

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ROBERTA ARLÊU TEIXEIRA

**CONCRETOS PRODUZIDOS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO PROVENIENTE DO
SISTEMA DE DESSULFURIZAÇÃO DE GASES (FGD): AVALIAÇÃO DE
ASPECTOS MECÂNICOS, AMBIENTAIS E DE DURABILIDADE**

Vitória

2019

ROBERTA ARLÊU TEIXEIRA

**CONCRETOS PRODUZIDOS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO PROVENIENTE DO
SISTEMA DE DESSULFURIZAÇÃO DE GASES (FGD): AVALIAÇÃO DE
ASPECTOS MECÂNICOS, AMBIENTAIS E DE DURABILIDADE**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Dra. Geilma Lima Vieira

Vitória

2019

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

T266c Teixeira, Roberta Arlêu, 1989-
Concretos produzidos com adição de resíduo proveniente do sistema de dessulfurização de gases (FGD): Avaliação de aspectos mecânicos, ambientais e de durabilidade / Roberta Arlêu Teixeira. - 2019.
202 f. : il.

Orientadora: Geilma Lima Vieira.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Resíduo de dessulfurização de gases. 2. FGD. 3. Concreto. 4. Durabilidade (Engenharia). 5. Resistência de Materiais. 6. Sustentabilidade. I. Vieira, Geilma Lima. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CONCRETOS PRODUZIDOS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO PROVENIENTE DO SISTEMA DE DESSULFURIZAÇÃO DE GASES (FGD): AVALIAÇÃO DE ASPECTOS MECÂNICOS, AMBIENTAIS E DE DURABILIDADE

Roberta Arlêu Teixeira

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Construção Civil.

Aprovada no dia **06 de junho de 2019** por:



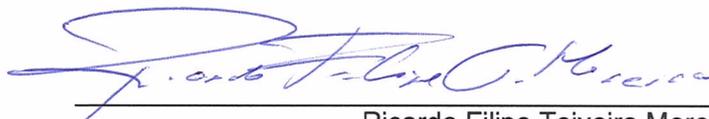
Profa. Dra. Geilma Lima Vieira
Doutora em Engenharia Civil
Orientadora – UFES



Profa. Ph.D. Jamilla Emi Sudo Lutfi Teixeira
Doutora em Engenharia Civil
Examinadora Interna – UFES



Profa. Dra. Sayonara Maria de Moraes Pinheiro
Doutora em Engenharia Civil
Examinadora Externa - UFES



Ricardo Filipe Teixeira Moreira
Engenheiro Industrial Mecânico
Especialista em Gestão Empresarial
Examinador Externo – FGV

Vitória – ES, junho de 2019

Aos meus amados pais,

Cida e Paulo.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por me guiar e por confiar tarefas na certeza de que seria capaz de realizá-las, me proporcionando viver esse momento tão especial e sonhado.

Aos meus pais, Maria Aparecida e Paulo e ao meu irmão Fred, pelo apoio e amor incondicional.

Ao meu namorado, Maxwell Klein Degen, por todo amor, carinho e companheirismo, sempre acreditando que eu seria capaz de vencer todos os desafios. Agradeço ainda a paciência e o auxílio durante esta pesquisa.

À professora orientadora Geilma Lima Vieira pela confiança, paciência e amizade, por todos ensinamentos e principalmente pela parceria. Obrigada por tudo, sem você este trabalho não seria possível.

Aos colegas de mestrado, Janaína Vazzoler, Larissa Carnielli, Dainer Dias, Juliana Grillo, Daiana Valt, e Álvaro Ávila pelas conversas, desabafos e cafezinhos, essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos alunos de IC e estagiários do Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção - LEMAC/UFES, Izabela Tavares, Antônio Tadeu, Luiz Filipe Gomes, Nadir Nascimento, Filipe Augusto e Wesley Souza por todos os momentos de descontração que tornaram os meus dias mais felizes. Agradeço ainda a Izabela pelo auxílio na caracterização do resíduo e nos ensaios de lixiviação, ao Wesley pela ajuda na determinação da metodologia para o ensaio de sulfatos e ao Lucas, que me auxiliou nos ensaios de MEV.

Aos servidores e funcionários do LEMAC-UFES, Breno, Denise, Felipe, Henrique, Loriato e Márcio pelo auxílio durante a realização da pesquisa.

Aos professores Jamilla Teixeira, João Luiz Calmon, Sayonara Pinheiro e Cláudia Teles por todos ensinamentos que contribuíram para o meu aprofundamento no tema desta dissertação.

Ao professor André Galdino, do IFES por disponibilizar o Laboratório de materiais cerâmicos do programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais para os ensaios de granulometria a laser.

Às empresas Brasitália, Concrevit e Lafarge/Holcim pela doação dos materiais utilizados neste trabalho.

Ao LPT – Laboratório de Plasma Térmico, pela realização dos ensaios de MEV, e em especial a querida amiga Luar Santana pelo apoio nos ensaios.

Ao LABPETRO – Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Metodologias para Análises de Petróleos, pela realização do ensaio de DRX.

À CAPES e a ArcelorMittal pelo apoio financeiro.

À UFES pela estrutura disponibilizada.

Finalmente, a todos que de uma maneira ou de outra, contribuíram para que este sonho fosse alcançado.

A persistência é o caminho do êxito.
Charles Chaplin

RESUMO

TEIXEIRA, Roberta Arlêu. **Concretos produzidos com adição de resíduo proveniente do sistema de dessulfurização de gases (FGD): Avaliação de aspectos mecânicos, ambientais e de durabilidade.** 2019. 194f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

A utilização de resíduos industriais na construção civil tem se apresentado como uma excelente alternativa, dos pontos de vista econômico, ambiental e social, uma vez que possibilita a reinserção dos resíduos no ciclo de produção, evitando a geração de resíduos, e também, pelo fato de contribuir para diminuição do consumo de recursos naturais por parte da indústria da construção. O processo FGD constitui numa alternativa para o controle de emissões de SO_x nas termelétricas e siderúrgicas, no entanto gera um resíduo, com características semelhantes às adições utilizadas para melhoria das propriedades dos materiais de construção. Sendo o concreto o material mais utilizado no mundo, alternativas que promovam uma maior sustentabilidade na sua produção são essenciais. Desta forma, esta pesquisa objetivou a avaliação do desempenho de concretos produzidos com adição do resíduo FGD, em 0%, 5%, 10% e 15% da massa de cimento, utilizando duas relações água/aglomerante de 0,45 e 0,6. Os concretos foram avaliados nas idades de 7, 28, 56 e 91 dias. No estado fresco, determinou-se o índice de consistência e a massa específica. No estado endurecido as propriedades avaliadas tiveram como objetivo determinar parâmetros de desempenho mecânico e de durabilidade dos concretos. Foram avaliadas a Resistência à Compressão, Resistência à Tração por Compressão Diametral, Absorção de água por imersão e por capilaridade, o Teor de cloretos totais e solúveis e o Teor de sulfatos solúveis. Também foi avaliada a microestrutura dos concretos e a lixiviação de contaminantes pela norma NEN 7375 (NNI, 2004). Foi realizada a ANOVA dos resultados obtidos. Como resultados, obteve-se que a utilização do resíduo FGD como adição em concretos é viável tecnicamente, sendo o melhor desempenho obtido para o teor de 5% de adição, que além de promover um maior incremento na resistência à compressão, garantiu a resistência à tração do concreto referência e contribuiu para uma melhor compacidade do concreto, diminuindo a absorção de água por imersão e capilaridade dos concretos estudados. Por fim, verificou-se que o uso do resíduo FGD é seguro do ponto de vista ambiental.

Palavras-chave: resíduo FGD. Desempenho Mecânico. Desempenho Ambiental. Durabilidade.

ABSTRACT

TEIXEIRA, Roberta Arlêu. **Concretes produced with addition of waste from the gas desulphurisation system (FGD): Assessment of mechanical, environmental and durability aspects.** 2019. 194 p. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Espirito Santo, Vitória, 2019.

The use of industrial waste in civil construction has been presented as an excellent alternative, from the economic, environmental and social points of view, since it allows the reinsertion of waste in the production cycle, avoiding the generation of waste, and also contribute to a reduction in the consumption of natural resources by the construction industry. The FGD process is an alternative for the control of SO_x emissions in thermoelectric and steel plants, but it generates a residue, with similar characteristics to the additions used to improve the properties of the building materials. Since concrete is the most widely used material in the world, alternatives that promote greater sustainability in its production are essential. In this way, this research aimed to evaluate the performance of concrete produced with addition of the FGD residue in 0%, 5%, 10% and 15% of the cement mass, using two water / binder ratios of 0.45 and 0.6. The concretes were evaluated at the ages of 7, 28, 56 and 91 days. In the fresh state, the consistency index and the specific mass were determined. In the hardened state the evaluated properties had the objective to determine parameters of mechanical performance and durability of concretes. Compressive Strength, Tensile Strength by Diametral Compression, Water Absorption by Immersion and by Capillarity, Total and Soluble Chloride Content and Soluble Sulphate Content were evaluated. The microstructure of the concretes and the leaching of contaminants according to NEN 7375 (NNI, 2004) were also evaluated. ANOVA of the results obtained was performed. As results, it was obtained that the use of the FGD waste as addition in concretes is technically feasible, being the best performance obtained for the content of 5% of addition, that besides promoting a greater increase in the resistance to compression, guaranteed the resistance to the traction of the concrete reference and contributed to a better compactness of the concrete, reducing the absorption of water by immersion and capillarity of the concrete studied. Finally, it has been found that the use of the FGD residue is environmentally safe.

Keywords: FGD residue. Mechanical Performance. Environmental Performance. Durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos processos FGD quanto a possibilidade de regeneração	22
Figura 2 - Processo FGD úmido com utilização de calcário	23
Figura 3 - Esquema do processo FGD seco	25
Figura 4 - Esquema de FGD semisseco.....	26
Figura 5 - Difratoograma do resíduo do processo FGD (úmido) - China.....	34
Figura 6 - Difratoograma do resíduo do processo FGD (úmido) - China.....	34
Figura 7 - Difratoograma do resíduo de processo FGD (úmido) – Reino Unido.....	34
Figura 8 - Difratoograma do resíduo de processo FGD (seco) – Itália	35
Figura 9 - MEV do resíduo FGD – processo seco.....	36
Figura 10 - MEV do resíduo FGD – processo semisseco.....	36
Figura 11 - MEV do resíduo FGD – processo úmido.....	36
Figura 12 - MEV do resíduo FGD – processo úmido.....	36
Figura 13 - Resistência à compressão das argamassas com incorporação de escória, FGD e cinzas volantes	43
Figura 14 - Comparação entre o empacotamento de partículas esféricas e tabulares	44
Figura 15 - Variação da resistência à compressão axial com relação ao teor de substituição do cimento pelo FGD.....	45
Figura 16 - Variação da absorção de água com relação ao teor de substituição do cimento pelo FGD	46
Figura 17- Resistência à compressão de concretos produzidos com mistura entre resíduo FGD e escória	47
Figura 18 - Programa experimental.....	50
Figura 19 - Localização da área geradora do resíduo estudado	55
Figura 20 - Processo de FGD Semisseco	56

Figura 21 - Central de tratamento dos gases provenientes da coqueificação (Área da empresa <i>Suncoke</i> no Complexo de Tubarão)	57
Figura 22 - Sacos com o resíduo de FGD recebidos na UFES	58
Figura 23 - Homogeneização do resíduo	58
Figura 24 - Quarteamento do resíduo	58
Figura 25 - Ensaio de granulometria a laser.....	60
Figura 26 - Preparo do frasco Le Chatelier	60
Figura 27 - Execução do ensaio de massa específica do resíduo	60
Figura 28 - Determinação da massa unitária do resíduo do FGD	61
Figura 29 - Determinação da finura na peneira #200	61
Figura 30 - Determinação da Finura na peneira #325	62
Figura 31 - Permeabilímetro de Blaine	63
Figura 32 - Equipamento de fluorescência de raios-x utilizado	64
Figura 33 - Determinação do pH do resíduo do FGD	65
Figura 34 - Ensaio de lixiviação do resíduo FGD	66
Figura 35 - Obtenção do extrato lixiviado	67
Figura 36 - Ensaio de solubilização do resíduo e recipientes utilizados para coleta do extrato solubilizado.....	68
Figura 37- Difratorômetro de raios-x utilizado nesta pesquisa.....	68
Figura 38 - MEV utilizado nesta pesquisa	70
Figura 39 - Distribuição granulométrica da areia utilizada na pesquisa	71
Figura 40 - Avaliação do teor de matéria orgânica na areia	72
Figura 41 - Lavagem e secagem da brita utilizada no experimento	73
Figura 42 - Peneiramento da brita	74
Figura 43 - Pesagem do material retido	74
Figura 44 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo utilizado na pesquisa .	74
Figura 45 - Determinação da massa específica e da absorção de água.....	75

Figura 46 - Distribuição granulométrica do cimento CP V-ARI utilizado nesta pesquisa	77
Figura 47 - Ensaio de abatimento de tronco de cone	80
Figura 48 - Moldagem dos corpos de prova utilizados	82
Figura 49 - Diagrama de Dosagem da família de concretos utilizada nesta pesquisa	82
Figura 50 - Materiais e betoneira utilizados nas concretagens.....	84
Figura 51 - Moldagem dos corpos de prova e realização do procedimento de desforma	85
Figura 52 - Retífica dos corpos de prova.....	87
Figura 53 - Medição dos diâmetros superior e inferior dos corpos de prova	88
Figura 54 - Prensa utilizada para realização do ensaio de Resistência à compressão	88
Figura 55 - Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral.....	89
Figura 56 - Execução do ensaio de absorção de água por capilaridade	91
Figura 57 - Pesagem dos corpos de prova.....	91
Figura 58 - Avaliação da distribuição de água nos Corpos de prova, após ensaio de absorção por capilaridade	91
Figura 59 - Absorção por imersão	92
Figura 60 - Método colorimétrico para detecção de cloretos livres no concreto.....	93
Figura 61 - Método colorimétrico para detecção de cloretos livres no concreto.....	95
Figura 62 - Aquecimento da solução com HCl	98
Figura 63 - Filtração da solução	98
Figura 64 - Solução em repouso	98
Figura 65 - Formação do precipitado	98
Figura 66 - Filtração à vácuo da solução.....	98
Figura 67 - Filtro antes da calcinação	99

Figura 68 - Amostras a serem analisadas no MEV	99
Figura 69 - Câmara para metalização	100
Figura 70 - Amostras de concreto metalizadas	100
Figura 71 - Dimensões dos corpos de prova utilizados para o ensaio de tanque ...	101
Figura 72 - Recipiente utilizado no ensaio.....	101
Figura 73 - Realização do Ensaio de Tanque	101
Figura 74 - Distribuição granulométrica do resíduo do FGD	105
Figura 75 - Difratograma de raios-x do resíduo FGD	113
Figura 76 - Imagens da microestrutura do resíduo de FGD deste estudo.....	115
Figura 77 - Imagens da microestrutura do resíduo de FGD do estudo de Liu <i>et al.</i> (2009).....	115
Figura 78 - Imagens da microestrutura do resíduo de FGD do estudo de Sheng <i>et al.</i> (2012).....	116
Figura 79 - Índice de consistência dos concretos.....	117
Figura 80 - Massa específica dos concretos	120
Figura 81 - Efeito isolado da relação a/c sobre a massa específica dos concretos produzidos.....	121
Figura 82 - Efeito isolado do percentual de Resíduo FGD sobre a massa específica dos concretos produzidos.....	122
Figura 83 - Efeito da interação entre o percentual de Resíduo FGD e a relação água/aglomerante sobre a massa específica dos concretos.....	122
Figura 84 - Resultados de resistência à compressão dos concretos avaliados para as diferentes idades	124
Figura 85 - Efeito isolado da relação água/aglomerante sobre a Resistência à Compressão	126
Figura 86 - Efeito isolado da idade sobre a Resistência à Compressão	127
Figura 87- Gráfico do efeito isolado da variação do teor de FGD sobre a média dos resultados de resistência à compressão	128

Figura 88 - Efeito da interação entre o percentual de Resíduo FGD e a relação água/aglomerante sobre a Resistência à Compressão	129
Figura 89 - Resultados da Resistência à Tração por Compressão Diametral	132
Figura 90 - Gráfico do efeito isolado da variação do teor de FGD sobre a Resistência à Tração	133
Figura 91 - Gráfico do efeito isolado da idade sobre a Resistência à Tração	134
Figura 92 - Gráfico do efeito isolado da relação água/aglomerante sobre a Resistência à Tração	134
Figura 93 - Efeito da interação entre o percentual de Resíduo FGD e a idade do concreto sobre a Resistência à Tração	135
Figura 94 - Resultado da Absorção de água por imersão	137
Figura 95 - Gráfico do efeito isolado da idade sobre a Absorção de água por imersão	139
Figura 96 - Gráfico do efeito isolado da relação água/aglomerante sobre a Absorção de água por imersão	139
Figura 97 - Gráfico da interação da idade com a relação água/aglomerante sobre a Absorção de água por imersão	140
Figura 98 - Gráfico do efeito isolado da variação do teor de FGD sobre a Absorção de água por imersão	141
Figura 99 - Ascensão capilar nos corpos de prova após 72 horas	143
Figura 100 - Resultados do ensaio de absorção por capilaridade.....	144
Figura 101 - Gráfico do efeito isolado da idade sobre a Absorção de água por capilaridade	145
Figura 102 - Gráfico do efeito isolado da relação água/aglomerante sobre a Absorção de água por capilaridade	146
Figura 103 - Gráfico da interação da idade com a relação água/aglomerante sobre a Absorção de água por capilaridade	146
Figura 104 - Gráfico do efeito isolado do % Resíduo FGD sobre a Absorção de água por capilaridade	147

Figura 105 - Teor de cloretos livres nos concretos estudados (em relação a massa de cimento).....	150
Figura 106 - Avaliação de cloretos pelo método colorimétrico com aspersão de nitrato de prata para a/agl 0,45 (28 dias)	152
Figura 107 - Avaliação de cloretos pelo método colorimétrico com aspersão de nitrato de prata para a/agl 0,45 (28 dias)	153
Figura 108 - Avaliação de cloretos pelo método colorimétrico com aspersão de nitrato de prata para a/agl 0,6 (28 dias)	153
Figura 109 - Avaliação de cloretos pelo método colorimétrico com aspersão de nitrato de prata para a/agl 0,6 (28 dias)	154
Figura 110 - Avaliação de cloretos pelo método colorimétrico com aspersão de nitrato de prata para a/agl 0,45 (91 dias)	154
Figura 111 - Avaliação de cloretos pelo método colorimétrico com aspersão de nitrato de prata para a/agl 0,45 (91 dias)	155
Figura 112 - Avaliação de cloretos pelo método colorimétrico com aspersão de nitrato de prata para a/agl 0,6 (91 dias)	155
Figura 113 - Avaliação de cloretos pelo método colorimétrico com aspersão de nitrato de prata para a/agl 0,6 (91 dias)	156
Figura 114 - Teores de sulfatos encontrados nos concretos estudados – em relação à massa de cimento	158
Figura 115 - Resultado do teste de Tukey para o teor de sulfatos solúveis no concreto	160
Figura 116 - Micrografia dos concretos referência (REF 0,45) - 7 dias	163
Figura 117 - Composição da fase identificada como CSH na Figura 116	163
Figura 118 - Composição da fase identificada como Etringita na Figura 116.....	164
Figura 119 - Micrografia dos concretos referência (REF 0,6) - 7 dias	164
Figura 120 - Composição da fase identificada como CSH na Figura 119	164
Figura 121 - Composição da fase identificada como Etringita na Figura 119.....	165

Figura 122 - Micrografia dos concretos com 5% de adiço de resduo FGD (A5 0,45) - 7 dias.....	165
Figura 123 - Composio da fase identificada como CSH na Figura 122	166
Figura 124 - Composio da fase identificada como CH na Figura 122	166
Figura 125 - Composio da fase identificada como Etringita na Figura 122.....	167
Figura 126 - Micrografia dos concretos com 5% de adiço de resduo FGD (A5 0,6) - 7 dias.....	167
Figura 127 - Composio da fase identificada como CSH na Figura 126	167
Figura 128 - Composio da fase identificada como CH na Figura 126	168
Figura 129 - Micrografia dos concretos com 10% de adiço de resduo FGD (A10 0,45) - 7 dias.....	168
Figura 130 - Composio da fase identificada como Etringita na Figura 129.....	169
Figura 131 - Composio da fase identificada como CSH na Figura 129	169
Figura 132 - Composio da fase identificada como CH na Figura 129	169
Figura 133 - Micrografia dos concretos com 10% de adiço de resduo FGD (A10 0,6) - 7 dias.....	170
Figura 134 - Composio da fase identificada como CSH na Figura 133	170
Figura 135 - Composio da fase identificada como CH na Figura 133	170
Figura 136 - Micrografia dos concretos com 15% de adiço de resduo FGD (A15 0,45) - 7 dias.....	171
Figura 137 - Composio da fase identificada como CH na Figura 136	171
Figura 138 - Composio da fase identificada como CSH na Figura 136	171
Figura 139 - Micrografia dos concretos com 15% de adiço de resduo FGD (A15 0,6) - 7 dias.....	172
Figura 140 - Composio da fase identificada como Etringita na Figura 139.....	172
Figura 141 - Composio da fase identificada como CSH na Figura 139	172
Figura 142 - Composio da fase identificada como CH na Figura 139	173
Figura 143 - Micrografia dos concretos referncia (REF 0,45) - 28 dias	173

Figura 144 - Micrografia dos concretos referência (REF 0,6) - 28 dias	174
Figura 145 - Micrografia dos concretos com 5% de adição de resíduo FGD (A5 0,45) - 28 dias.....	174
Figura 146 - Micrografia dos concretos com 5% de adição de resíduo FGD (A5 0,6) - 28 dias.....	174
Figura 147 - Micrografia dos concretos com 10% de adição de resíduo FGD (A10 0,45) - 28 dias.....	175
Figura 148 - Micrografia dos concretos com 10% de adição de resíduo FGD (A10 0,6) - 28 dias.....	175
Figura 149 - Micrografia dos concretos com 15% de adição de resíduo FGD (A15 0,45) - 28 dias.....	176
Figura 150 - Micrografia dos concretos com 15% de adição de resíduo FGD (A15 0,6) - 28 dias.....	176
Figura 151 - Micrografia dos concretos referência (REF 0,45) - 91 dias	177
Figura 152 - Micrografia dos concretos referência (REF 0,6) - 91 dias	177
Figura 153 - Micrografia dos concretos com 5% de adição de resíduo FGD (A5 0,45) - 91 dias.....	177
Figura 154 - Micrografia dos concretos com 5% de adição de resíduo FGD (A5 0,6) - 91 dias.....	178
Figura 155 - Micrografia dos concretos com 10% de adição de resíduo FGD (A10 0,45) - 91 dias.....	178
Figura 156 - Micrografia dos concretos com 10% de adição de resíduo FGD (A10 0,6) - 91 dias.....	178
Figura 157 - Micrografia dos concretos com 15% de adição de resíduo FGD (A15 0,45) - 91 dias.....	179
Figura 158 - Micrografia dos concretos com 15% de adição de resíduo FGD (A15 0,6) - 91 dias.....	179

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Pesquisas utilizando resíduo FGD em materiais de construção	39
Quadro 2 - Variáveis envolvidas nesta pesquisa.....	52
Quadro 3 - Propriedades físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais avaliadas para o resíduo de FGD.....	59
Quadro 4 - Número de corpos de prova e idades ensaiadas para cada traço	86
Quadro 5 - Proposta de classificação para concretos de acordo com a porosidade e a absorção de água.....	137
Quadro 6 - Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto	149
Quadro 7 - Relações entre as massas dos principais óxidos encontrados em matrizes cimentícias e sua correlação com os compostos de interesse.....	161

LISTA DETABELAS

Tabela 1 - Comparação entre o tamanho das partículas de resíduo FGD gerado a partir de diferentes processos	29
Tabela 2 - Superfície específica e Finura dos resíduos gerados em diferentes processos FGD	30
Tabela 3 - Composição do resíduo do processo FGD.....	31
Tabela 4 - Comparação entre os parâmetros da avaliação ambiental do resíduo de FGD semisseco com relação ao ensaio de Lixiviação (ABNT, 2004)	33
Tabela 5 - Níveis dos fatores para os ensaios de consistência e massa específica .	53
Tabela 6 - Níveis dos fatores para os ensaios de Resistência à compressão axial e Resistência à tração por compressão diametral.....	53
Tabela 7 - Níveis dos fatores para os ensaios de durabilidade	53
Tabela 8 - Traços utilizados na pesquisa e quantidade de corpos de prova necessários	54
Tabela 9 - Propriedades avaliadas para o agregado miúdo	71
Tabela 10 - Propriedades avaliadas para o agregado graúdo.....	73
Tabela 11 - Propriedades avaliadas para o cimento utilizado na pesquisa (CPV - ARI)	76
Tabela 12 - Determinação do teor ideal de argamassa para o traço intermediário ...	80
Tabela 13 - Determinação dos traços para elaboração do Diagrama de Dosagem ..	81
Tabela 14 - Traços utilizados na confecção dos concretos utilizados nesta pesquisa	83
Tabela 15 - Padrões cumulativos U1 e U2 requeridos pela NEN 7375 (NNI, 2004)	103
Tabela 16 - Resultado da caracterização do resíduo do FGD.....	104
Tabela 17 - Diâmetros do resíduo FGD e do cimento estudado, e de outras adições utilizadas em concretos	106
Tabela 18 - Comparação entre os valores de superfície específica Blaine (cm ² /g) do resíduo estudado e de outras adições	106

Tabela 19 - Comparação entre os valores de massa específica e unitária do resíduo FGD com outras adições.....	108
Tabela 20 - Composição do resíduo do processo FGD.....	109
Tabela 21 - Resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização do resíduo FGD estudado.....	112
Tabela 22 - Análise de variância da Massa específica.....	121
Tabela 23 - Resultado da análise de Tukey para os resultados de massa específica	123
Tabela 24 - Análise de variância da Resistência à Compressão.....	125
Tabela 25 - Análise de variância da Resistência à Tração por Compressão Diametral	132
Tabela 26 - Análise de variância da Absorção de Água por Imersão.....	138
Tabela 27 - Resultados da Absorção de Água por Imersão, Índice de vazios e massa específica real aos 28 dias	142
Tabela 28 - Resultados da Absorção de Água por Imersão, Índice de vazios e massa específica real aos 91 dias	142
Tabela 29 - Análise de variância da Absorção de Água por capilaridade	144
Tabela 30 - Redução percentual do teor de cloretos após 91 dias de cura.....	151
Tabela 31 - Análise de variância do teor de íons sulfato	159
Tabela 32 - Resultados da Lixiviação acumulada nos concretos após os 8 ciclos avaliados	181

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/agl – Relação água/aglomerante

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CNTP – Condições Normais de Pressão e Temperatura

CP – Corpo de prova

FGD – Flue-Gas Desulfurization

LEMAC – Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção

NO_x – Óxidos de nitrogênio

SO_x – Óxidos de enxofre

SO₂ – Dióxido de enxofre

HF – Ácido fluorídrico

HCl – Ácido clorídrico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.1.1 Geral	14
1.1.2 Específicos	14
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 RESÍDUO DO PROCESSO DE DESSULFURIZAÇÃO DE GASES (FGD).....	17
2.1.1 Processo de geração	21
2.1.1.1 FGD Úmido	22
2.1.1.2 FGD Seco.....	24
2.1.1.3 FGD Semisseco	26
2.1.2 Características físico-químicas, mineralógicas e microestruturais.....	28
2.1.2.1 Características físicas	28
2.1.2.2 Características químicas	30
2.1.2.3 Características mineralógicas e microestruturais	33
2.2 UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO FGD NA CONSTRUÇÃO CIVIL	38
2.2.1 Utilização do resíduo FGD em cimentos	40
2.2.2 Utilização do resíduo FGD em argamassas	42
2.2.3 Estudos com utilização de resíduos do processo FGD em concretos.....	44
3 METODOLOGIA	49
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	49
3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	51
3.2.1 Variáveis da pesquisa	51
3.2.2 Planejamento fatorial	52

3.5 MATERIAIS	55
3.5.1 Resíduo do processo FGD	55
3.5.1.1 <i>Coleta e homogeneização do resíduo</i>	57
3.5.1.2 <i>Características físicas</i>	59
3.5.1.2 <i>Características químicas</i>	63
3.5.1.3 <i>Características mineralógicas</i>	68
3.5.1.4 <i>Características microestruturais</i>	69
3.5.2 Agregado miúdo	70
3.5.3 Agregado graúdo.....	72
3.5.4 Cimento	75
3.5.5 Água	77
3.6 MÉTODOS.....	78
3.6.1 Dosagem dos concretos	78
3.6.2 Propriedades dos concretos no estado fresco.....	83
3.6.2.1 <i>Índice de consistência</i>	84
3.6.2.2 <i>Massa específica</i>	84
3.6.3 Propriedades dos concretos no estado endurecido	85
3.6.3.1 <i>Resistência à compressão axial</i>	87
3.6.3.2 <i>Resistência à tração por compressão diametral</i>	89
3.6.3.3 <i>Absorção de água por capilaridade</i>	90
3.6.3.4 <i>Absorção de água por imersão e Índice de vazios</i>	92
3.6.3.5 <i>Avaliação da presença de cloretos livres</i>	92
3.6.3.6 <i>Determinação do teor de íons sulfatos</i>	96
3.6.3.7 <i>Avaliação da microestrutura</i>	99
3.6.3.8 <i>Avaliação da lixiviação de contaminantes</i>	100

3.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS	103
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	104
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DO PROCESSO FGD	104
4.1.1 Características Físicas.....	105
4.1.2 Características Químicas.....	108
4.1.3 Características Mineralógicas.....	113
4.1.4 Características Microestruturais.....	114
4.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	116
4.2.1 Índice de consistência	116
5.2.2 Massa específica no estado fresco.....	119
4.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	124
4.3.1 Resistência à Compressão Axial	124
4.3.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral	131
4.3.3 Absorção de Água por Imersão e Índice de Vazios.....	136
4.3.4 Absorção de Água por Capilaridade.....	143
4.3.5 Avaliação da Presença de Cloretos Livres	148
4.3.6 Determinação do Teor de Íons sulfatos	156
4.3.7 Avaliação da Microestrutura	160
4.3.8 Avaliação da Lixiviação de Contaminantes	180
5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	183
5.1 CONCLUSÃO GERAL	183
5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS	183
5.2.1 Quanto a caracterização do Resíduo FGD	183

5.2.2 Quanto ao concreto no estado fresco	183
5.2.3 Quanto ao concreto no estado endurecido	184
5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	185
REFERÊNCIAS.....	187

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Dentre os processos industriais, a queima do carvão mineral, ocorrida nas termelétricas à carvão para produção de energia e nas Siderurgias para produção do aço, é a principal atividade responsável pela liberação de dióxido de enxofre (SO_2) na atmosfera (VIEIRA, 2009). Este gás poluente é um dos precursores da deposição ácida, além de causar agravos à saúde de diversos seres vivos (YANG; YUESI; CHANGCHUN, 2009). Desta forma, a legislação mundial prevê a necessidade de tratamento deste gás, para diminuir sua concentração para níveis inofensivos ao meio ambiente e aos seres vivos (BRASIL, 2008).

Atualmente, o processo mais utilizado para remoção do SO_2 é o processo FGD - *Flue Gas Desulfurization* (MATHIEU *et al.*, 2013), que permite a remoção dos gases SO_x , pela adsorção destes, em um meio alcalino. Após a captura do SO_2 , é gerado um material, que varia de acordo com o tipo de substância utilizada como adsorvente, mas, pode-se dizer que, como a grande maioria das plantas de FGD utilizam Cal e/ou Calcário e/ou Hidróxido de Cálcio, o principal material gerado é composto majoritariamente por $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ou, gipsita (KOHL; NIELSEN, 1997).

Segundo a American Coal Ash Association, em 2013, foram geradas, só nos EUA, 35,2 milhões de toneladas do resíduo de FGD. Além disso, espera-se um aumento de 2% até 2033, chegando a 38,8 milhões de toneladas geradas anualmente (ACAA, 2015). Já na China, espera-se que, este número chegue a 90 milhões de toneladas, em 2020 (CAILLAHUA, 2013).

No Brasil, infere-se que a quantidade de resíduo FGD gerada tenha grande representatividade tendo em vista que o carvão mineral corresponde a 5% da matriz energética brasileira, e a relevância da produção de ferro gusa e aço para o Brasil (que é um dos 10 maiores produtores de aço do mundo) (IAB, 2017). Considerando apenas as usinas termelétricas das regiões sul e nordeste do Brasil, dados da Fundação de Ciência e Tecnologia (ROHDE; MACHADO, 2016), apresentam uma geração de 500 mil toneladas do resíduo ao ano.

Devido à grande quantidade gerada, e a suas características, o gerenciamento deste resíduo nas indústrias ainda tem envolvido a disposição em aterros industriais. Porém, tendo em vista a importância da valorização dos resíduos, conforme apresentado na Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), alternativas que visem a reinserção deste resíduo em outras cadeias produtivas devem ser mais bem exploradas.

Pelas características apresentadas com relação a sua composição e granulometria, o resíduo FGD tem sido apontado como um coproduto. Além disso, tendo em vista que a maior parte do resíduo gerado é proveniente de sistemas que utilizam os compostos de calcário, cal e hidróxido de cálcio, ele apresenta características próximas ao gesso utilizado na construção civil, conhecido como sulfogesso (CAILLAHUA, 2013).

Todavia, devido ao fato de existirem diversas configurações do processo FGD, atualmente, estão presentes no mercado diferentes tipos de resíduos, que variam ainda com relação ao tipo de carvão utilizado, e sua composição. Assim, estudos são necessários para se determinar, com base no tipo de configuração do processo FGD, as possíveis formas de valorização deste resíduo, inclusive para a construção civil.

Além disso, existem usos nobres para o resíduo de FGD dentro da construção civil, como a produção de cimento e concreto, que ainda são pouco explorados. Numa indústria que anseia por diminuir os impactos ambientais gerados por suas atividades, a incorporação de resíduos em materiais de construção tem apresentado inúmeras vantagens ambientais, e econômicas.

Desta forma, esta pesquisa visa a incorporação do resíduo do processo FGD em concretos, como adição, com o objetivo de avaliar o desempenho mecânico, ambiental e a durabilidade dos concretos produzidos, de forma a promover subsídios para o aproveitamento deste resíduo na construção civil.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Avaliar aspectos mecânicos, ambientais e de durabilidade de concretos produzidos com incorporação do resíduo proveniente do processo de Dessulfurização de Gases (FGD), na forma de adição.

1.1.2 Específicos

- Levantar as características físico-químicas, mineralógicas e microestruturais do resíduo do processo FGD;
- Avaliar o efeito dos diferentes percentuais de adição do resíduo do processo FGD nas propriedades dos concretos dos diferentes traços, no estado fresco (consistência e massa específica);
- Avaliar o efeito dos diferentes percentuais de adição do resíduo do processo FGD sobre resistência à compressão axial do concreto e a resistência à tração por compressão diametral, nos diferentes traços e idades estudados;
- Avaliar o efeito dos diferentes percentuais de adição do resíduo do processo FGD sobre a absorção de água do concreto pelos métodos de capilaridade e imersão, nos diferentes traços, para as idades de 28 e 91 dias;
- Avaliar a presença de cloretos livres e sulfatos, nos concretos produzidos com os diferentes percentuais de adição de resíduo do processo FGD, nos diferentes traços, para as idades de 7, 28, 56 e 91 dias;
- Avaliar o efeito dos diferentes percentuais de adição do resíduo do processo FGD do ponto de vista microestrutural através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos concretos, nos diferentes traços, para as idades de 7, 28 e 91 dias;
- Avaliar a lixiviação de contaminantes nos concretos produzidos, de acordo com a norma EA NEN 7375 (NNI, 2004);
- Inferir sobre os parâmetros de utilização do resíduo do processo FGD em concretos, do ponto de vista do controle tecnológico.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente documento encontra-se estruturado em cinco capítulos.

- Capítulo 1: Introdução, onde serão apresentadas as considerações iniciais deste trabalho e a justificativa para sua realização, o objetivo da pesquisa, e a estrutura da dissertação com a descrição dos capítulos.

- Capítulo 2: Revisão Bibliográfica, que englobará o referencial técnico científico sobre o qual este estudo está sendo embasado. Neste tópico serão apresentados os conceitos gerais sobre o tema, o processo de geração do resíduo de dessulfurização de gases, suas características físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais. Além das propriedades apresentadas por matrizes cimentícias com incorporação do resíduo FGD, tanto no estado fresco, como endurecido, de forma a fornecer subsídio para comparação dos resultados obtidos neste trabalho.

O referencial teórico utilizado para desenvolvimento do trabalho foi obtido, principalmente, a partir do Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes). As principais bases de dados utilizadas foram: *Web of Science* e *Science Direct*.

Além disso, foram utilizados os bancos de dados *online* de instituições de ensino superior, como Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Pontifícia Universidade Católica (PUC), Universidade de São Paulo (USP), Universidade de Campinas (Unicamp) e Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), do Banco de Teses e Dissertações da CAPES, da Biblioteca Digital Brasileira de Dissertações e Teses (BDTD), dentre outros.

Os descritores utilizados para as buscas bibliográficas foram extraídos da Compendex (*Engineering Village*) e são: *flue gases* (gases de combustão), *desulfurization* (dessulfurização), *construction materials* (materiais de construção) e *concrete*(concreto).

- Capítulo 3: Metodologia, que aborda o método utilizado para se alcançar os objetivos deste trabalho. Neste capítulo serão descritas e justificadas todas as etapas de trabalho e os métodos experimentais empregados, envolvendo a coleta e caracterização dos materiais, a execução da dosagem do concreto para determinação

dos traços a serem utilizados, a produção dos concretos e a avaliação de suas propriedades no estado fresco e endurecido, incluindo a avaliação da lixiviação de possíveis contaminantes.

- Capítulo 4: Resultados e Discussão, onde são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais, comparando com as respectivas normas para uso em concretos, além dos resultados dos ensaios no concreto em estado fresco e endurecido. Neste capítulo todos os resultados serão discutidos e comparados com as normas vigentes, além de outras pesquisas sobre o tema.

- Capítulo 5: Conclusão e recomendações, que abordará as principais conclusões da pesquisa, além de recomendações para uso do resíduo de FGD em concretos, e também, sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESÍDUO DO PROCESSO DE DESSULFURIZAÇÃO DE GASES (FGD)

A quase totalidade das emissões de poluentes atmosféricos ocorre por força da queima de combustíveis fósseis no processo de geração elétrica em diferentes momentos, conforme a tecnologia de geração usada ou ciclo termodinâmico (ZOU *et al.*, 2016).

Os combustíveis fósseis de maior importância são o carvão, o óleo combustível e o óleo diesel, e sua queima, além de contribuir para a emissão de gases de efeito estufa (GEE), provoca a liberação de SO_x , gases compostos de enxofre. Os SO_x são gases poluentes precursores da deposição ácida, como a chuva ácida, que acometem os ciclos do carbono, nitrogênio e oxigênio (tendo impacto nas mudanças climáticas), além de causarem agravos à saúde de diversos seres vivos (YANG; YUESI; CHANGCHUN, 2009).

Dentre os gases SO_x , o SO_2 (dióxido de enxofre) é o mais perigoso para a saúde e para o meio ambiente. E a queima do carvão mineral é a principal atividade responsável pela sua liberação na atmosfera, correspondendo por 50% do total de emissões de SO_2 no mundo (BRODNY; TUTAK, 2019).

O carvão mineral é o combustível fóssil mais abundante no mundo, com reservas da ordem de um trilhão de toneladas, o suficiente para atender à demanda energética mundial até 2217 (ANEEL, 2017). Além de combustível (para geração de energia elétrica e térmica), o carvão mineral também é matéria-prima para produção do aço nas indústrias siderúrgicas, sendo essencial para a construção civil e para diversos outros setores, como para produção de automóveis e de utensílios domésticos (FRANÇA; UGARTE; SILVA, 2008).

Na indústria siderúrgica, a coqueificação é o processo responsável pela transformação do carvão mineral em coque, que é utilizado na produção do ferro-gusa nos altos-fornos. O ferro-gusa é a matéria-prima para produção do ferro fundido e do aço (ISNUGROHO; BIRAWIDHA, 2018).

Para produção do ferro-gusa, o carvão mineral é aquecido (até 800 °C) na câmara de combustão em um ambiente com pouco ou nenhum oxigênio de forma a sofrer pirólise (ou decomposição térmica), o que promove o desprendimento da matéria volátil do carvão mineral e gera um material sólido, poroso e carbonoso denominado coque (ISNUGROHO; BIRAWIDHA, 2018).

Neste processo é produzida uma mistura de gases e material particulado denominada de “gás de coqueria”. Pelo fato de o gás de coqueria conter em sua composição, dentre outros, gases SO_x, NO_x e CH₄ (metano), o Ministério do Meio Ambiente determina que este gás seja recuperado e tratado, e seu poder calorífico aproveitado (BRASIL, 2008).

O limite de emissão de SO₂, requerido pela legislação brasileira para o processo de coqueificação, tanto em siderurgias instaladas após 2007 (BRASIL, 2006), como antes deste ano (BRASIL, 2011), corresponde a 800 mg/Nm³ (nas CNTP – Condições Normais de Temperatura e Pressão). Se, após monitoramento for verificado que o limite está acima do exigido, devem ser implementadas medidas de controle deste poluente.

O controle das emissões de SO_x pode ser realizado por diversas técnicas. Prioritariamente, é recomendado o uso de combustíveis com menor teor de enxofre, como a utilização de outro tipo de carvão que não contenha mais de 0,5% de enxofre) (BARRENETXEA *et al.*, 2003). Como esta alternativa nem sempre é viável, pode-se remover o enxofre do carvão através de procedimentos mecânicos e físicos, ou, atuar sobre os gases de emissão, através da dessulfurização para eliminar os dióxidos de enxofre produzidos na combustão (SANTOS, 2007).

Atualmente, o processo mais utilizado para remoção do SO₂ é o processo FGD - *Flue Gas Desulfurization* (MATHIEU *et al.*, 2013; CROPPER *et al.*, 2017). Sua importância é tanta que nos EUA, e em outros países, como Alemanha, Índia, Japão, França e Rússia, seu uso é obrigatório para controle de SO_x (CSE, 2016; JAMIL *et al.*, 2013; KOHL; NIELSEN, 1997). No Brasil não existe a obrigatoriedade de uso deste sistema, no entanto, Tomazi, Marques e Schneider (2017) citam que a utilização do sistema FGD é essencial para que os limites de emissão de SO_x impostos pelas resoluções do CONAMA, nº 386 do (BRASIL, 2006) e nº 436 (BRASIL, 2011) sejam atingidos nas coquearias e nas termelétricas a carvão mineral.

O processo de dessulfurização de gases permite a remoção dos gases SO_x , pela adsorção destes, em um meio alcalino. Após a captura do SO_x é gerado um material, que varia de acordo com o tipo de substância utilizada como adsorvente, mas, pode-se dizer que, como a grande maioria das plantas de FGD utilizam Cal e/ou Calcário e/ou Hidróxido de Cálcio, o principal material gerado é composto majoritariamente por $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ou, gipsita (KOHL; NIELSEN, 1997). Além disso, apesar do processo FGD atuar principalmente na dessulfurização, ele pode ser utilizado para remoção tanto de HCl (ácido clorídrico), HF (ácido fluorídrico), como outros compostos, que também estarão na composição dos resíduos gerados no processo (CAILLAHUA, 2013).

O material oriundo do processo de dessulfurização é conhecido como resíduo FGD e sua geração, no mundo, supera 120 milhões de toneladas anualmente (WALIA; DICK, 2018). Só nos países da China e dos Estados Unidos, a geração anual deste resíduo chegou a 80 milhões e 32 milhões de toneladas, respectivamente, em 2017 (USGS, 2019; WENYI *et al.*, 2018). Ainda, Wenyi *et al.* (2018) estimam que esta produção tende a aumentar 2% a cada ano, até 2050.

Não se tem dados concretos sobre a geração deste resíduo no Brasil, mas um levantamento da CIENTEC (Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul), considerando as usinas termelétricas da região Sul e Nordeste, estima que sejam geradas anualmente 400.000 toneladas de resíduo FGD nestas regiões (ROHDE; MACHADO, 2016).

No entanto, tendo em vista que o carvão mineral corresponde a 5% da matriz energética brasileira, e, sendo a capacidade energética instalada de 157.061.758 MW (ANEEL, 2017), considerando que a taxa de geração de resíduo é 250 kg/MWh (PRADO; RODRIGUES; SILVA, 2015), prevê-se uma geração de 1,2 bilhão de toneladas de FGD ao ano, isso, se todas as instalações que promovem a combustão do carvão utilizassem este processo de controle.

Ainda, existe a parcela de FGD gerado com a produção do coque, para fabricação do ferro-gusa e do aço. Uma vez que a produção de ferro gusa e aço para o Brasil é de grande relevância, sendo este um dos dez maiores produtores de aço do mundo (IAB, 2017), pode-se inferir que existe um alto potencial de geração deste resíduo no país.

Apenas no Espírito Santo, 3º maior produtor brasileiro de aço, foram produzidas 7,5 milhões de toneladas deste material no ano de 2014, contribuindo para uma geração de 25 mil toneladas de resíduo FGD (SUNCOKE ENERGY, 2015).

Apesar da importância do sistema FGD para o controle de emissões de SO_x , o resíduo gerado no processo de dessulfurização de gases ainda tem sido visto como um grande problema para a gestão das termelétricas e siderúrgicas, pela grande quantidade gerada de resíduo, além do alto custo de destinação em aterros industriais (CASTRO, 2016).

Porém, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) considera que somente devem ser dispostos em aterros sanitários e industriais, resíduos que não possuam forma de reaproveitamento/valorização.

Desta forma, o resíduo do processo FGD tem sido apontado como um coproduto, uma vez que suas características o tornam possível de ser utilizado em vários processos, como a produção de materiais de construção, estabilização de aterros, infraestrutura de vias, estabilização de solos, produção de fertilizante, processos de remoção de contaminantes de águas residuárias, revestimentos anti-corrosão, dentre outros (WU *et al.*, 2013; QIAO; POON; CHEESEMAN, 2006, PINHEIRO, 2011; PRADO; RODRIGUES; SILVA, 2015). No entanto, ainda não é possível o uso comercial deste produto, sendo necessárias pesquisas para comprovação de sua viabilidade técnica (KOUKOUZAS; VASILATOS, 2008).

Dentre os diversos usos citados, a construção civil é a maior receptora do resíduo do FGD no mundo (KOUKOUZAS; VASILATOS, 2008). Tendo em vista que a maior parte do resíduo gerado é proveniente de sistemas que utilizam os compostos de calcário, cal e hidróxido de cálcio, o subproduto gerado apresenta características próximas ao gesso utilizado na construção civil, conhecido como sulfogesso (CAILLAHUA, 2013).

Todavia, devido ao fato de existirem diversas configurações do processo FGD, atualmente estão presentes no mercado diferentes tipos de resíduos FGD, que variam ainda com relação ao tipo de carvão utilizado, e sua composição. Assim, estudos são necessários para se determinar, com base no tipo de configuração do processo FGD, as possíveis formas de valorização deste resíduo, inclusive para a construção civil.

Além disso, existem usos nobres para o resíduo de FGD dentro da construção civil, como a produção de cimento e concreto, que ainda são pouco explorados. Numa

indústria que anseia por diminuir os impactos ambientais gerados por suas atividades, a incorporação de resíduos em materiais de construção tem apresentado inúmeras vantagens ambientais e econômicas.

2.1.1 Processo de geração

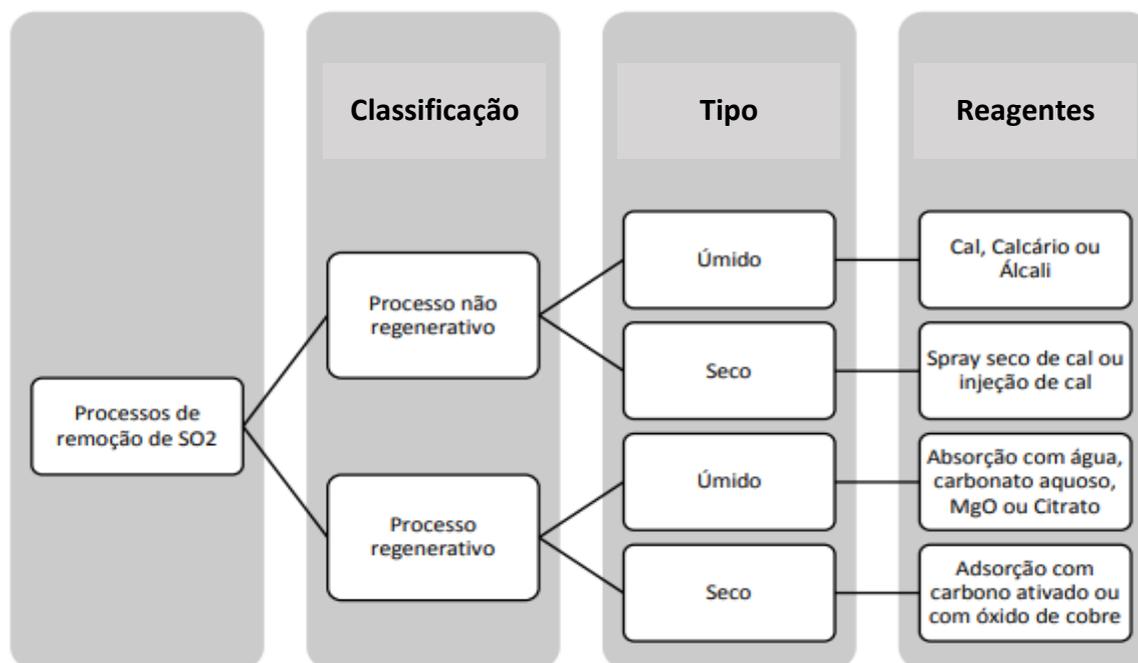
Como citado, existem vários tipos e configurações de sistemas FGD, porém, segundo Zhang *et al.* (2015), estes podem ser classificados, resumidamente, em duas categorias:

- a) Consumo de água;
- b) Possibilidade de regeneração.

A partir do consumo de água, as tecnologias FGD podem ser classificadas como FGD seco, semisseco ou úmido. Segundo Poullikkas (2015), 89,4% dos sistemas FGD instalados são do tipo úmido, os outros 10,6%, se dividem em FGD seco e semisseco, sendo que destes dois, o FGD semisseco é o mais utilizado.

Com relação a possibilidade de regeneração, os processos se dividem em regenerativos, e não-regenerativos (Figura 1), nos quais os regenerativos possuem possibilidade de reutilização dentro do processo de dessulfurização, ao contrário dos outros (COOPER; ALLEY, 2011). Os processos não-regenerativos, tanto secos ou úmidos, com utilização de cal, calcário ou outros compostos álcalis (NaOH), correspondem a 80% das plantas de FGD no mundo, isto devido a maior disponibilidade de reagentes (XIE *et al.*, 2012).

Figura 1 - Classificação dos processos FGD quanto a possibilidade de regeneração



Fonte: Adaptado de Cooper e Alley (2011).

No mercado mundial, os Estados Unidos possuem o maior número de unidades de FGD instaladas (45%), seguidos da Alemanha, em 2º (com 24%), e Japão, em 3º (com 11%), o resto do mercado é distribuído entre Índia, França, Rússia, Brasil, dentre outros. Importante ressaltar que 79% das instalações de FGD correspondem ao processo úmido, com uso de cal ou calcário (PIMENTA, 2010).

Tendo em vista que a configuração dos processos FGD varia principalmente de acordo com o consumo de água, geralmente os processos são estudados de acordo com essa classificação. Desta forma, a seguir são abordadas as principais características dos processos dos tipos seco, úmido e semisseco.

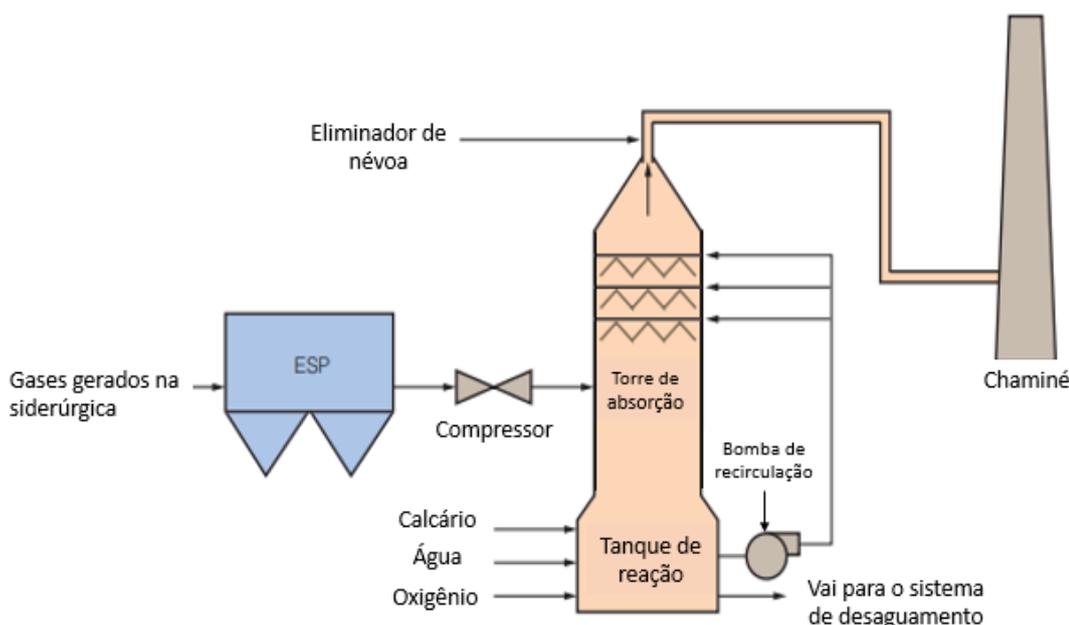
2.1.1.1 FGD Úmido

O processo de dessulfurização de gases por via úmida, conhecido como *Wet FGD*, é a tecnologia mais utilizada para dessulfurização no mundo (POULLIKKAS, 2015). Este processo pode ter variações com relação a sua configuração, além dos reagentes utilizados, sendo que o formato com uso de cal, hidróxido de cálcio ou calcário, aparece como mais utilizado, conforme dito anteriormente.

O processo úmido é realizado nas torres absorvedoras (*absorber tower*), principalmente, onde uma solução alcalina reagente é pulverizada no fluxo de gás

(Figura 2), promovendo reações com os compostos de SO_x que são absorvidos pelos compostos reagentes. As soluções reagentes mais utilizadas são compostas geralmente por CaCO_3 (calcário) ou $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (cal hidratada), sendo que a cal hidratada é gerada a partir da mistura de CaO (cal virgem) com água, antes do início do processo. O preparo das soluções é realizado no tanque de reação, conforme Figura 2 (SRIVASTA; JOZEWICZ, 2001).

Figura 2 - Processo FGD úmido com utilização de calcário



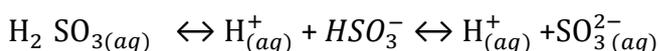
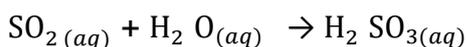
Fonte: Adaptado de CARPENTER (2013).

Segundo Zevenhoven e Kilpinen (2001) as reações químicas que descrevem o processo são:

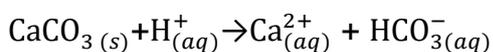
- Dissolução do SO_2 :



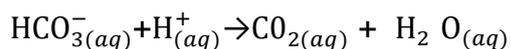
(Equação 1)



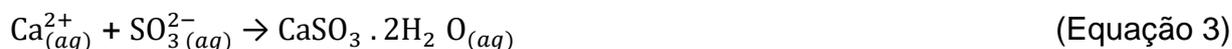
- Dissolução do calcário, por exemplo:



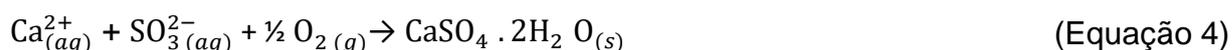
(Equação 2)



- Absorção do $\text{SO}_3^{2-}_{(aq)}$:



Ou:



Obs.:

- aq = aquoso;

- g = gasoso;

- s = sólido

Como visto na esquematização do processo, a dessulfurização úmida promove a geração de subprodutos compostos majoritariamente por $\text{CaSO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (sulfito de cálcio di-hidratado). Em algumas configurações é realizada a oxidação forçada, conforme mostrado na Figura 2, a partir deste processo, ocorre a reação apresentada na Equação 4, gerando como produtos, além dos compostos já citados, a bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) e a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (CARPENTER, 2012).

Após a geração dos subprodutos, estes são encaminhados para desaguamento e secagem, já o gás, após dessulfurização é encaminhado para as chaminés e liberado na atmosfera (CARPENTER, 2012).

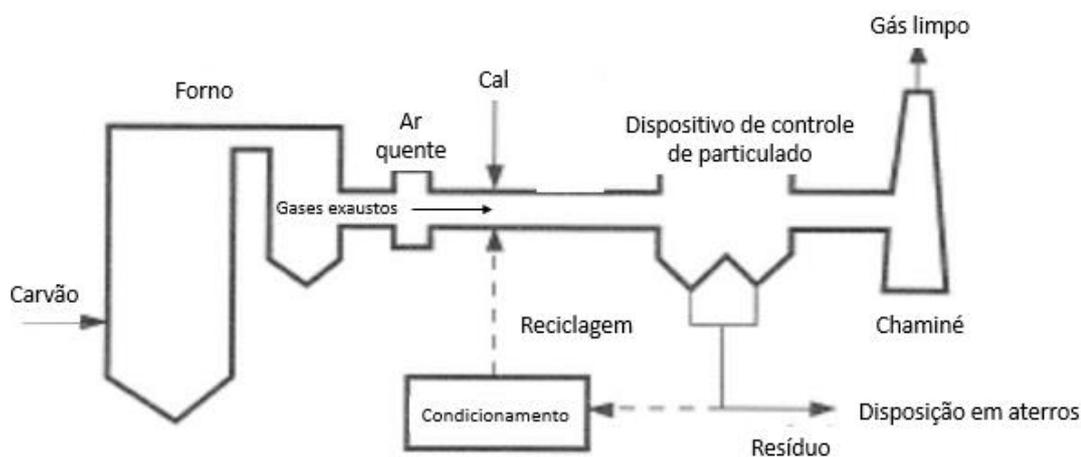
Uma das vantagens do processo úmido, e por isso a sua ampla aceitação, é a faixa de utilização, uma vez que pode ser implantado em plantas com carvão nos teores de até 3,5% de enxofre, com uma eficiência de 90 a 98%. Ainda, o consumo de reagentes no processo é bastante inferior às tecnologias secas e semissecas, além dos custos de instalação e operação também serem menores. Uma desvantagem, no entanto, é o consumo de água, superior ao verificado nos processos secos e semissecos, em 100% e 60%, respectivamente (CREVECOEUR; SMITH, 2009).

2.1.1.2 FGD Seco

Os processos de dessulfurização do tipo seco utilizam materiais sorventes secos e pulverizados, que em altas temperaturas (950°C a 1300°C) reagem com os gases de

exaustão, capturando os compostos de SO_x . O pó formado é removido por meio de filtros de manga ou precipitadores eletrostáticos, constituindo um resíduo seco a ser disposto de forma adequada (Figura 3) (POULLIKKAS, 2015; ZEVENHOVEN; KILPINEN, 2001).

Figura 3 - Esquema do processo FGD seco



Fonte: Adaptado de POULLIKKAS (2015).

Dentre os reagentes utilizados no processo seco estão o calcário, a dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) e a cal hidratada (CARPENTER, 2012). Apesar de sua pequena utilização, frente aos processos úmidos e semissecos (<1%), este tipo de dessulfurização é considerado o mais simples e com menor custo, porém, ele perde em eficiência, possuindo um aproveitamento médio de 50% a 80%, bem inferior aos outros processos (SRIVASTA; JOZEWICZ, 2001).

O processo utilizando cal consiste nas seguintes reações:

Decomposição dos compostos reagentes pela ação do calor do forno



Captura dos compostos SO_x e geração dos subprodutos/resíduos

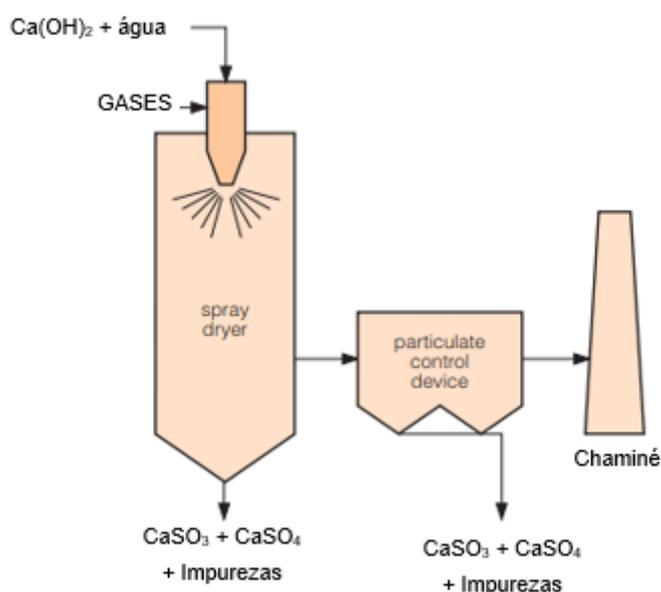


2.1.1.3 FGD Semisseco

Uma variação dos processos secos e úmidos é a tecnologia FGD Semisseco, ou *SprayDryer*. Este tipo de dessulfurização utiliza uma pequena quantidade de água, porém, gera um produto seco, sendo um meio termo entre os outros processos. Seu uso vem crescendo devido aos menores custos de investimento, tanto na instalação da planta (principalmente em locais onde já existe a estrutura industrial), como na manutenção e operação. Os fatores que colaboram para isso são o tipo de reagente utilizado (amplamente disponível) e a menor demanda de água (cerca de 60% inferior ao processo úmido) (CARPENTER, 2013; POULLIKKAS, 2015; CÓRDOBA *et al.*, 2015). Atualmente esta tecnologia corresponde a aproximadamente 10% das plantas de FGD instaladas no mundo (CARPENTER, 2012).

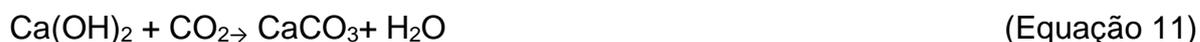
O processo consiste na injeção de hidróxido de cálcio – Ca(OH)_2 , ou cal hidratada, em conjunto com uma parcela de água, nas torres absorvedoras por meio de um atomizador rotativo (Figura 4). Com isso, é criada uma fina névoa de partículas que reagem com os gases SO_2 e SO_3 presentes nas emissões atmosféricas (gases exaustos), e como a quantidade de água é controlada, a reação promove aquecimento, o que auxilia na secagem dos produtos da reação (CaSO_3 e CaSO_4) (CARPENTER, 2013).

Figura 4 - Esquema de FGD semisseco



Fonte: Adaptado de Carpenter (2013).

O processo acontece por meio das reações descritas nas Equações 9, 10 e 11.



Desta forma, como a água evapora, seriam gerados resíduos compostos de CaSO_4 , CaSO_3 e CaCO_3 , porém, segundo Wright e Khatib (2016), o CaSO_3 é oxidado a CaSO_4 , na presença de oxigênio, e ainda, o processo de secagem não é tão eficiente, podendo ocorrer a formação de compostos hidratados, assim como na dessulfurização úmida, como $\text{CaSO}_3 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ (*Hannebachite*) $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ (*Bassanita*) e $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (*Gipsita*).

O processo semisseco promove uma eficiência de 90-95% de remoção de SO_x , para efluentes atmosféricos com menores teores de SO_x . Devido ao formato do processo, a névoa reagente formada só consegue absorver uma quantidade de poluentes, assim, o processo só apresenta eficiência adequada em efluentes atmosféricos da queima de carvões com teor de enxofre de no máximo 1,5% (JOHNSON, 2010).

É importante ressaltar que, dependendo das características da planta, a eficiência pode chegar a 98%, com o uso, por exemplo, de filtros de manga como sistemas de controle secundários (CARPENTER, 2013).

Outro fator de relevância são os produtos gerados no processo semisseco, uma vez que já se encontram no estado seco, seu manuseio e destinação são facilitados, não necessitando de um tratamento extra, como nos processos úmidos, e, devido sua composição, podem ser aproveitados em várias áreas, como na construção civil (RIAZI; GUPTA, 2016).

Existem outros tipos de FGD semissecos que apresentam variações na configuração do processo, visando aumento da eficiência de remoção de contaminantes. Um exemplo é o tipo LILAC, que utiliza como reagentes gipsita, cal e cinzas volantes “ativados”, após tratamento em água quente, para melhorar a eficiência de captura dos compostos (ISHIZUKA *et al.*, 1995).

Também pode haver combinações entre os sistemas citados.

2.1.2 Características físico-químicas, mineralógicas e microestruturais

Conforme discutido, existem diferentes configurações das plantas de FGD, o que contribui para que os resíduos/coprodutos gerados neste processo possuam características bastante distintas, tanto em qualidade como em quantidade (KHATIB WRIGHT; MANGAT, 2016).

Devido esta diversidade, é imprescindível, para o reaproveitamento do resíduo do processo FGD, a determinação das características, e propriedades específicas de cada processo.

Tendo em vista a grande possibilidade de aproveitamento deste resíduo na construção civil, como adição para melhoria de propriedades em concretos, substituto parcial de cimento, e até mesmo do gesso, nos tópicos a seguir serão discutidas características dos diferentes resíduos FGD, presentes na literatura, com foco nas propriedades avaliadas na construção civil.

2.1.2.1 Características físicas

Wright e Khatib (2016) citam que o tamanho e a forma das partículas do resíduo do FGD variam bastante com o tipo de processo de dessulfurização de gases utilizado. Pesquisas realizadas por Lei *et al.* (2017), Caillahua (2013), Liu *et al.* (2009) e Wu *et al.* (2013) apresentam uma variação do diâmetro das partículas de FGD entre 1 e 500 μm , conforme visto na Tabela 1. Estes valores divergem dos apresentados por Walker *et al.* (2002), que após um levantamento entre os processos de FGD existentes, encontraram uma faixa de granulometria de 1 a 50 μm para as partículas do processo FGD úmido, e de 2 a 75 μm , para os processos semisseco e seco. Estas informações evidenciam as diferenças entre os resíduos.

Tabela 1 - Comparação entre o tamanho das partículas de resíduo FGD gerado a partir de diferentes processos

Tamanho das partículas	Distribuição do diâmetro das partículas (%)				
	LEI <i>et al.</i> (2017) Processo úmido (CaO)	CAILLAHUA (2013) Processo úmido (Calcário)	LIU <i>et al.</i> (2009) Processo semisseco Siderúrgica (CaO)	LIU <i>et al.</i> (2009) Processo semisseco Termelétrica (MgO)	WU <i>et al.</i> (2013) Processo seco Termelétrica (CaO)
1–10 µm	4	65	85	50	3
10–40 µm	62	30	10	20	17
40–60 µm	28	2	5	30	30
60–100 µm	6	2	-	-	50
100-500 µm	-	1	-	-	-

Fonte: Elaborado pela autora.

Outra característica de grande importância é a massa específica do resíduo. Kassim e Williamson (2005), Wright e Khatib (2016) e FHWA (2016) citam que, diferentemente da granulometria, a massa específica do resíduo do processo FGD não varia muito entre os diferentes processos e matérias-primas utilizadas, ficando numa faixa de 2,25 a 2,6 g/cm³.

Com relação a superfície específica do resíduo, verifica-se que os valores encontrados na literatura para os diferentes processos FGD são bastante diversificados (Tabela 2), no geral, os processos secos tendem a apresentar menor superfície específica do que os úmidos, porém não se pode afirmar isto dos semissecos. Apesar da importância da determinação da finura do resíduo (nas peneiras de diâmetro 200 mm e 325 mm), esta informação não é abordada na literatura, encontrando-se apenas um valor para a finura do resíduo de FGD do processo semisseco, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Superfície específica e Finura dos resíduos gerados em diferentes processos FGD

Literatura	Características físicas		
	Superfície específica Blaine (cm ² /g)	Finura #200	Finura #325
WU <i>et al.</i> (2013) Processo seco - Termelétrica (CaO)	6.620	-	-
Nguyen <i>et al.</i> (2016) CFB (Leito fluidizado) - Processo seco	3.000	-	-
Gomes <i>et al.</i> (1998) Processo seco	3.340	-	-
Wu; Naik (2002) Processo semisseco	9.500	-	2,4
LIU <i>et al.</i> (2009) Processo semisseco - Siderúrgica (CaO)	7.940	-	-
Córdoba <i>et al.</i> (2015) Processo úmido com calcário	9.410	-	-

Fonte: Elaborado pela autora.

2.1.2.2 Características químicas

Dentre os principais compostos presentes no resíduo do processo FGD, o óxido de cálcio (CaO) e o trióxido de enxofre (SO₃) merecem destaque, uma vez que correspondem a um teor que varia de 40% a 80% do total de resíduo, dependendo do processo utilizado e das características do carvão, conforme pode ser visto na Tabela 3. O teor de SiO₂ também se mostra presente em quantidade considerável, chegando, em alguns processos, a 36,7% do total.

Tabela 3 - Composição do resíduo do processo FGD

Parâmetro	MCCARTHY <i>et al.</i> (1997) Processo seco (Estados Unidos)	GOMES <i>et al.</i> (1998) Processo seco (França)	WU; NAIK (2002) Processo seco (Estados Unidos)	GUO; SHI (2008) Processo úmido (China)	SADIQUE <i>et al.</i> (2012) Não especificado (Reino Unido)	TELESCA <i>et al.</i> (2013) Processo seco (Itália)
SiO ₂	22,7-36,7	18	27,5	1,82	14,3	3,3
Al ₂ O ₃	0,3-12,3	12,2	15,1	0,39	-	1
Fe ₂ O ₃	5,1-5,3	4,5	3	0,2	-	0,3
CaO	20,0-25,6	41,2	26,4	31,24	36	31,9
MgO	5,8-6,6	1,8	3,6	0,64	0,53	3,8
K ₂ O	0,5-1,1	1,7	-	0,13	-	-
Na ₂ O	5,4-9,3	0,07	1,1	0,05	-	-
SO ₃	10,4-15,8	3,8	19,7	41,8	34,6	36,9
Loss on ignition at 950°C	-	0	2,2	-	-	22,4

Fonte: Elaborado pela autora.

Algumas impurezas também podem estar presentes na composição deste resíduo, como cloretos e fluoretos decorrentes do tipo de carvão utilizado. Os cloretos são considerados como as impurezas mais prejudiciais ao processo de dessulfurização de gases, uma vez que altas concentrações desta substância diminuem a eficiência do sistema (LV *et al.*, 2017). Isto acontece porque concentrações de cloretos acima de 9.000 mg/L, promovem um aumento da concentração do íon Ca²⁺ no meio, e assim, inibem a decomposição do reagente de cálcio utilizado (CaO, CaCO₃, Ca(OH)₂), como resultado, a absorção dos compostos de SO_x é reduzida.

No que se refere à umidade e ao pH do resíduo, verifica-se que estes parâmetros também variam de acordo com o processo FGD utilizado. Pease, Rauch e Ladwig (2017) afirmam que o pH dos resíduos do processo FGD úmido varia de 5 a 8, e a umidade, em torno de 80%, podendo chegar a uma faixa de 7 a 12%, após desaguamento, valores mencionados também por Poullikkas (2015).

Já os resíduos de FGD tipo seco e semisseco possuem umidade inferior a 2%, com um pH neutro/básico, variando de 7 a 13 (ZAREMBA *et al.*, 2008).

Com relação à periculosidade do resíduo FGD, apesar deste poder apresentar alguns metais pesados, como arsênio, bário, cádmio, cromo, cobre, mercúrio, molibdênio, níquel, chumbo, antimônio, selênio e zinco, oriundos do processamento do carvão, pesquisas o têm considerado como não perigoso, de acordo com as normas de classificação utilizadas em diversos países.

Na União Européia, Koukouzas e Vasilatos (2008) e Leiva *et al.* (2010) verificaram que o resíduo não é considerado perigoso após ensaios de lixiviação estabelecidos na norma EN 12457- 4 (CEN, 2002). Já nos Estados Unidos, o mesmo resultado foi encontrado por Pasini (2009), utilizando a normalização do *Resource Conservation and Recovery Act* (RCRA) contida no *Code of Federal Regulations* (CFR), Título 40, Partes 260 a 273 (US, 2019).

No Brasil, a NBR 10.004 (ABNT, 2004) apresenta além da classificação de periculosidade, a avaliação da solubilidade do resíduo, para definir se é inerte ou não, fornecendo subsídios para seu gerenciamento. Manfroi (2014), após realização da análise estabelecida pela referida norma, chegou à conclusão de que o resíduo FGD avaliado (semisseco), apresentava concentrações de alguns metais pesados superiores aos limites estabelecidos, para o ensaio de lixiviação (ABNT, 2004), classificando o resíduo avaliado como Classe I, Perigoso.

Já Caillahua (2013), em seu estudo, obteve como resultado que o resíduo do processo FGD, após lixiviação, foi considerado não perigoso. Porém, avaliando o resíduo com relação ao ensaio de solubilidade, verificou que seria classificado como Classe – IIA (não-inerte). A Tabela 4 mostra os resultados obtidos por Caillahua (2013) e Manfroi (2014), indicando que variações no processo FGD possam interferir na periculosidade do resíduo.

Tabela 4 - Comparação entre os parâmetros da avaliação ambiental do resíduo de FGD semisseco com relação ao ensaio de Lixiviação (ABNT, 2004)

Elementos	Concentração(mg/L)		Limite máx. NBR 10.004 (ABNT, 2004)
	CAILLAHUA (2013)	MANFROI (2014)	
Arsênio (As)	0,10	8,55	1,0
Bário (Ba)	0,38	< 70,0	70,0
Cádmio (Cd)	0,02	5,70	0,5
Chumbo (Pb)	0,02	< 1,0	1,0
Cromo (Cr)	< 0,001*	36,09	5,0
Mercúrio (Hg)	< 0,006*	< 0,1	0,1
Prata (Ag)	< 0,001*	< 5,0	5,0
Selênio (Se)	0,31	< 1,0	1,0

Nota: *Limite de detecção do método.

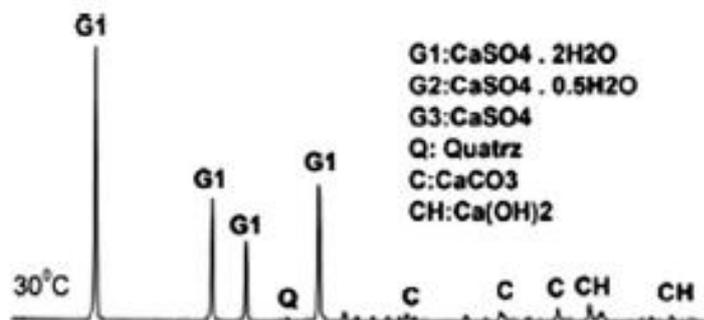
Fonte: Adaptado pela autora.

2.1.2.3 Características mineralógicas e microestruturais

Os minerais componentes do resíduo do FGD também variam de acordo com o processo utilizado. A partir da análise de espectrometria de fluorescência de raios-x (FRX), pode-se identificar os principais compostos presentes em uma substância. No entanto, as diferentes combinações entre os compostos, formando as substâncias constituintes, só é possível verificar utilizando a técnica de FRX em conjunto com a difração de raios-x. Além disso, a difração de raios-x fornece informações sobre a estrutura microscópica da substância, principalmente se possui fases cristalinas ou amorfas (KLEIN; DUTROW, 2012).

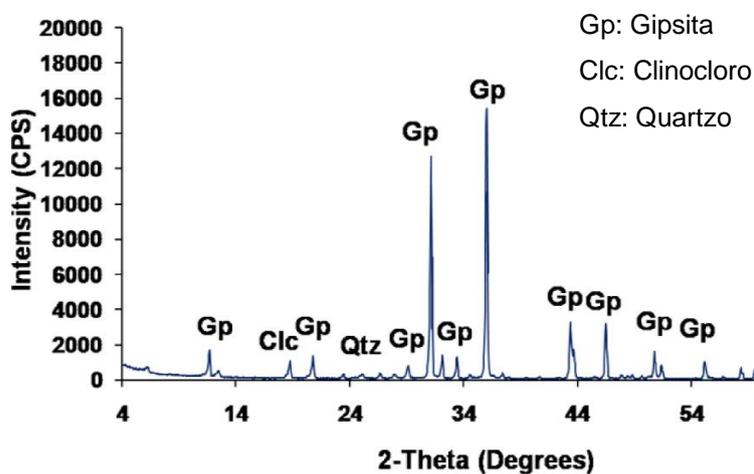
Pesquisas realizadas por Guo e Shi (2008), Li *et al.* (2015), Sadique *et al.* (2012), Telesca *et al.* (2013) apresentam uma estrutura cristalina para o resíduo do processo FGD (Figuras 5, 6, 7 e 8), não se diferenciando com relação ao processo de geração (úmido, seco ou semisseco). No entanto, os compostos minerais presentes no resíduo se mostraram diferentes, conforme já discutido na seção 2.1.1.

Figura 5 - Difratoograma do resíduo do processo FGD (úmido) - China



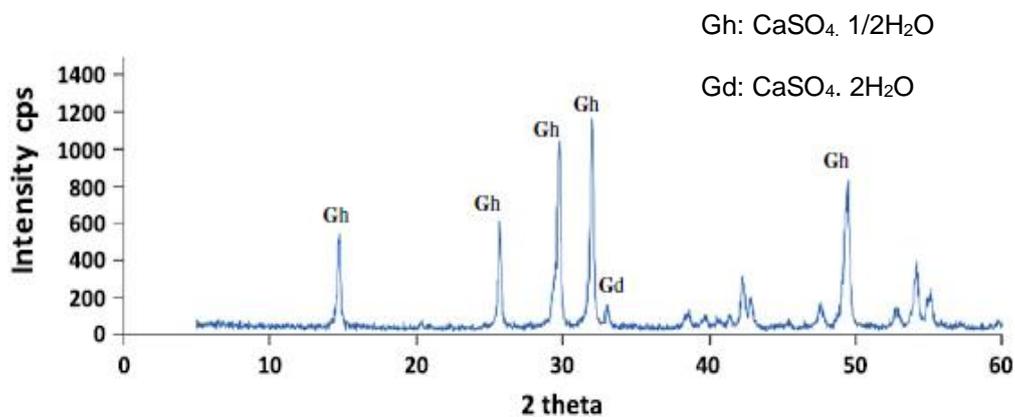
Fonte: Guo e Shi (2008)

Figura 6 - Difratoograma do resíduo do processo FGD (úmido) - China



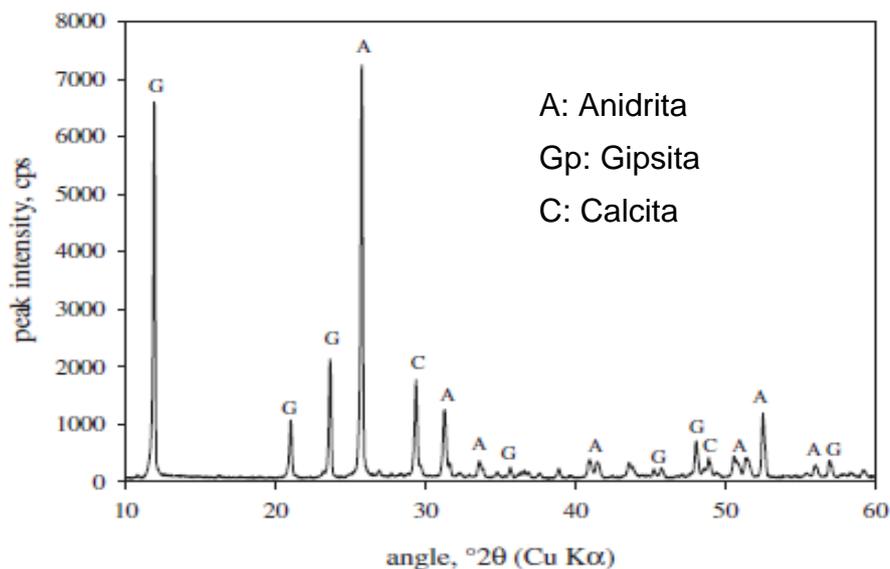
Fonte: Liet *et al.* (2015).

Figura 7 - Difratoograma do resíduo de processo FGD (úmido) – Reino Unido



Fonte: Sadique *et al.* (2012).

Figura 8 - Difratoograma do resíduo de processo FGD (seco) – Itália



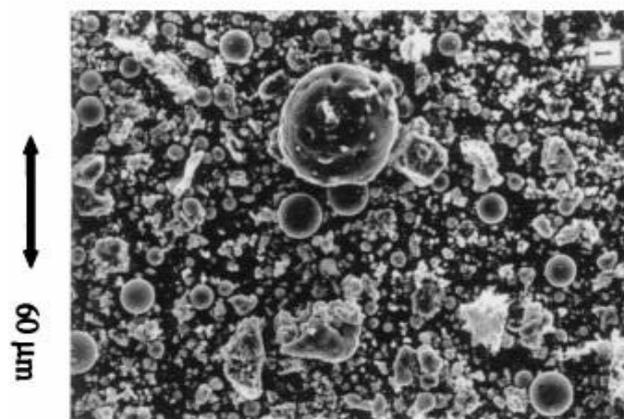
Fonte: Telesca *et al.* (2013).

Conforme visto nos difratogramas apresentados, os processos secos (Figura 8) apresentam o mineral anidrita (CaSO_4), que é a forma desidratada da Gipsita, em sua composição. Alguns processos úmidos, dependendo da temperatura, promovem a geração de gipsita hemihidratada ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$), em conjunto com a dihidratada ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Segundo Papageorgiou, Tzouvalas e Tsimas (2005), a formação da forma dihidratada ou hemihidratada depende da temperatura e do pH do processo FGD, sendo possível, em temperaturas superiores a 170°C , a formação de CaSO_4 (Anidrita).

Ainda, podem conter na composição do resíduo gerado quartzo (SiO_2), Calcita (CaCO_3), dentre outros minerais, dependendo do tipo de processo. Interessante observar que, dependendo do teor de cloretos no carvão, pode ocorrer a formação de minerais a base de cloretos, como verificado por Li *et al.* (2015).

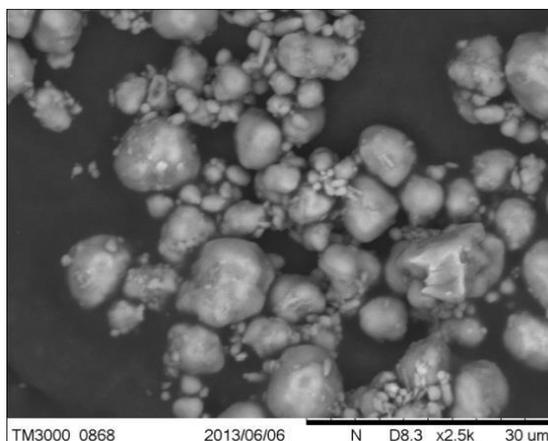
Com relação a morfologia dos resíduos gerados no processo FGD, verifica-se que, o tamanho dos cristais constituintes da microestrutura do resíduo apresenta grande variabilidade, porém, se mostrando inferior a $100 \mu\text{m}$ (Figuras 9, 10, 11 e 12), estes resultados são semelhantes aos apresentados pelas pesquisas que avaliaram a granulometria do resíduo (seção 2.1.2.1).

Figura 9 - MEV do resíduo FGD – processo seco



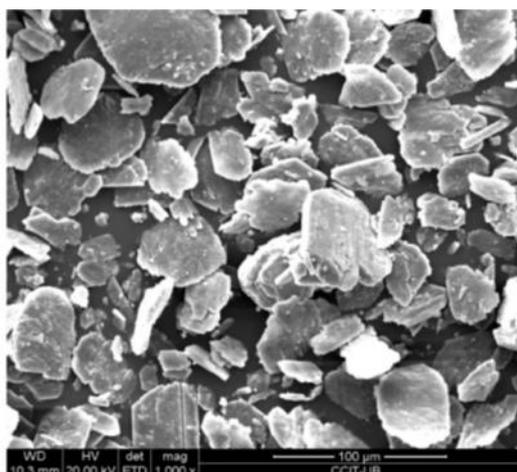
Fonte: Gomes *et al.* (1998)

Figura 10 - MEV do resíduo FGD – processo semisseco



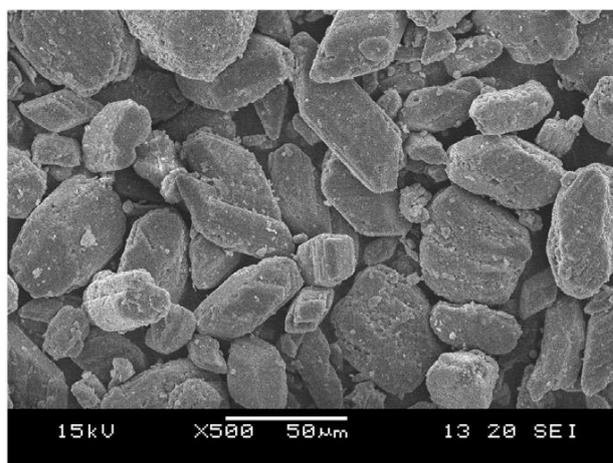
Fonte: Caillahua (2013)

Figura 11 - MEV do resíduo FGD – processo úmido



Fonte: Li *et al.* (2015)

Figura 12 - MEV do resíduo FGD – processo úmido



Fonte: Lei *et al.* (2017)

Percebe-se, pelas Figuras 11 e 12, que os resíduos provenientes do processo úmido possuem menor variabilidade com relação ao tamanho e a forma das partículas, diferentemente dos resíduos dos processos seco e semisseco, que demonstram uma composição bastante variável.

Com relação a composição dos diferentes processos, Klein e Dutrow (2012) ressaltam que a gipsita geralmente é apresentada em cristais com formato losangular, conforme visto nas Figuras 11 e 12. Isto corrobora com a análise por difração de raios-x dos resíduos do processo FGD úmido, que apresentaram gipsita em todos difratogramas avaliados.

Já a Anidrita, presente com maior frequência em processos secos e semissecos, possui formato tabular, podendo ocorrer na forma granular (KLEIN; DUTROW, 2012), como pode ser visto nas Figuras 9 e 10. Os autores afirmam ainda que, a anidrita, quando gerada a partir da desidratação da gipsita, pode apresentar formato hexagonal, que também pode ser observado nas referidas figuras.

Gomes *et al.* (1998) verificaram a presença de partículas esféricas em análise de MEV de resíduo do FGD seco (Figura 9). Após análise de EDS para verificação da composição destas partículas, os autores concluíram que se tratava de partículas silicoaluminosas, que poderiam ser constituídas por cinzas do processo de queima do carvão, que não foram totalmente retiradas nas etapas de controle atmosférico anteriores ao processo FGD.

2.2 UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO FGD NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Segundo Isaia (2017), não existe atividade humana em que a construção civil não esteja presente para suprir a demanda por maior quantidade de bens e serviços requeridos pela população mundial.

Porém, ao mesmo tempo em que as atividades da construção civil se tornam essenciais para o crescimento urbano e econômico, tem-se a geração de um paradigma, uma vez que, esta mesma indústria é responsável por cerca de 20% a 50% dos recursos naturais consumidos em todo mundo, por 50% do CO₂ emitido na atmosfera, e pela geração de 50% dos resíduos produzidos no planeta (PULASKI, 2004).

Apesar disto, Scrivener, John e Gartner (2016) citam que a construção civil é a indústria que tem o maior potencial para reciclagem de resíduos provenientes de outras indústrias, como escória de alto forno, cinzas volantes e sucata de aço.

Isto se deve tanto as características dos resíduos industriais (que possuem em sua composição substâncias que podem ser aproveitadas na construção civil), quanto as características dos próprios materiais de construção, que, por serem essencialmente inertes, atuam como uma matriz encapsuladora de contaminantes contidos nos resíduos industriais.

Além disso, o reaproveitamento de resíduos industriais na construção civil promove muitos outros benefícios ambientais, como a diminuição do consumo de matérias-primas naturais e de energia, a redução na emissão de poluentes, além de minimizar os custos com a destinação dos resíduos e contribuir para a sua valorização sustentável (ISAIA; GASTALDINI, 2004).

Devido a semelhança entre a composição do resíduo gerado nos diferentes processos FGD com os materiais utilizados na construção civil, diversas pesquisas vêm sendo realizadas com o intuito de verificar a aplicabilidade de sua utilização como material de construção (Quadro 1).

Resultados favoráveis têm sido obtidos, sendo o resíduo de FGD (na forma de gipsita - CaSO₄.2H₂O, bassanita - CaSO₄. ½ H₂O e anidrita - CaSO₄) utilizado muitas vezes como substituto do gesso, principalmente na produção de componentes pré-moldados (de gesso) e na produção de cimento, conforme visto no Quadro 1.

Quadro 1 - Pesquisas utilizando resíduo FGD em materiais de construção

Autores	Pesquisa
COPPOLA <i>et al.</i> (1996)	Incorporação de resíduo de FGD e cinzas de carvão em blocos e tijolos
WU; NAIK (2002)	Avaliação das propriedades de concretos produzidos com resíduo FGD e cinzas volantes
TZOUVALAS; RANTIS; TIMAS (2004)	Materiais alternativos de sulfato de cálcio como retardadores de cimento: Gesso FGD
PAPAGEORGIU; TZOUVALAS; TSIMAS (2005)	Uso de resíduo de FGD como retardador de tempo de pega do cimento
TESÁREK <i>et al.</i> (2007)	Estudo das propriedades mecânicas, hídricas e térmicas do gesso FGD
GUO; SHI (2008)	Utilização de resíduo FGD em concretos
CHINDAPRASIRT <i>et al.</i> (2011)	Argamassas produzidas com resíduos de sulfato de cálcio (FGD), aditivos orgânicos, inorgânicos e fibras
FENG-QING <i>et al.</i> (2012)	Bloco de gesso FGD resistente a água
SADIQUE <i>et al.</i> (2012)	Utilização de resíduo FGD na produção de argamassa
YU; BROUWERS (2012)	Fabricação de compósito de gesso a partir do resíduo de FGD
ZHONG; NI; LI (2012)	Argamassa produzida com resíduo de FGD, cinzas volantes e escória de alto forno
GUO; SHI (2013)	Utilização de resíduo FGD e escória na produção ode concretos
LI <i>et al.</i> (2015)	Utilização do gesso FGD para produção de painés de gesso resistentes ao fogo
LIANG; LI (2015)	Produção de tijolos leves com incorporação de resíduo FGD
KHATIB; WRIGHT; MANGAT (2016)	Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concreto produzido com resíduo FGD
RUNGCHET <i>et al.</i> (2016)	Produção de cimento de belita a partir de resíduo de FGD
ZHANG; PAN; WU (2016)	Utilização de resíduo FGD na produção de pastas com metacaulim
CAILLAHUA; MOURA (2018)	Uso de gesso FGD como aditivo retardador de tempo de pega

Fonte: Elaborado pela autora.

2.2.1 Utilização do resíduo FGD em cimentos

Como incorporação em cimentos, um dos usos do resíduo do processo FGD é a substituição da gipsita, mineral adicionado junto ao clínquer, na produção dos cimentos, com o objetivo de atuar no controle do tempo de pega.

Este processo é realizado retardando-se a reação de hidratação do C3A ($3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), ou aluminato tricálcico. A inibição acontece porque a gipsita reage com os aluminatos formando um mineral denominado de etringita. Este mineral é normalmente o primeiro produto a cristalizar-se durante a primeira hora de hidratação do cimento à temperatura ambiente, contribuindo para o enrijecimento, pega e desenvolvimento da resistência inicial da pasta (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A etringita se cristaliza na forma de pequenas agulhas prismáticas na superfície do aluminato tricálcico formando uma barreira que contribui para a redução da velocidade de hidratação dos aluminatos (CODY *et al.*, 2004).

A reação entre gipsita e aluminatos ocorre até que toda a gipsita seja consumida. Quando isto acontece, o aluminato tricálcico fica livre para reagir com a etringita formada anteriormente (etringita primária), produzindo monossulfato, que é uma forma mais estável. Porém, se os sulfatos ficarem disponíveis no meio da pasta, o equilíbrio é deslocado, sendo formada novamente etringita, mas na forma secundária, ou tardia (MEHTA; MONTEIRO, 2008)

As reações iniciais entre a gipsita (sulfato) e os aluminatos devem acontecer em até 10 horas do início da hidratação do cimento, de forma a evitar a formação de etringita na fase plástica, ou etringita secundária/tardia. Este tipo de etringita é extremamente prejudicial para as matrizes cimentícias devido sua estrutura expansiva, que forma microagulhas responsáveis por promover tensões internas na matriz, causando microfissuras/fissuras, e, conseqüentemente, a perda de resistência (KHATIB; WRIGHT; MANGAT, 2016).

Para se evitar a formação da etringita secundária, Mehta e Monteiro (2008) ressaltam que é necessário o estabelecimento de um teor ótimo de sulfatos no cimento, geralmente 3% a 5% do teor de clínquer, este teor será suficiente para retardar a pega e contribuir para a formação de etringita primária, devendo, os sulfatos, serem totalmente consumidos antes da formação da etringita secundária.

Para Khatib, Wright e Mangat (2016), o máximo teor de sulfatos que pode ser adicionado em matrizes cimentícias deve ser avaliado de acordo com cada situação, tendo em vista a grande variabilidade dos componentes envolvidos no processo e, conseqüentemente, das interações nas matrizes cimentícias. Os autores afirmam que estudos que visem avaliar a interação do resíduo do processo FGD em cimentos, argamassas e concretos são essenciais para o conhecimento do potencial de reaproveitamento deste resíduo, uma vez que diferentes tipos de resíduo FGD são gerados, com diferentes características. Além disso, os processos secos e semissecos muitas vezes geram produtos compostos por sulfato de cálcio, que não são reativos, possibilitando o uso de maiores teores de adição de resíduo FGD.

Com relação as pesquisas desenvolvidas a partir da incorporação do resíduo FGD em cimentos, Tzouvalas, Rantis e Tsimas (2004), utilizando resíduo do processo úmido, avaliaram as propriedades de tempo de pega e de resistência à compressão dos cimentos produzidos com diferentes teores de resíduo FGD.

A partir desta pesquisa, os autores encontraram um teor ótimo de SO_3 a ser contido na mistura de cimento (3,5%). Este teor foi correspondente a uma adição de 6,5% de resíduo, em relação a massa de cimento, e promoveu valores de resistência à compressão axial de 60 MPa em 28 dias, valor praticamente idêntico ao da resistência obtida com o mesmo teor de incorporação da gipsita natural (TZOUVALAS, RANTIS; TSIMAS, 2004)

Outro ponto importante é a influência do resíduo do FGD no tempo de pega do cimento. Com relação a esta propriedade, os autores verificaram que, a adição do resíduo do FGD propiciou um atraso de até 1 hora no início do tempo de pega do cimento, se comparado com o cimento produzido com a gipsita natural. Isto se deve, principalmente, as diferenças entre a solubilidade dos compostos do resíduo FGD e a gipsita natural, uma vez que, no FGD, os compostos de sulfato existentes possuem maior solubilidade, e assim, se tornam mais facilmente disponíveis na hidratação do cimento. Conseqüentemente, a adição de FGD forma mais etringita primária, reduzindo a velocidade de hidratação dos aluminatos (TZOUVALAS; RANTIS; TSIMAS, 2004).

Ainda, é importante ressaltar que a solubilidade dos sulfatos presentes no resíduo FGD se deve, também, a sua estrutura cristalina hexagonal, uma vez que a gipsita

natural possui estrutura geralmente monoclinica, tornando-a menos solúvel (PAPAGEORGIU; TSOUVALAS; TSIMAS, 2005).

Papageorgiou, Tzouvalas e Tsimas (2005) avaliaram, a partir da produção de cimentos com adição de resíduo de FGD, a influência dos componentes anidrita (CaSO_4) e sulfato de cálcio hemi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) na resistência à compressão. Os autores chegaram à conclusão de que quanto maior a concentração destes componentes, maior a resistência à compressão do cimento, demonstrando que por estas formas serem mais instáveis, promovem a formação de etringita primária mais rapidamente, aumentando a resistência inicial das matrizes.

2.2.2 Utilização do resíduo FGD em argamassas

Caillahua e Moura (2018), avaliando a influência do resíduo FGD em argamassas, verificaram que a substituição da gipsita natural pelo resíduo FGD contribui para um aumento da resistência à compressão em 6%, 14% e 5,6%, nas idades de 3, 7 e 28 dias, respectivamente.

Estes autores também avaliaram a influência da adição de FGD no tempo de pega do cimento, obtendo um atraso da pega do cimento com FGD em 65 minutos, comparando ao cimento produzido com gipsita natural, resultados semelhantes a Tzouvalas, Rantis e Tsimas (2004).

Sadique *et al.* (2012) estudando as propriedades de argamassas produzidas com misturas de resíduo FGD, sílica ativa e cinzas volantes, perceberam que a mistura entre os três tipos de resíduos contribuía para o aumento da resistência à compressão das argamassas sendo 211% superior a resistência de argamassas que continham apenas cinzas volantes.

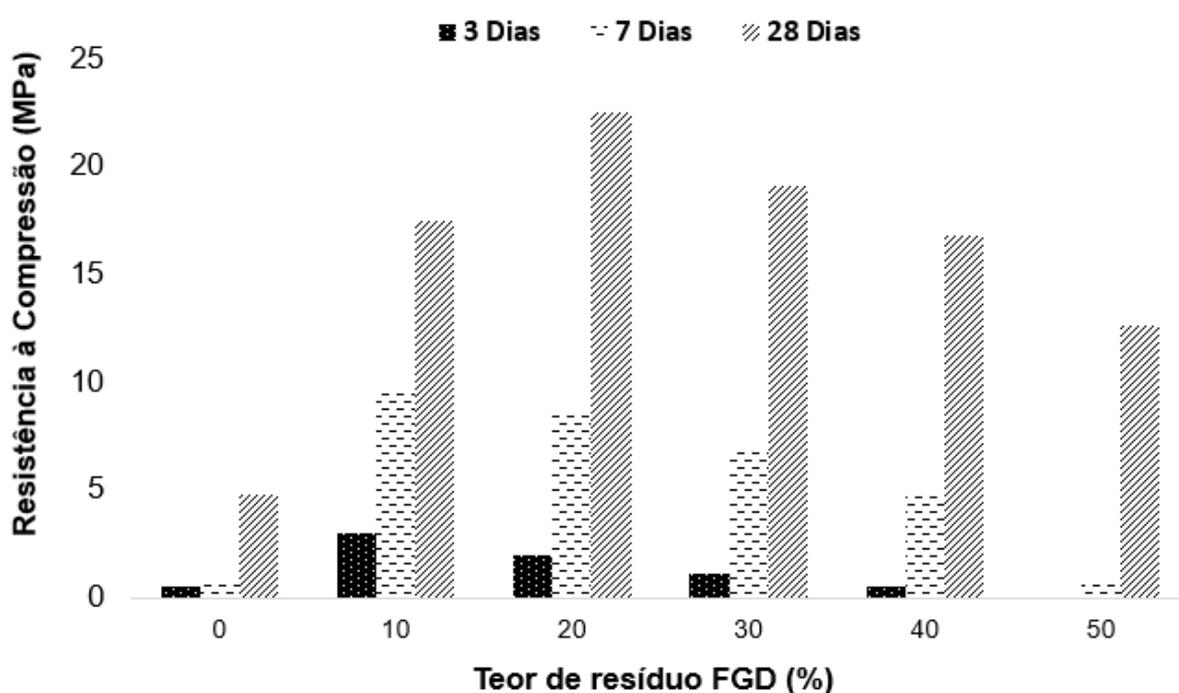
Os autores concluíram que isto se deve ao fato do resíduo de FGD atuar como um ativador alcalino da pozolanicidade das cinzas volantes, pelo teor de sulfato contido no resíduo, além da sua alta alcalinidade. A ação do resíduo FGD promove a dissolução da sílica contida nas cinzas volantes, contribuindo para a formação do gel CSH, maior responsável pela resistência das matrizes cimentícias (QIAN; SHI; WANG, 2001; FERNANDEZ-JIMENEZ; PALOMO, 2005).

Efeitos semelhantes aos observados por Sadique *et al.* (2012) foram verificados por Zhong, Ni e Li (2012), a partir de pesquisa com argamassas produzidas com misturas ternárias de cinzas volantes, escória de alto forno e resíduo do FGD. Além de

constatar um aumento da resistência à compressão e à flexão nas argamassas que continham o resíduo FGD, os autores também verificaram o efeito do FGD como ativador alcalino nas cinzas volantes, sendo que este mecanismo teve maior relevância em argamassas com idades superiores a 7 dias.

A partir da Figura 13, retirada do trabalho de Zhong, Ni e Li (2012), pode-se observar o ganho de resistência à compressão das misturas com a incorporação do resíduo de FGD, principalmente após 28 dias, o que indica a atuação do resíduo como um ativador alcalino.

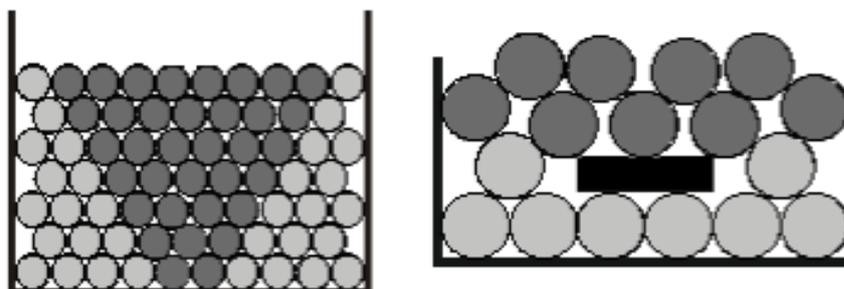
Figura 13 - Resistência à compressão das argamassas com incorporação de escória, FGD e cinzas volantes



Fonte: Adaptado de Zhong, Ni e Li (2012).

Com relação a consistência das argamassas, os autores verificaram que a adição do resíduo do processo FGD aumenta a quantidade de água necessária na mistura para se atingir a trabalhabilidade desejada. Isto se deve ao fato das partículas de resíduo FGD possuírem morfologia lamelar ou tabular (Figuras 11 e 12), que possuem um menor efeito de rolamento, dificultando o contato entre as partículas da mistura, conforme mostrado na Figura 14 (ZHONG; NI; LI, 2012).

Figura 14 - Comparação entre o empacotamento de partículas esféricas e tabulares



Fonte: Adaptado de Callister Jr. e Rethwisch (2012).

2.2.3 Estudos com utilização de resíduos do processo FGD em concretos

O concreto é o segundo material mais utilizado no mundo, atrás apenas da água (HELENE; ANDRADE, 2017). Com um consumo de 1,9 toneladas/hab.ano, o concreto de cimento Portland é considerado o material estrutural e de construção civil mais importante da atualidade. Estima-se que seu uso só aumente ao longo dos anos (PEDROSO, 2009).

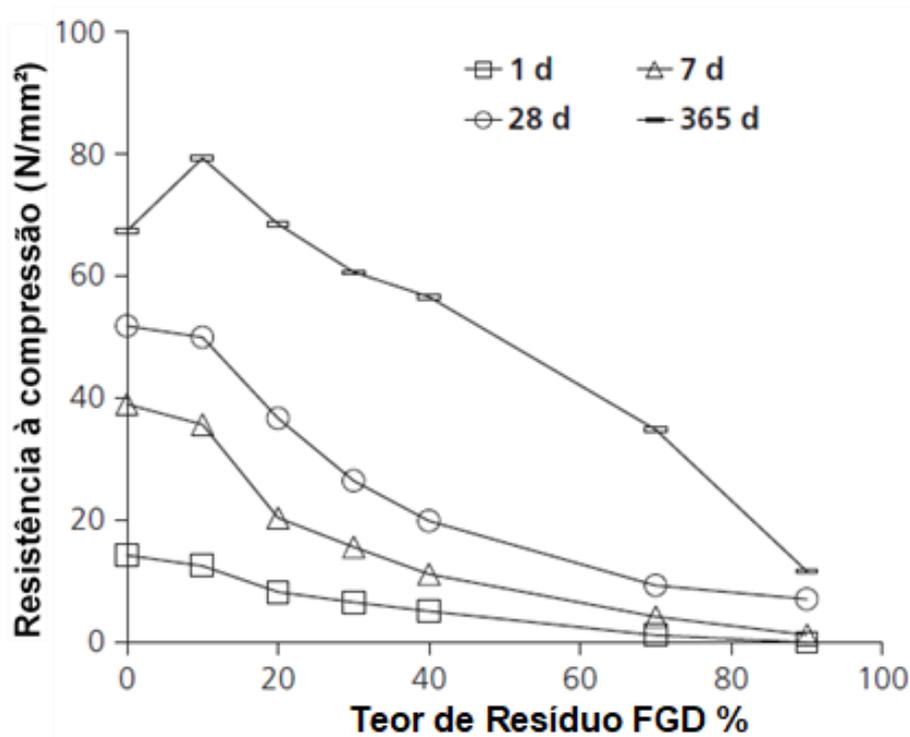
Dados da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) e da FIHP (Federação Iberoamericana de Concreto Pré-misturado) apresentam um crescimento de 470% do consumo de concreto no mundo, entre 2012 e 2015, sendo que apenas no ano de 2015, a produção mundial de concreto pré-misturado chegou a 2,4 bilhões de m³ (ABCP, 2013; CLA, 2017).

Pela importância do concreto para a construção civil e conseqüentemente o alto consumo, o concreto contribui com grande parte dos impactos ambientais advindos da Indústria da Construção Civil. Várias pesquisas têm sido realizadas em todo mundo objetivando reduzir o consumo dos recursos naturais e mitigar a geração de resíduos, principalmente por meio da utilização de insumos menos impactantes, como agregados reciclados, adições minerais, ou com a incorporação de resíduos, que mantenham o desempenho das funções deste material (ISAIA, 2017).

Apesar de ser uma alternativa muito interessante, estudos que visam a utilização do resíduo do processo FGD como incorporação em concretos são bastante escassos, conforme mostrado no Quadro 1, merecendo destaque os trabalhos realizados por Wu e Naik (2002), Guo e Shi (2008; 2013) e Khatib, Wright e Mangat (2016).

Khatib, Wright e Mangat (2016), em estudo envolvendo a substituição de cimento por uma mistura de resíduo dos processos FGD seco e semisseco, nas porcentagens de 10%, 20%, 30%, 40%, 70% e 90% da massa de cimento, verificaram que a resistência à compressão dos concretos com FGD apresentou um decréscimo, proporcional ao teor de FGD na massa, para as idades de 1, 7 e 28 dias. Porém, aos 365 dias, foi verificado que a resistência à compressão dos concretos com 10% de FGD foi superior ao concreto referência, indicando que a incorporação deste resíduo possui efeito em longo prazo (Figura 15).

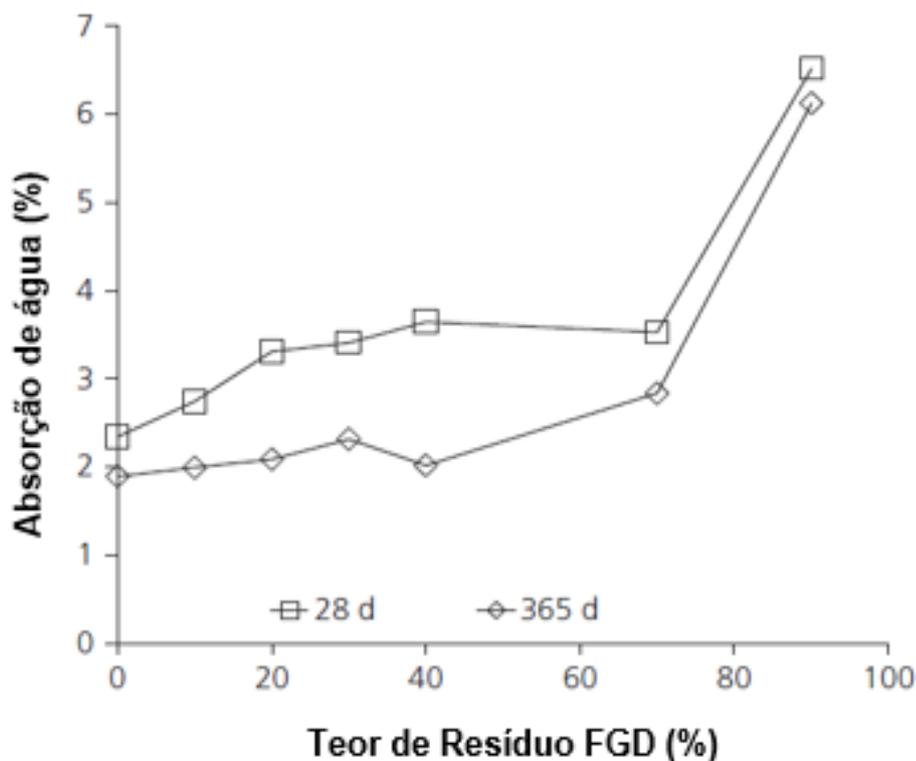
Figura 15 - Variação da resistência à compressão axial com relação ao teor de substituição do cimento pelo FGD



Fonte: Adaptado de Khatib, Wright e Mangat (2016).

Os autores verificaram ainda que a incorporação do resíduo FGD contribuiu para o aumento da absorção de água nos concretos (Figura 16). Provavelmente, isto ocorreu devido ao excesso de sulfatos na massa de concreto, que promoveu a formação de etringita secundária (tardia), nos poros do concreto.

Figura 16 - Variação da absorção de água com relação ao teor de substituição do cimento pelo FGD



Fonte: Adaptado de Khatib, Wright e Mangat (2016).

Com relação a consistência dos concretos no estado fresco, os autores verificaram que a substituição de cimento pelo resíduo FGD promoveu um aumento no abatimento para um teor de 10% de FGD, se comparado ao concreto referência, obtendo-se valores próximos a 200 mm. Acima deste teor de substituição, o abatimento diminuiu consideravelmente, chegando a 0 mm para 90% de teor de FGD na massa de concreto.

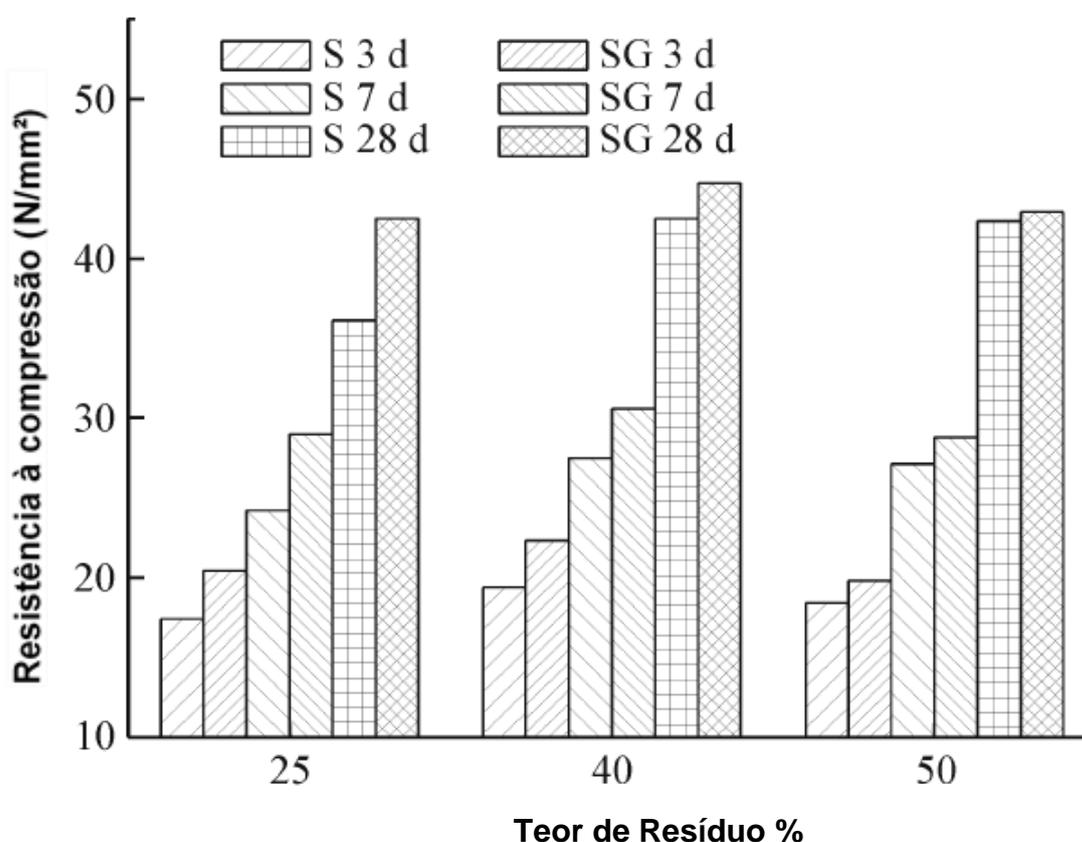
Em muitos processos de dessulfurização, o resíduo do FGD é gerado próximo ou em conjunto aos altos fornos, nas siderúrgicas, onde são geradas as escórias de alto forno, amplamente utilizadas na indústria da construção civil, como adições cimentantes no concreto. Diversos estudos foram desenvolvidos com o objetivo de avaliar esta interação e propiciar um melhor aproveitamento para estes materiais, uma vez que ambos são gerados em grandes quantidades nas indústrias.

Guo e Shi (2013) avaliaram a influência da mistura de resíduo FGD com escória de alto forno. O conteúdo de FGD na mistura foi controlado limitando-se o teor de SO_3 , obtendo-se um valor fixo de 4% de FGD nas misturas. O teor de escória adicionado

foi de 21%, 36% e 46%, promovendo um teor de substituição do cimento pela mistura de escória + FGD de 25%, 40% e 50%, respectivamente.

Os autores verificaram que a resistência à compressão dos concretos com a mistura de escória e FGD foram superiores em quase 50% as resistências obtidas para os concretos referência, para as idades de 3, 7 e 28 dias (Figura 17). Não havendo, no entanto, grande diferença entre os resultados obtidos pela substituição do cimento apenas pelo resíduo FGD, ou pela mistura de resíduo FGD + Escória.

Figura 17- Resistência à compressão de concretos produzidos com mistura entre resíduo FGD e escória



Fonte: Guo e Shi (2013).

Nota: S = Escória e SG = Escória + Resíduo FGD.

Conforme a pesquisa de Guo e Shi (2013), pode-se inferir que devido a grande quantidade de aluminatos presentes na escória, houve uma menor disponibilidade de sulfatos (provenientes do FGD) nas matrizes de concreto. Isto contribui para uma maior formação de etringita primária, em detrimento da secundária, e conseqüentemente, para o aumento da resistência dos concretos, se comparado com concretos que continham apenas o resíduo FGD, como na pesquisa de Khatib, Wright e Mangat (2016).

Importante ressaltar que, a escória promove uma maior compacidade da mistura no concreto, o que também auxilia no aumento da resistência à compressão, e na melhoria de características de durabilidade, como redução do volume de vazios e menor absorção de água (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

CAPÍTULO 3

3 METODOLOGIA

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

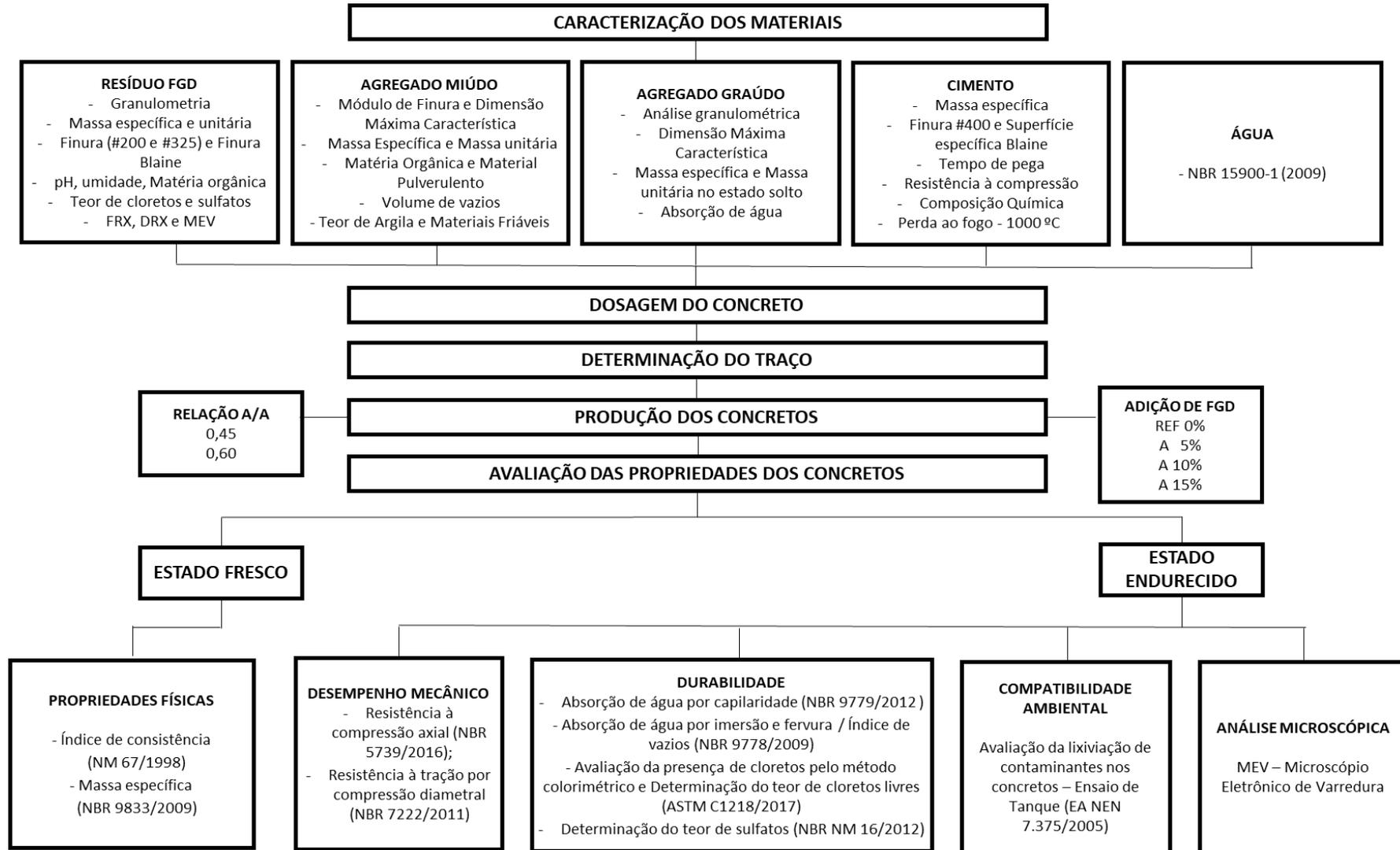
O programa experimental desta pesquisa consiste nas etapas mostradas no fluxograma da Figura 18. Fundamentalmente, a pesquisa é composta por três etapas principais. A primeira etapa consiste na caracterização dos materiais necessários para a produção dos concretos (resíduo FGD, agregados graúdo e miúdo, cimento e água), a segunda etapa, na produção propriamente dita dos concretos, incluindo a dosagem para determinação do traço a ser utilizado.

Já a terceira e última etapa constitui-se na avaliação do concreto no estado fresco (índice de consistência e massa específica) e no estado endurecido, compreendendo os ensaios de Resistência à compressão e Resistência à tração por compressão diametral, nas idades de 7, 28, 56 e 91 dias, Absorção de água por capilaridade e determinação do Índice de vazios, aos 28 e 91 dias. Também foi avaliado o teor de cloretos totais, livres e de sulfatos nos concretos produzidos, aos 7, 28, 56 e 91 dias e a sua microestrutura pelo ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), aos 7, 28 e 91 dias. Por fim, procedeu-se a avaliação da compatibilidade ambiental dos concretos, aos 120 dias, por meio do ensaio de lixiviação de contaminantes.

De forma a avaliar o comportamento do resíduo FGD em concretos com diferentes percentuais de água na mistura, foram adotadas duas relações água/aglomerante (a/agl). As relações foram escolhidas após a dosagem, buscando-se obter concretos com maior resistência (traço com maior teor de cimento), e com menor resistência (traços com menor teor de cimento), de acordo com o estabelecido pela NBR 12655 (ABNT, 2015).

Os teores de adição do resíduo de FGD foram escolhidos com base em revisão bibliográfica de trabalhos com incorporação de resíduos em concretos, e também, de trabalhos que utilizaram resíduo FGD (KHATIB, WRIGHT; MANGAT, 2016; GUO; SHI, 2008).

Figura 18 - Programa experimental



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Tendo em vista elaborar um programa experimental que contemplasse a maior precisão estatística possível e o menor custo, ou seja, garantindo a confiabilidade estatística com o menor uso de materiais, realizou-se um Planejamento de Experimentos, conforme metodologia descrita por Souza *et al.* (2002).

Para tal, utilizou-se o Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), com arranjo fatorial para os tratamentos, visando avaliar a interação entre três fatores: adição do resíduo do FGD, relação água/aglomerante e idade do concreto.

3.2.1 Variáveis da pesquisa

Neste estudo foram consideradas variáveis do tipo independentes, dependentes e de controle.

As variáveis independentes, conforme Lakatos e Marconi (2003), são as que influenciam, determinam ou afetam outra variável. Estas variáveis são o fator determinante, condição ou causa para determinado resultado, efeito ou consequência.

Já as variáveis dependentes são os fatores que aparecem, desaparecem ou variam à medida que o investigador introduz, tira ou modifica a variável independente. Correspondem a uma propriedade ou fator que é efeito resultado, consequência ou resposta a algo que foi manipulado (variável independente) (LAKATOS; MARCONI, 2003).

As variáveis de controle são fatores ou propriedades que possuem a natureza de afetar os resultados obtidos para as variáveis dependentes, e por isso, são neutralizadas no estudo, de forma que não interfiram na relação entre a variável independente e a dependente (LAKATOS; MARCONI, 2003).

As variáveis de pesquisa utilizadas neste estudo estão presentes no Quadro 2.

Quadro 2 - Variáveis envolvidas nesta pesquisa

Tipo de variável	Variável
Dependente	Índice de consistência pelo abatimento do tronco de cone
	Massa específica
	Resistência à compressão axial
	Resistência à tração por compressão diametral
	Absorção de água por capilaridade
	Absorção de água por imersão e fervura
	Teor de cloretos livres
	Teor de sulfatos solúveis em água
	Lixiviação de contaminantes
	Análise microestrutural
Independente	Percentual de adição de Resíduo do FGD (0%, 5%, 10% e 15%)
	Relação água/aglomerante ou água /cimento (0,45 e 0,6)
	Idade do concreto (7, 28, 56 e 91 dias)
Controle	Características do resíduo do FGD
	Tipo de cimento (CPV ARI)
	Características dos agregados
	Procedimento de dosagem do concreto (IPT/EPUSP)
	Processo de moldagem dos corpos de prova
	Cura imersa em solução saturada com cal

Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.2 Planejamento fatorial

O tipo de planejamento escolhido para execução dos ensaios desta pesquisa foi o Planejamento Fatorial Cruzado ou Multinível. O Planejamento Fatorial foi escolhido pela necessidade de se verificar o efeito de duas ou mais variáveis (fatores) de influência (independentes), sendo neste estudo consideradas: o percentual de adição de resíduo do FGD, a relação água aglomerante e a idade dos concretos estudados, conforme mostrado no Quadro 2.

Optou-se por utilizar o Planejamento Fatorial Cruzado para abranger todas as possíveis combinações dos fatores e níveis estudados. O cálculo das interações e a determinação do número de corpos de prova necessários são apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7.

Tabela 5 - Níveis dos fatores para os ensaios de consistência e massa específica

Variáveis independentes	Níveis			
	0%	5%	10%	15%
Percentual de adição de resíduo do FGD	0%	5%	10%	15%
Relação água/ aglomerante	0,45		0,60	

Fonte: Elaborado pela autora.

Totalizando 16 amostras (4 x 2 x 2 repetições) para o ensaio de abatimento de tronco de cone (consistência), e, 16 repetições para o ensaio de massa específica.

Tabela 6 - Níveis dos fatores para os ensaios de Resistência à compressão axial e Resistência à tração por compressão diametral

Variáveis independentes	Níveis			
	0%	5%	10%	15%
Percentual de adição de resíduo do FGD	0%	5%	10%	15%
Relação água/ aglomerante	0,45		0,60	
Idade (dias)	7	28	56	91

Fonte: Elaborado pela autora.

Totalizando 128 corpos de prova (4 x 2 x 4 x 4 repetições) para o ensaio Resistência à compressão axial, e 128 corpos de prova para o ensaio de Resistência à tração por compressão diametral.

Tabela 7 - Níveis dos fatores para os ensaios de durabilidade

Variáveis independentes	Níveis			
	0%	5%	10%	15%
Percentual de adição de resíduo do FGD	0%	5%	10%	15%
Relação água/ aglomerante	0,45		0,60	
Idade (dias)	28		91	

Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: Conforme Programa Experimental, os ensaios de durabilidade são referentes à absorção de água por capilaridade, e determinação do índice de vazios.

Totalizando 48 corpos de prova (4 x 2 x 2 x 3 repetições) para o ensaio de Absorção por capilaridade, assim como para o ensaio de determinação do Índice de vazios.

As repetições foram determinadas de acordo com as normas NBR 5739 (ABNT, 2007), NBR 7222 (ABNT, 2011), NBR 9779 (ABNT, 2012) e NBR 9778 (ABNT, 2005), que dispõem sobre a normatização dos ensaios a serem realizados.

Assim, obteve-se um total de 352 corpos de prova cilíndricos (com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm) utilizados, produzidos conforme NBR 5738 (ABNT, 2015).

Para o ensaio de lixiviação de contaminantes nos concretos produzidos foram utilizados os corpos de prova obtidos no ensaio de Resistência à Tração, e para a análise microestrutural foram coletados pedaços aleatórios de concretos (pasta) obtidos após rompimento no ensaio de Resistência à Compressão Axial.

Os traços de concreto utilizados, e o número de corpos de prova de concreto necessários para a realização dos ensaios são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Traços utilizados na pesquisa e quantidade de corpos de prova necessários

Relação água/aglomerante(a/agl)	Teor de adição de FGD (%)	Tipo	Número de corpos de prova estimado
0,45	0%	REF	50
	5%	A5	50
	10%	A10	50
	15%	A15	50
0,60	0%	REF	50
	5%	A5	50
	10%	A10	50
	15%	A15	50
Total			400

Fonte: Elaborado pela autora.

Estes valores foram utilizados para estimar a quantidade de concreto necessária, apesar de serem utilizados apenas 49, arredondou-se para 50, o número de corpos de prova de forma a se evitar que faltasse concreto para qualquer um dos traços.

3.5 MATERIAIS

3.5.1 Resíduo do processo FGD

O resíduo utilizado nesta pesquisa é proveniente do processo de dessulfurização de gases da empresa *SunCoke Energy*, localizada no Complexo de Tubarão, no município de Serra/ES (Figura 19). A empresa é responsável pela produção do coque utilizado como matéria-prima pela ArcelorMittal para a produção do aço.

Figura 19 - Localização da área geradora do resíduo estudado

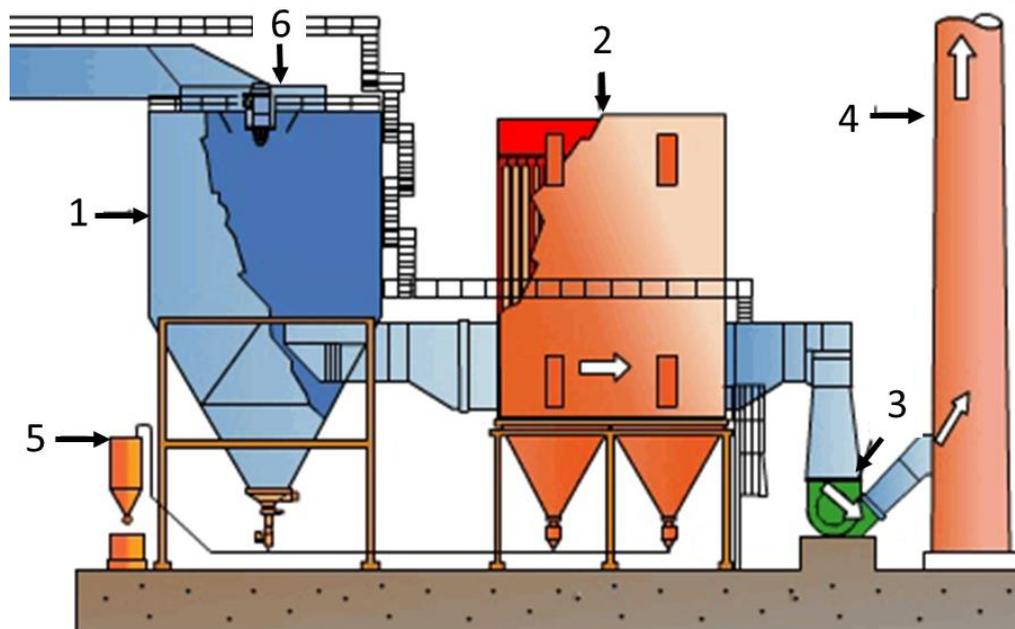


Fonte: Adaptado de Google Earth (2018).

O processo utilizado para a dessulfurização de gases na referida empresa é o semissecado, que utiliza uma solução de hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou cal hidratada, como reagente no processo, e promove a geração de subprodutos ($\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ e CaSO_4).

O esquema do processo utilizado é mostrado na Figura 20.

Figura 20 - Processo de FGD Semisseco



1. Reator FGD semisseco
2. Filtro de manga/Precipitador Eletrostático
3. Ventilador de exaustão
4. Chaminé
5. Silo para armazenamento do resíduo FGD
6. Atomizador

Fonte: Adaptado de ALSTON (2018).

Os efluentes atmosféricos do processo de queima do carvão mineral na coqueificação são exauridos para o reator FGD (1), onde ocorre a aspensão da solução de hidróxido de cálcio, por meio de atomizadores (6). Após contato do efluente atmosférico com a solução de hidróxido de cálcio são gerados os subprodutos $\text{CaSO}_3/\text{CaSO}_4$, sulfito e sulfato de cálcio, respectivamente, sendo que a geração destes compostos depende do teor de oxigênio disponível na queima do carvão mineral. Um maior teor de oxigênio corresponde a uma combustão completa, onde é gerado CaSO_4 , e um menor teor, a uma combustão incompleta, com geração de CaSO_3 . Também podem ser gerados produtos hidratados como $\text{CaSO}_3 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ (*Hannebachite*), $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ (*Bassanita*) e $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (*Gipsita*).

Estes compostos são capturados em filtros de manga (2) e armazenados para destinação (5), já o gás tratado (dessulfurizado), segue para exaustão nas chaminés (4), conforme esquema da Figura 21.

A Figura 21 mostra a área de dessulfurização de gases da *SunCoke*, de onde o resíduo foi retirado.

Figura 21 - Central de tratamento dos gases provenientes da coqueificação (Área da empresa *Suncoke* no Complexo de Tubarão)



Fonte: Adaptado de SUNCOKE ENERGY (2015).

3.5.1.1 Coleta e homogeneização do resíduo

Para desenvolvimento desta pesquisa o resíduo foi coletado da caçamba de armazenamento de resíduo FGD, na *SunCoke*, no Complexo de Tubarão, Serra/ES, no dia 05/06/2017, segundo procedimentos descritos na NBR 10.007 (ABNT, 2004). Os resíduos foram dispostos em sacos inertes, devidamente identificados (Figura 22) e transportados para o LEMAC – Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção, da UFES.

Após a chegada do resíduo no LEMAC, procedeu-se a homogeneização conforme estabelecido na NBR 10.007 (ABNT, 2004), com a disposição do resíduo de FGD em uma lona inerte para realização do quarteamento (Figuras 23 e 24).

Figura 22 - Sacos com o resíduo de FGD recebidos na UFES



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 23 - Homogeneização do resíduo



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 24 - Quarteamento do resíduo



No quarteamento, foi separada uma amostra representativa do resíduo para realização dos ensaios de caracterização, e para a produção dos concretos.

Os ensaios de caracterização do resíduo de FGD tiveram como objetivo determinar suas características físicas, químicas, mineralógicas, além da análise microestrutural visando fornecer subsídios para o uso deste resíduo como adição em concretos (Quadro 3).

As propriedades foram avaliadas de acordo com métodos usuais para adições minerais em concretos, além disso, devido ao fato da granulometria apresentada pelo resíduo ser muito fina, optou-se por adotar alguns métodos de ensaio utilizados na caracterização de cimentos.

Quadro 3 - Propriedades físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais avaliadas para o resíduo de FGD

Propriedades avaliadas		Método de ensaio
Características Físicas	Distribuição granulométrica	Granulômetro a laser MALVEN Mastersizer Hydro 2000MU (Ifes– Campus Vitória)
	Massa específica (g/cm ³)	NBR 16605 (ABNT, 2017)
	Massa unitária (g/cm ³)	NBR 12127 (ABNT, 2017)
	Finura #200 (%)	NBR 11579 (ABNT, 2012)
	Finura #325 (%)	NBR 15894-3 (ABNT, 2010)
	Superfície específica Blaine (cm ² /g)	NBR 16372 (ABNT, 2015)
Características Químicas	Composição química (FRX)	Análise semi-quantitativa por espectrometria de fluorescência de raios-x
	Perda ao fogo (%)	NBR NM 18 (ABNT, 2004)
	pH	4500 – HB (APHA, 2005)
	Umidade	2540 B (APHA, 2005)
	Matéria orgânica (%)	2540 E (APHA, 2005)
	Teor de cloretos totais (%)	4500-CI (APHA, 2005)
	Teor de sulfatos solúveis (%)	NBR NM 16 (ABNT, 2012)
	Classificação do resíduo	NBR 10004 (ABNT, 2004)
Características mineralógicas	Difração de raios-x	Difratômetro de raios-x BRUCKER D8 ADVANCE
Características microestruturais	MEV – Microscopia eletrônica de varredura	Microscópio eletrônico de varredura SHIMADZU SUPERSCAN SS-550

Fonte: Elaborado pela autora.

3.5.1.2 Características físicas

Para realização da análise granulométrica do resíduo foi utilizado um granulômetro a laser (Figura 25), cujas especificações mostradas no Quadro 3. Este tipo de análise foi definido tendo em vista que o resíduo se apresentava sobre um aspecto bastante fino, passando quase em sua totalidade na peneira de nº 200. O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), Campus Vitória.

Figura 25 - Ensaio de granulometria a laser



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Os outros ensaios físicos foram realizados no LEMAC – UFES.

A massa específica do resíduo foi determinada conforme procedimento descrito na NBR 16605 (ABNT, 2017), conforme mostrado nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 - Preparo do frasco
Le Chatelier



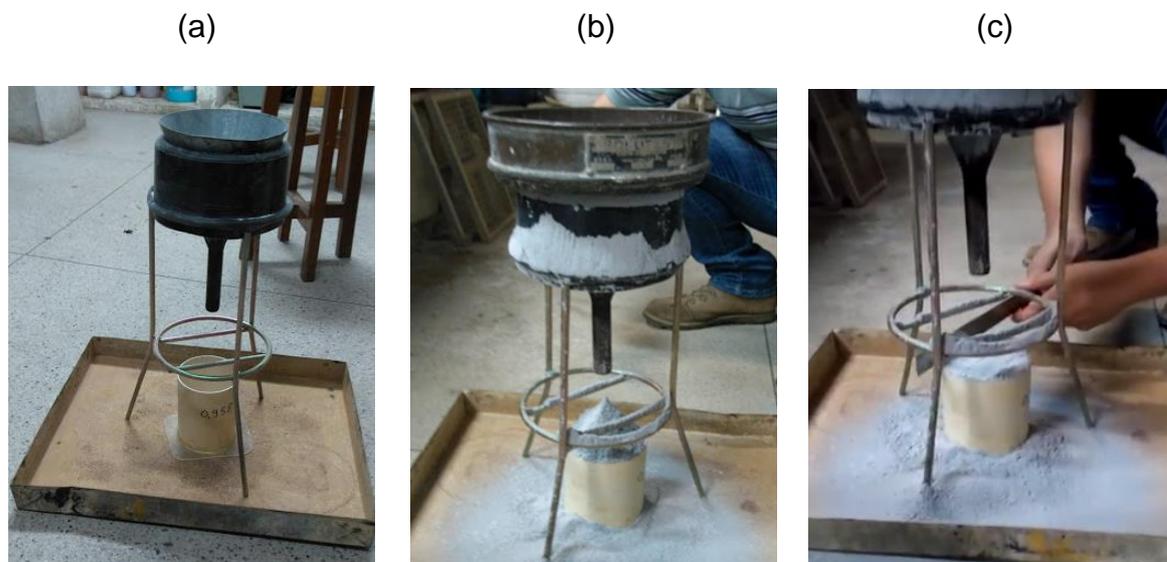
Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 27 - Execução do ensaio de
massa específica do resíduo



Já a massa unitária foi determinada conforme procedimento especificado na NBR 12127 (ABNT, 2017). A Figura 28 (a, b e c) mostra os procedimentos realizados neste ensaio.

Figura 28 - Determinação da massa unitária do resíduo do FGD



Fonte: Acervo pessoal da autora.

De forma a conhecer a finura do resíduo utilizou-se os procedimentos descritos nas normas NBR 11579 (ABNT, 2012) e NBR 15894-3 (ABNT, 2010), a primeira, utilizada na avaliação da finura do cimento, e a segunda, de metacaulim.

Para a determinação da finura na peneira #200, seguiu-se o procedimento citado na NBR 11579 (ABNT, 2012). O resíduo foi pesado e passado pela peneira #200, até que, a massa passante, em 1 minuto fosse inferior a 0,1% da massa inicial de resíduo colocada na peneira (Figura 29).

Figura 29 - Determinação da finura na peneira #200

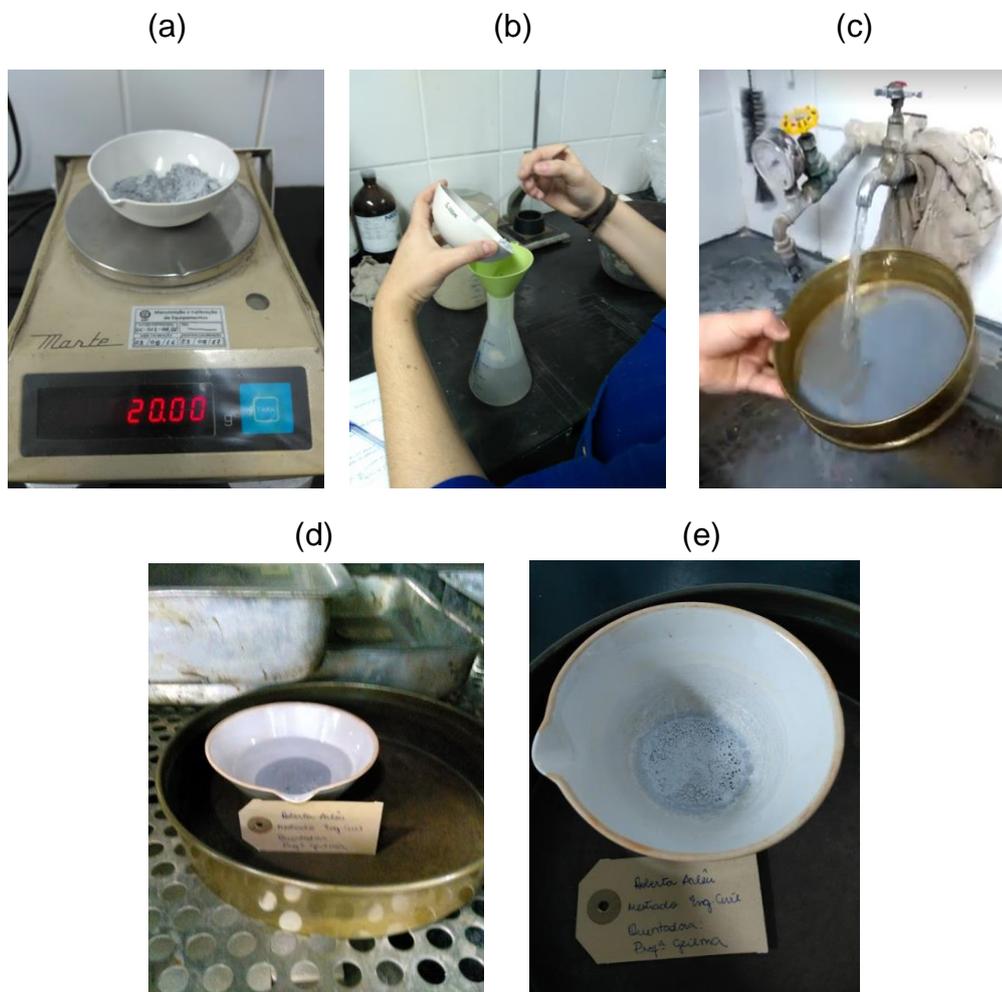


Fonte: Acervo pessoal da autora.

A determinação da finura na peneira #325 seguiu o especificado na NBR 15894 - parte 3 (ABNT, 2010). O resíduo foi misturado com hexametáfosfato de sódio, e passado

pela peneira #325, sobre água corrente, durante 10 minutos. O material retido foi seco em estufa a 103°C, pesado, e foi calculado o percentual de material retido na peneira #325. Os procedimentos realizados são mostrados na Figura 30 abaixo.

Figura 30 - Determinação da Finura na peneira #325



Fonte: Acervo pessoal da autora.

A superfície específica do resíduo foi determinada pelo método de Blaine – NBR 16372 (ABNT, 2015), com o auxílio do permeabilímetro de Blaine (Figura 31).

Figura 31 - Permeabilímetro de Blaine

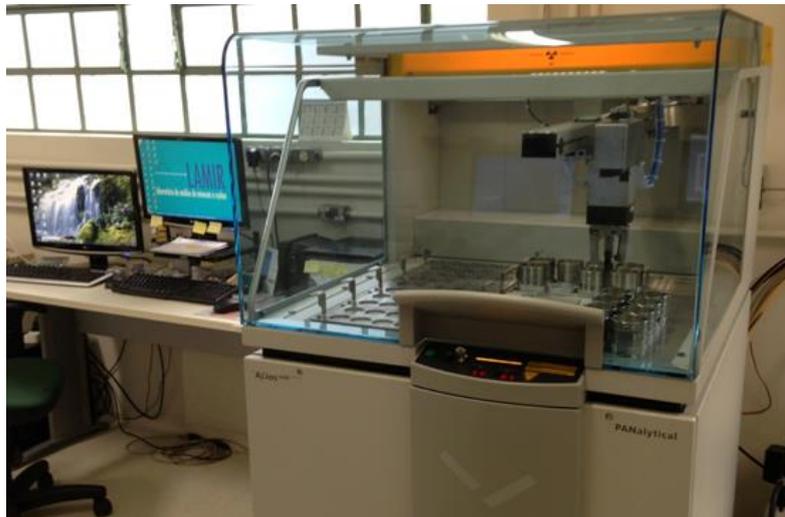


Fonte: Acervo pessoal da autora.

3.5.1.2 Características químicas

A composição química do resíduo foi determinada por meio da análise semi-quantitativa por espectrometria de fluorescência de raios-x, realizada pelo Laboratório de minerais e rochas (LAMIR), localizado na Universidade Federal do Paraná. Nessa técnica, a absorção dos raios emitidos pelo equipamento ocasiona a excitação dos átomos do material estudado que, por sua vez, produzem uma radiação conhecida por fluorescência. Essa radiação viabiliza a identificação de cada componente químico em função do comprimento de onda dos raios emitidos. Neste ensaio foi utilizado o equipamento de Fluorescência de Raios X Panalytical, modelo Axios Max: tubo Ródio 4 kv (Figura 32).

Figura 32 - Equipamento de fluorescência de raios-x utilizado



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Também foi realizado o ensaio de perda ao fogo, a 1000°C, importante propriedade a ser observada para aplicação do resíduo FGD como adição em cimentos. Isto porque uma perda ao fogo excessiva acarreta retração e porosidade durante a queima, o que prejudica a qualidade do cimento, sendo normatizados teores máximos e mínimos de perda ao fogo à 1000°C pela ABNT, de acordo com o tipo de cimento a ser produzido. A análise da perda ao fogo foi realizada conforme a NBR NM 18 (ABNT, 2012).

Os outros ensaios para caracterização química do resíduo foram realizados no LEMAC – UFES.

O pH do resíduo foi determinado seguindo-se o procedimento descrito no Standard Methods, método 4500 – HB (APHA. 2005), com auxílio do pHmetro marca KASVI modelo K39-1014B (Figura 33).

Figura 33 - Determinação do pH do resíduo do FGD



Fonte: Acervo pessoal da autora.

A determinação da umidade foi realizada seguindo o método 2540 B (APHA, 2005) e utilizando uma estufa (Quimis, modelo Q314M, de circulação forçada), devidamente calibrada.

O teor de matéria orgânica foi estimado segundo o método 2540 E (APHA, 2005), após a secagem (a 103°) em estufa durante 24h. Neste ensaio faz-se o uso de um forno tipo Mufla (Linn High Therm, modelo KK 170), devidamente calibrada, no qual a amostra é submetida a 550°C durante 1 hora, o percentual de sólidos voláteis é calculado pela diferença de massa no início e fim do ensaio.

Dal Molin *et al.* (2016) citam que na avaliação do potencial de um resíduo ser utilizado como uma adição em matrizes cimentícias devem ser realizados ensaios que busquem a identificação de potenciais compostos deletérios, como óxidos de cálcio e magnésio (livres), álcalis, dióxido de silício, íons cloreto, óxido de zinco e ferro, além de trióxido de enxofre.

Como o resíduo estudado era proveniente de um sistema de dessulfurização de gases oriundos da queima do carvão, era esperado que o mesmo contivesse óxidos de enxofre e cloretos em sua composição. Assim, foi realizada a quantificação do teor de sulfatos presentes no resíduo, utilizando a metodologia determinada pela NBR NM 16 (ABNT, 2012), e de íons cloreto, utilizando o método 4500 Cl (APHA, 2005).

A classificação do resíduo foi realizada segundo procedimento descrito na NBR 10004 (ABNT, 2004), utilizando os ensaios de lixiviação e solubilização do resíduo, descritos nas normas NBR 10005 e NBR 10006 (ABNT, 2004).

Os procedimentos adotados para o ensaio de lixiviação foram referentes a resíduos inorgânicos, com teor de sólidos igual a 100% e pH >5. Para execução do ensaio foram adicionadas 100 g de resíduo (com granulometria inferior a 9,5 mm), em 2 litros de solução de extração (para pH >5) em um recipiente vedado (Figura 34a), que foi levado a agitação em um agitador rotatório por 18 h (Figura 34b). Após este período, a solução foi filtrada em de fibra de vidro isento de resinas e com porosidade de 0,6 μm a 0,8 μm (Figura 35).

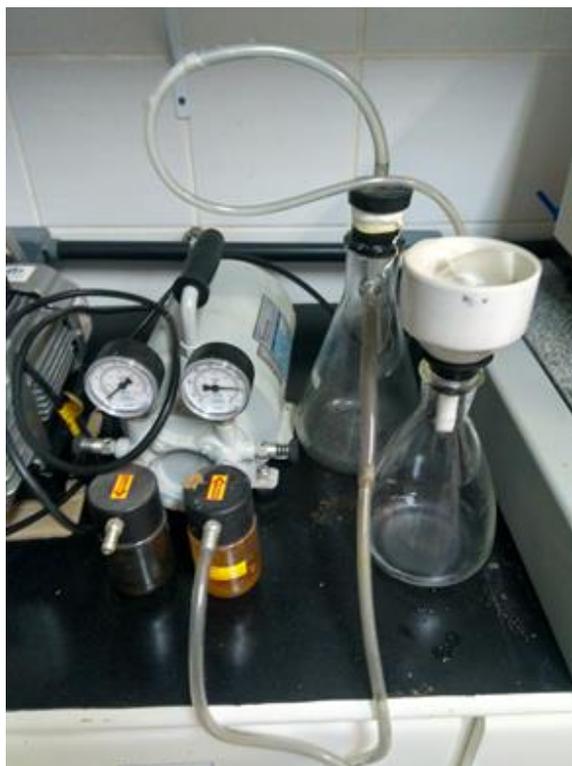
O experimento foi realizado em triplicata. Também foi realizado um tratamento em “branco”, contendo apenas a solução de extração, para comparação dos resultados.

Figura 34 - Ensaio de lixiviação do resíduo FGD



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 35 - Obtenção do extrato lixiviado



Fonte: Acervo pessoal da autora.

O filtrado foi denominado extrato lixiviado e analisado em laboratório, por meio da técnica de Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS). Os parâmetros analisados foram: Arsênio, Cádmio, Cromo, Mercúrio, Chumbo e Selênio.

Após a realização do ensaio de lixiviação do resíduo, partiu-se para a execução do ensaio de solubilização, conforme NBR 10006 (ABNT, 2004). Foram pesadas 250 g de resíduo e colocadas em um recipiente com 1 litro de água ultrapura (Figura 36). O recipiente foi vedado e deixado em repouso por 7 dias, em uma temperatura ambiente de 23°C.

O ensaio de solubilização foi realizado em triplicata e também foi obtido um branco para análise, composto de água ultrapura. Após o período de ensaio efetuou-se a filtração das amostras seguindo a mesma metodologia descrita para a lixiviação, o extrato solubilizado filtrado foi encaminhado para análise laboratorial, por meio da técnica de Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS). Os parâmetros analisados foram: Arsênio, Cádmio, Cobre, Chumbo, Cromo, Manganês, Mercúrio, Selênio e Zinco.

Figura 36 - Ensaio de solubilização do resíduo e recipientes utilizados para coleta do extrato solubilizado



Fonte: Acervo pessoal da autora.

3.5.1.3 Características mineralógicas

Para conhecer as características mineralógicas do resíduo, além de sua estrutura, realizou-se a análise de difração de raios-x. Esta caracterização foi realizada no Laboratório de raios-x, do Labpetro, na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). O equipamento utilizado foi o Difratorômetro de raios-x BRUCKER D8 ADVANCE (Figura 37).

Figura 37- Difratorômetro de raios-x utilizado nesta pesquisa



Fonte: Acervo pessoal da autora.

3.5.1.4 Características microestruturais

A análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada em um Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV Shimadzu modelo Superscan SS-550 (Figuras 38a e 38b), no Laboratório de Plasma Térmico da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Esta caracterização teve como objetivo conhecer a distribuição das partículas microscopicamente, buscando visualizar seu estado de agregação, além dos tipos de partículas existentes, para comparação com a literatura sobre o resíduo estudado.

Também foi realizada a análise composicional das imagens adquiridas, a partir das amostras produzidas. Para tanto, foi utilizado o detector de EDS (Energy dispersive x-ray spectroscopy) acoplado ao microscópio eletrônico de varredura.

Figura 38 - MEV utilizado nesta pesquisa

(a)



(b)



Fonte: Acervo pessoal da autora.

3.5.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi uma areia branca quartzosa natural, extraída de jazida. A areia foi submetida à secagem em temperatura ambiente e peneiramento para retirada de impurezas. Os ensaios de caracterização da areia foram realizados no LEMAC - UFES, seguindo as recomendações normativas brasileiras, como pode ser observado no Tabela 9. Como conclusão, verificou-se que a areia analisada estava de acordo com os requisitos para uso de agregados em concretos.

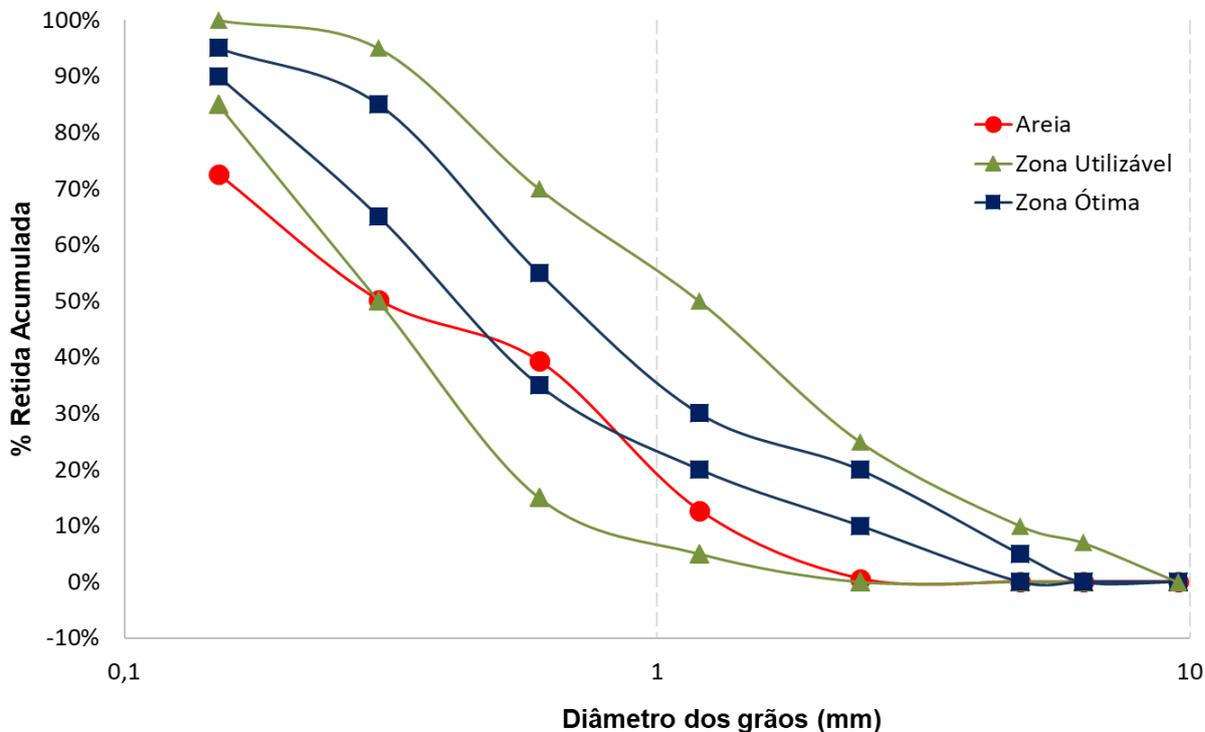
Tabela 9 - Propriedades avaliadas para o agregado miúdo

Propriedades	Normas	Resultado
Distribuição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	Figura 39
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	1,75
Dimensão Máxima Característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,40
Massa Específica (g/cm ³)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,49
Massa Unitária (g/cm ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,73
Volume de vazios (%)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	30,3
Matéria Orgânica	NBR NM 49 (ABNT, 2001)	Mais escura
Material Pulverulento (%)	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	6,88
Teor de Argila e Materiais Friáveis (%)	NBR 7218 (ABNT, 2010)	0,37

Fonte: Elaborado pela autora.

A curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo é apresentada na Figura 39.

Figura 39 - Distribuição granulométrica da areia utilizada na pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora.

O teor de matéria orgânica foi determinado seguindo a NBR NM 49 (ABNT, 2001), no qual, comparando a cor da solução obtida para a areia estudada com a da solução

padrão, ambas preparadas conforme descrito na norma (Figura 40b). Como resultado verifica-se que apesar do teor de matéria orgânica ter sido elevado, Neville (2015) aponta que isso não significa que o agregado não possa ser utilizado em concretos, devendo verificar se essa matéria orgânica é prejudicial ao concreto, por meio de ensaios mecânicos. Ressalta-se que o agregado miúdo utilizado neste trabalho foi o mesmo utilizado no trabalho experimental de Degen (2017), que produziu concretos de alta resistência com a incorporação de resíduo de rochas ornamentais tratado termicamente, e não verificou prejuízos no desempenho mecânico dos concretos.

Figura 40 - Avaliação do teor de matéria orgânica na areia



Fonte: Acervo pessoal da autora.

3.5.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi do tipo brita 1, proveniente da britagem de rochas naturais de origem granítica, atendendo as características da NBR 7211 - Agregados para concreto – Especificações (ABNT, 2009). O agregado graúdo foi coletado na pedreira de origem, lavado e seco ao ar (Figura 41), armazenado e posteriormente ensaiado no LEMAC - UFES, de acordo com as normas brasileiras descritas na Tabela 10. Após os ensaios foi verificado que a brita avaliada estava de acordo com as normas para uso de agregados graúdos em concretos.

Figura 41 - Lavagem e secagem da brita utilizada no experimento



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Tabela 10 - Propriedades avaliadas para o agregado graúdo

Propriedades	Normas	Resultado
Análise granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	Figura 44
Dimensão Máxima Característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	19
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	1,95
Massa Específica (g/cm ³)	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,883
Absorção de água (%)	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	0,525
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,600

Fonte: Elaborado pela autora.

A análise granulométrica foi realizada considerando as peneiras da série normal e intermediária, conforme determinado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003, conforme visto nas Figuras 42 e 43.

Figura 42 - Peneiramento da brita



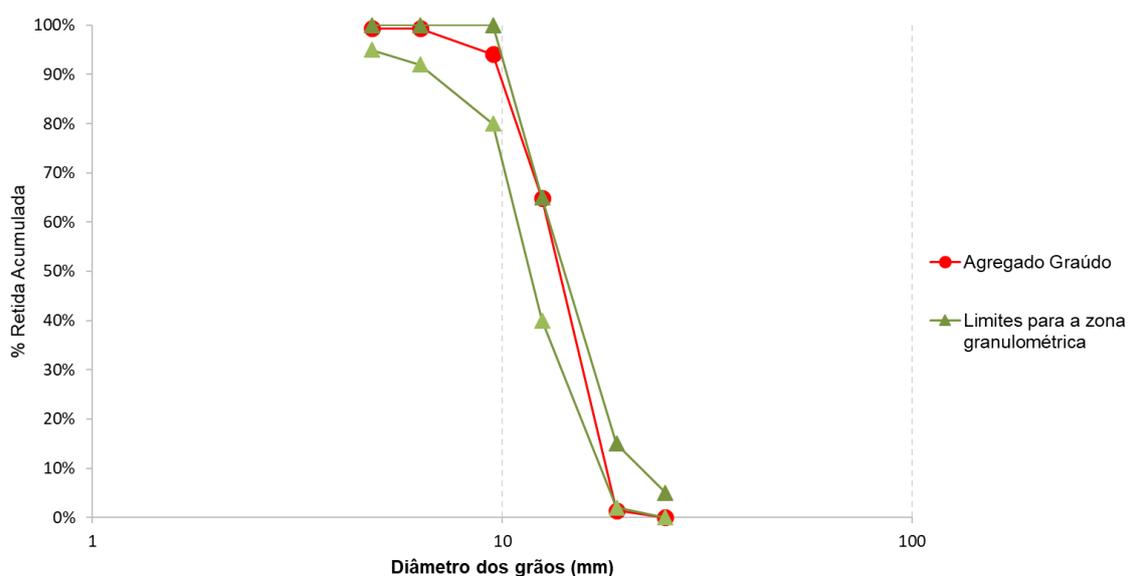
Figura 43 - Pesagem do material retido



Fonte: Acervo pessoal da autora.

A dimensão máxima característica e o módulo de finura foram determinados a partir da análise granulométrica conforme NBR 248 (ABNT, 2003). A partir da análise granulométrica pode-se obter a curva granulométrica da brita 1 avaliada (Figura 44).

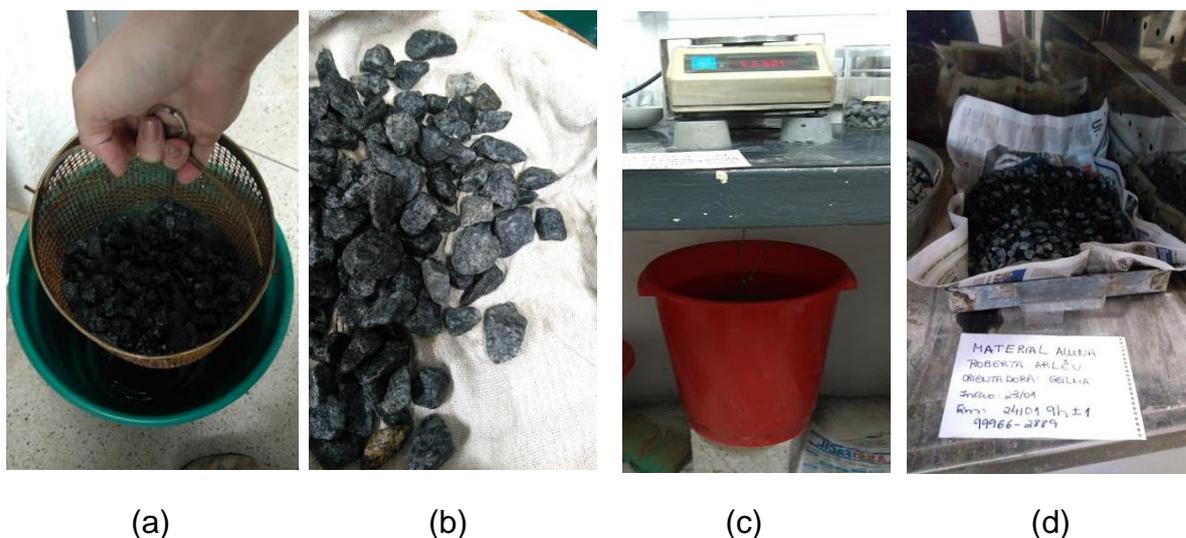
Figura 44 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo utilizado na pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora.

Para cálculo da massa específica e da absorção de água, procedeu-se o disposto na NBR NM 53 (ABNT, 2009), conforme visto na Figura 45 (a, b, c e d).

Figura 45 - Determinação da massa específica e da absorção de água



Fonte: Acervo pessoal da autora.

3.5.4 Cimento

Para realização da pesquisa foi utilizado o Cimento Portland de alta resistência inicial (CP VARI), que é um cimento constituído de 95 a 100% de clínquer e sulfatos de cálcio e de 0 a 5% de material carbonático, conforme NBR 5733 (ABNT, 1991). Esta escolha foi devido ao fato deste tipo de cimento possuir uma quantidade de adições inferior à observada em outros cimentos Portland, o que minimiza possíveis efeitos combinados que poderiam mascarar os resultados obtidos.

O cimento foi recebido no LEMAC, armazenado em um *pallet* e coberto com lona, de forma a evitar absorção de umidade até a produção dos concretos.

O cimento foi caracterizado seguindo as normas presentes na Tabela 11, de forma a verificar os requisitos estabelecidos pela NBR 5733 (ABNT, 1991).

Tabela 11 - Propriedades avaliadas para o cimento utilizado na pesquisa (CPV - ARI)

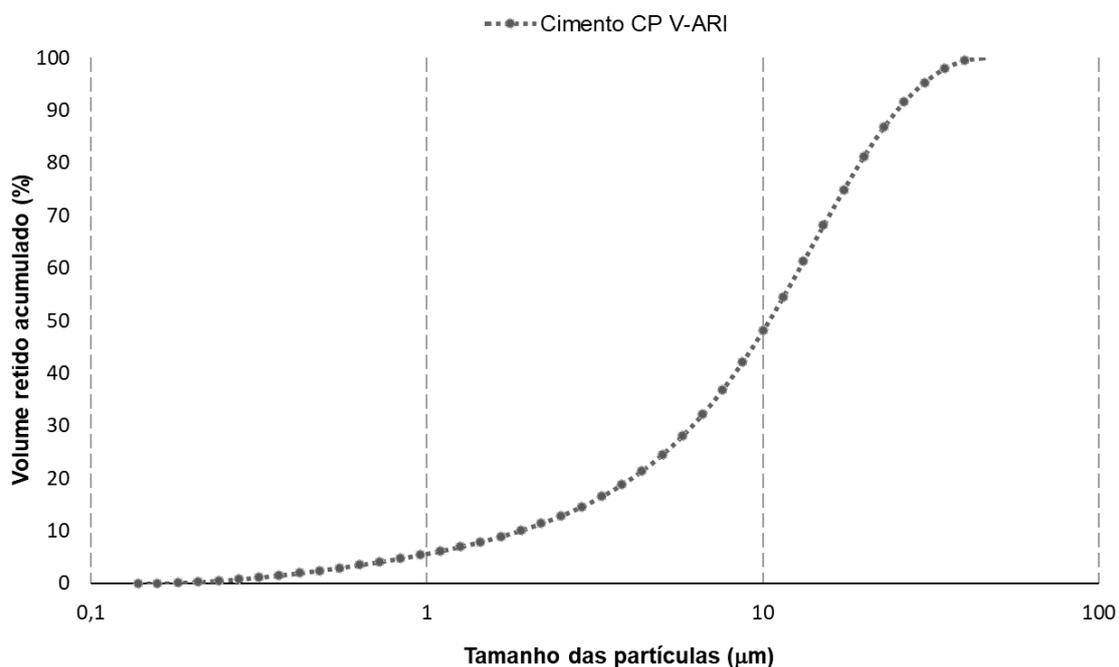
Propriedades		Método de ensaio	Limites NBR 5733 (ABNT, 1991)	Resultado
Massa específica (g/cm ³)		NBR NM 23 (ABNT, 2001)	N.E.	3,09
Finura	Material retido na peneira#400 (%)	Controle LafargeHolcim	N.E.	2,2
	Área específica Blaine (cm ² /g)	NBR NM 76 (ABNT, 1996)	>3000	4751
Tempo de pega	Início de pega (min)	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	≥60	135
	Fim de pega (min)		≤600	190
Resistência à compressão	1 dia (MPa)		≥14	28,4
	3 dias (MPa)	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥24	41,2
	7 dias (MPa)		≥34	46,4
	28 dias (MPa)		N.E.	54,4
Composição Química (%)	CaO		N.E.	63,69
	SiO ₂		N.E.	19,42
	Al ₂ O ₃		N.E.	4,87
	SO ₃	NBR 14656 (ABNT, 2001)	≤4,5	3,02
	Fe ₂ O ₃		N.E.	2,93
	MgO		N.E.	0,86
	K ₂ O		N.E.	0,8
	CO ₂	NBR NM 20 (ABNT, 2012)	≤3,5	2,49
	R.I.	NBR NM 15 (ABNT, 2012)	≤1,0	0,92
	C ₃ A (Teórico)	Equação de Bogue	N.E.	7,74
Perda ao fogo 1000°C (%)		NBR NM 18 (ABNT, 2012)	≤4,5	3,39

Fonte: Acervo pessoal da autora.

Ressalta-se que após o início da pesquisa a NBR 5733 (ABNT, 1991) foi substituída pela NBR 16697 (ABNT, 2018), não sendo possível a utilização desta última na realização dos ensaios referentes ao cimento.

Com relação à análise granulométrica do cimento, a mesma pode ser verificada na Figura 46.

Figura 46 - Distribuição granulométrica do cimento CP V-ARI utilizado nesta pesquisa



Fonte: Acervo pessoal da autora.

3.5.5 Água

A água utilizada na pesquisa foi proveniente da concessionária de água do município de Vitória/ES, a CESAN (Companhia Espírito Santense de Saneamento). Não foram realizados ensaios para caracterização desta água, uma vez que a NBR 15900-1 (ABNT, 2009) dispensa a realização de ensaios quando a água utilizada para produção do concreto for proveniente de concessionária, como é o caso.

3.6 MÉTODOS

A seguir serão descritos os métodos utilizados para a produção dos concretos desta pesquisa, e para avaliação de suas propriedades no estado fresco e endurecido.

Todas as etapas que constituíram a produção dos concretos, moldagens dos corpos de prova e os ensaios em concreto fresco e endurecido contidos neste programa experimental foram realizados no LEMAC - UFES.

3.6.1 Dosagem dos concretos

Para determinar os traços de concreto utilizados neste estudo foi aplicado o método IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992). O método relaciona resistência à compressão, relação água/ cimento, traço e consumo de cimento em um diagrama de dosagem que segue três leis de comportamento, as Equações 12, 13 e 14, Lei de Abrams, Lei de Lyse e Lei de Molinari, respectivamente.

$$f_{cj} = k_1 k_2 (a/c) \quad (\text{Equação 12})$$

$$m = k_3 + k_4 a/c \quad (\text{Equação 13})$$

$$C = 1000 k_5 + k_6 m \quad (\text{Equação 14})$$

Onde:

f_{cj} = resistência à compressão axial à idade j , em MPa;

a/c = relação água /cimento, em kg/kg;

m = relação agregados secos/ cimento em massa, em kg/kg;

C = consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m³;

k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 e k_6 = constantes que dependem dos materiais (cimento, agregados, aditivos, entre outros).

Conforme exposto por Helene e Terzian (1992), o Diagrama de Dosagem é válido somente para concretos que utilizam o mesmo tipo e classe de cimento e adições minerais, mesmos agregados, equipamentos e materiais, de forma a manter todas as variabilidades sobre controle. Com esse diagrama, é possível obter vários concretos

com propriedades bem distintas quando endurecido, mas que são pertencentes sempre a uma mesma “família”.

Para construção do Diagrama de Dosagem são necessários três pontos, ou seja, três traços distintos de concreto - um rico em cimento, um pobre e um intermediário. Neste método, o estudo é iniciado com o traço intermediário, no qual é utilizada a proporção de 1 : 5,0, em massa, de cimento e agregados secos totais. Para cálculo da quantidade de materiais necessária é fixada uma massa de agregado graúdo, e um teor de argamassa, e pelas relações mostradas nas Equações 15 e 16, abaixo, chega-se aos outros valores.

$$\alpha = \frac{1+a}{1+m} \quad (\text{Equação 15})$$

$$C = \frac{\gamma}{1+a+p+\frac{a}{c}} \quad (\text{Equação 16})$$

Onde:

α = Teor de argamassa (%);

a/c = relação água/cimento em massa (kg/kg);

a = relação agregado miúdo seco/cimento em massa (kg/kg);

p = relação agregado graúdo seco/cimento em massa (kg/kg);

$m = a + p$ = relação agregados secos/cimento em massa (kg/kg);

C = consumo de cimento por m^3 de concreto adensado em kg/m^3 ;

γ = massa específica do concreto, medida em kg/m^3 .

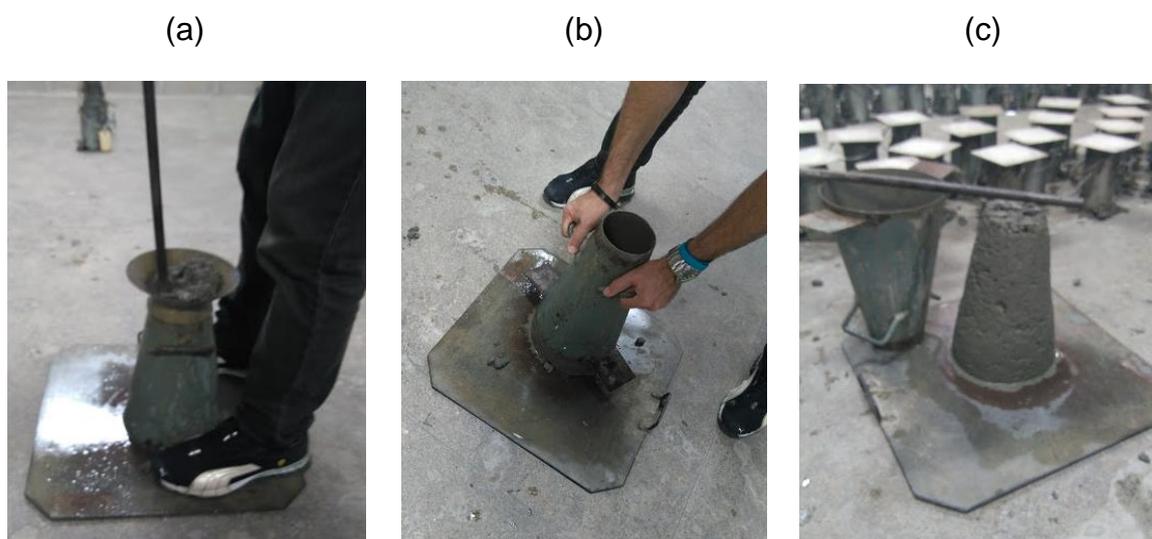
O teor de argamassa ideal é aquele que possibilita um abatimento desejado pelo ensaio de abatimento de tronco de cone – NBR NM 67 (ABNT, 1998). Desta forma, se o teor de argamassa utilizado não promover o abatimento desejado, deve-se aumentar a quantidade de materiais, utilizando um novo teor de argamassa.

Antes de iniciar o preparo do concreto, com os materiais selecionados, é necessária a imprimação da betoneira, ou seja, o espalhamento dos materiais (areia, água e cimento) na superfície interna do equipamento para que não ocorra perda de materiais do traço em questão. O excesso de material de imprimação é descartado.

Após a imprimação é realizado o teste com o teor de argamassa estipulado. Conforme experiência do LEMAC – UFES na execução da dosagem, partiu-se de um teor de argamassa de 52% para determinar o traço intermediário.

Porém, como o teor de 52% não foi suficiente para atingir o abatimento requerido (80mm±10mm), aumentou-se a quantidade de materiais, até chegar em um teor de 53%, que foi considerado adequado, de acordo com o abatimento Figura 47 (a, b e c) e Tabela 12.

Figura 47 - Ensaio de abatimento de tronco de cone



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Tabela 12 - Determinação do teor ideal de argamassa para o traço intermediário

Teor de argamassa (%)	Traço unitário (1 : a : p)			Brita (kg)	Cimento (kg)		Areia (kg)		Água (kg)		Relação a/agl
	c	a	P		Total	Adc.	Total	Adc.	Total	Adc.	
					52	1	2,12	2,88	13,89	0,30	
53	1	2,18	2,82	4,0	14,18	-	30,92	-	6,83	-	

Fonte: Elaborado pela autora.

*Nota: Adc. = Adição; c = cimento; a = massa de areia no traço; p = massa de brita no traço.

Com o teor de argamassa ideal, partiu-se a calcular os traços a serem utilizados na elaboração do diagrama de dosagem (Tabela 13).

Tabela 13 - Determinação dos traços para elaboração do Diagrama de Dosagem

TRAÇO UNITÁRIO ($\alpha = 53\%$)				BRITA (kg)	CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	ÁGUA (kg)	RELAÇÃO a/agl	CONSUMO DE CIMENTO (kg/m ³)
m	(1 : a : p)								
	c	a	p						
3,5	1	1,39	2,12		18,913	26,194	7,155	0,38	498,762
5	1	2,18	2,82	40	14,184	30,922	6,825	0,48	369,518
6,5	1	2,98	3,53		11,348	33,759	6,675	0,59	296,097

Fonte: Elaborado pela autora.

*Nota: Adc. = Adição; c = cimento; a = massa de areia no traço; p = massa de brita no traço; m = massa de materiais secos = a + p.

Em seguida, foram preparados os concretos e moldados 6 corpos de prova para cada traço, a fim de se determinar a resistência à compressão axial aos 28 dias, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018).

Os corpos de prova utilizados foram do tipo cilíndrico (10 cm de diâmetro e 20 cm de altura) (Figura 48), e a moldagem ocorreu conforme disposto na NBR 5738 (ABNT, 2015).

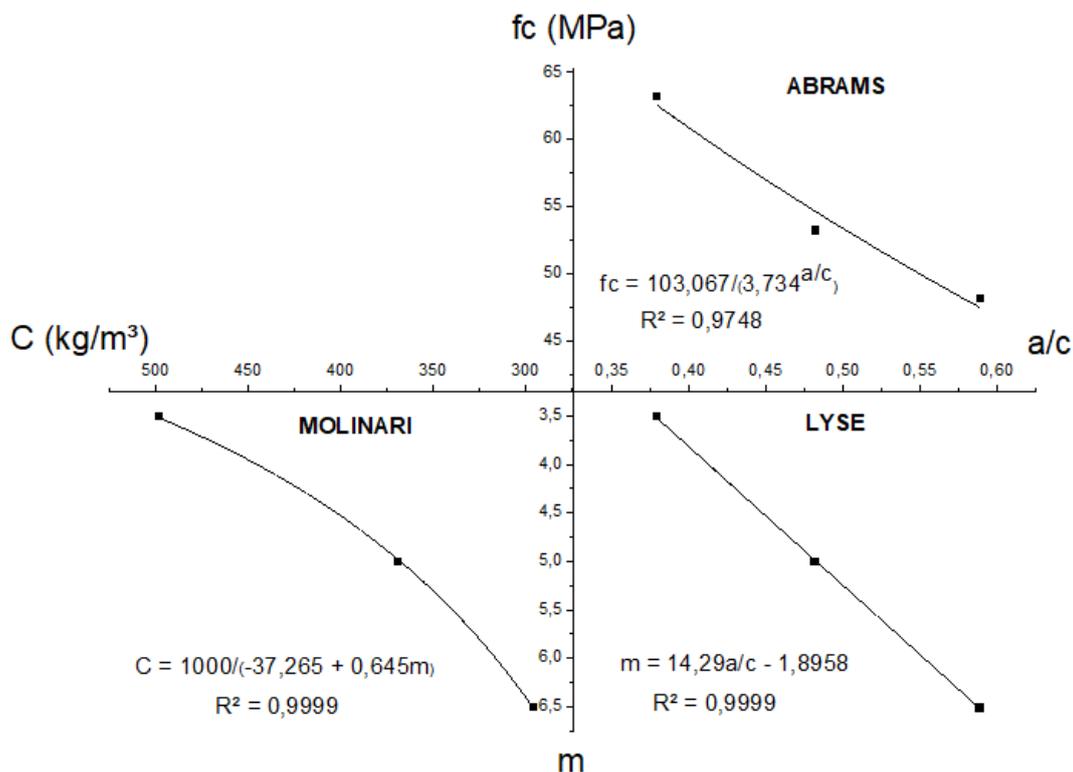
Figura 48 - Moldagem dos corpos de prova utilizados



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Após a obtenção dos três traços para o concreto estudado, e da resistência a compressão axial aos 28 dias, partiu-se para a elaboração do Diagrama de Dosagem (Figura 49), que exhibe de forma prática o comportamento do concreto produzido com cimento Portland CP V, agregados e água, nas condições deste estudo, para o abatimento de $80 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$.

Figura 49 - Diagrama de Dosagem da família de concretos utilizada nesta pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora.

Com a montagem do diagrama de dosagem definiu-se os traços unitários e a quantidade de material a ser utilizada para cada percentual de adição além das relações de água/aglomerante previstas, como exibido na Tabela 14. É importante ressaltar que o FGD mostrou solubilidade em água e capacidade parcial de aglomerante após testes realizados, o que foi confirmado com a análise de difração de raios-x, que indicou a presença de gipsita na composição do resíduo. Por este motivo, utilizou-se a relação água/aglomerante, em vez de água/cimento, considerando-se como aglomerante a mistura de cimento e resíduo do FGD.

Tabela 14 - Traços utilizados na confecção dos concretos utilizados nesta pesquisa

Traço	Cimento	Areia	Brita	FGD	Relação a/agl	Consumo de cimento real (kg/m ³)
REFERÊNCIA						
REF 0,45	1	1,915	2,585	0,000	0,45	448,336
REF 0,60	1	3,081	3,619	0,000	0,60	319,340
5% FGD						
A5 0,45	1	1,915	2,585	0,050	0,45	426,383
A5 0,6	1	3,081	3,619	0,050	0,60	300,292
10% FGD						
A10 0,45	1	1,915	2,585	0,100	0,45	433,208
A10 0,6	1	3,081	3,619	0,100	0,60	312,465
15% FGD						
A15 0,45	1	1,915	2,585	0,150	0,45	425,817
A15 0,6	1	3,081	3,619	0,150	0,60	308,761

Fonte: Elaborado pela autora.

É importante observar que todos os teores de adição de FGD proporcionaram uma diminuição no consumo de cimento, sendo esta mais acentuada para os teores de 5% e 15%. Isto contribui para a sustentabilidade do uso deste resíduo em concretos, uma vez que pode ser possibilitado um menor impacto ambiental, pela redução do consumo de cimento.

3.6.2 Propriedades dos concretos no estado fresco

As propriedades dos concretos no estado fresco foram avaliadas no LEMAC – UFES. Após imprimação da betoneira, e pesagem dos materiais de acordo com o traço utilizado (Tabela 14), os mesmos foram colocados na betoneira, para a realização da

concretagem, seguindo-se a ordem: brita, água, cimento (e resíduo FGD quando utilizado), água, areia, e mais água. Ressalta-se que o cimento foi misturado ao FGD nos traços que continham adição do resíduo.

A Figura 50a mostra as padiolas utilizadas para armazenamento dos materiais, e a Figura 50b apresenta a betoneira utilizada para produção dos concretos.

Figura 50 - Materiais e betoneira utilizados nas concretagens

(a)

(b)



Fonte: Elaborado pela autora.

3.6.2.1 Índice de consistência

Para avaliar consistência dos concretos no estado fresco realizou-se o ensaio de abatimento de tronco de cone, conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998). Foi especificado o abatimento de 80 ± 10 mm para que a mistura tivesse trabalhabilidade adequada para a moldagem dos corpos de prova cilíndricos. O ensaio foi executado pelo mesmo operador para todas as famílias de concreto produzidas, conforme já mostrado na Figura 47, apresentada na seção 3.6.1.

3.6.2.2 Massa específica

A massa específica é definida por Mehta e Monteiro (2008) como massa do material por unidade de volume, incluindo os poros internos. Para o registro da massa específica dos concretos em seu estado fresco procedeu-se a moldagem de dois corpos de prova, conforme NBR 5738 (ABNT, 2015), para cada tipo de concreto estudado.

Foram escolhidas duas fôrmas metálicas cilíndricas, de volumes e pesos conhecidos, que, depois de preenchidas com concreto, foram novamente pesadas, conforme NBR 9833 (ABNT, 2009).

Para cálculo da massa específica foi utilizada a Equação 17, descrita na NBR 9833 (ABNT, 2009), onde:

$$\gamma_c = (M_{forma+concreto} - M_{forma}) / V_{forma} \quad (\text{Equação 17})$$

Onde:

γ_c = massa específica do concreto fresco;

$M_{forma+concreto}$ = massa da forma preenchida com concreto,

M_{forma} = massa da forma;

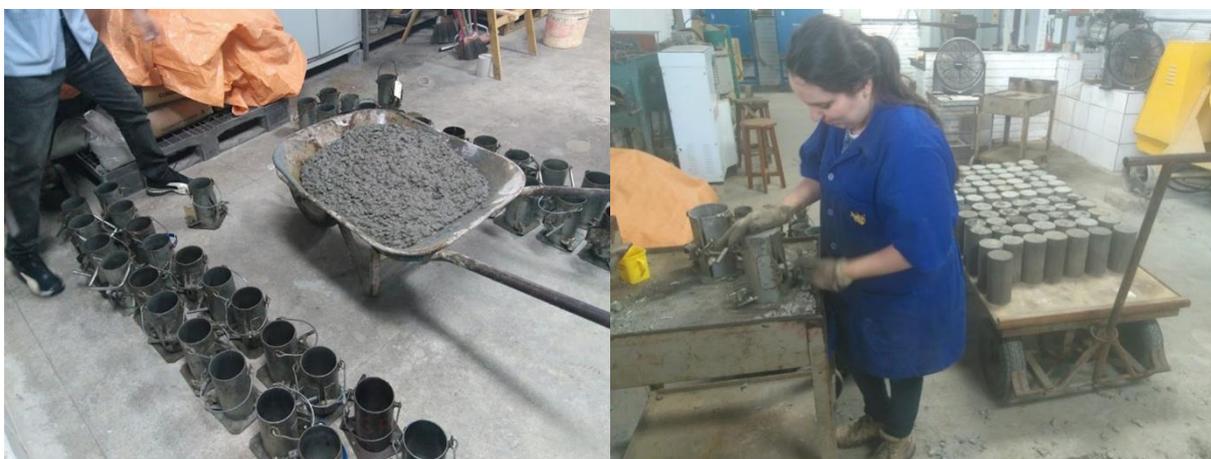
V_{forma} = volume da forma.

3.6.3 Propriedades dos concretos no estado endurecido

Para avaliação das propriedades do concreto em estado endurecido foi necessária a moldagem de 352 corpos de prova, sendo 44 para cada traço, conforme mostrado no Quadro 4.

A Figura 51 mostra com detalhe a moldagem dos corpos de prova, realizada conforme NBR 5738 (ABNT, 2015). Depois de 24h da moldagem, os corpos de prova foram desformados e levados para cura em uma câmara úmida, onde permaneceram submersos em uma solução de água saturada em cal até atingirem as idades a serem ensaiados.

Figura 51 - Moldagem dos corpos de prova e realização do procedimento de desforma



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Quadro 4 - Número de corpos de prova e idades ensaiadas para cada traço

Ensaio	Idade do concreto	Nº de Corpos de prova	Total de Corpos de prova
Resistência à compressão axial	7, 28, 56 e 91 dias	4 CP por idade	16
Resistência à tração por compressão diametral	7, 28, 56 e 91 dias	4 CP por idade	16
Absorção de água por capilaridade		3 CP por idade	6
Absorção de água por imersão e volume de vazios	28 e 91 dias	3 CP por idade	6
Avaliação de cloretos livres pelo método colorimétrico	28, 56 e 91 dias	Foram utilizados os CP do ensaio à tração por compressão diametral	-
Avaliação da lixiviação de contaminantes	120 dias		-
Avaliação do teor cloretos livres	7, 28, 56 e 91 dias	Foram utilizados pedaços dos CP rompidos no ensaio de compressão axial	-
Avaliação do teor de sulfatos			-
Avaliação da microestrutura (MEV)	7, 28 e 91 dias		

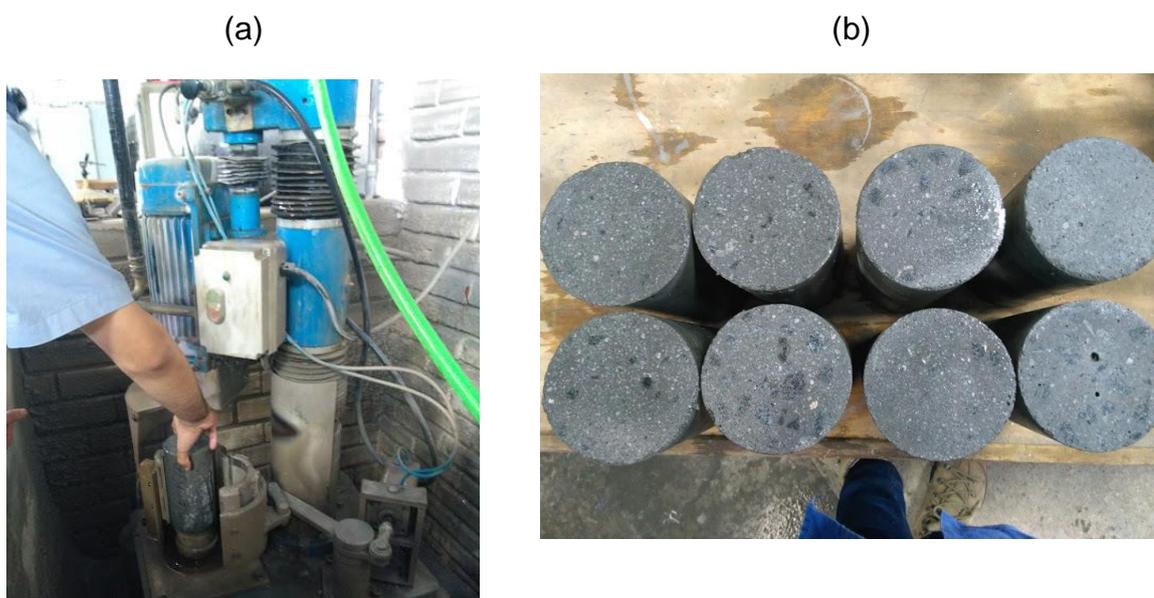
Fonte: Elaborado pela autora.

3.6.3.1 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado para determinar a carga máxima de ruptura suportada pelos corpos de prova de concreto. Foi executado conforme a norma NBR 5739 (ABNT, 2018), para as idades de 7, 28, 56 e 91 dias, como apresentado no Quadro 4. Foram ensaiados 4 corpos de prova, por traço e por idade, visando garantir a confiabilidade estatística, conforme planejamento experimental.

Antes do ensaio, os corpos de prova eram retificados nas partes superior e inferior para que a distribuição da força aplicada fosse uniforme na área transversal do mesmo e duas medidas de diâmetro (Figura 52), por CP, eram tomadas com auxílio do paquímetro (Figura 53).

Figura 52 - Retífica dos corpos de prova



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 53 - Medição dos diâmetros superior e inferior dos corpos de prova



Fonte: Acervo pessoal da autora.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em uma prensa (Figura 54a), devidamente calibrada. Os corpos de prova a serem ensaiados eram posicionados de forma centralizada na prensa, conforme determinado na NBR 5739 (ABNT, 2018) (Figura 54b).

Figura 54 - Prensa utilizada para realização do ensaio de Resistência à compressão

(a)

(b)



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Com a realização do ensaio era obtido o valor da força axial aplicada necessária para romper o corpo de prova, em kgf. Para análise dos resultados, procedeu-se a transformação de unidades, conforme descrito na NBR 5739 (ABNT, 2018), e a força foi convertida em tensão (σ) e expressa em MPa (Equação 18).

$$f_c = \left(\frac{4 F}{\pi * D^2} \right) * 0,1018 \quad (\text{Equação 18})$$

f_c = resistência à compressão, em MPa;

F = força máxima alcançada, em kgf;

D = Diâmetro do corpo de prova, em mm.

3.6.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

Para determinação da resistência à tração dos concretos foi utilizada a metodologia da NBR 7222 (ABNT, 2011), que descreve o método de determinação da resistência à tração por compressão diametral. Este é um método indireto para determinação da tração do concreto, descrito por Carneiro (1943), onde a aplicação de duas forças de compressão concentradas e diametralmente opostas, em um cilindro, gera, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a este diâmetro (Figura 55).

Figura 55 - Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Acervo pessoal da autora.

O ensaio de Resistência à tração por compressão diametral, neste trabalho, foi realizado na mesma prensa utilizada para o ensaio de Resistência à Compressão axial (Figura 55), sendo executado, também, para as idades de 7, 28, 56 e 91 dias, e utilizando 4 corpos de prova, por traço e por idade (conforme Quadro 4).

Antes dos corpos de prova serem ensaiados, os diâmetros superior e inferior, e seu comprimento eram medidos, para cálculo da tração, segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011), conforme visto na Equação 19.

$$f_{ct} = \left(\frac{2F}{\pi * D * l} \right) * 0,1018 \quad (\text{Equação 19})$$

Onde:

f_{ct} = resistência à tração por compressão, em MPa;

F = força máxima alcançada, em kgf;

D = Diâmetro do corpo de prova, em mm;

l = Comprimento do corpo de prova, em mm.

É importante ressaltar que a tração por compressão diametral pode ser considerada em 5 a 12% maior que a tração direta (NEVILLE, 2015), devendo-se atentar para este fato na análise dos resultados deste ensaio.

3.6.3.3 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi determinada segundo a NBR 9779 (ABNT, 2012). Os ensaios foram realizados em concretos com idade de 28 e 91 dias, utilizando-se três corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, por traço e idade. Após pesagem dos corpos de prova secos (após 3 dias em estufa), estes foram colocados em um recipiente com água, apresentando 5mm de coluna de água em cada corpo de prova. Efetuou-se as pesagens dos corpos de prova depois de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h do início do ensaio, para cálculo da absorção por capilaridade. As Figuras 56 e 57 apresentam os procedimentos realizados durante o ensaio.

Figura 56 - Execução do ensaio de absorção de água por capilaridade



Figura 57 - Pesagem dos corpos de prova



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Após medição da absorção de água, realizou-se o rompimento dos corpos de prova por compressão diametral, de forma a avaliar a distribuição de água no seu interior (Figura 58).

Figura 58 - Avaliação da distribuição de água nos Corpos de prova, após ensaio de absorção por capilaridade



Fonte: Acervo pessoal da autora.

3.6.3.4 Absorção de água por imersão e Índice de vazios

Para determinar a absorção de água por imersão e o índice de vazios dos concretos, seguiu-se a metodologia da NBR 9778 (ABNT, 2009). Assim como no ensaio de absorção por capilaridade, foram utilizados três corpos de prova de formato cilíndrico (100mm de diâmetro e 200mm de altura), ensaiados nas idades de 28 e 91 dias (Figura 59).

Figura 59 - Absorção por imersão



Fonte: Acervo pessoal da autora.

3.6.3.5 Avaliação da presença de cloretos livres

Tendo em vista o percentual considerado alto de cloretos no resíduo FGD (6,5%), realizou-se a avaliação da presença de cloretos livres na massa de concreto pelo método colorimétrico com aspersão de nitrato de prata.

O método é descrito na norma italiana UNI 7928 (UNI, 1970) "Determinazione della penetrabilità dello tone cloruro", publicada pela instituição normalizadora, UNI - Unificazione Nazionale Italiana. Com a aplicação do método do nitrato de prata é possível a realização de uma avaliação qualitativa da presença de cloretos livres ou combinados no concreto, não quantificando seus teores.

A presença de cloretos foi investigada por meio da aspersão de uma solução de nitrato de prata - AgNO_3 (0,1 mol/L) nas superfícies recém fraturadas dos concretos com a idade de 28, 56 e 91 dias. Com este procedimento, as regiões dos corpos de prova que apresentem concentração de íons cloreto superior a 0,15% de cloretos livres em relação à massa de cimento, adquirem uma coloração esbranquiçada.

Esta coloração esbranquiçada é facilmente visível a olho nu e demora cerca de 15 minutos para surgir no concreto. Nos locais em que o cloreto não atingiu, o concreto apresenta uma coloração marrom.

A imagem do concreto referência está apresentada na Figura 60 e foi feita 15 minutos após a aspersão do AgNO_3 (0,1mol/L) sobre o concreto.

Figura 60 - Método colorimétrico para detecção de cloretos livres no concreto



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Ainda, tendo em vista a quantificação do percentual de íons cloreto nos concretos, para fins de comparação com a norma NBR 12655 (ABNT, 2015) foi realizada a determinação do teor de cloretos livres nos concretos produzidos de acordo com a ASTM C1218 (ASTM, 2017).

As amostras utilizadas para o ensaio de determinação do teor de cloretos livres no concreto foram retiradas dos corpos de prova após rompimento pelo ensaio de Resistência à Compressão. Foram coletados pedaços contendo apenas argamassa, que depois foram moídos em um moinho de argolas por 30 segundos. O ensaio foi realizado para todos os traços de concreto avaliados, nas idades de 7, 28, 56 e 91 dias.

Os procedimentos utilizados para o ensaio foram:

- Pesagem de 10 g de cada amostra de concreto após moagem, realização da diluição em 50 mL de água destilada (quente) (Figura 61a);
- Aquecimento da solução até fervura durante 30 segundos (o béquer deve ser tampado com um vidro relógio) (Figura 61b);
- Após resfriamento, filtrou-se a solução em papel de textura média, lavando o béquer, o vidro relógio, e o filtro, com pequenas porções de água quente até que se obtivesse um filtrado clarificado (Figura 61c)
- O filtrado foi recolhido e armazenado em um balão de 50 mL. Neste volume foram acrescentadas 5 gotas de cromato de potássio (0,01 mol/L), e controlou-se o pH para que o mesmo se situasse entre 6,5 e 10,5;
- Procedeu-se a titulação com nitrato de prata (0,1 mol/L – padronizado) (Figura 61d). O volume de nitrato de prata gasto para mudança da coloração da solução de amarelo-esverdeado para laranja era anotado, e utilizado no cálculo do teor de cloretos da amostra.

O cálculo do teor de cloretos foi realizado conforme a Equação 20.

$$\%Cloretos = \left(\frac{3,5453 \times (V_{tit\ branco}) \times M \times Fc \times (V_{avol})}{m \times V_{aliqua}} \right) \quad (\text{Equação 20})$$

Onde:

$V_{tit\ branco}$ = Volume gasto na titulação do branco;

M = Molaridade do Nitrato de Prata utilizado;

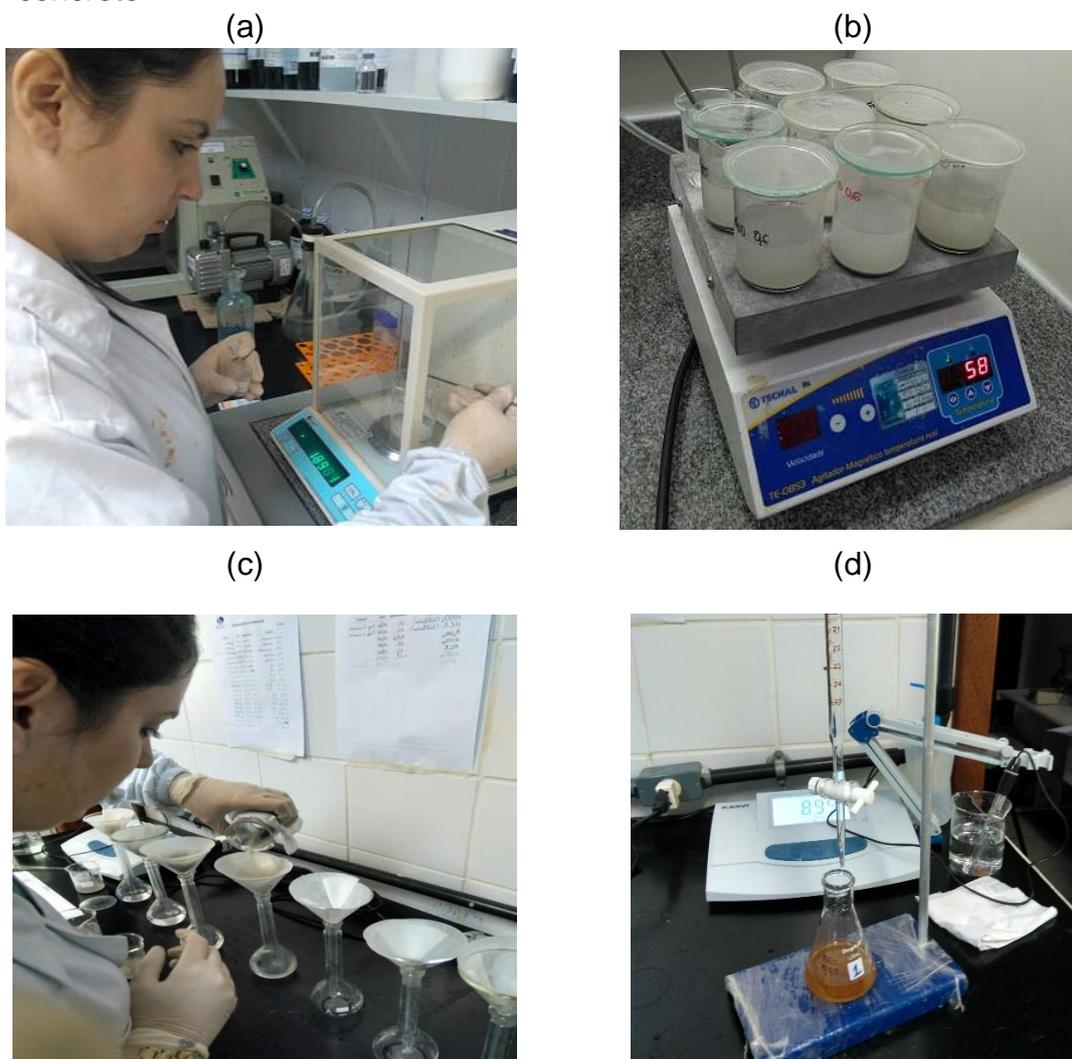
Fc = Fator de correção para padronização;

V_{avol} = Volume gasto na titulação;

m = Massa da amostra utilizada para preparo da solução;

V_{aliqua} = Volume da alíquota da solução inicial utilizada no ensaio;

Figura 61 - Método colorimétrico para detecção de cloretos livres no concreto



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Também foi realizada a determinação do percentual de cimento no concreto, de forma a se calcular o teor de cloretos em relação a massa de cimento. Para tal, foram realizados os ensaios de Perda ao fogo - NBR NM 18 (ABNT, 2004) e Resíduo insolúvel - NBR NM 15 (ABNT, 2012). Nestes ensaios foram utilizadas as amostras moídas para o ensaio de determinação do teor de cloretos.

Com os percentuais de perda ao fogo e resíduo insolúvel de cada concreto avaliado, partiu-se para o cálculo do teor de cloretos em relação a massa do cimento, de acordo com as Equações 21, 22 e 23 (PEREIRA; CINCOTTO, 2001).

$$\%Agregados = \left(\frac{\%RI \times 100}{100 - \%PF} \right) \quad (\text{Equação 21})$$

Onde:

%Agregados = Percentual de agregados no concreto;

%RI = Resíduo Insolúvel (%);

% PF = Perda ao fogo (%).

$$\%Aglomerante = 100 - \% Agregados \quad (\text{Equação 22})$$

$$\%Cl^- \text{ em relação ao cimento} = \left(\frac{\%Cl \text{ concreto} \times 100}{\%Aglomerante} \right) \quad (\text{Equação 23})$$

Onde:

%Aglomerante = Percentual de aglomerante no concreto;

%Cl_{concreto} = Teor de cloretos no concreto (Equação 21)

%Cl⁻ em relação ao cimento = Teor de íons cloreto em relação a massa de cimento.

Os valores obtidos do teor de íons cloreto em relação a massa de cimento foram comparados com a NBR 12655 (ABNT, 2015), de forma a se inferir sobre a qualidade dos concretos produzidos, com relação a susceptibilidade à corrosão das armaduras.

3.6.3.6 Determinação do teor de íons sulfatos

O teor de íons sulfato foi determinado a partir da metodologia descrita na NBR NM 16 (ABNT, 2012), que visa a determinação de anidrido sulfúrico em cimentos. Esta escolha se deu pelo fato de não existir norma para este ensaio em concretos. Mazer *et al.* (2014), também se basearam nesta norma para quantificação do teor de sulfatos de uma estrutura de concreto.

O procedimento realizado para coleta das amostras foi o mesmo definido na análise para determinação de cloretos (item 3.6.3.5). O ensaio foi realizado para todos os traços de concreto avaliados, nas idades de 7, 28, 56 e 91 dias.

Para realização do ensaio, foram seguidos os seguintes procedimentos:

- Pesou-se 1 g da amostra de concreto após moagem;
- Adicionou-se 25 mL de água ultrapura, dispersou-se a solução e adicionou-se 5 mL de HCl;

- A solução foi aquecida durante 30 segundos em chapa e diluída em 50 mL de água ultrapura com temperatura próxima a ebulição e aquecida novamente por 15 minutos, sem entrar em ebulição (Figura 62);
- Em seguida, a solução foi filtrada em um béquer com o uso de papel de filtração média até que 250 mL de filtrado fossem obtidos (Figura 63);
- O filtrado foi colocado em um béquer e aquecido na chapa, sem atingir fervura. Em seguida, 10 mL de solução de BaCl_2 (100 g/L) (em temperatura próxima a ebulição), foram adicionados, gota a gota em cada béquer. A solução foi deixada em aquecimento (temperatura próxima a ebulição por 30 min);
- Após este período, desligou-se a chapa e manteve-se a solução em repouso por 24 horas a temperatura ambiente (Figura 64). No outro dia, havia sido formado um precipitado na solução (Figura 65), então procedeu à filtração lenta, sendo lavado o filtro com água ultrapura durante toda a filtragem para a eliminação de cloretos (Figura 66);
- Por fim, o filtro com a amostra precipitada (Sulfato de Bário) (Figura 67), foi calcinado a 900°C por 30 min em um forno tipo mufla. A massa final é correspondente a massa de sulfato contida no concreto. Foi realizado um tratamento em branco para quantificação do teor de cinzas do filtro. O teor de anidrido sulfúrico (SO_3) em cada amostra de concreto foi calculado de acordo com a Equação 24.

$$\% \text{SO}_3 = \left(\frac{m_2 - m_1 - m_3}{m} \right) = x \ 34,3 \quad (\text{Equação 24})$$

Onde:

- m_1 = massa do cadinho, expressa em gramas (g);
- m_2 = massa do cadinho mais a massa do precipitado de BaSO_4 , expressa em gramas (g);
- m_3 = massa do resíduo obtido no ensaio em branco, expressa em gramas;
- m = massa da amostra, expressa em gramas;
- 34,3, é a relação molar entre SO_3 e BaSO_4 , multiplicada por 100.

Assim como o teor de cloretos livres, o teor de anidrido sulfúrico (SO_3) foi calculado com base na massa de cimento, determinada pelos ensaios de perda ao fogo e resíduo insolúvel (seção 3.6.3.5).

Figura 62 - Aquecimento da solução com HCl



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 63 - Filtração da solução



Figura 64 - Solução em repouso



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 65 - Formação do precipitado



Figura 66 - Filtração à vácuo da solução



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 67 - Filtro antes da calcinação



Fonte: Acervo pessoal da autora.

3.6.3.7 Avaliação da microestrutura

Para auxiliar na interpretação dos ensaios mecânicos e de durabilidade realizados, procedeu-se a investigação da microestrutura dos concretos produzidos, por meio da análise em microscópio eletrônico de varredura (MEV) com EDS acoplado, localizado no Laboratório de Plasma Térmico (LPT), da UFES.

As análises realizadas visaram avaliar a microestrutura das amostras extraídas dos corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial, sendo coletadas no centro dos corpos de prova aleatoriamente entre as quatro unidades ensaiadas nas idades de 7, 28 e 91 dias.

Antes de serem analisadas no MEV, as amostras tiveram sua hidratação interrompida com a adição de acetona P.A. durante 5 dias. Após esse tempo, elas foram levadas para a estufa durante 24 horas, e armazenadas em um dessecador (Figura 68).

Figura 68 - Amostras a serem analisadas no MEV



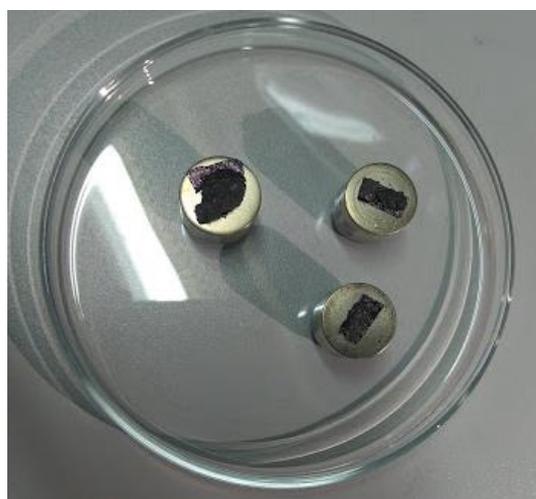
Fonte: Acervo pessoal da autora.

As amostras também foram submetidas ao recobrimento por deposição de íons metálicos de ouro, tendo em vista tornar o concreto um meio condutor de elétrons, facilitando a construção da imagem no MEV. Este procedimento ocorreu em uma câmara com pressão em torno de 0,1 a 0,05 mbar (Figura 69), na qual os átomos de ouro são bombardeados com átomos de gás inerte (argônio), se desprendendo de sua superfície e sendo depositados sobre a amostra de concreto. As amostras metalizadas são mostradas na Figura 70.

Figura 69 - Câmara para metalização



Figura 70 - Amostras de concreto metalizadas



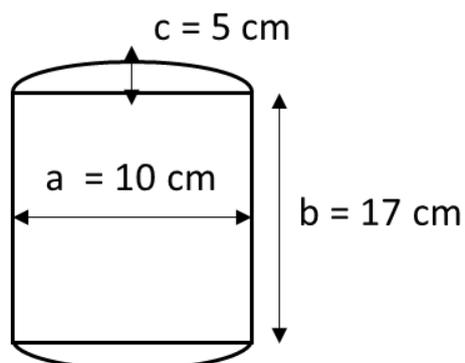
Fonte: Acervo pessoal da autora.

3.6.3.8 Avaliação da lixiviação de contaminantes

O ensaio de lixiviação nos concretos foi realizado de acordo com a norma EA NEN 7375:2004 – Leaching characteristics of moulded or monolithic Building and waste materials (NNI, 2004). Este ensaio é conhecido como ensaio de tanque e é utilizado para simular a lixiviação de componentes inorgânicos de materiais monolíticos em função de um período de tempo de 64 dias.

Para realização do ensaio, os corpos de prova de concreto foram retificados, de forma a atingirem as dimensões mostradas na Figura 71.

Figura 71 - Dimensões dos corpos de prova utilizados para o ensaio de tanque



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 72 - Recipiente utilizado no ensaio



Figura 73 - Realização do Ensaio de Tanque



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Foi avaliado 1 corpo de prova para cada traço de concreto descrito na Tabela 14.

Após os corpos de prova serem retificados, estes foram colocados em um recipiente plástico com capacidade de 2,5 litros, preenchido com 2,3 litros de água ultrapura (Figuras 72 e 73), este valor foi determinado por meio da norma EA NEN 7375 (NNI, 2004).

Por fim, os recipientes foram vedados com plástico filme, e colocados em repouso, em uma temperatura de 23°C , até os períodos de coleta das amostras e troca da água.

As amostras eram coletadas e filtradas utilizando papel filtro de 28 μm . Após a coleta as amostras eram colocadas em tubos tipo Falcon e destinadas para análise química por meio da técnica de Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS). Os compostos analisados foram: Arsênio (As), Cádmio (Cd), Cobre (Cu), Chumbo (Pb), Cromo, Manganês, Mercúrio, Selênio e Zinco.

O procedimento foi realizado em 8 ciclos, após 6 horas, 1 dia, 2 dias e 6 horas, 4, 9, 16, 36, até 64 dias do início do ensaio, conforme determinado pela norma EA NEN 7375 (NNI, 2004). Para o início do próximo ciclo, os recipientes eram enchidos novamente com 2,3 litros de água e vedados com papel filme.

A lixiviação dos metais pesados em mg/m^2 foi calculada pela seguinte expressão (EIGHMY, 1997):

$$B_i = \frac{C_i \cdot V}{1000 A} \quad (\text{Equação 25})$$

Onde:

B_i = liberação do elemento por unidade de área no período i (mg/m^2);

C_i = a concentração do elemento no período (mg/L);

V = o volume do lixiviante (L);

A = área superficial do material monolítico (m^2).

Após cálculo do B_i , os valores obtidos foram comparados com a norma NEN 7375 (NNI, 2004), que determina o uso de materiais monolíticos, como concreto. Segundo esta norma, para cada composto analisado é obtida uma taxa de lixiviação total (B_{IT}), referente a todo o período avaliado (64 dias). Esta taxa deve ser comparada com os valores de U_1 e U_2 , para cada composto, mostrados na Tabela 15, de forma a enquadrar a lixiviação do composto avaliado em três categorias:

- Categoria 1: materiais que apresentam taxa de lixiviação total (B_{IT}) de qualquer contaminante abaixo dos valores de U_1 . Não apresentam restrições ao uso.
- Categoria 2: materiais que apresentam taxa de lixiviação total (B_{IT}) de qualquer contaminante entre os respectivos valores de U_1 e U_2 . Estes materiais não apresentam qualquer restrição ambiental na sua utilização, no entanto, após a sua vida útil é obrigatório remover os compostos contaminantes que tenham concentrações superiores a U_1 .

- Categoria 3: materiais que apresentam taxa de lixiviação total (B_{IT}) de qualquer contaminante acima dos valores de U2. Sua utilização na construção civil deve ser restrita, tomando as devidas precauções para evitar a lixiviação dos compostos contaminantes.

Tabela 15 - Padrões cumulativos U1 e U2 requeridos pela NEN 7375 (NNI, 2004)

	U1 (mg/m ²)	U2 (mg/m ²)
As	40	300
Cd	1	7,5
Cr	150	950
Cu	50	350
Se	1,5	9,5
Zn	200	1500

Fonte: NNI (2004).

3.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios serão submetidos a uma análise estatística, por meio da análise de variância (ANOVA) a um nível de confiabilidade de 95%, e com o uso de testes de comparação múltipla, com o auxílio do software Statística 7.0.

As variáveis dependentes e independentes consideradas na ANOVA foram descritas na seção 3.2.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DO PROCESSO FGD

Após a realização dos ensaios descritos na seção 3, pode-se obter os resultados apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultado da caracterização do resíduo do FGD

Propriedades avaliadas		Resultado	Valores presentes na literatura
Características Físicas	Distribuição granulométrica	Figura 74	Tabela 1
	Finura #200 (%)	2,7	-
	Finura #325 (%)	10,8	2,4
	Superfície específica Blaine (cm ² /g)	7.610	8.720
	Massa específica (g/cm ³)	2,265	De 2,25 a 2,6
	Massa unitária (g/cm ³)	0,417	-
Características Químicas	pH	13	9-13
	Umidade	3,70	< 2%
	Matéria orgânica (%)	<1	-
	Composição química (FRX)	Tabela 20	Tabela 20
	Perda ao fogo (%)	26,57	22,2
	Teor de cloretos totais (%)	6,5%	-
	Teor de cloretos livres (%)	5,4%	-
	Teor de sulfatos solúveis (%)	1,5%	-
Classificação do resíduo	Classe IIA	Classe I e Classe IIA	
Características mineralógicas	Difração de raios-x	Figura 75	Figuras 5, 6, 7 e 8
Características microestruturais	MEV – Microscopia eletrônica de varredura	Figuras 76 e 77	Figuras 9, 10, 11 e 12

Fonte: Elaborado pela autora.

Nota*: Os valores presentes na literatura foram retirados da seção 2.1.2.

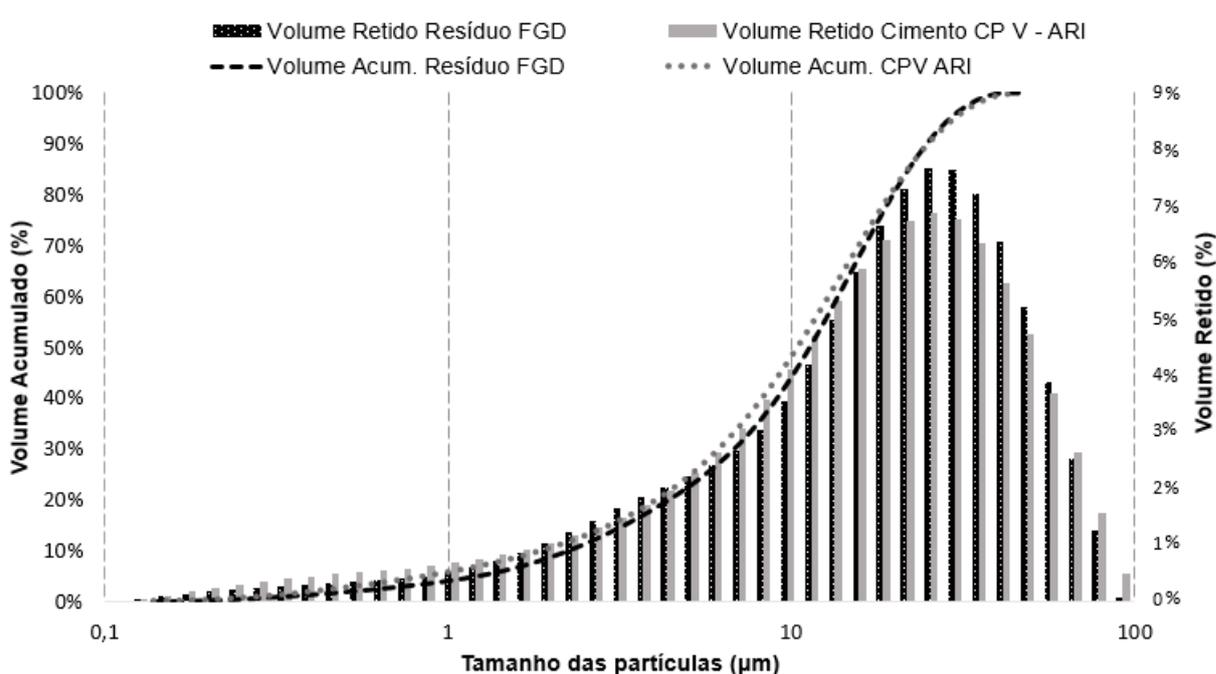
4.1.1 Características Físicas

O resultado da análise granulométrica do resíduo FGD é mostrado na Figura 74.

Com relação a distribuição granulométrica (Figura 74), percebe-se que os resultados obtidos para o resíduo de FGD se assemelham aos presentes na literatura (Tabela 1), considerando os diferentes processos de dessulfurização.

No entanto, se comparado ao trabalho de Liu *et al.* (2009), que também utilizaram resíduo FGD do processo semisseco, percebe-se que o resíduo FGD desta pesquisa apresentou uma maior granulometria do que a encontrada por estes autores (Tabela 1). Enquanto Liu *et al.* (2009) obtiveram uma dimensão máxima para os grãos do resíduo, de 60 μm , nesta pesquisa foi encontrado um valor de 79 μm . Ainda, 85% das partículas encontrada no resíduo FGD estudado por Liu *et al.* (2009) possuíam granulometria inferior a 10 μm , enquanto no presente trabalho, este valor foi de apenas 3,89%.

Figura 74 - Distribuição granulométrica do resíduo do FGD



Fonte: Elaborado pela autora.

Apesar disso, a granulometria obtida para o resíduo FGD é bastante semelhante a do cimento estudado (CPV – ARI), conforme pode ser visto na Figura 74, indicando uma possível viabilidade de utilização do resíduo como substituto do cimento, pelo menos quanto a sua granulometria.

Avaliando-se os valores de D10, D50 e D90 (diâmetros abaixo dos quais se situam 10%, 50% e 90% das partículas, respectivamente) do resíduo estudado com as principais adições em concretos, verifica-se que as partículas do FGD são mais finas do que as partículas de adições amplamente utilizadas, como cinzas volantes e metacaulim, possuindo uma granulometria bastante semelhante a sílica ativa (Tabela 17).

Tabela 17 - Diâmetros do resíduo FGD e do cimento estudado, e de outras adições utilizadas em concretos

Diâmetro	FGD	Cinzas volantes	Metacaulim	Sílica ativa	CPV ARI
D10 (µm)	3,89	7,33	2,27	2,45	3,60
D50 (µm)	19,62	50,13	29,05	18,44	11,79
D90 (µm)	42,87	209,167	59,01	31,8	29,02

Fonte: Elaborado a partir de dados das pesquisas de Andrade (2017) e Diaz (2016). Os dados do Cimento CPV-ARI foram obtidos a partir de boletim de caracterização da empresa LafargeHolcim (2018).

Desta forma, a granulometria obtida para o resíduo FGD indica que este pode apresentar potencial de atuar como um microfíler em concretos, uma vez que 100% do material é passante na peneira #200 (0,075mm), e seu diâmetro médio é semelhante ao cimento (Tabela 17) (DAL MOLIN, 2005). A Tabela 18 apresenta dados da superfície específica e finura do resíduo FGD.

Tabela 18 - Comparação entre os valores de superfície específica Blaine (cm²/g) do resíduo estudado e de outras adições

Parâmetro	FGD	Cinzas volantes	Metacaulim	Sílica ativa	CPV ARI
Superfície específica (m ² /kg)	761	300-700	1.854	13000 - 30.000	350 - 600
Finura #200 (%)	2,7	12,2	1,0	-	-
Finura #325 (%)	10,8	25,0	34,0	10,0	-

Fonte: Elaborado a partir de dados das pesquisas de Andrade (2017), Diaz (2016) e Moraes (2001). Os dados do Cimento CPV-ARI foram obtidos a partir de boletim de caracterização da empresa LafargeHolcim (2018).

Avaliando-se a finura do resíduo FGD, verifica-se que este resíduo apresenta finura comparável com o metacaulim e a sílica ativa, e uma superfície específica superior a do cimento utilizado (Tabela 18), o que confirma a possibilidade de utilização deste resíduo como um fíler.

Como um fíler, o resíduo FGD pode atuar no refinamento da estrutura de poros e como pontos de nucleação para formação dos produtos de hidratação do cimento (principalmente pela sua alta superfície específica), contribuindo para que a formação dos cristais ocorra nos poros, o que influencia a cinética de hidratação (acelera as reações), e os tipos de produtos formados (gera cristais mais numerosos e menores) (DAL MOLIN, 2005; NEVILLE; 2015).

Isto contribui para a densificação da microestrutura dos concretos, promovendo melhorias no desempenho mecânico, nas reduções das taxas de absorção de água por imersão total e por capilaridade, e, conseqüentemente, em uma maior durabilidade dos concretos (NEVILLE, 2015).

Ainda, Quercia *et al.* (2013) afirmam que adições minerais com elevada finura afetam mais fortemente a demanda total de água de matrizes cimentícias, uma vez que demandam de mais água aderida em sua superfície, pela alta superfície específica. Isto indica que a adição do resíduo FGD pode influenciar ainda a consistência das matrizes cimentícias após hidratação.

A massa específica do resíduo FGD estudado se encontra dentro da faixa determinada pela literatura – entre 2,25 e 2,6 g/cm³ (KASSIM; WILLIAMSON, 2005; WRIGHT; KHATIB, 2016; FHWA, 2016), sendo 26,7% inferior a massa específica do cimento utilizado. Este comportamento é comum em adições minerais, como metacaulim, cinzas volantes e sílica ativa (Tabela 19). Ainda, a massa específica do resíduo FGD foi semelhante a encontrada na literatura para cinzas volantes e sílica ativa (Tabela 19).

Tabela 19 - Comparação entre os valores de massa específica e unitária do resíduo FGD com outras adições

Parâmetro	FGD	Cinzas volantes	Metacaulim	Sílica ativa	CPV ARI
Massa específica (g/cm ³)	2,265	1,9 - 2,4	2,70	2,22	3,09
Massa unitário estado solto (g/cm ³)	0,417	0,69	0,3 a 1	0,35	-

Fonte: Elaborado a partir de dados de Andrade (2017), Diaz (2016) e Moraes (2001). Os dados do Cimento CPV-ARI foram obtidos a partir de boletim de caracterização da empresa LafargeHolcim (2018).

Segundo Lacerda e Helene (2005), é esperado que a massa específica de uma adição mineral utilizada como fíler seja inferior ao cimento, de forma a contrabalancear o efeito do preenchimento dos poros, uma vez que na incorporação de fílers no concreto, se tem uma massa maior de materiais dentro de um mesmo volume de concreto. Desta forma, a massa específica apresentada pelo resíduo FGD se mostrou adequada para o uso deste como uma adição mineral/fíler.

4.1.2 Características Químicas

Com relação as características químicas do resíduo FGD, pode-se verificar que também estão de acordo com os valores encontrados na literatura, sendo este resíduo essencialmente alcalino (pela incorporação de cal), inorgânico, com umidade de 3,7%, um pouco superior a encontrada em resíduos de FGD semisseco (<2%).

Estas características são compatíveis com o uso do FGD como adição em concretos, principalmente pela alta alcalinidade do resíduo (RIBEIRO *et al.*, 2014).

A composição do resíduo é apresentada na Tabela 20, junto a valores encontrados na literatura.

Tabela 20 - Composição do resíduo do processo FGD

Parâmetro	MCCARTHY <i>et al.</i> (1997)	GOMES <i>et al.</i> (1998)	WU; NAIK (2002)	GUO; SHI (2008)	LIU <i>et al.</i> (2009)	TELESCA <i>et al.</i> (2013)	ESTA PESQUISA
	Processo seco	Processo seco	Processo seco	Processo úmido	Processo semisseco	Processo seco	Processo semisseco
	Estados Unidos	França	Estados Unidos	China	China	Itália	Brasil
SiO ₂	22,7-36,7	18	27,5	1,82	3,96	3,3	0,2
Al ₂ O ₃	0,3-12,3	12,2	15,1	0,39	2,38	1	< 0,1
Fe ₂ O ₃	5,1-5,3	4,5	3	0,2	13,6	0,3	0,2
CaO	20,0-25,6	41,2	26,4	31,24	32,89	31,9	37,8
MgO	5,8-6,6	1,8	3,6	0,64	2,49	3,8	0,1
K ₂ O	0,5-1,1	1,7	-	0,13	-	-	0,1
Na ₂ O	5,4-9,3	0,07	1,1	0,05	-	-	-
SO ₃	10,4-15,8	3,8	19,7	41,8	9,93	36,9	28,9
Perda ao fogo a 950°C	-	0	2,2	-	22,5	22,4	26,57

Fonte: Elaborado pela autora.

Se comparada com a composição dos outros resíduos oriundos de diferentes processos FGD, verifica-se que o resíduo desta pesquisa (TEIXEIRA, 2018), apesar de ser obtido do mesmo processo que o estudado por Li *et al.* (2009), se assemelha mais aos resíduos estudados por Guo e Shi (2008) e Telesca *et al.* (2013) gerados do processo úmido e seco, respectivamente. Isto indica que o processo FGD utilizado não seja preponderante na determinação das características do resíduo, e sim, o carvão utilizado no processo de queima.

A partir da análise da Tabela 20, pode-se perceber que o resíduo FGD é rico em óxido de cálcio, principal componente no cimento (Tabela 11). No entanto, o resíduo não foi considerado uma adição do tipo pozolana, uma vez que a soma das composições de (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) é inferior a 50% de sua massa, percentual mínimo exigido pela

NBR 12653 (ABNT, 2014), para pozolanas de classe C, oriundas da queima do carvão.

O resíduo FGD também apresentou uma elevada perda ao fogo (26,57%), que está relacionada com a quantidade de matéria-orgânica residual existente no material após a queima a 950°C, tais como os elementos voláteis, como o carbono (NAKANISHI *et al.*, 2018). A elevação neste parâmetro provavelmente foi causada pela presença de CaCO_3 na composição do resíduo, discutido a seguir na análise de difração de raios-x (Figura 75).

Wright e Khatib (2016) propõem uma classificação para os diferentes tipos de resíduo FGD, com base na sua composição, sendo:

- Não-silicosos e deletérios: resíduos FGD de processo úmidos, compostos essencialmente por gipsita, com um percentual de SO_3 de 35-50%;
- Não-silicosos e não reativos: resíduos FGD oriundos de processos secos e semissecos, compostos por formas não reativas de sulfatos e sulfitos de cálcio. O conteúdo de SO_3 destes resíduos fica entre 20 e 30%;
- Silicosos e não-pozolânicos: resíduos FGD com alto percentual de cinzas oriundas da queima do carvão mineral, mas que não apresentam atividade pozolânica. O percentual de SO_3 varia de 10-15%;
- Silicosos e pozolânicos: resíduos FGD com alto percentual de cinzas pozolânicas oriundas da queima do carvão mineral. O percentual de SO_3 é de no máximo 10%;

Com base no exposto acima, o resíduo FGD estudado pode ser classificado como não-silicoso e não reativo, confirmando assim, o seu potencial de uso como fíler (devido as características físicas citadas).

Ainda, foi realizada a determinação do teor de cloretos totais e solúveis e de sulfatos do resíduo FGD, encontrando valores de teor de cloretos totais de 6,5%, de cloretos solúveis de 5,4%, e de anidrido sulfúrico (SO_3), de 1,5%, conforme mostrado na Tabela 20.

Apesar da importância de conhecimento destes valores, não foram identificados trabalhos que mostrassem esta caracterização na literatura, a não ser o teor de anidrido sulfúrico (SO_3), conforme mostrado na Tabela 20.

Segundo Santos (2007) a presença de cloretos no resíduo FGD é advinda do carvão, sendo produzido, durante sua queima, HCl, que é introduzido nos gases exaustos, e levados até o equipamento FGD. Já os sulfatos são oriundos da captura dos óxidos de enxofre, como discutido na seção 2.1.1.

Ressalta-se que os valores de teor de cloretos totais apresentados pelo resíduo FGD são elevados, e considerando os percentuais de adição de FGD utilizados neste trabalho (5%, 10% e 15%), pode-se ter teores de íons cloreto (Cl^-) nos concretos em relação a massa de cimento (0,33%, 0,65% e 0,98%, respectivamente), acima do permitido pela NBR 12655 (ABNT, 2015) para uso em concreto protendido, que é a situação mais crítica citada pela norma.

Este cálculo foi realizado tomando como base o percentual de cloretos totais contido no resíduo FGD (6,5%). A partir do conhecimento da massa de resíduo FGD adicionada em cada traço de concreto (Tabela 13), determinou-se o percentual de cloretos em relação a massa total de aglomerante adicionada (cimento + resíduo FGD) em cada traço.

No entanto, como será explicado na seção 4.3.5, os íons cloreto participam das reações de hidratação, podendo estar combinados - a partir do C3A, C4AF e C-S-H – ou livres (SILVA, 2006). Segundo Neville (1995) e Nilsson *et al.* (1996) os cloretos livres são os responsáveis pelo fenômeno da corrosão das armaduras, desta forma, neste trabalho também foi realizada a determinação dos teores de cloretos livres nos concretos produzidos, permitindo uma avaliação mais assertiva sobre este parâmetro.

O teor de sulfatos no resíduo FGD pode ser avaliado assim como os íons cloreto. Tendo em vista que a NBR 16697 (ABNT, 2018) determina um teor máximo de anidrido sulfúrico (SO_3) de 4,5% no cimento. Considerando o teor de SO_3 presente no resíduo FGD (28,9%), conforme Tabela 20, tem-se que as adições de 5%, 10% e 15% proporcionariam teores de 1,45%, 2,89% e 4,34% de anidrido sulfúrico, em relação a massa de cimento. Para chegar a esta conclusão utilizou-se o mesmo cálculo descrito acima para o teor de cloretos.

Considerando o percentual de SO_3 contido no cimento CPV – ARI, utilizado neste trabalho (Tabela 11), a porcentagem de SO_3 , em cada adição aumenta para cada um dos teores avaliados, sendo 4,47% de SO_3 para 5% de FGD, 5,91% para 10% e 7,36% para 15%.

Utilizando este raciocínio, segundo a NBR 16697 apenas o teor de 5% estaria adequado para uso em concretos (ABNT, 2018), uma vez que apresentou um valor inferior a 4,5%. No entanto, os íons sulfato (SO_4^{2-}) e sulfito (SO_3^{2-}), assim como os íons cloreto (Cl^-), também participam das reações de hidratação, sendo transformados neste processo (NEVILLE, 2015).

Desta forma, para prever a susceptibilidade dos concretos produzidos ao ataque interno por sulfatos foi realizada também determinação do teor de sulfatos (seção 4.3.6).

Com relação a classificação do resíduo FGD pela NBR 10004 (ABNT, 2004), os resultados obtidos nos ensaios de lixiviação e solubilização são mostrados na Tabela 21.

Tabela 21 - Resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização do resíduo FGD estudado

Parâmetro	Lixiviação – NBR 10.004 e 10.005 (ABNT, 2004) (mg/l)		Solubilização – NBR 10.004 e 10.006 (ABNT, 2004) (mg/l)	
	Resultado	Padrão	Resultado	Padrão
Arsênio	0,253	1,0	0,283	0,010
Cádmio	0,055	0,5	0,001	0,005
Chumbo	0,071	1,0	0,500	0,010
Cromo	0,050	5,0	0,371	0,050
Mercúrio	0,005	0,1	0,002	0,001
Prata	< LD	5,0	< LD	0,050
Selênio	0,382	1,0	0,417	0,010
Manganês	-	-	0,001	0,100
Zinco	-	-	0,163	5,000
Cobre	-	-	0,010	2,000

Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: LD = Limite de detecção.

Avaliando o resultado do ensaio de lixiviação (Tabela 21), percebe-se que as concentrações obtidas para todos os metais avaliados foram inferiores aos limites exigidos pela norma para classificar os resíduos como perigosos.

No entanto, para o ensaio de solubilização, pode-se verificar que as concentrações de alguns dos metais avaliados foram superiores aos limites apresentados pela NBR

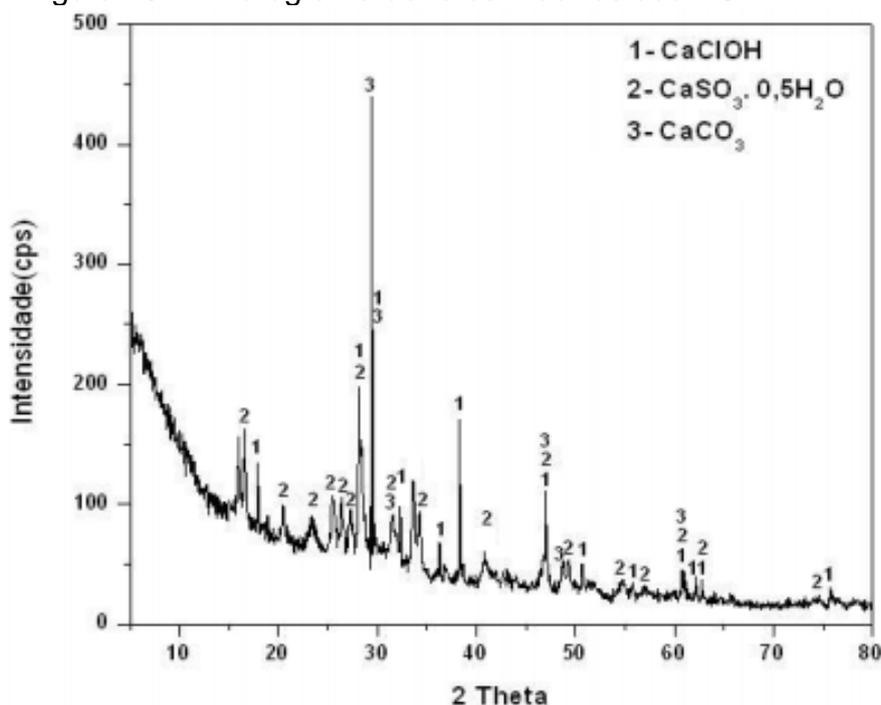
10.006 (ABNT, 2004), são eles: Arsênio, Chumbo, Cromo, Mercúrio e Selênio. Assim, o resíduo FGD estudado é classificado como um resíduo classe II-A não perigoso, não inerte, baseado na NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Os resultados obtidos para a classificação do resíduo corroboram com o trabalho de Caillahua (2013), que também encontrou concentrações acima do limite para o extrato solubilizado, classificando o resíduo FGD estudado como Classe II-A. No entanto, no trabalho de Caillahua, os metais que extrapolaram o limite foram apenas o cádmio e selênio, diferente do verificado no presente trabalho.

4.1.3 Características Mineralógicas

Com a análise da composição química do FGD, pode-se inferir sobre os minerais presentes, porém a confirmação só pode ser avaliada com a difração de raios-x. Com a difração de raios-x, pode-se elaborar o difratograma da Figura 75, e identificar as principais fases minerais presentes no resíduo estudado.

Figura 75 - Difratograma de raios-x do resíduo FGD



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da análise de difração de raios-x, pode-se verificar picos de sulfito de cálcio hemidratado (CaSO₃ .1/2 H₂O), hidroxiclreto de cálcio (CaClOH) e calcita (CaCO₃). Assim, como apresentado no trabalho de Li *et al.* (2015), foi verificada a presença de cloretos no resíduo FGD, oriundos do carvão utilizado como matéria-

prima na coqueificação. A formação de calcita é condizente com outros processos FGD semisseco com Spra-Dry conforme descrito na seção 2.1.2, mais precisamente na Equação 11.

Ainda, é possível verificar a presença de sulfito de cálcio hemi-hidratado, que demonstra a inexistência da oxidação forçada no processo, característica dos processos semissecos. Isto também foi averiguado por Bigham *et al.* (2005) comparando a mineralogia de resíduos oriundos de diferentes plantas de processos FGD semissecos, nos quais o sulfito de cálcio hemi-hidratado é o mineral predominante.

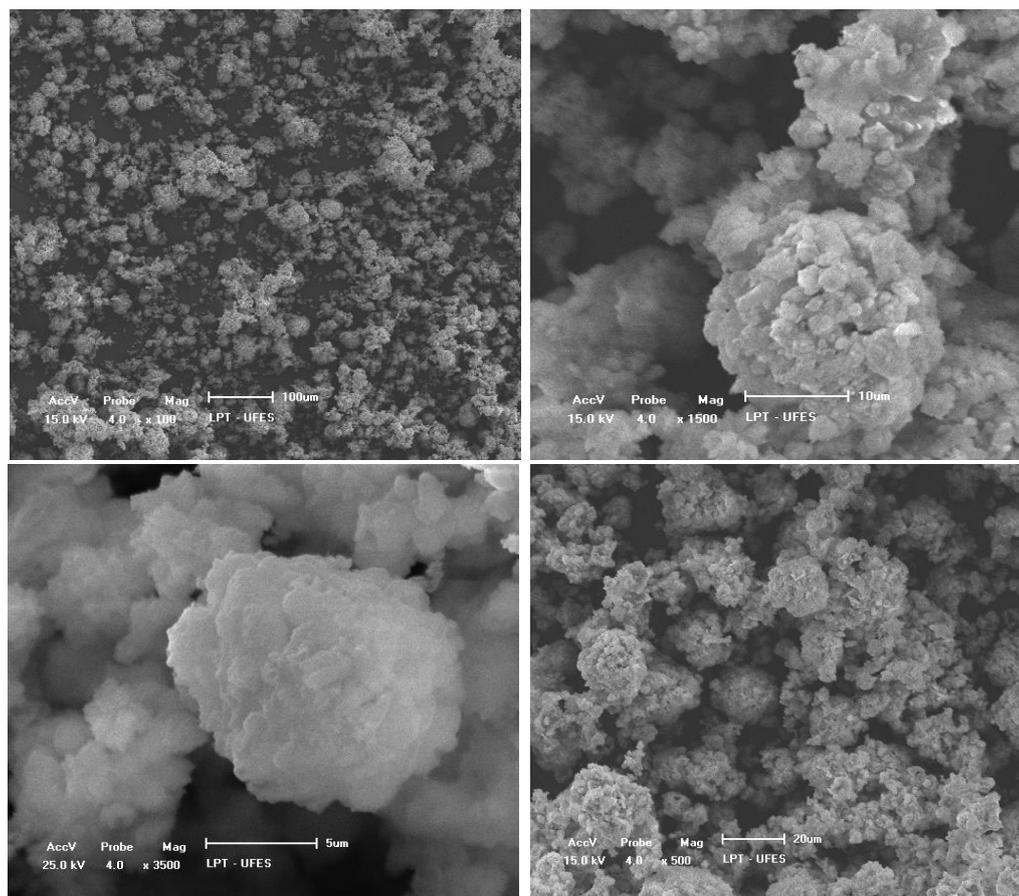
A presença do sulfito de cálcio hemi-hidratado ($\text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$) também foi verificada por Khatib, Wright e Mangat (2011), que identificaram um efeito filler deste material, comparando com outros tipos de resíduo FGD (com altos teores de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - gipsita). Neste trabalho, Khatib, Wright e Mangat (2011) compararam o desempenho de pastas produzidas com misturas de resíduos FGD gerados em diferentes locais com cimento (25% resíduo FGD + 75% Cimento), percebendo que os resíduos que continham gipsita apresentaram redução na resistência ao longo do tempo, ao contrário dos que continham *Hannebachite* ($\text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$).

Segundo os autores, a *Hannebachite* é um mineral geralmente inerte, e os resíduos FGD que contém um alto teor deste material tendem a atuar como fillers em matrizes cimentícias (KHATIB; WRIGHT; MANGAT, 2011).

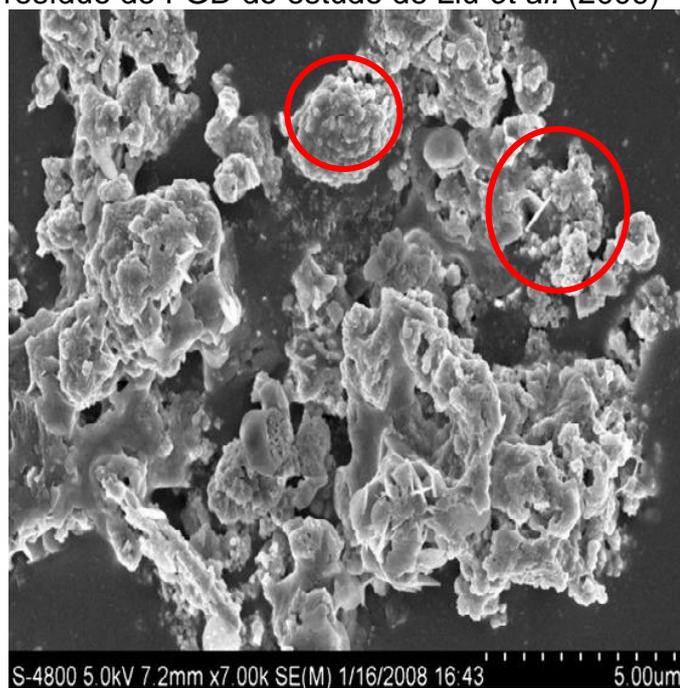
4.1.4 Características Microestruturais

Considerando a microestrutura do resíduo FGD estudado (Figura 76), verifica-se que o aspecto apresentado pelas partículas se mostra diferente dos encontrados nos trabalhos avaliados, no entanto, possui alguma similaridade com as partículas dos resíduos FGD estudados por Li *et al.* (2009) e por Sheng *et al.* (2012), que também eram provenientes do processo semisseco (Figuras 77 e 78).

Figura 76 - Imagens da microestrutura do resíduo de FGD deste estudo

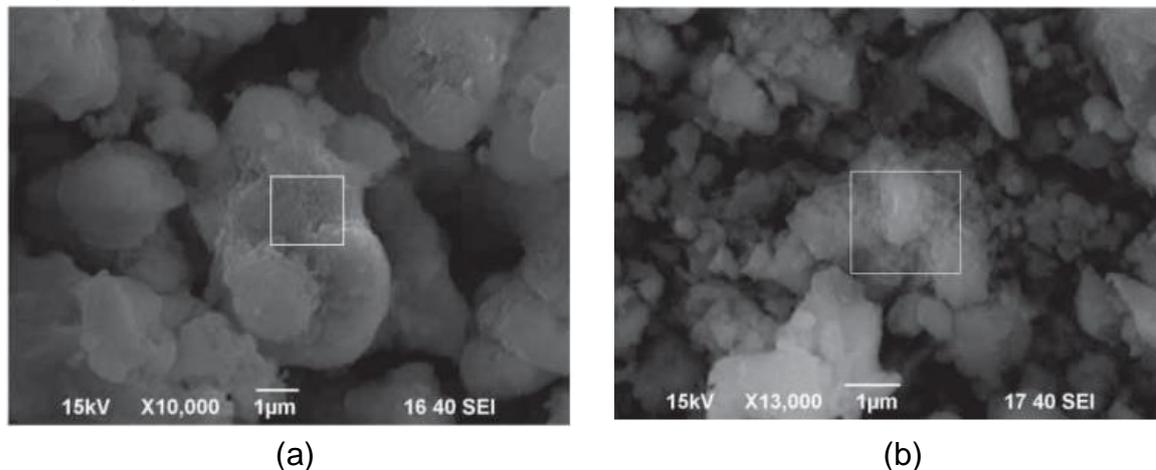


Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 77 - Imagens da microestrutura do resíduo de FGD do estudo de Liu *et al.* (2009)

Fonte: LIU *et al.* (2009).

Figura 78 - Imagens da microestrutura do resíduo de FGD do estudo de Sheng *et al.* (2012)



Fonte: SHENG *et al.* (2012).

Sheng *et al.* (2012) afirmam que no processo semissecado são formados cristais parecidos com flocos na superfície das partículas de cinza, identificados como *Hannebachite* (sulfato de cálcio hemi-hidratado), principal componente dos resíduos FGD do tipo semissecado. Isto corrobora com os resultados da difração de raios-x obtida para o resíduo FGD deste trabalho, uma vez que a *Hannebachite* ($\text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$) foi o principal composto encontrado.

Ainda pode-se perceber que o resíduo FGD deste estudo é composto por partículas de tamanhos e formatos variados (Figura 76), o que, segundo Naik and Kraus (2001) indica uma menor reatividade nas reações de hidratação do cimento, pelo formato irregular das partículas.

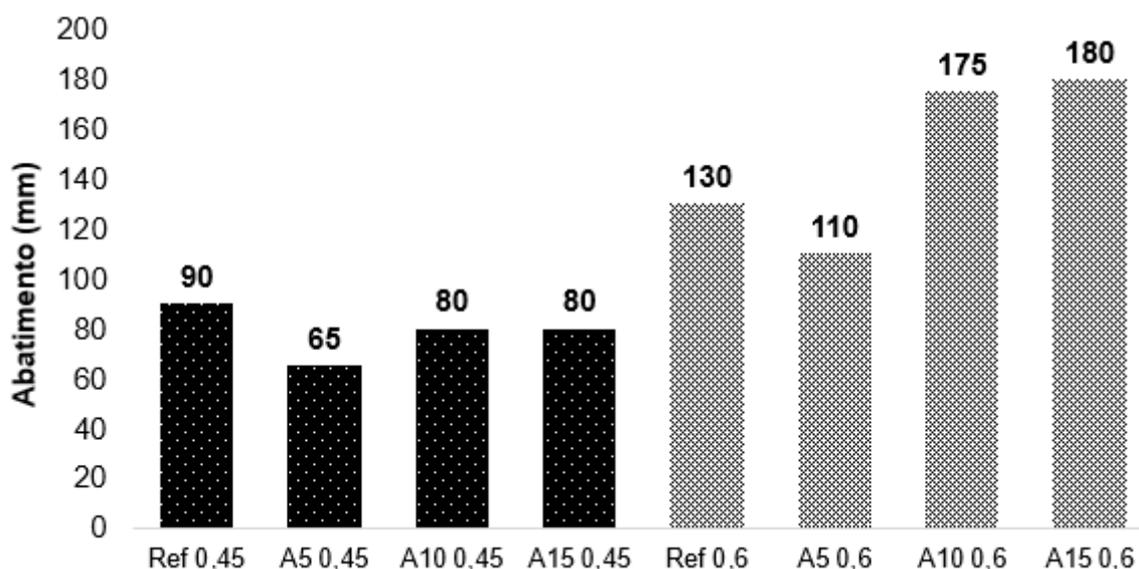
4.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Com o interesse de conhecer o comportamento da mistura de concreto em suas primeiras idades em função da adição do resíduo FGD e das diferentes relações água/cimento, foram determinadas duas propriedades do concreto em seu estado fresco: sua consistência e sua massa específica.

4.2.1 Índice de consistência

Os resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone para os concretos estudados são mostrados na Figura 79. Para a consistência não foi realizada a ANOVA, uma vez que foi coletado um dado de abatimento por traço de concreto.

Figura 79 - Índice de consistência dos concretos



Fonte: Elaborado pela autora.

Pode-se perceber, de acordo com a Figura 79, que a adição de resíduo FGD altera a trabalhabilidade dos concretos, tendo um comportamento diferente para as duas relações água/aglomerante utilizadas (0,45 e 0,6). No entanto, para ambas relações a/agl estudadas, os traços com 5% apresentaram menores abatimentos, indicando que até este teor de resíduo, é necessária uma maior quantidade de água para atingir uma consistência mais fluida.

Para Gonçalves (2000), a elevada finura das adições, como o resíduo FGD, pode aumentar a necessidade de água necessária para manter a consistência desejada. No entanto, os autores citam que em alguns casos o efeito pode ser adverso, dependendo das características da adição.

Segundo Gallias, Kara-Ali e Bigas (2000), o abatimento é afetado também por parâmetros morfológicos como forma e textura superficial das partículas. De acordo com os parâmetros de forma, as adições podem se classificar em arredondadas, cujas partículas são esféricas ou poligonais com a superfície ligeiramente áspera (sílica ativa); angulares, de partículas poligonais com superfícies apresentando bordas afiadas (pó de quartzo); ou irregulares; partículas com formas complexas e superfície bastante áspera (metacaulim) (BIGAS; GALLIAS, 2003).

As adições irregulares apresentam maior fricção entre os grãos, em função da maior rugosidade, necessitando de uma maior quantidade de água para obter uma trabalhabilidade adequada (CALADO *et al.*, 2016). Isto corrobora com os resultados apresentados na Figura 78, uma vez que as partículas de resíduo FGD possuem uma morfologia irregular (Figura 75), podendo ter contribuído para a diminuição do abatimento para a relação a/agl de 0,45, e para o traço com 5% de FGD, na relação a/agl igual a 0,6.

No entanto, pode-se perceber que os concretos produzidos com maiores teores de adição de FGD (10% e 15%) apresentaram um maior abatimento do que o produzido com 5% de adição do resíduo, para ambas relações água/aglomerante. Isto indica que o incremento de finos advindo destas porcentagens promoveu um efeito de rolamento das partículas, contribuindo para um maior abatimento (CARNEIRO *et al.*, 2003).

Ainda, quando quantidade de água na mistura foi aumentada, para a relação a/agl de 0,6, este incremento no abatimento para os teores de 10% e 15% de adição de FGD foi ainda mais acentuado, sendo verificados abatimentos acima do obtido no concreto referência. Isto indica que o efeito de rolamento das partículas foi mais significativa para a relação a/agl de 0,6.

Xiaodong *et al.* (2011) afirmam que os compostos de sulfato de cálcio di-hidratado e hemi-hidratado, além do sulfato de cálcio hemi-hidratado ($\text{CaSO}_3 \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$), este último presente no resíduo FGD estudado, pode contribuir para um aumento da trabalhabilidade de matrizes cimentícias, uma vez que atua no retardo da pega, o que provavelmente teve um maior efeito nos teores de adição de 10% e 15% para a relação a/agl de 0,6.

Rodvinij, Wattanachai e Chaiwithee (2019), avaliando a trabalhabilidade de concreto projetado com adição de resíduo FGD e utilizando cinzas pesadas como agregado miúdo, verificaram uma diminuição da trabalhabilidade do concreto com o aumento do teor de resíduo FGD incorporado, devido ao elevado teor de finos contido no resíduo FGD.

Entretanto, diferente do percebido neste trabalho, os autores verificaram uma contínua diminuição do abatimento dos concretos com o aumento do teor de resíduo FGD incorporado, não sendo verificado o efeito de rolamento nas partículas. Isto provavelmente ocorreu pela granulometria dos agregados utilizados pelos autores,

dentre os quais, a cinza pesada, que possui uma morfologia irregular e uma elevada absorção de água se comparada com agregados miúdos naturais (RODVINIJ, WATTANACHAI; CHAIWITHEE, 2019; SALVADOR *et al.*, 2006).

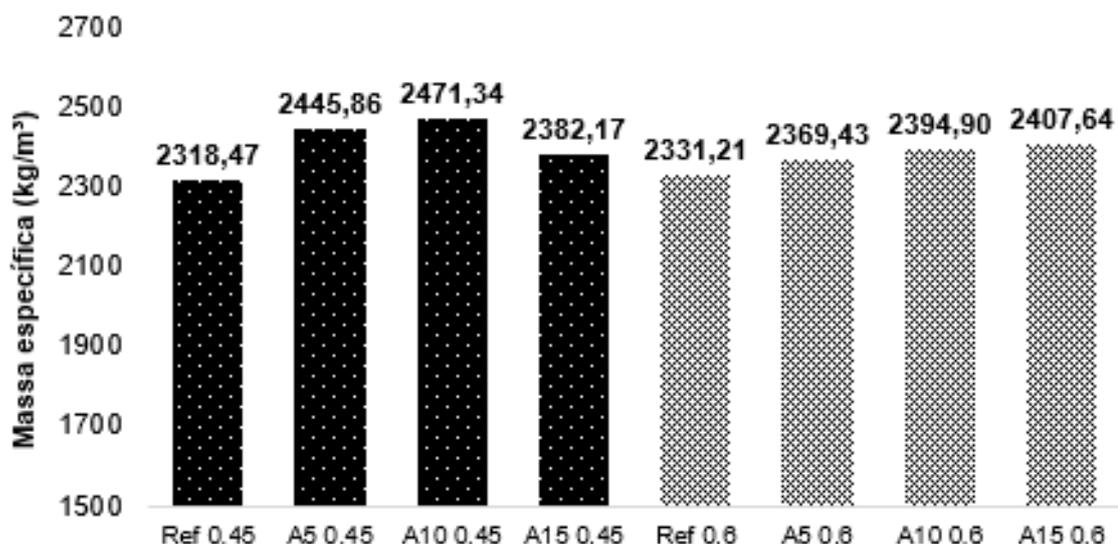
Zhong, Ni e Li (2012) avaliaram a consistência de argamassas produzidas com resíduo FGD e escória de alto-forno. Os autores perceberam uma menor consistência nas argamassas para os teores de FGD de até 10%, atribuindo este fator ao formato das partículas do resíduo utilizado (tabulares), e a elevada finura. No entanto, para 15% de adição os autores conseguiram um abatimento equivalente ao concreto referência, indicando que houve o incremento advindo do efeito de rolamento das partículas.

Khatib, Wright e Mangat (2016), avaliando as propriedades de concretos produzidos com substituição de cimento por resíduo FGD, verificaram que um teor de 10% de substituição promovia um incremento no abatimento, para relação água/aglomerante de 0,5. Provavelmente isto aconteceu pelo efeito do retardo da pega, uma vez que a quantidade de finos foi mantida praticamente constante. No entanto, para teores acima de 10%, os autores verificaram uma diminuição no abatimento, devido ao formato irregular das partículas de resíduo FGD.

5.2.2 Massa específica no estado fresco

Os resultados obtidos para as massas específicas dos concretos avaliados são apresentados na Figura 80. Pode-se perceber que a massa específica dos concretos produzidos se situou dentro do esperado para concretos convencionais (2000 a 2800 Kg/m³) (HELENE; ANDRADE, 2017), demonstrando pouca variação entre os tipos estudados. No entanto, pode-se inferir que existe uma tendência no aumento da massa específica dos concretos estudados, com o aumento do teor de resíduo FGD adicionado (Figura 79).

Figura 80 - Massa específica dos concretos



Fonte: Elaborado pela autora.

O aumento da massa específica dos concretos com o incremento do resíduo FGD ocorreu apesar das diferenças entre as densidades deste resíduo e do cimento. Isto indica que ocorreu o preenchimento de vazios presentes no concreto pelas partículas de resíduo FGD, possibilitando um melhor empacotamento da massa de concreto.

Este efeito fíler é de grande interesse para a melhoria das características dos concretos, uma vez que possui um efeito benéfico também nas propriedades mecânicas e durabilidade dos concretos (HERMAN *et al.*, 2016; MEHDIPOUR; KHAYAT, 2017; SHVARZMAN *et al.*, 2003).

Os resultados da análise de variância (ANOVA) para as massas específicas obtida, a um nível de confiabilidade de 95% são mostrados na Tabela 22, indicando que tanto o percentual de resíduo FGD incorporado, como a relação água/aglomerante utilizada e a interação entre os dois parâmetros, foram significativos para os resultados obtidos com relação a massa específica dos concretos.

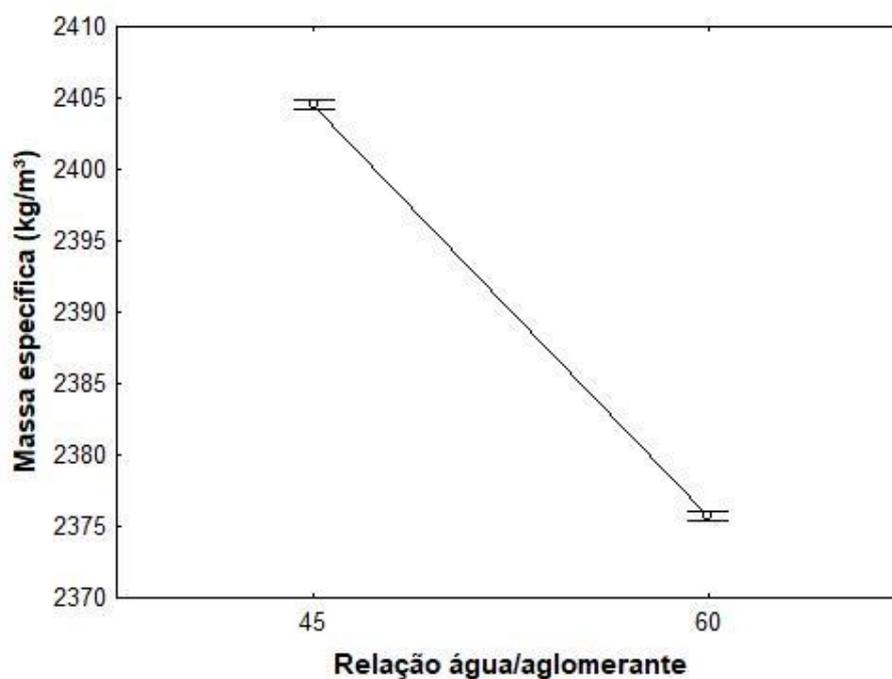
Tabela 22 - Análise de variância da Massa específica

Fatores de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Significância
a/agl	3325	1	3325	24523	0,000	Sim
% Resíduo FGD	25551	3	8517	62810	0,000	Sim
a/agl*% Resíduo FGD	9130	3	3043	22444	0,000	Sim
Erro	1,0	8	0			

Fonte: Elaborado pela autora. Nota: a/agl = Relação água/aglomerante.

Os gráficos das Figuras 81, 82 e 83 mostram o efeito isolado das variáveis independentes avaliadas com relação a massa específica dos concretos produzidos.

Figura 81 - Efeito isolado da relação a/c sobre a massa específica dos concretos produzidos

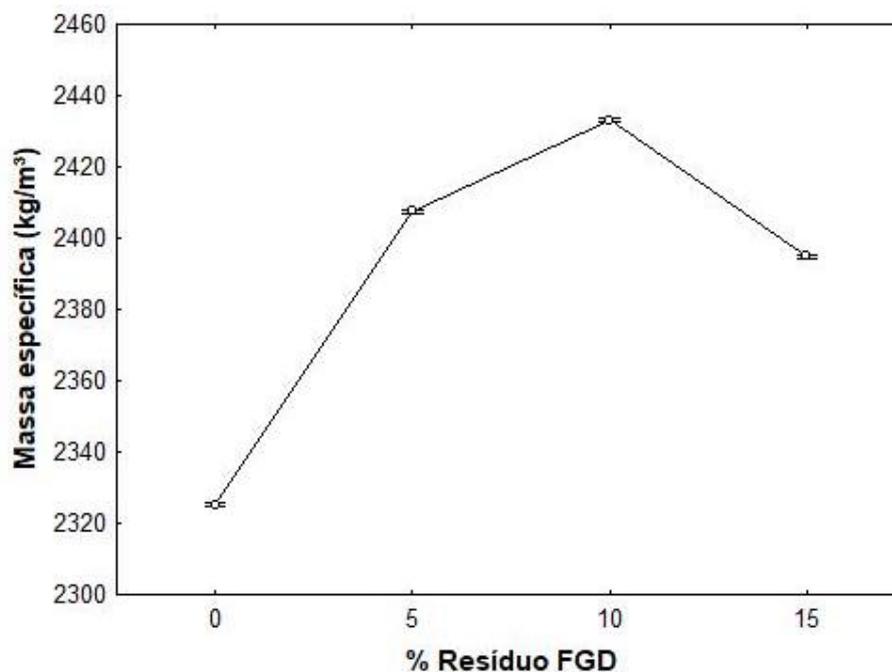


Fonte: Elaborado pela autora.

Como esperado, a interação entre a relação água/aglomerante (Figura 81) mostrou que traços mais ricos ($a/agl = 0,45$), com menor teor de água, possuem maior massa específica. Já, avaliando o efeito do percentual de resíduo FGD adicionado (Figura 82), verifica-se que ocorre um incremento desta propriedade com a adição de FGD, até um teor de 10%, indicando que até esta porcentagem é possível um

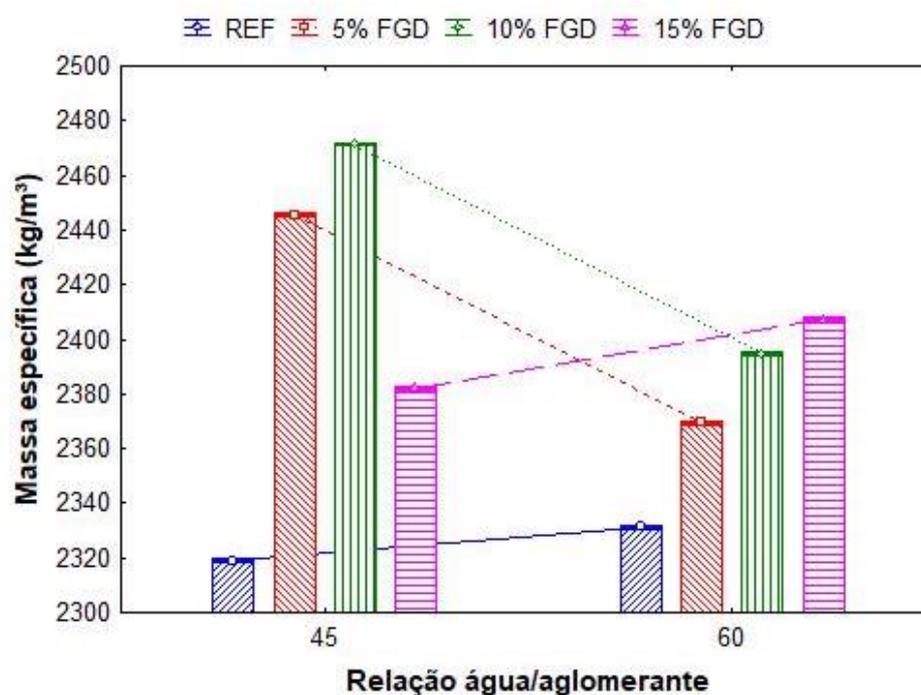
preenchimento efetivo dos vazios intergranulares. Para o teor de 15% de adição de resíduo FGD, houve uma queda na massa específica, demonstrando que há uma perda de eficiência no preenchimento dos poros para maiores teores de adição.

Figura 82 - Efeito isolado do percentual de Resíduo FGD sobre a massa específica dos concretos produzidos



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 83 - Efeito da interação entre o percentual de Resíduo FGD e a relação água/aglomerante sobre a massa específica dos concretos



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 83 apresenta o efeito da interação entre o percentual de adição de resíduo FGD e a relação água aglomerante sobre a massa específica, demonstrando que para traços com maiores teores de água é possível um ganho na massa específica para teores de 15%, e assim, um possível preenchimento efetivo de poros.

A partir dos gráficos apresentados nas Figuras 81, 82 e 83 e da Tabela 22, pode-se verificar que a variável mais influente na massa específica foi o teor de resíduo FGD incorporado no concreto, uma vez que apresentou valor de F (Tabela 22) superior às outras variáveis. Como discutido, isto deveu-se ao efeito fíler do resíduo, que é mais acentuado para traços mais ricos (como o de relação água/aglomerante de 0,45).

Foi realizado ainda o teste de Tukey (mostrado na Tabela 23), obtendo-se que os valores de massa específica obtidos para os traços avaliados foram estatisticamente diferentes.

Tabela 23 - Resultado da análise de Tukey para os resultados de massa específica

Traço	Massa específica média (kg/m³)
REF 0,45	2318,47 a
A5 0,45	2445,86b
A10 0,45	2471,34c
A15 0,45	2382,17d
REF 0,6	2331,21e
A5 0,6	2369,43f
A10 0,6	2394,90g
A15 0,6	2407,64h

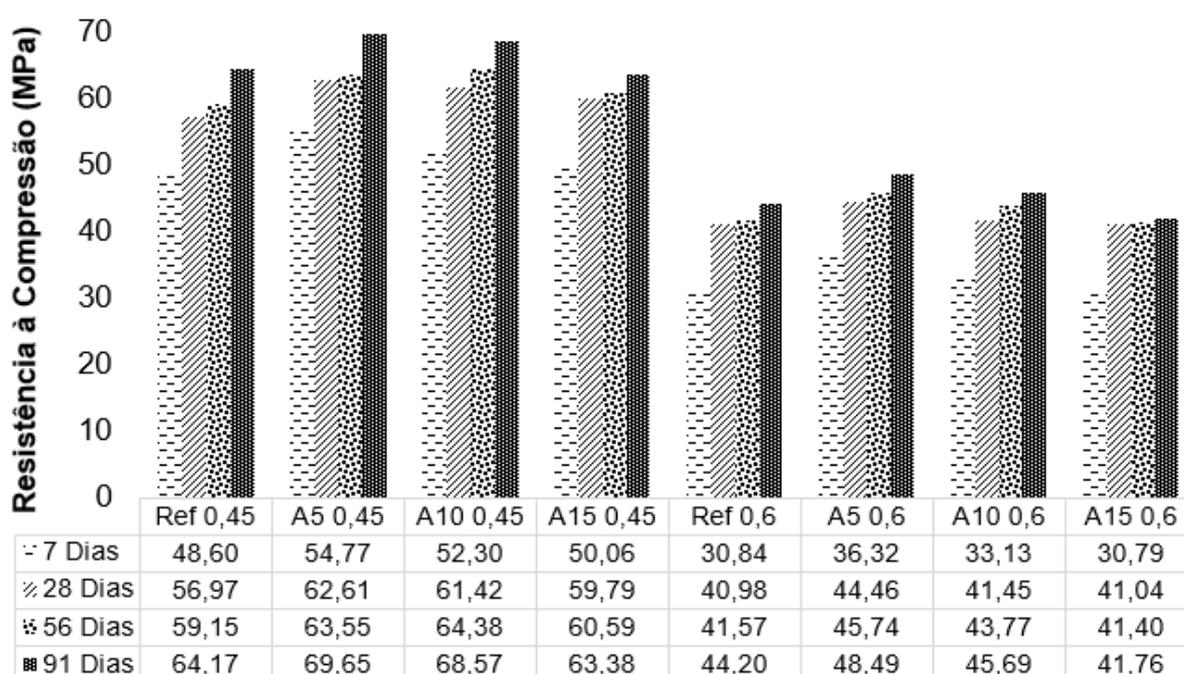
Fonte: Elaborado pela autora.

4.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

4.3.1 Resistência à Compressão Axial

Os resultados médios obtidos para resistência à compressão dos concretos estudados para os diferentes traços e idades avaliadas são apresentados na Figura 84. Foi realizada a avaliação estatística do ensaio de Resistência à Compressão Axial, conforme prescrito na NBR 5739 (ABNT, 2018), encontrando-se coeficientes de variação inferiores a 4%, o que enquadra o ensaio como “muito bom”, de acordo com a referida norma.

Figura 84 - Resultados de resistência à compressão dos concretos avaliados para as diferentes idades



Fonte: Elaborado pela autora.

Para inferir se as variáveis independentes estudadas (% FGD, relação a/agl e idade do concreto), bem como se a interação entre elas, exerciam influência sobre a variável de resposta (Resistência à compressão), em um nível de confiabilidade de 95%, os dados foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) através do software STATISTICA® 7.0 (STATSOFT, 2004). Os resultados da ANOVA são mostrados na Tabela 24.

Tabela 24 - Análise de variância da Resistência à Compressão

Fatores de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Significância
Idade	3112,8	3	1037,6	206,9	0,000	Sim
a/agl	11412,1	1	11412,1	2275,2	0,000	Sim
% Resíduo FGD	554,4	3	184,8	36,8	0,000	Sim
Idade*% Resíduo FGD	59,6	9	6,6	1,3	0,236	Não
a/agl*% Resíduo FGD	36,3	3	12,1	2,4	0,072	Não
Idade*a/agl*% Resíduo FGD	24,9	9	2,8	0,6	0,833	Não
Idade*a/agl	42,9	3	14,3	2,85	0,041	Sim
Erro	481,5	96	5,0			

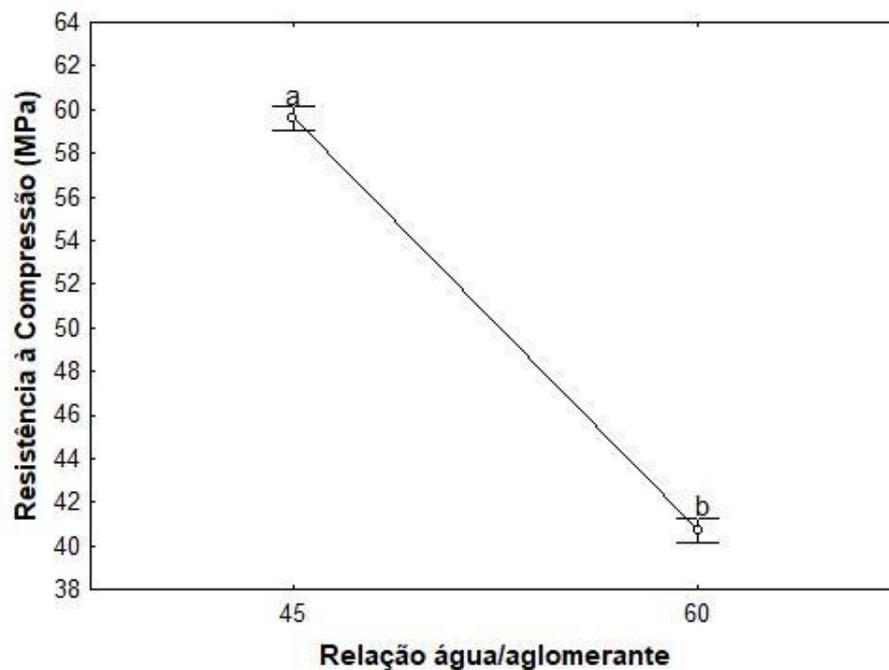
Fonte: Elaborado pela autora. Nota: a/agl = Relação água/aglomerante.

A partir da análise estatística, pode-se verificar conforme a Tabela 24, que os efeitos isolados dos fatores de variação foram significativos, juntamente com a interação entre a idade e a relação água aglomerante. Dentre os fatores de variação, pelo teste estatístico F verifica-se que o maior fator de influência na resistência à compressão foi a relação água/aglomerante (Figura 85), seguido da idade (Figura 86), do percentual de adição de resíduo FGD (Figura 87) e por último da interação entre a idade e a relação água/aglomerante (Figura 88).

A baixa interação entre o percentual de adição do resíduo FGD com a Resistência à Compressão é um indicativo de que a adição deste resíduo não provoca aumentos significativos na resistência à compressão axial ao longo do tempo, sendo comum em adições que apresentam pouca ou nenhuma atividade pozolânica, como verificado para o resíduo FGD foco desta pesquisa (GONÇALVES, 2000; ISAIA, 2017).

A Figura 85 demonstra que, como esperado, a resistência à compressão de concretos produzidos com um traço mais rico ($a/agl = 0,45$) é superior a obtida para os concretos com menor teor de aglomerante ($a/agl = 0,6$), uma vez que o aglomerante é responsável por conferir a resistência inicial do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Ainda os valores obtidos para as duas relações água/aglomerante avaliadas são diferentes estatisticamente pelo Teste de Tukey (Figura 85).

Figura 85 - Efeito isolado da relação água/aglomerante sobre a Resistência à Compressão

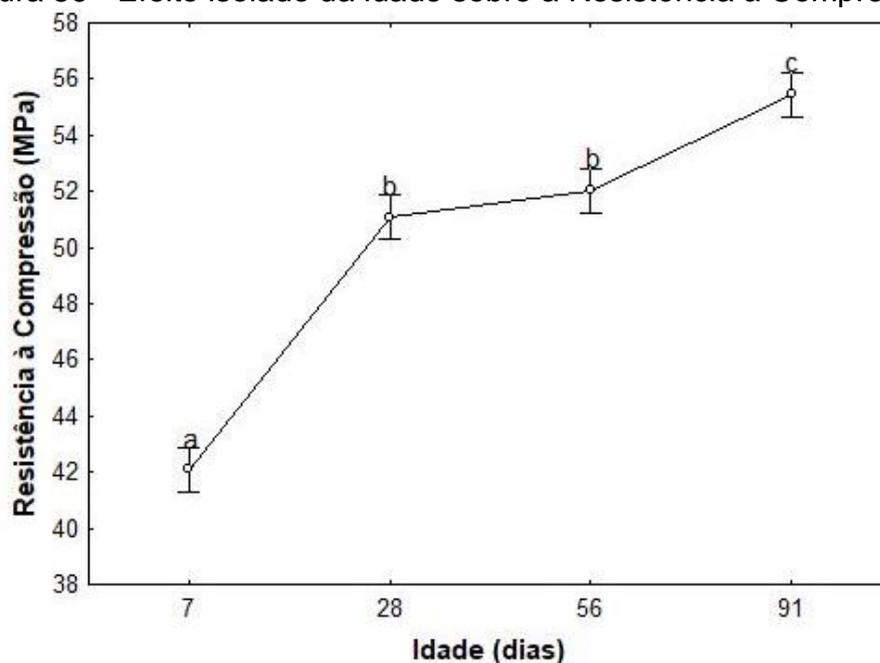


Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: a e b são variáveis do Teste de Tukey.

Com relação a influência da idade dos concretos estudados sobre a Resistência à Compressão, verifica-se que o aumento desta propriedade é mais evidenciado aos 28 dias, como esperado, mantendo-se constante até os 56 dias (conforme evidenciado pelo Teste de Tukey), e com um incremento considerável aos 91 dias (Figura 86).

Figura 86 - Efeito isolado da idade sobre a Resistência à Compressão

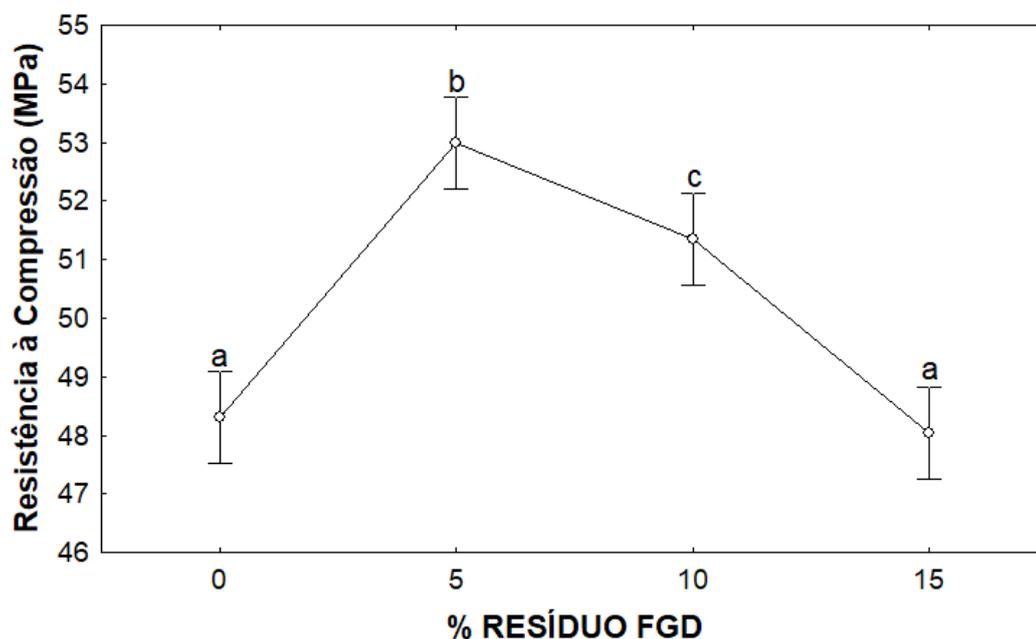


Fonte: Elaborado pela autora. Nota: a, b e c são variáveis do Teste de Tukey

A avaliação da influência dos teores de adição do resíduo FGD estudados sobre a Resistência a Compressão (Figura 87) permite inferir que todos os traços apresentaram efeitos benéficos ao desempenho deste parâmetro, com valores de Resistência à Compressão que são iguais ou superiores aos obtidos para o concreto referência. Isto corrobora com os resultados dos ensaios de caracterização do resíduo, que apontavam um alto potencial de uso deste resíduo como uma adição mineral do tipo fíler.

A Figura 87 apresenta ainda o resultado do Teste de Tukey para o efeito isolado do percentual de adição de resíduo FGD indicando que os percentuais de 5% e 10% promoveram um incremento na resistência à compressão, enquanto o teor de 15% manteve a resistência obtida no concreto referência.

Figura 87- Gráfico do efeito isolado da variação do teor de FGD sobre a média dos resultados de resistência à compressão



Fonte: Elaborado pela autora.

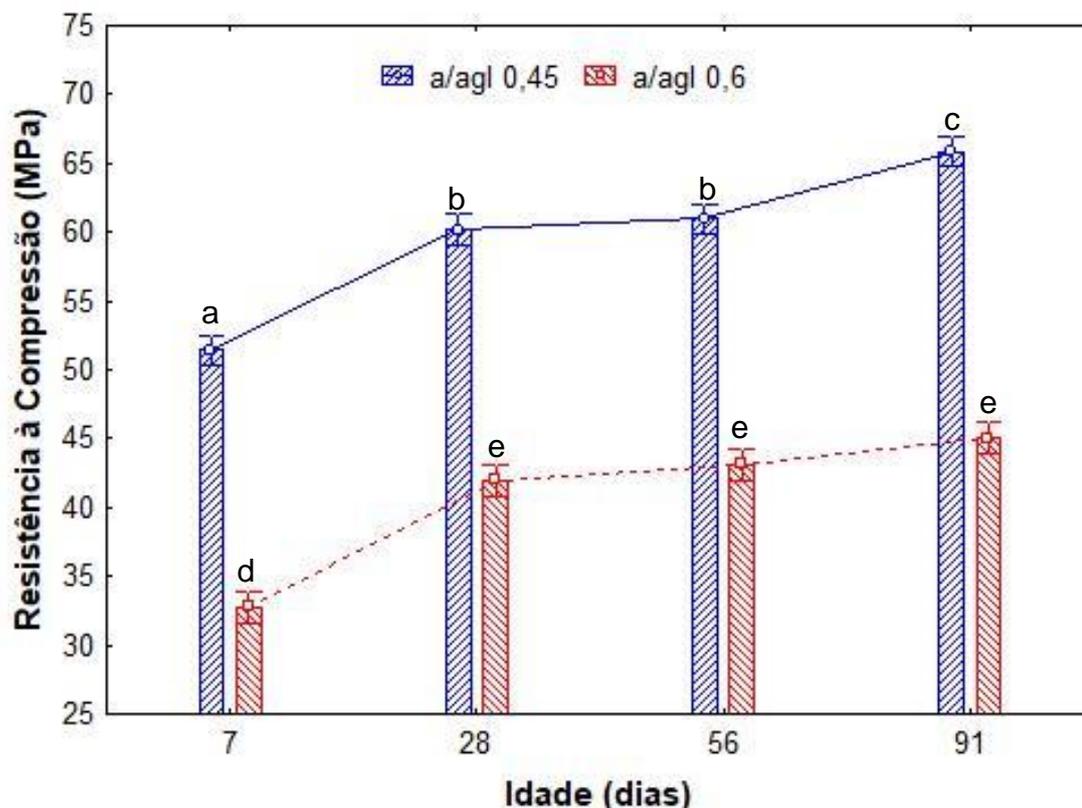
Nota: a, b, c e d são variáveis do Teste de Tukey

Ainda, pelas Figuras 84 e 87, verifica-se que o teor de adição de 5% foi o que proporcionou um melhor desempenho com relação a esta propriedade, seguido do teor de 10%, para todas as idades e relações água/aglomerante avaliadas.

Importante ressaltar que, para as idades mais avançadas, a adição de 10% de resíduo FGD apresentou resultados bastante semelhantes ao teor de 5% (Figura 84), o que pode ser interessante do ponto de vista de valorização deste resíduo, por possibilitar uma quantidade maior incorporada no concreto.

Considerando a interação entre a idade e a relação água/aglomerante (Figura 88), observa-se o mesmo comportamento da resistência à compressão com relação a idade do concreto. No entanto, para uma relação a/agl de 0,6, o incremento na resistência aos 91 dias não se difere estatisticamente dos obtidos nas idades de 28 e 56 dias, pela análise de Tukey (incorporada na Figura 88).

Figura 88 - Efeito da interação entre o percentual de Resíduo FGD e a relação água/aglomerante sobre a Resistência à Compressão



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: a, b, c, d, e são variáveis do Teste de Tukey.

Infer-se pelos resultados mostrados nas Figuras 84 e 87, que a alta finura do resíduo FGD atuou como filler nos poros e nos pontos de nucleação, garantindo uma maior dispersão das partículas de cimento e, assim, melhorando as condições de hidratação, o que contribuiu para o aumento da Resistência à Compressão dos concretos nas idades avaliadas (DAL MOLIN, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Além disso, as finas partículas do resíduo podem ter preenchido espaços da zona de transição reduzindo o espaço livre para a água nessa região. A combinação desses fatores resultou numa melhor ligação entre os elementos da matriz cimentícia, gerando um concreto com resistências maiores que o de referência (ALMEIDA; BRANCO; SANTOS, 2007).

Os concretos produzidos com relação a/agl de 0,45, REF, A5, A10 e A15, podem ainda ser classificados como concretos de alta resistência (CAR), segundo a NBR 12655 (ABNT, 2015), por atingirem resistências superiores a 50 MPa aos 28 dias. No entanto, para Mehta e Monteiro (2014), esta faixa de classificação abrange concretos com

resistência superior a 40 MPa, valores obtidos para todos os concretos produzidos com relação a/agl igual a 0,6.

Apesar de se ter conseguido uma melhoria no desempenho da Resistência à Compressão para os teores de 5% e 10%, com relação ao concreto referência, e de se ter garantido o desempenho deste para o teor de 15% de adição, verifica-se que a Resistência à Compressão dos concretos produzidos com resíduo FGD tende a diminuir para percentuais de adição acima de 5%. Desta forma, é provável que teores acima de 5% provoquem uma maior dispersão dos produtos hidratados, conduzindo a uma queda da ligação entre esses produtos e, conseqüentemente, diminuindo a resistência (GONÇALVES, 2000).

A queda de resistência para teores acima de 5% também foi verificada em outros trabalhos que utilizaram o resíduo FGD como adição em concretos.

Jiang *et al.* (2018) avaliaram o efeito da adição de resíduo FGD em concretos produzidos com cimento e escória de alto forno (CPIII). Os autores verificaram um teor ótimo de adição de 5%, inferindo que quantidades superiores promoviam uma redução nos produtos de hidratação do cimento, formando uma estrutura mais fina e porosa. Isto se deveu provavelmente pela grande liberação de sulfatos, uma vez que o resíduo FGD estudado pelos autores era composto majoritariamente por gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Guo e Shi (2013) citam que o aumento na resistência devido a adição de resíduo FGD pode-se dar pela formação de etringita primária, devido a adição de gipsita, que, além de provocar um retardo na hidratação do cimento, contribui para um aumento da resistência inicial da matriz cimentícia. No entanto, Khatib, Wright e Mangat (2016) verificaram que este aumento é garantido nos concretos com 365 dias de idade, assim, mesmo que a formação de etringita primária tenha significância neste processo, é provável que outros mecanismos estejam atuando em conjunto, como a presença de fases não reativas de sulfato/sulfito de cálcio.

A partir da análise destes trabalhos, pode-se inferir que o resíduo FGD foco do presente estudo seja composto majoritariamente por fases de sulfito de cálcio hemi-hidratado, que geralmente são não reativas, no entanto, percebe-se que pode haver uma porcentagem minoritária de formas reativas, que contribuam para uma maior

liberação de sulfatos na matriz de concreto, e conseqüentemente, para um decréscimo na sua resistência.

Estas fases mais reativas provavelmente contêm maiores teores de impurezas, como cloretos. Este fato será discutido mais adiante, onde será avaliada a microestrutura dos concretos produzidos.

4.3.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

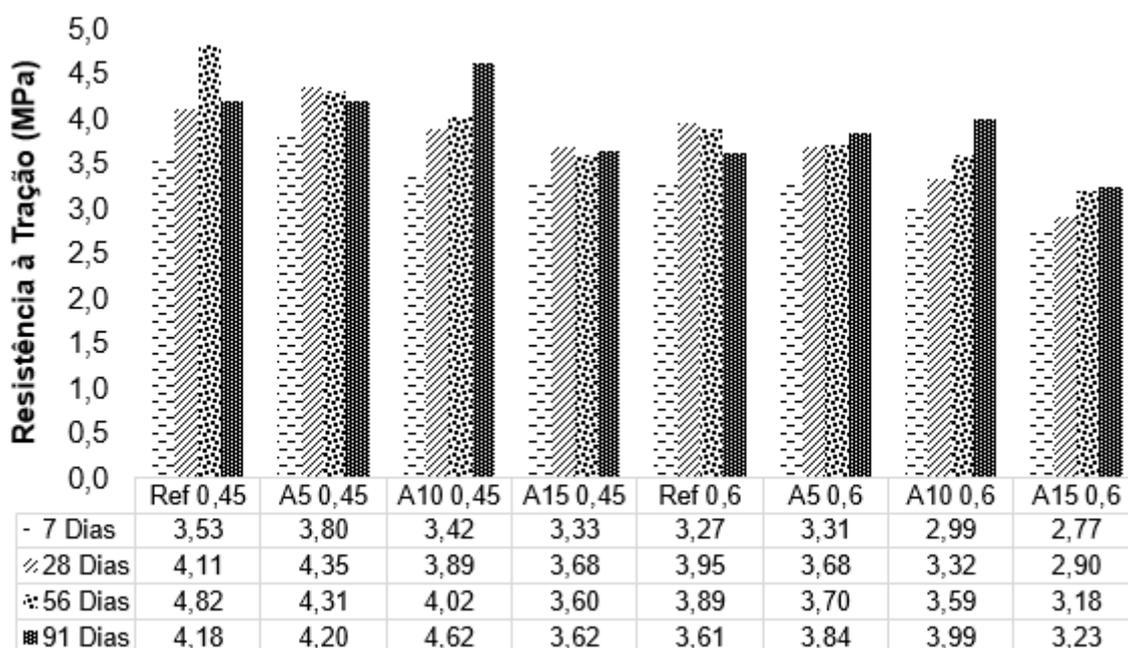
Apesar de a maior parte dos elementos de concreto ser projetadas para resistirem às tensões de compressão, as tensões de tração não podem ser ignoradas uma vez que a fissuração do concreto geralmente é resultante de uma ruptura à tração causada por retração restringida. A resistência de um concreto quando submetido a um carregamento à flexão (como em pavimentação de estradas) é determinada por uma combinação das tensões de tração, compressão e cisalhamento (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A partir dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral, pode-se obter os dados presentes na Figura 89. Os resultados da ANOVA para um nível de confiabilidade de 95% são mostrados na Tabela 25.

Com a realização da análise estatística mostrada na Tabela 25, verifica-se que os efeitos isolados (idade, % Resíduo FGD e relação água/aglomerante) influenciaram a Resistência à Tração, assim como a interação entre o percentual de adição de Resíduo FGD e a idade do concreto. No entanto, a variável que possuiu maior influência nesta propriedade foi a relação água/aglomerante.

Oliveira Júnior (2009) cita que as adições minerais têm pouco efeito na resistência à tração do concreto, uma vez que o concreto, por si só, tem uma baixa resistência à esforços de tração, pela baixa capacidade de deformação do material antes da ruptura.

Figura 89 - Resultados da Resistência à Tração por Compressão Diametral



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 25 - Análise de variância da Resistência à Tração por Compressão Diametral

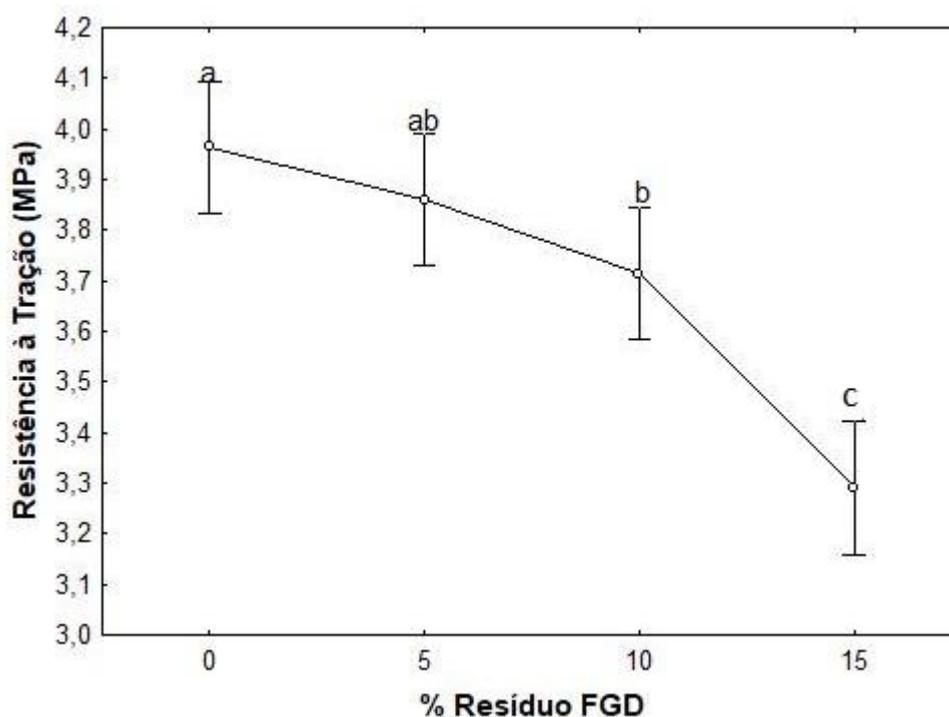
Fatores de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Significância
Idade	7,7	3	2,6	18,6	0,000	Sim
a/agl	9,6	1	9,6	69,6	0,000	Sim
% Resíduo FGD	8,5	3	2,9	20,6	0,000	Sim
Idade*% Resíduo FGD	3,3	9	0,4	2,6	0,009	Sim
a/agl*% Resíduo FGD	0,1	3	0,1	0,3	0,825	Não
Idade* a/agl	0,2	3	0,1	0,6	0,630	Não
Idade*a/agl*% Resíduo FGD	0,8	9	0,1	0,6	0,772	Não
Erro	13,3	96	0,1			

Fonte: Elaborado pela autora. Nota: a/agl = Relação água/aglomerante.

Percebe-se que, diferente da Resistência à Compressão Axial, a Resistência à Tração por Compressão Diametral decaiu com a adição do resíduo (Figura 89). Apesar disso, os valores para o teor de 5%, estatisticamente, não apresentaram variação com relação aos concretos referência para o teste de Tukey, conforme mostrado na Figura

90, que apresenta o efeito do percentual da adição de resíduo com relação a Resistência à Tração.

Figura 90 - Gráfico do efeito isolado da variação do teor de FGD sobre a Resistência à Tração



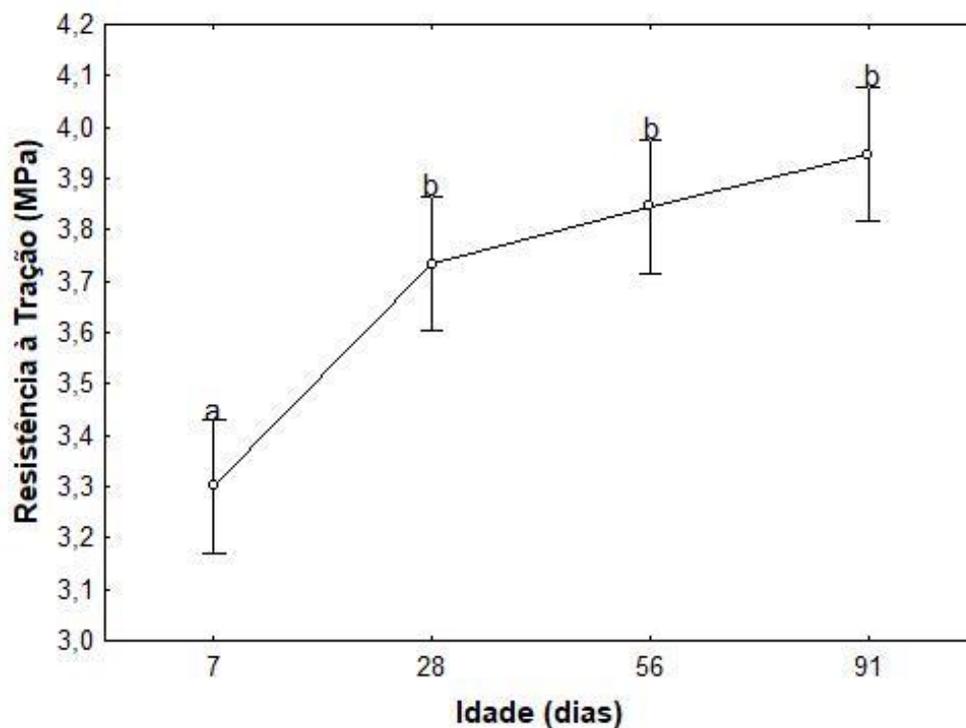
Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: a, b e c são variáveis do Teste de Tukey.

Já com relação ao efeito da idade sobre a Resistência à Tração, tem-se um aumento considerável da Resistência à Tração dos 7 aos 28 dias (Figura 91), no entanto, para as demais idades este efeito não é significativo, conforme resultado do Teste de Tukey.

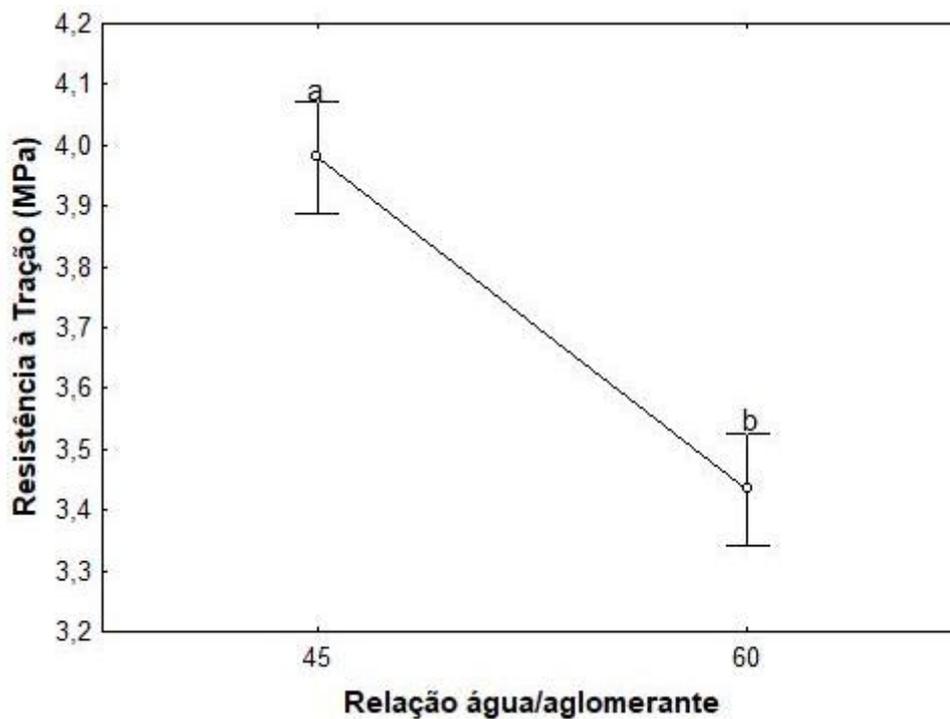
Assim como para a Resistência à Compressão, a relação água/aglomerante também foi significativa para a Resistência à Tração (Figura 92).

Figura 91 - Gráfico do efeito isolado da idade sobre a Resistência à Tração



Fonte: Elaborado pela autora. Nota: a e b são variáveis do Teste de Tukey.

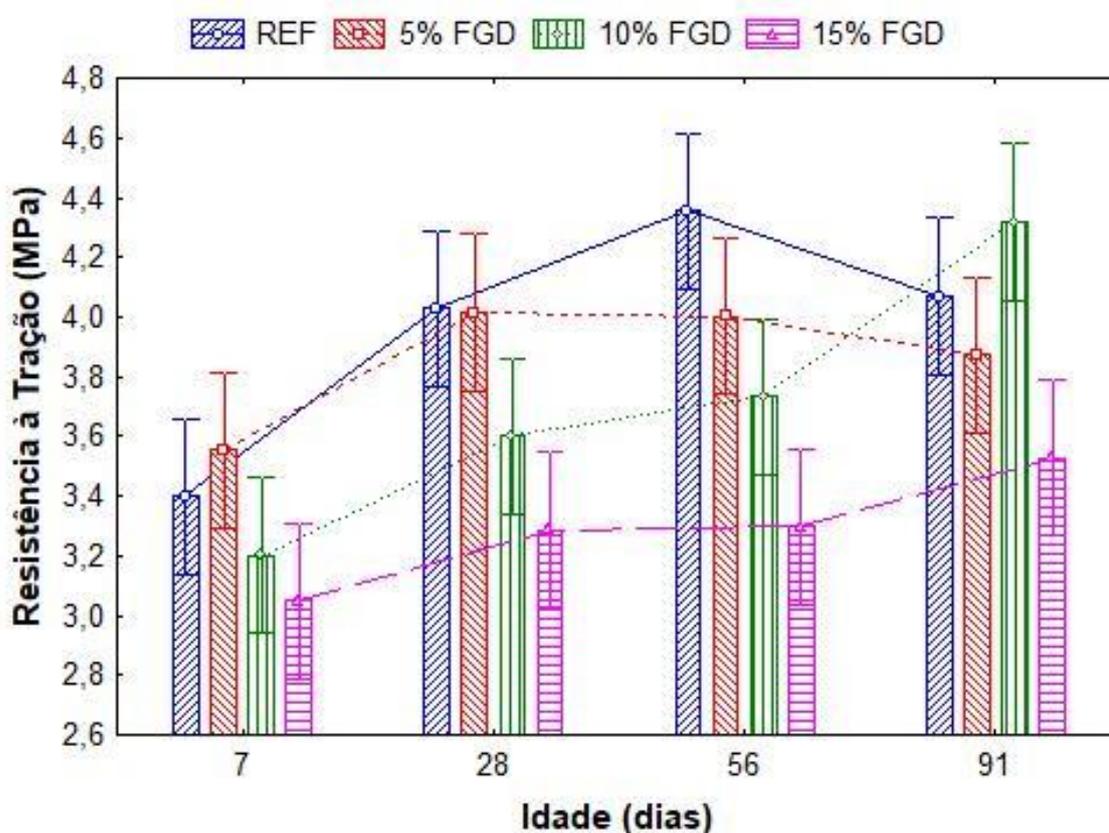
Figura 92 - Gráfico do efeito isolado da relação água/aglomerante sobre a Resistência à Tração



Fonte: Elaborado pela autora. Nota: a e b são variáveis do Teste de Tukey.

A interação entre o percentual de resíduo FGD adicionado e a idade do concreto é mostrada na Figura 93, verificando-se um incremento considerável desta propriedade aos 28 dias, no entanto para as demais idades, percebe-se uma estagnação. Avaliando a Figura 94, pode-se inferir ainda que não houve grande diferença entre o teor de adição de resíduo FGD e a Resistência à Compressão ao longo das idades avaliadas, uma vez que os valores de Resistência à Tração obtidos foram muito próximos.

Figura 93 - Efeito da interação entre o percentual de Resíduo FGD e a idade do concreto sobre a Resistência à Tração



Fonte: Elaborado pela autora.

Como encontrado neste trabalho, Oliveira Júnior (2009), avaliando a influência de adição de cinzas volantes e sílica ativa em concretos, não percebeu diferença estatística entre os teores de adição dos materiais e o concreto referência, confirmando a baixa influência das adições no desempenho da resistência à tração do concreto (OLIVEIRA JÚNIOR, 2009).

Outro fator que pode ter contribuído para que a Resistência à Tração não fosse incrementada com o aumento do teor de adição do resíduo FGD é o formato das

partículas deste resíduo. Como verificado na Figura 76, as partículas possuem formatos variados e uma alta superfície específica, no entanto, é verificado na seção 4.3.7 que a adição do resíduo promove a formação de uma grande quantidade de Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que é um cristal pseudo-hexagonal. Segundo Neville (2015), partículas com formato hexagonal e/ou tabulares tendem a interferir na Resistência à Tração, pois promovem acomodação em direções preferenciais gerando alinhamentos que propiciam planos de fraqueza no sentido da ruptura por tração.

Entretanto, mesmo que não se tenha obtido um incremento nesta propriedade, é importante ressaltar que a adição de 5% de resíduo FGD garantiu o desempenho dos concretos referência, para as duas relações água/aglomerante avaliadas, provavelmente pelo efeito fíler gerado.

Conforme mostrado na Figura 93, quando avaliada a interação entre o percentual de resíduo FGD adicionado, e a Resistência à tração por compressão diametral, pode-se verificar que para os teores de 10% e 15% de adição de resíduo FGD há um incremento na Resistência à Tração aos 91 dias, enquanto para os concretos referência e com adição de 5% existe uma estagnação (Figura 93).

Naik, Canpolat e Kraus (2013) também perceberam este comportamento em pavimentos de concreto produzidos com adição de 45% de resíduo FGD, em relação a massa de cimento. Os autores verificaram que nas idades iniciais, a adição deste percentual de resíduo não contribuía para melhoria desta propriedade, no entanto, a partir de 100 dias, era atingido um incremento de 17% na resistência à tração.

Apesar destes resultados, ressalta-se a necessidade de estudos que avaliem melhor o desempenho da resistência à tração dos concretos com adição de resíduo FGD, para idades mais avançadas, tendo em vista a carência de informação sobre este tema na literatura.

4.3.3 Absorção de Água por Imersão e Índice de Vazios

O ensaio de Absorção de Água por Imersão tem como objetivo avaliar o desempenho do concreto em termos de durabilidade, uma vez que caracteriza a porosidade total do concreto. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 2009) que nos permite, pelos resultados, obter valores não apenas da absorção de água como também dos índices de vazios, da massa específica seca e saturada além da massa específica real dos concretos produzidos. A partir da Absorção de água e

do índice de vazios nos concretos, Helene (1983) propõe a seguinte classificação para a qualidade do concreto (Quadro 5).

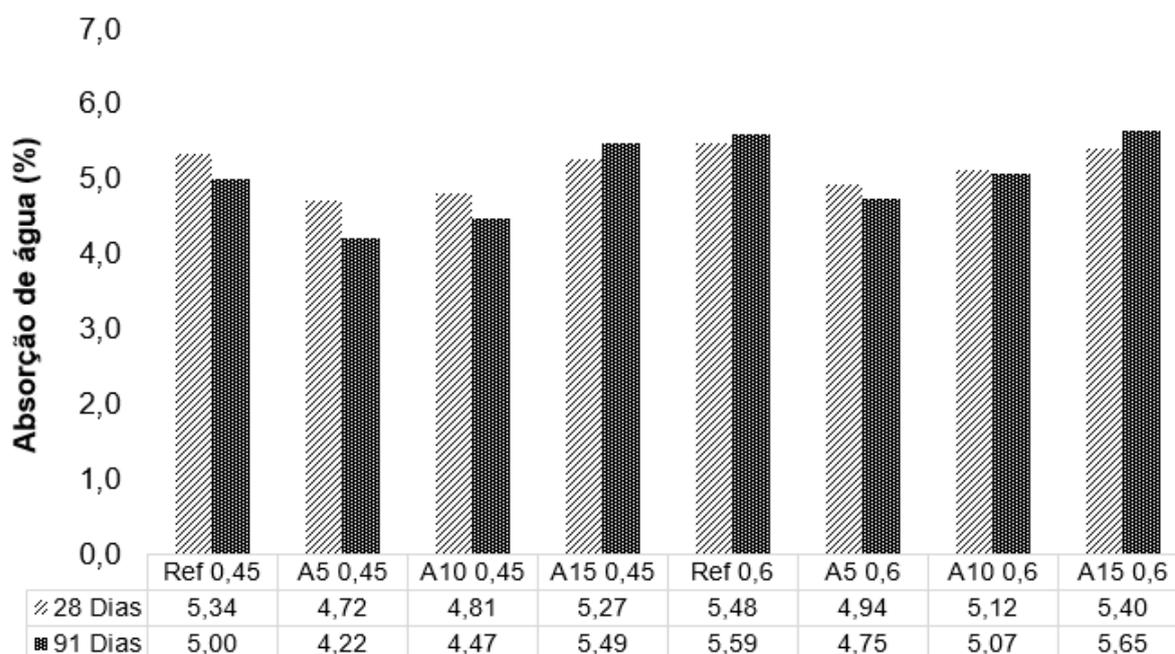
Quadro 5 - Proposta de classificação para concretos de acordo com a porosidade e a absorção de água

Propriedade	Qualidade do	<10%	10 a 15%	>15%
Porosidade	Durável	X		
	Normal		X	
	Deficiente			X
		<4,2%	4,2 a 6,3%	>6,3%
Absorção de água	Durável	X		
	Normal		X	
	Deficiente			X

Fonte: Adaptado de Helene (1983).

Os resultados obtidos para a Absorção de água (%) dos concretos estudados são mostrados na Figura 94. A Tabela 26 apresenta os resultados da ANOVA para um nível de significância de 95%.

Figura 94 - Resultado da Absorção de água por imersão



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 26 - Análise de variância da Absorção de Água por Imersão

Fatores de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Significância
Idade	0,1	1	0,1	5,3	0,034	Sim
a/agl	0,3	1	0,3	12,2	0,003	Sim
% Resíduo FGD	2,0	3	0,7	30,7	0,000	Sim
Idade*a/agl	0,1	1	0,1	6,4	0,022	Sim
Idade*%Resíduo FGD	0,1	1	0,0	1,3	0,320	Não
a/agl*% Resíduo FGD	0,2	3	0,1	3,1	0,059	Não
Idade*a/agl*% Resíduo FGD	0,0	3	0,0	0,2	0,926	Não
Erro	0,3	16	0,1			

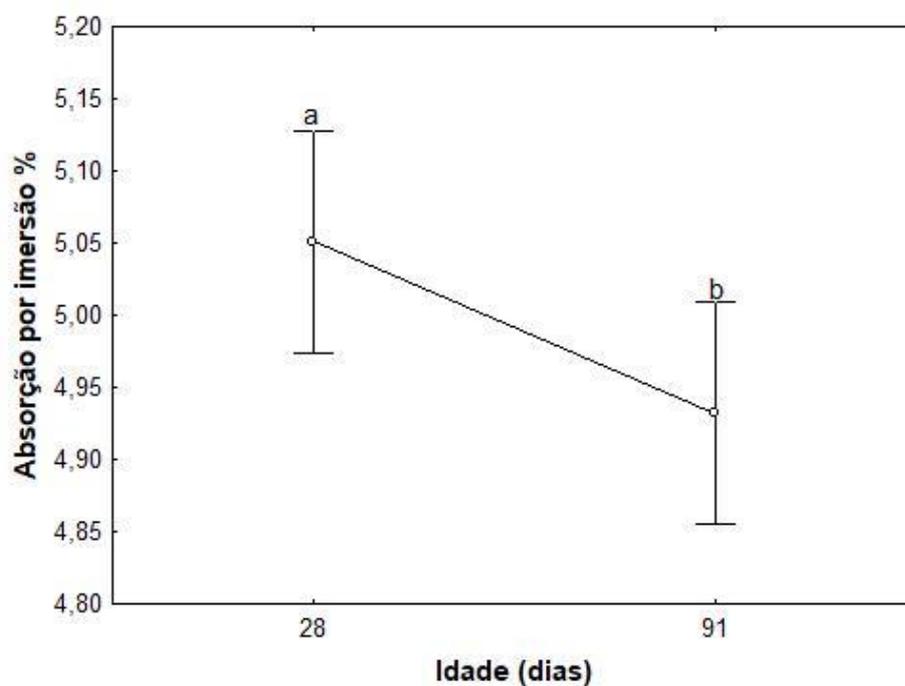
Fonte: Elaborado pela autora. Nota: a/agl = Relação água/aglomerante.

Pode-se perceber, avaliando os resultados mostrados na Figura 94, a porcentagem de adição de resíduo FGD foi significativa para a absorção de água pelos concretos, assim como a idade e a relação água/aglomerante. A interação entre a idade e a relação água/aglomerante também foi significativa. No entanto, pelo valor de F obtido, pode-se inferir que o percentual de resíduo FGD possui maior influência na absorção de água por imersão do que os outros parâmetros.

Com relação ao efeito da Idade sobre a Absorção de água por imersão (Figura 95) verifica-se que houve uma melhora desta propriedade, devido ao fechamento dos poros dos concretos pela densificação da matriz decorrente da hidratação dos compostos e formação de CSH (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Considerando o efeito da relação água/aglomerante (Figura 96), os concretos produzidos com traço mais rico (0,45) tiveram uma menor absorção de água por imersão, devido também a maior produção de CSH advinda do maior teor de cimento incorporado nestes traços (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Estes fatores provavelmente contribuíram para a significância da interação entre a idade e a relação água/aglomerante (Figura 97).

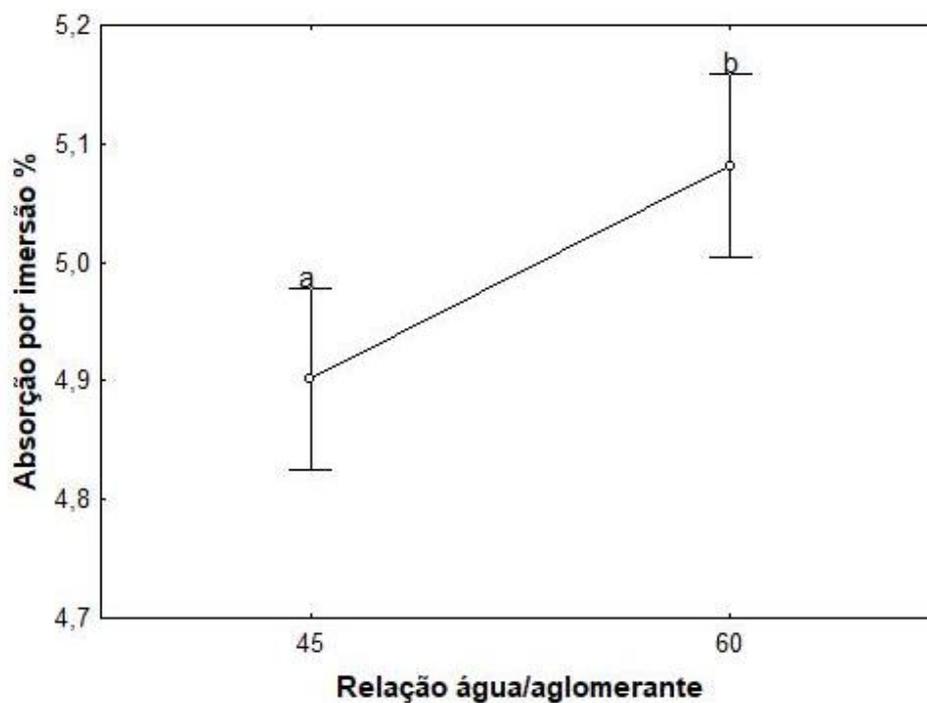
No entanto, para a relação a/agl de 0,6, não foi observada diferença estatística entre os valores obtidos para as diferentes idades avaliadas, o que infere-se que seja devido ao menor teor de aglomerante incorporado neste traço, e conseqüentemente, uma menor produção de CSH (Figura 97).

Figura 95 - Gráfico do efeito isolado da idade sobre a Absorção de água por imersão



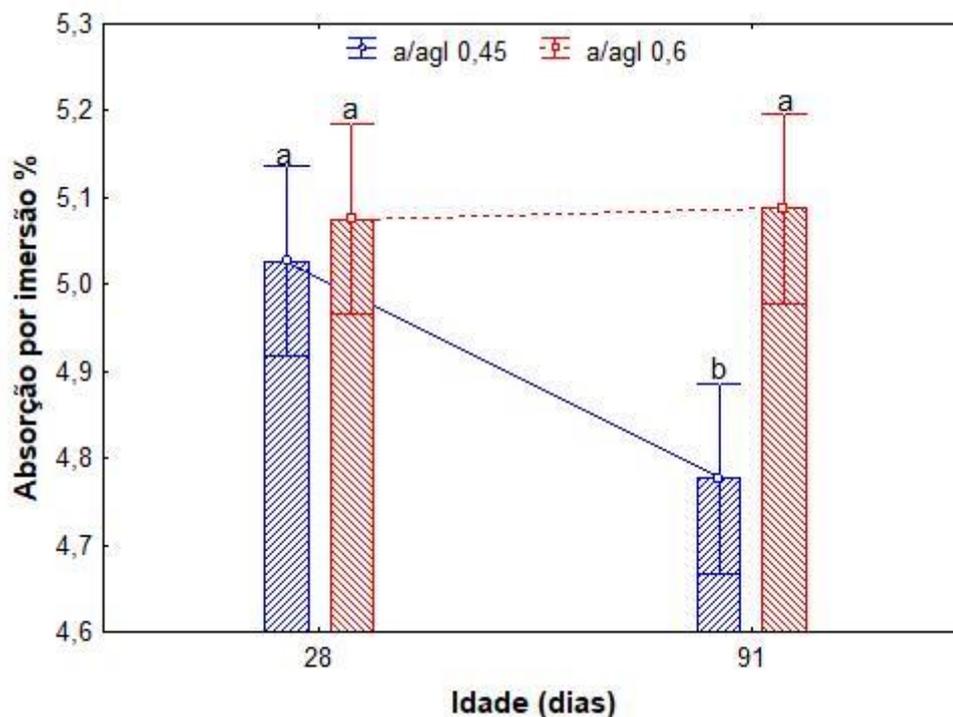
Fonte: Elaborado pela autora. Nota: a e b são variáveis do Teste de Tukey.

Figura 96 - Gráfico do efeito isolado da relação água/aglomerante sobre a Absorção de água por imersão



Fonte: Elaborado pela autora. Nota: a e b são variáveis do Teste de Tukey.

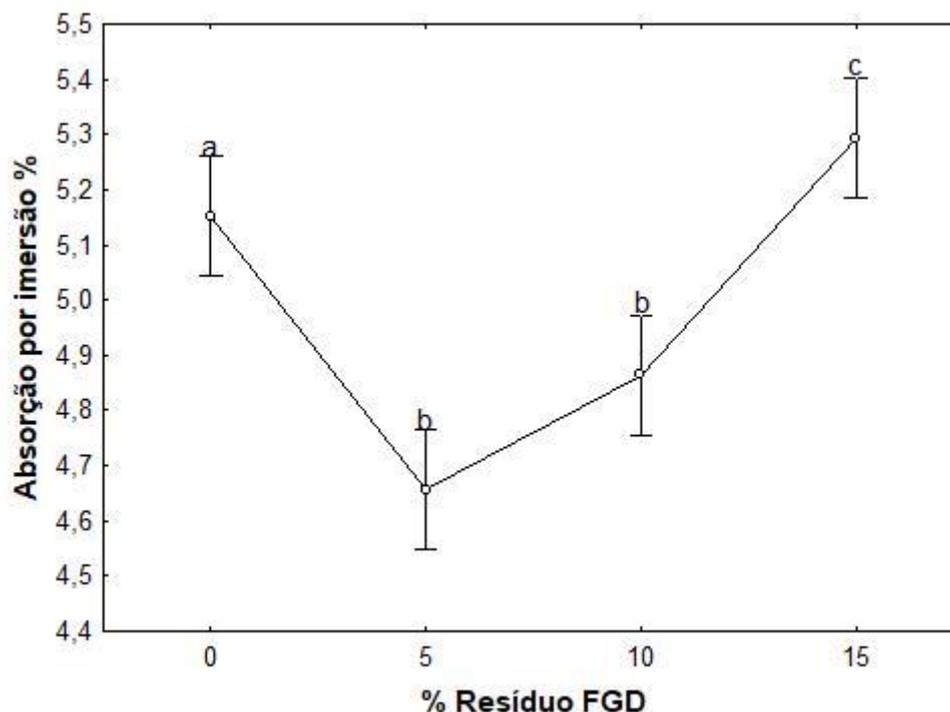
Figura 97 - Gráfico da interação da idade com a relação água/aglomerante sobre a Absorção de água por imersão



Fonte: Elaborado pela autora. Nota: a e b são variáveis do Teste de Tukey.

Avaliando o efeito isolado da adição do resíduo FGD (Figura 98), verifica-se que os teores de 5% e 10% promoveram uma redução na absorção de água por imersão em relação ao concreto referência, como consequência do preenchimento de poros advindos da adição do resíduo FGD (efeito Fíler). Percebe-se, no entanto, que para o teor de 15% de adição, a absorção obtida para o concreto referência foi mantida, indicando que existe uma capacidade máxima de preenchimento dos poros, obtida para os teores de 5% e 10% de adição, que não apresentaram diferença estatística entre si pelo Teste de Tukey (Figura 98).

Figura 98 - Gráfico do efeito isolado da variação do teor de FGD sobre a Absorção de água por imersão



Fonte: Elaborado pela autora. Nota: a, b e c são variáveis do Teste de Tukey.

A partir dos resultados mostrados na Figura 98, pode-se inferir que para o resíduo FGD foco desta pesquisa, porcentagens acima de 15% promovam um excesso de compostos solúveis no concreto, que contribuam para o aumento da porosidade e queda de resistência, como discutido na seção 4.3.2.

Os resultados obtidos para absorção por imersão e índice de vazios, nas idades avaliadas são mostrados nas Tabelas 27 e 28. A partir destes resultados, pode-se classificar os concretos produzidos de acordo com a metodologia proposta por Helene (1983), mostrada no Quadro 5. Todos os traços possibilitaram concretos do tipo Normal, com relação a porosidade e a absorção de água.

De acordo com as Tabelas 27 e 28 pode-se verificar ainda uma diminuição do número de poros com a adição de 5% e 10% de resíduo FGD, corroborando com os resultados obtidos para a Absorção de água por imersão. Já para o teor de 15% percebe-se um ligeiro aumento dos poros, o que pode ser devido à solubilidade de sulfatos na matriz.

Tabela 27 - Resultados da Absorção de Água por Imersão, Índice de vazios e massa específica real aos 28 dias

Traço	Absorção por imersão (%)	Índice de Vazios (%)	Massa específica da amostra seca (ps) (g/cm ³)	Massa específica da amostra saturada (psat) (g/cm ³)	Massa específica real (pr) (g/cm ³)
REF 0,45	5,28	12,35	2338,14	2461,65	2667,60
A5 0,45	4,72	10,81	2290,31	2398,41	2567,89
A10 0,45	4,81	11,27	2342,95	2455,61	2640,40
A15 0,45	5,29	12,21	2305,69	2427,75	2626,23
Ref 0,6	5,34	12,41	2321,62	2445,72	2650,56
A5 0,6	4,84	10,86	2243,07	2351,65	2516,44
A10 0,6	5,05	11,78	2332,14	2449,90	2643,45
A15 0,6	5,35	12,37	2310,60	2434,32	2636,82

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 28 - Resultados da Absorção de Água por Imersão, Índice de vazios e massa específica real aos 91 dias

Traço	Absorção por imersão (%)	Índice de Vazios (%)	Massa específica da amostra seca (ps) (g/cm ³)	Massa específica da amostra saturada (psat) (g/cm ³)	Massa específica real (pr) (g/cm ³)
REF 0,45	5,00	11,69	2339,59	2456,48	2649,27
A5 0,45	4,32	10,09	2332,25	2433,11	2593,88
A10 0,45	4,47	10,62	2375,56	2481,81	2657,96
A15 0,45	5,49	12,69	2309,37	2436,22	2644,88
Ref 0,6	5,39	12,43	2305,78	2430,04	2632,89
A5 0,6	4,75	11,08	2335,30	2446,11	2626,33
A10 0,6	5,07	11,83	2334,54	2452,85	2647,80
A15 0,6	5,50	12,74	2315,66	2443,05	2653,73

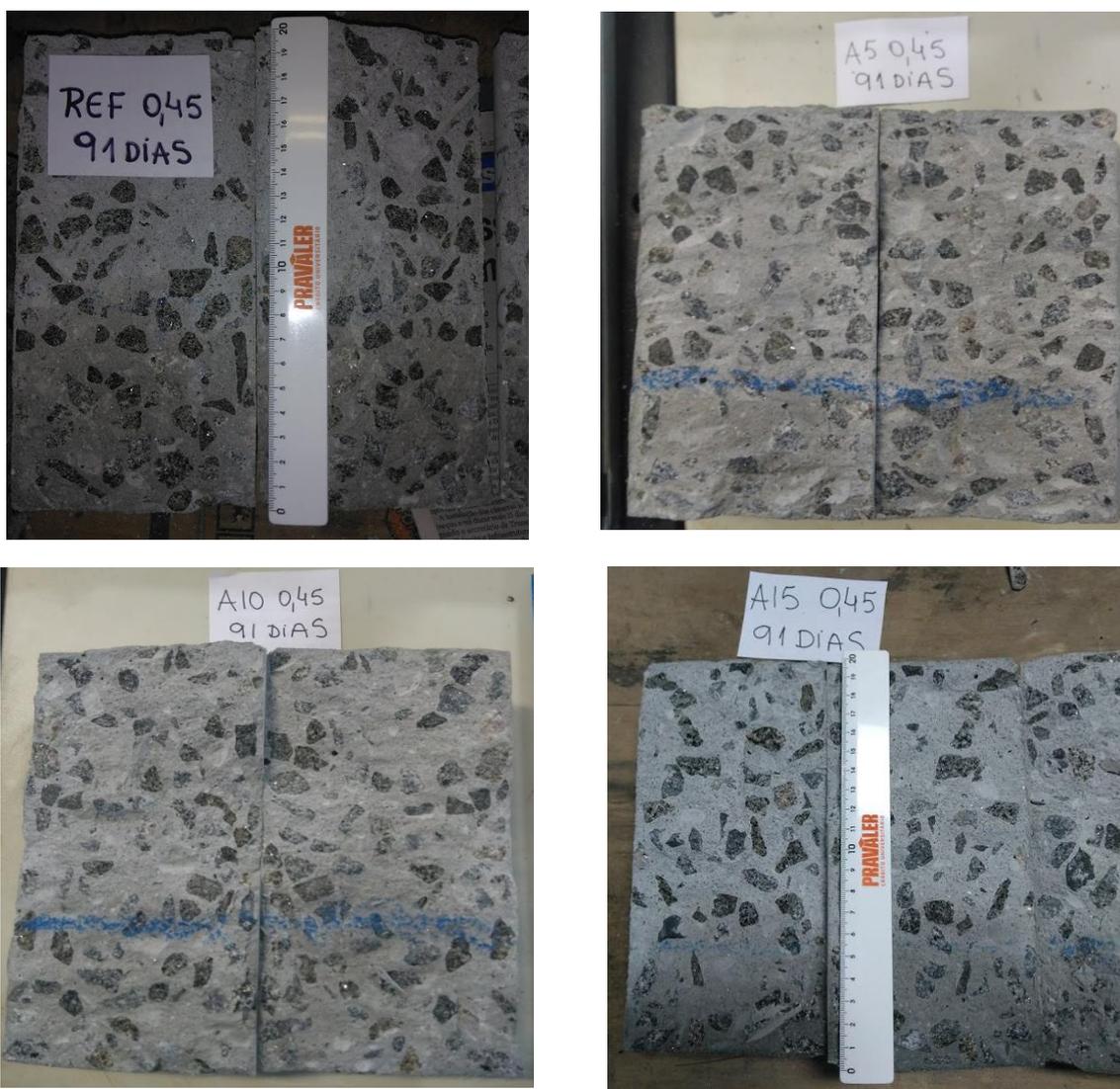
Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.4 Absorção de Água por Capilaridade

A permeabilidade do concreto está diretamente ligada à sua durabilidade e vida útil, pois a água, juntamente com íons agressivos, é responsável por alguns processos de deterioração (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Desta forma a susceptibilidade do concreto a penetração de íons agressivos pode ser medida pela absorção por capilaridade, que indica a presença de sulcos capilares no concreto.

Após a realização do ensaio de absorção por capilaridade, os corpos de prova foram rompidos de forma a se medir a ascensão capilar nos concretos estudados (Figura 99).

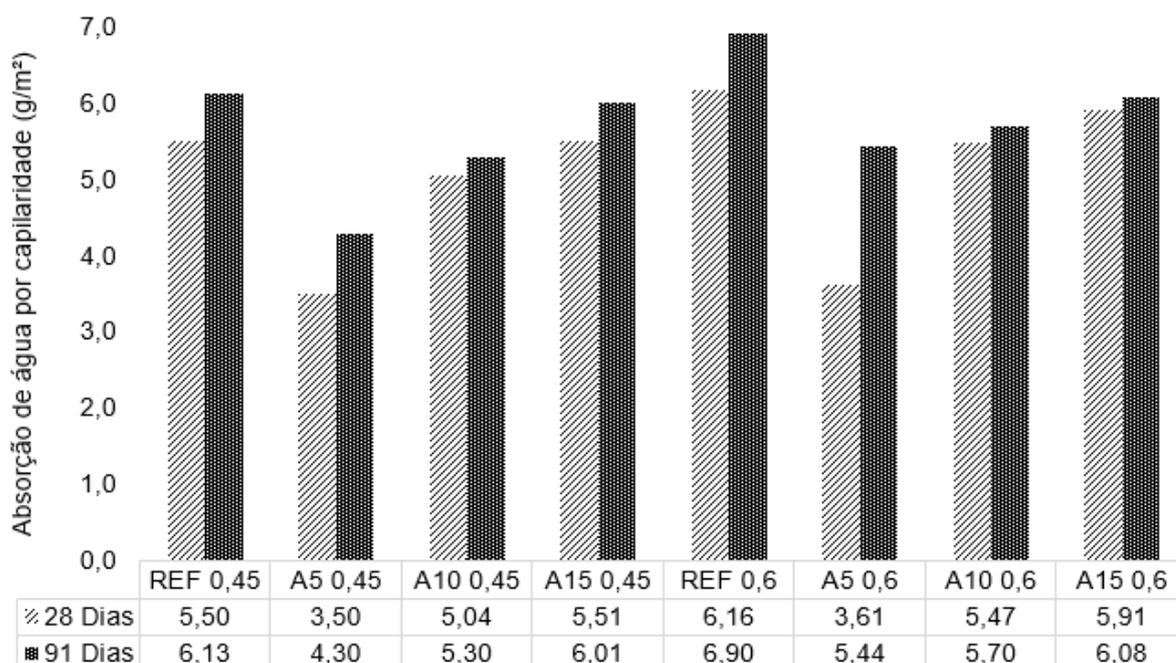
Figura 99 - Ascensão capilar nos corpos de prova após 72 horas



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Os resultados do ensaio de absorção por capilaridade são mostrados na Figura 100.

Figura 100 - Resultados do ensaio de absorção por capilaridade



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados obtidos às 72 horas no ensaio de absorção de água por capilaridade foram submetidos a uma análise de variância conforme apresentado na Tabela 29.

Tabela 29 - Análise de variância da Absorção de Água por capilaridade

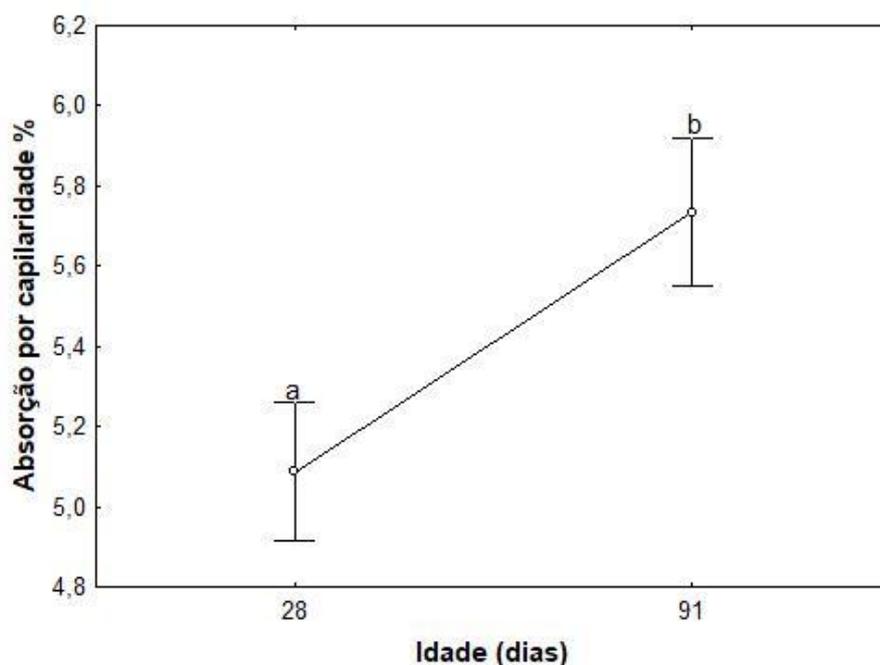
Fatores de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Significância
Idade	4,7	1	4,7	27,0	0,000	Sim
a/agl	2,8	1	2,8	16,2	0,000	Sim
% Resíduo FGD	24,9	3	8,3	47,5	0,000	Sim
Idade*% Resíduo FGD	1,9	3	0,6	3,6	0,002	Sim
a/agl*% Resíduo FGD	0,4	3	0,1	0,8	0,509	Não
Idade*a/agl	0,1	1	0,1	0,7	0,425	Não
Idade*a/agl*% Resíduo FGD	0,7	3	0,2	1,4	0,274	Não
Erro	5,2	30	0,2			

Fonte: Elaborado pela autora. Nota: a/agl = Relação água/aglomerante.

A partir da Tabela 29, é possível observar que os efeitos isolados das variáveis: Idade, % de adição de resíduo FGD e relação/aglomerante foram significativos para a Absorção de água por capilaridade, assim como o efeito da interação entre a idade e o percentual de adição de resíduo FGD. No entanto, pelo maior valor de F obtido, o efeito isolado da adição de resíduo possui maior influência nesta propriedade.

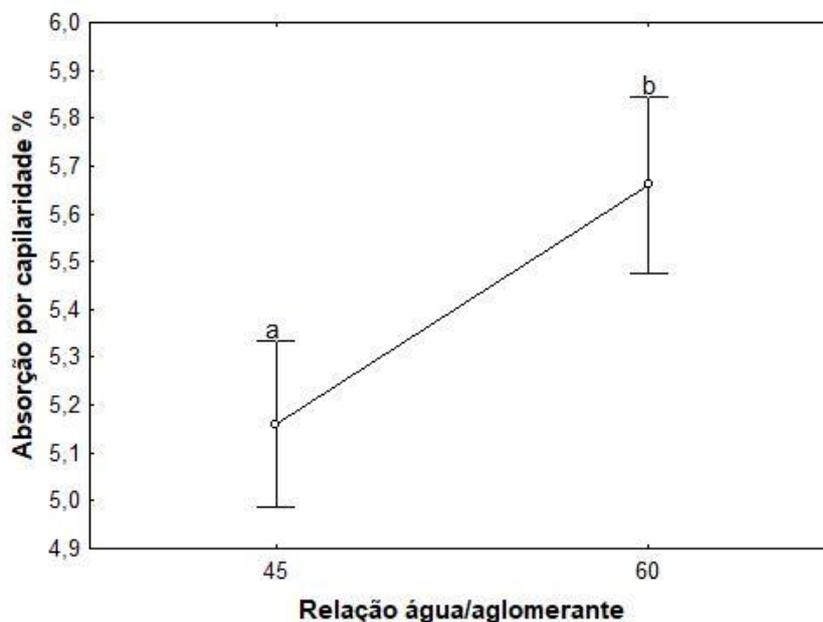
Conforme pode ser observado nas Figuras 101 e 102 houve um acréscimo da absorção por capilaridade com a idade e com o aumento da relação água/aglomerante, corroborado pela análise de Tukey apresentada em ambos gráficos.

Figura 101 - Gráfico do efeito isolado da idade sobre a Absorção de água por capilaridade



Fonte: Elaborado pela autora. Nota: a e b são variáveis do Teste de Tukey.

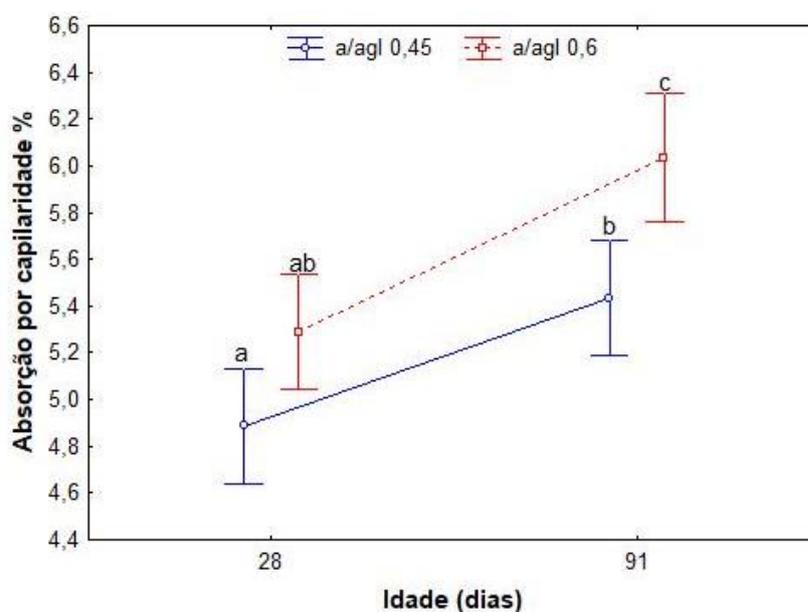
Figura 102 - Gráfico do efeito isolado da relação água/aglomerante sobre a Absorção de água por capilaridade



Fonte: Elaborado pela autora. Nota: a e b são variáveis do Teste de Tukey.

É possível observar que não houve diferença significativa pelo Teste de Tukey para a absorção por capilaridade obtida em 28 dias nas duas relações água/aglomerante avaliadas (Figura 103). No entanto, aos 91 dias, houve um incremento significativo para as duas relações água/aglomerante, indicando que foi promovido um refinamento dos poros pela produção de CSH.

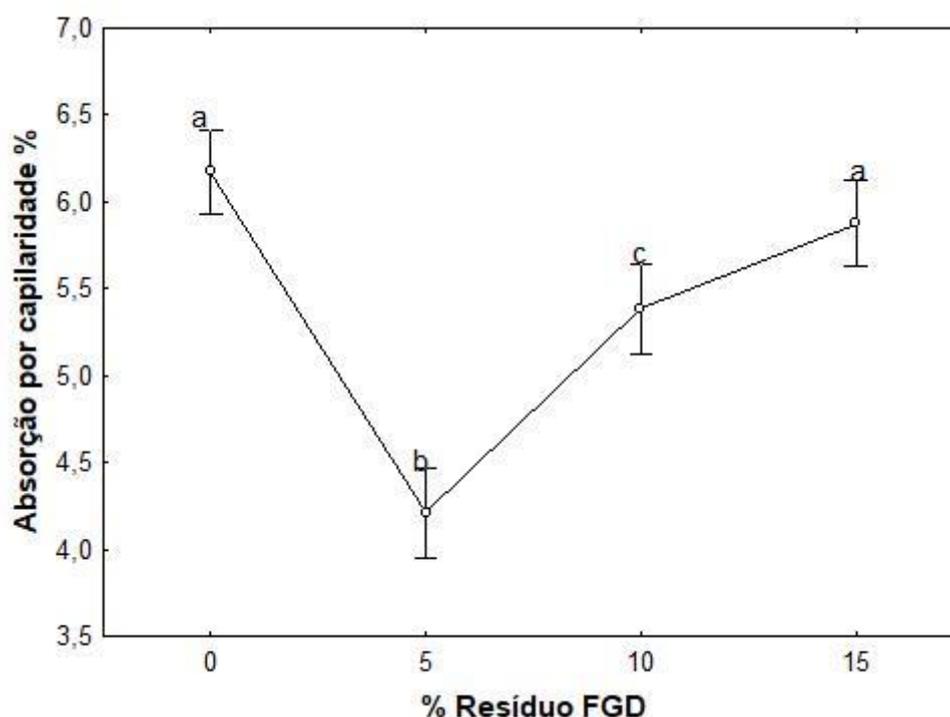
Figura 103 - Gráfico da interação da idade com a relação água/aglomerante sobre a Absorção de água por capilaridade



Fonte: Elaborado pela autora. Nota: a, b e c são variáveis do Teste de Tukey.

Com relação ao efeito da adição do resíduo FGD na Absorção por capilaridade, avaliando os resultados mostrados na Figura 104, verifica-se que os mesmos corroboram com os resultados obtidos na absorção por imersão. Percebe-se que a adição do resíduo FGD contribui para a redução do número de poros, promovendo um maior empacotamento da matriz cimentícia. Sendo assim, o efeito da adição não é relativo ao refinamento dos poros, e sim, na redução de poros de maior diâmetro.

Figura 104 - Gráfico do efeito isolado do % Resíduo FGD sobre a Absorção de água por capilaridade



Fonte: Elaborado pela autora. Nota: a, b e c são variáveis do Teste de Tukey.

O melhor desempenho foi obtido para o teor de adição de 5% (Figura 104), que promoveu, aos 91 dias, uma redução de 30% e 21% na absorção de água por capilaridade para as relações a/agl de 0,45 e 0,6 respectivamente, com relação ao concreto referência, seguido do teor de 10% de adição, com 14% e 17% de redução e do de 15% de adição, 2% e 12%.

Os resultados obtidos para absorção por imersão e capilaridade corroboram com o exposto por Gonçalves (2000), que avaliando o efeito de fílers de resíduo de mármore e granito perceberam uma redução na absorção de água dos concretos, pelo preenchimento dos vazios.

4.3.5 Avaliação da Presença de Cloretos Livres

A presença de cloretos nas estruturas de concreto armado é crítica, pelo fato de serem um agente da corrosão das armaduras (PEREIRA; CINCOTTO, 2001).

Desta forma, a NBR 12655 (ABNT, 2015), apresenta teores máximos de íons cloreto em concretos (calculados sobre a massa de cimento) para proteção das armaduras, de acordo com a classe de agressividade. Estes são mostrados no Quadro 6.

Como visto na seção 4.1.2, o teor de cloretos no resíduo FGD estudado foi considerado alto (6,5%), assim, para utilização deste resíduo como adição em concretos, deve ser observado o impacto do incremento da quantidade de cloretos, que pode contribuir para uma susceptibilidade das estruturas de concreto armado à corrosão.

Considerando a adição de resíduo FGD em concretos, para a condição mais crítica (concreto protendido), só poderia ser adicionado 0,75% de FGD ($6,5\%Cl^- \times 0,75\%FGD = 0,049\%Cl^-$) em relação a massa de cimento, se o resíduo FGD fosse a única fonte de cloretos dentro do concreto.

No entanto, é importante observar que os íons cloreto (Cl^-) podem estar presentes no concreto na forma de cloretos livres ou combinados, sendo que apenas os cloretos livres são agentes do processo de corrosão das armaduras (NEVILLE, 1995; NILSSON *et al.*, 1996).

Com vistas a avaliar a contribuição dos teores de adição de resíduo FGD na formação de cloretos livres, que são críticos à corrosão das armaduras, foi realizada a determinação do teor de cloretos livres nos concretos produzidos, como descrito na seção 3.6.3.5, nas idades de 7, 28, 56 e 91 dias.

Quadro 6 - Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto

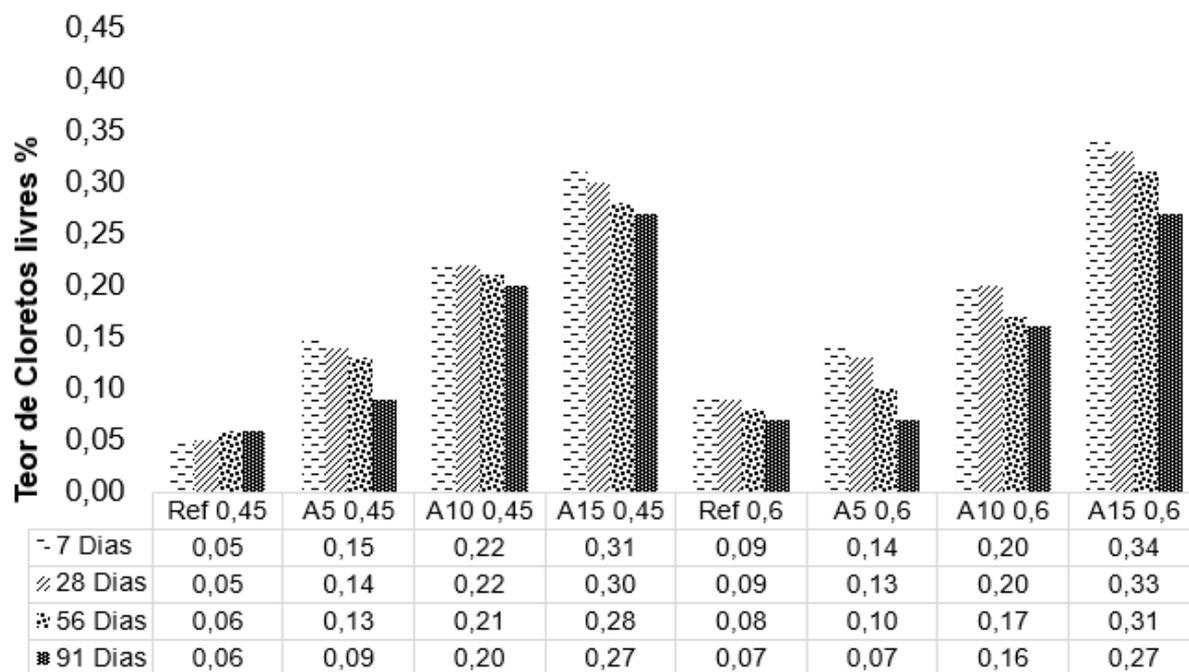
Classe de agressividade	Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl⁻) no concreto % sobre a massa de cimento
Todas	Concreto protendido	0,05
III e IV	Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
II	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,30
I	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40

Fonte: Adaptado da NBR 12655 (ABNT, 2015).

As concentrações de cloretos livres nos concretos dos diferentes traços, para as idades de 7, 28, 56 e 91 dias, são mostradas na Figura 105

Ainda, os resultados obtidos com a aspersão da solução de nitrato de prata nos concretos são apresentados nas Figuras 106 a 113 (para as idades de 28, 56 e 91 dias). Importante ressaltar que apenas um lado do corpo de prova foi aspergido com a solução.

Figura 105 - Teor de cloretos livres nos concretos estudados (em relação a massa de cimento)



Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 105, pode-se perceber que aos 7 dias, apenas os concretos referência com relação água/aglomerante de 0,45 possuíam uma concentração de cloretos livres abaixo do limite da NBR 12655 (ABNT, 2015) para uso em qualquer classe de agressividade (Quadro 6).

Os concretos com adição de 5% de resíduo poderiam ser utilizados em ambientes com classe de agressividade I, II e III, os com 10% de resíduo FGD para classes I e II, já os concretos de 15%, somente na classe I (ABNT, 2015).

No entanto, exceto para o traço REF 0,45, todos os outros traços avaliados, apresentaram diminuição da concentração de cloretos com relação a idade dos concretos, provavelmente pelo encapsulamento destes íons durante o processo de hidratação do cimento (Tabela 30).

Tabela 30 - Redução percentual do teor de cloretos após 91 dias de cura

Traço	% Redução do teor de cloretos aos 91 dias
REF 0,45	0,0
A5 0,45	40,0
A10 0,45	9,1
A15 0,45	12,9
REF 0,6	26,1
A5 0,6	50,0
A10 0,6	20,0
A150 0,6	20,6

Fonte: Elaborado pela autora.

O mecanismo de encapsulamento de cloretos livres no concreto é descrito por Neville (2015) como a formação de cloretos combinados pela reação destes íons com o aluminato tricálcio anidro (C3A), gerando o mono-cloro-aluminato hidratado (sal de Friedel): $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$. Os íons cloreto podem ainda reagir com o C4AF (ferroaluminato de cálcio) formando outros cloroaluminatos.

A partir do encapsulamento de cloretos, consegue-se já aos 28 dias, para os concretos produzidos com adição de 5% de resíduo FGD, concentrações de cloretos livres compatíveis com o concreto referência.

No entanto, apesar de haver uma redução significativa no teor de cloretos para o traço A10 0,6, que se aproxima do limite de 0,15%, aos 91 dias, percebe-se que provavelmente a maior quantidade de íons cloreto neste traço tornou o processo de combinação ineficiente, uma vez que o cimento utilizado não continha grandes quantidades de aluminatos e ferroaluminatos, que encapsulam os íons cloreto no concreto, conforme sua caracterização, mostrada na seção 3.5.4.

Avaliando o resultado do ensaio colorimétrico com aspensão de nitrato de prata, para os concretos com 28 dias (Figuras 106 a 109), pode-se observar que os resultados são semelhantes aos da Figura 105, sendo clara a percepção da coloração marrom nos concretos referência (mínimas concentrações de cloretos livres), e a formação desta coloração nos concretos com 5% de adição (A5 0,45 e A5 0,6). Isto indica que os testes se correlacionam, como esperado.

Percebe-se ainda, um início de formação de coloração amarronzada no concreto com 10% de adição e 0,6 de relação a/agl (A10 0,6), que, após 56 dias apresentou uma redução significativa no teor de cloretos livres.

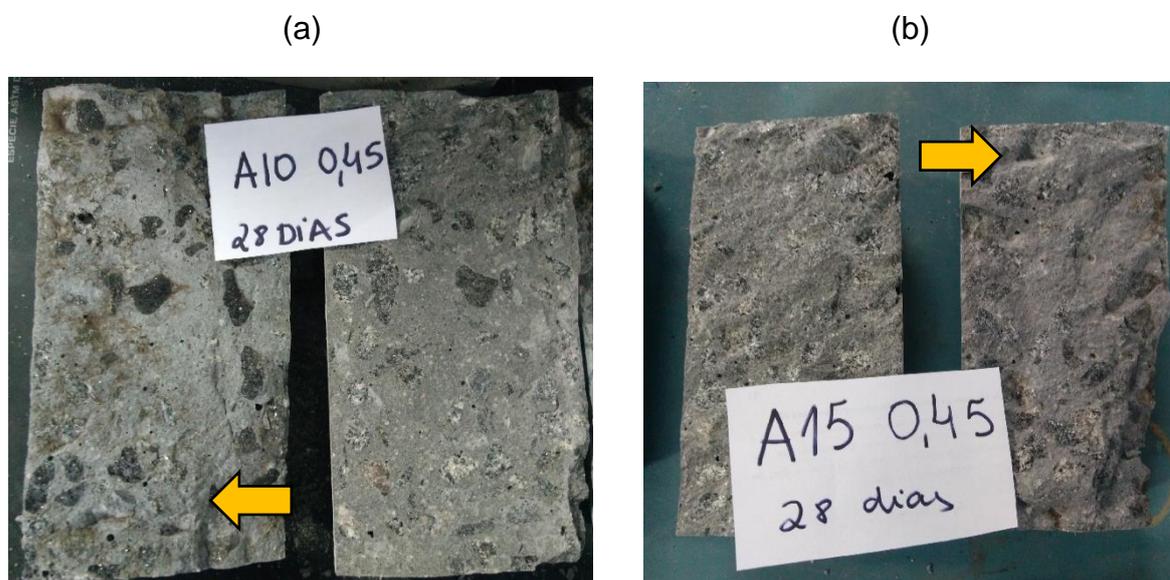
Segundo Santos (2016), pelo fato do sal de Friedel ser um sal hidratado, existe a necessidade de água para sua formação, isto corrobora com o encontrado nesta pesquisa, uma vez que os traços com maior teor de água ($a/agl = 0,6$) promoveram uma maior redução de cloretos livres no concreto.

Figura 106 - Avaliação de cloretos pelo método colorimétrico com aspensão de nitrato de prata para a/agl 0,45 (28 dias)



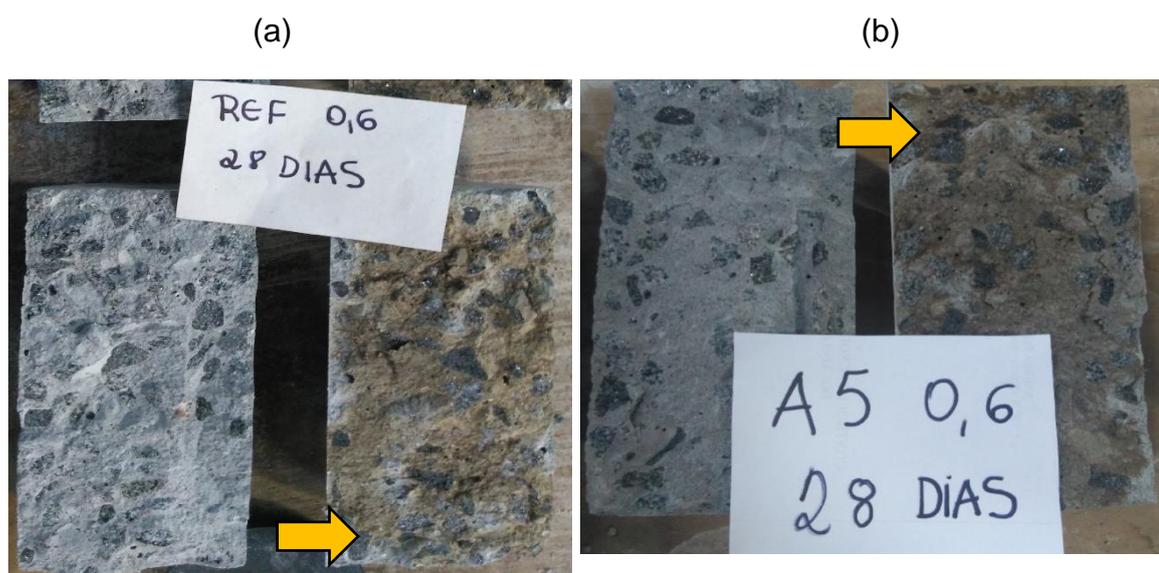
Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 107 - Avaliação de cloretos pelo método colorimétrico com aspersione de nitrato de prata para a/agl 0,45 (28 dias)



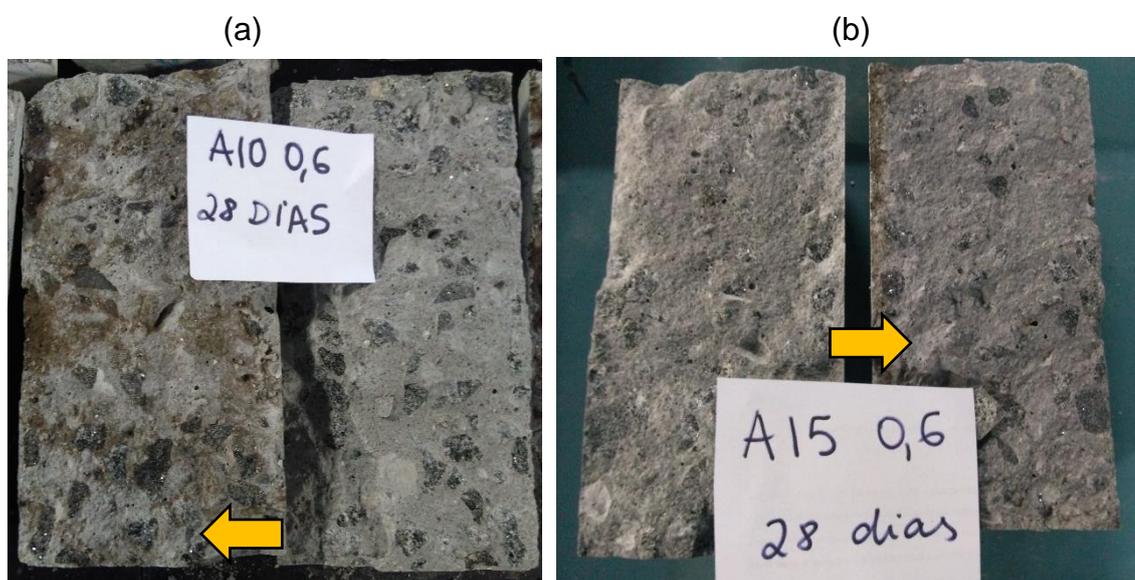
Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 108 - Avaliação de cloretos pelo método colorimétrico com aspersione de nitrato de prata para a/agl 0,6 (28 dias)



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 109 - Avaliação de cloretos pelo método colorimétrico com aspersion de nitrato de prata para a/agl 0,6 (28 dias)



Fonte: Acervo pessoal da autora.

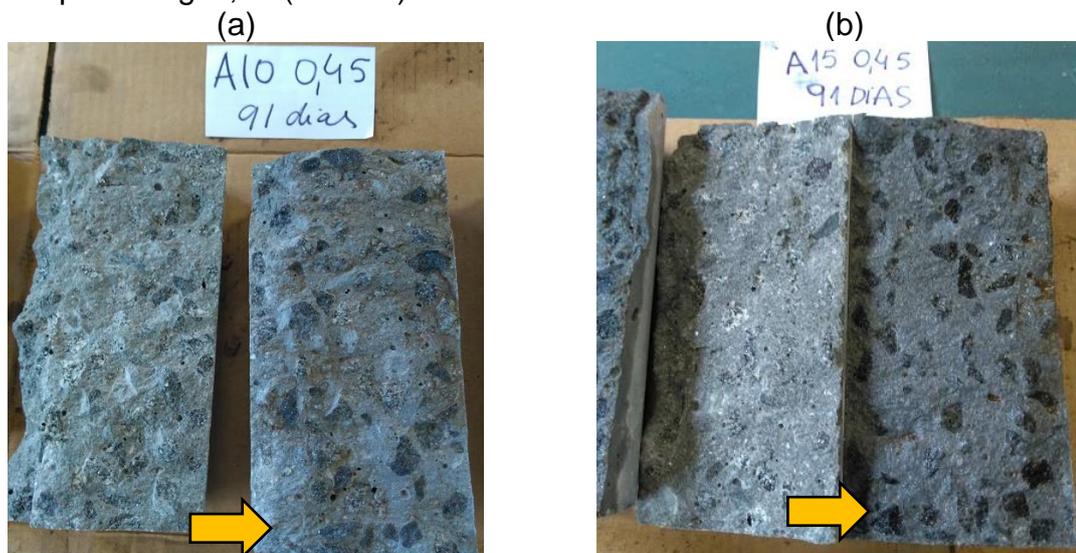
Para a idade de 91 dias, verificou-se o mesmo comportamento, conforme mostrado nas Figuras 93 a 96, percebendo-se uma intensificação na coloração amarronzada dos concretos com traços A5 0,45, A5 0,6 e A10 0,6, o que corrobora com os resultados da determinação analítica (Figura 88).

Figura 110 - Avaliação de cloretos pelo método colorimétrico com aspersion de nitrato de prata para a/agl 0,45 (91 dias)



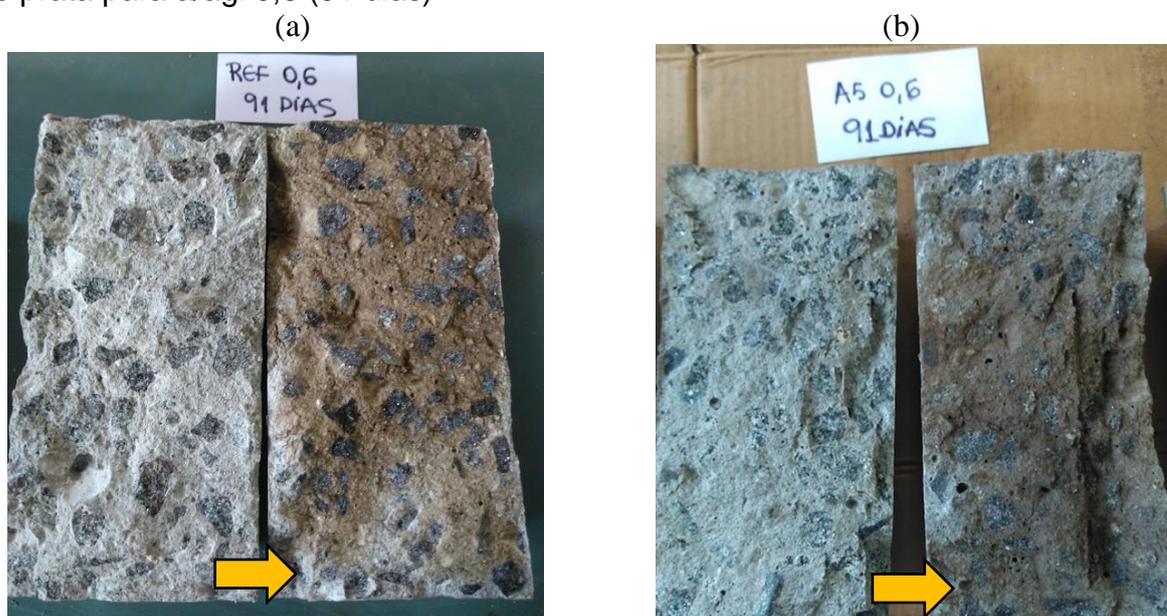
Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 111 - Avaliação de cloretos pelo método colorimétrico com aspersione de nitrato de prata para a/agl 0,45 (91 dias)



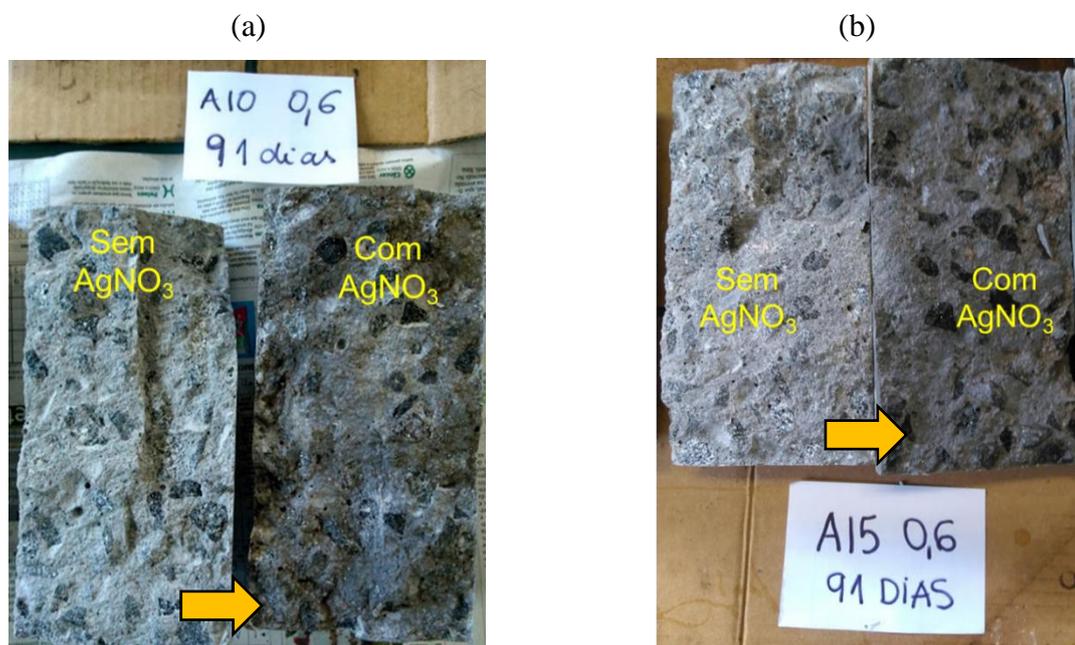
Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 112 - Avaliação de cloretos pelo método colorimétrico com aspersione de nitrato de prata para a/agl 0,6 (91 dias)



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 113 - Avaliação de cloretos pelo método colorimétrico com aspersione de nitrato de prata para a/agl 0,6 (91 dias)



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Desta forma, avaliando-se a presença de cloretos na massa de concreto, apenas a adição de 5% de FGD (em massa de cimento), para ambas relações água/aglomerante estudadas, promove um concreto com aspecto semelhante ao concreto referência, e assim, com menor concentração de cloretos livres.

Inferese-se que, apesar do resíduo incorporado conter um percentual de cloretos em sua massa, a adição de 5% é suportada pela massa de concreto, provavelmente pelo teor de aluminatos contidos no cimento (Tabela 11). No entanto, mesmo que tenha se percebido maiores quantidades de cloretos livres nos outros traços estudados, a possibilidade de utilização dos teores de adição de 10% e 15% não é descartada, podendo ser utilizados para classes de agressividade mais brandas, conforme a NBR 12655 (ABNT, 2015).

4.3.6 Determinação do Teor de Íons sulfatos

Como visto na caracterização do resíduo FGD estudado, foi encontrado um alto teor de sulfatos (na forma de SO_3) no resíduo, o que pode contribuir para reações deletérias, culminando em um ataque interno por sulfatos, conforme Mehta e Monteiro (2014). Pela difração de raios-x, este produto foi caracterizado como $CaSO_3 \cdot 1/2H_2O$,

sulfito de cálcio hemi-hidratado, que é praticamente inerte, segundo Khatib, Wright e Mangat (2016).

Para confirmar esta tendência de comportamento do sulfito de cálcio hemi-hidratado, de forma a contribuir na avaliação dos efeitos da incorporação do resíduo FGD nos concretos estudados, foi realizada a determinação da concentração de sulfatos solúveis nos mesmos.

Ressalta-se que não existe uma metodologia para quantificação de íons de enxofre no concreto. No entanto, como os íons sulfitos e sulfatos, nas formas de SO_3 e SO_4 , são mais comuns nas estruturas de concreto, Silva Filho (1994) e Andrade (1992) sugerem a determinação do teor de sulfatos como uma análise adequada para inferência de possível ataque interno por sulfatos no concreto.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o sulfato de cálcio é extremamente agressivo ao concreto. A reação destes compostos com os aluminatos hidratados causa um incremento de volume considerável no concreto, pois a etringita formada ocupa um volume 2.5 vezes maior que o aluminato tricálcico.

No entanto, uma parcela de sulfato de cálcio já é incorporada ao clínquer durante o processo de fabricação do cimento, para regular a pega. Porém, durante a hidratação, as condições químicas da solução resultante da dissolução dos compostos anidros são tais que ocorre a formação de monossulfato hidratado de cálcio, ao invés do trissulfato (MEHTA; MONTEIRO, 2014; SILVA FILHO, 1994).

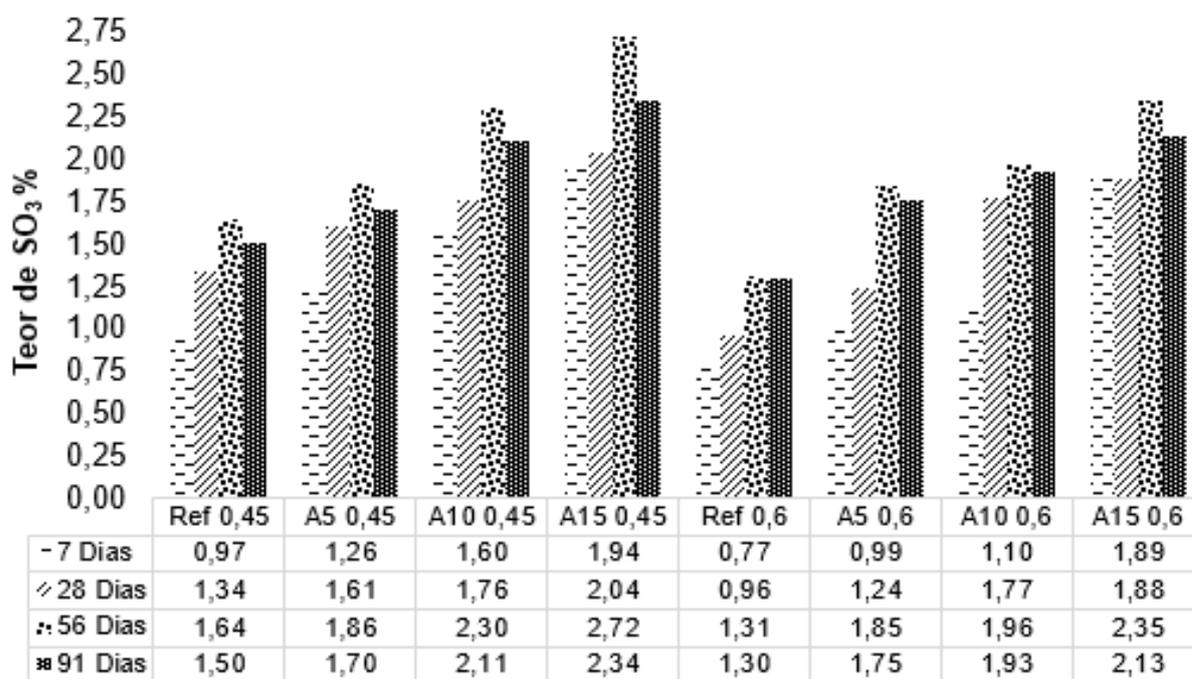
Como a estrutura resistente ainda não se desenvolveu completamente, o monossulfato pode se cristalizar sem provocar o aparecimento de tensões. Mais tarde, durante a exposição do concreto endurecido à solução externa contaminada com sulfatos, o monossulfato pode se dissolver e recristalizar sobre a forma de trissulfato, o que acarreta um aumento de volume dentro da estrutura já enrijecida (MEHTA; MONTEIRO, 2014; SILVA FILHO, 1994).

Segundo Silva Filho (1994), não necessariamente toda a expansão produzida pela etringita leva ao prejuízo do desempenho do concreto. Quando a formação de etringita ocorre de forma homogênea, formando-se nos poros nas horas iniciais de cimentação, não causa nenhuma ação destrutiva, devendo-se avaliar a concentração de íons sulfato no concreto, que prejudica seu desempenho.

Além disso, Khatib, Wright e Mangat (2016) citam que o mecanismo de atuação dos sulfatos de cálcio no processo de hidratação não é bem entendido, não sendo verificadas grandes interferências deste composto na expansão, usualmente causada pelo excesso de sulfatos.

A Figura 114 mostra os resultados do ensaio para determinação do teor de sulfatos presentes nos concretos estudados, nas diferentes idades.

Figura 114 - Teores de sulfatos encontrados nos concretos estudados – em relação à massa de cimento



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos resultados mostrados na Figura 114, verifica-se que para todos os concretos estudados, a concentração de sulfatos solúveis foi inferior a estipulada na NBR 16697 (ABNT, 2018), para cimentos, indicando que possivelmente o resíduo estudado possui maior quantidade de compostos inertes.

Para avaliar a influência das variáveis estudadas na solubilização de sulfatos, foi realizada ANOVA dos resultados mostrados na Figura 114, no entanto, as interações entre as concentrações de sulfato solúvel presentes nos concretos estudados, e as variáveis idade e relação água/aglomerante, não foram significativas.

Conforme Tabela 31, apenas o teor de adição de resíduo FGD interferiu neste parâmetro.

Tabela 31 - Análise de variância do teor de íons sulfato

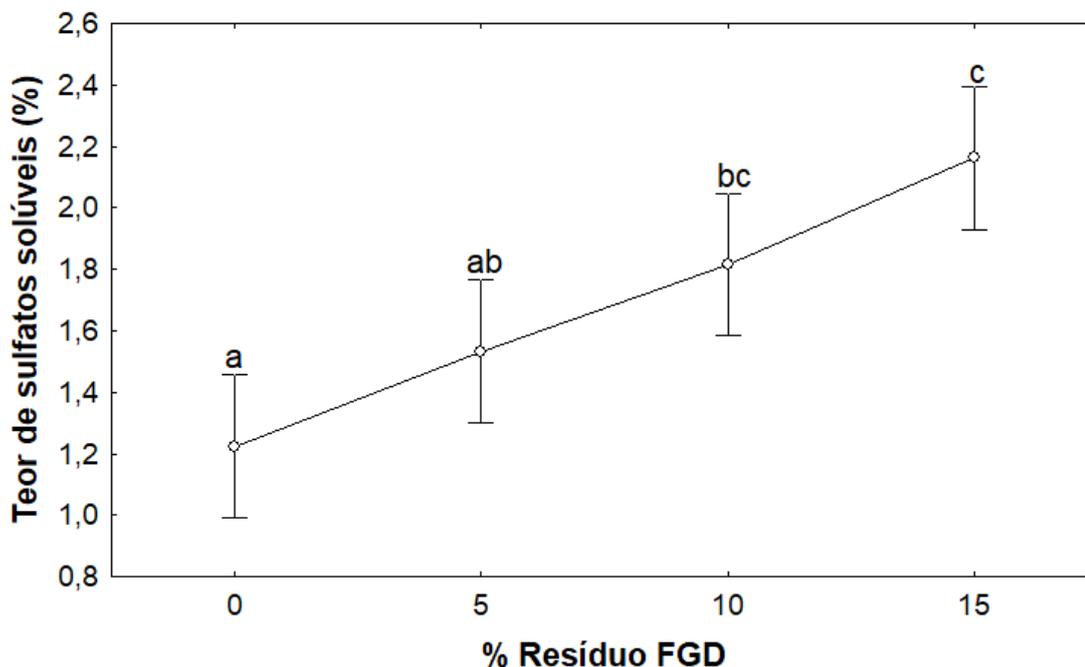
Fatores de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Significância
Idade	2,2	3	0,7	0,3	0,980	Não
a/agl	0,3	1	0,4	0,1	0,971	Não
% Resíduo FGD	3,8	3	1,3	12,5	0,000	Sim
Idade*% Resíduo FGD	0,1	3	0,1	0,2	0,932	Não
a/agl*% Resíduo FGD	0,1	9	0,1	0,1	0,912	Não
Idade*a/agl*% Resíduo FGD	0,1	9	0,1	0,1	0,94	Não
Erro	0,2	9	0,1	-	-	-

Fonte: Elaborado pela autora. Nota: a/agl = Relação água/aglomerante.

Ainda, realizando o teste de Tukey (Figura 115), pode-se perceber que as concentrações de sulfatos promovidas pelos traços com 5% de adição de resíduo FGD são idênticas às promovidas pelos concretos referência. Isto corrobora com a hipótese inicial de que o resíduo FGD é composto majoritariamente por sulfato de cálcio hemihidratado ($\text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$) na forma inerte.

Com o aumento do teor de resíduo FGD incorporado, percebe-se um incremento no teor de sulfatos solúveis, indicando que para maiores adições, possam aparecer formas de sulfatos não inertes, em menor quantidade (Figura 115).

Figura 115 - Resultado do teste de Tukey para o teor de sulfatos solúveis no concreto



Fonte: Elaborado pela autora,

4.3.7 Avaliação da Microestrutura

A análise da microestrutura da zona de transição entre o agregado e a matriz de concreto foi realizada com o auxílio de um Microscópio Eletrônico de Varredura, com EDS acoplado, nas idades de 7, 28 e 91 dias, conforme discutido na seção 3.6.3.7.

Para identificação dos compostos gerados na hidratação da matriz cimentícia foi realizada uma análise simultânea da morfologia e da composição dos principais produtos da hidratação de cimento na zona de transição, tais como CH (hidróxido de cálcio), C-S-H (silicato de cálcio hidratado), AFt (etringita) e AFm (monosulfoaluminato de cálcio).

Esta análise foi feita com base no trabalho de Rossignolo (2009), e dos resultados das pesquisas realizadas por Taylor e Newbury (1984), Wasserman e Bentur (1996) e Kjellsen, Wallevik e Fjällberg (1998), que apresentaram dados sobre as relações das massas atômicas de alguns óxidos presentes em matrizes cimentícias (SiO_2 [Si], CaO [Ca], Fe_2O_3 [Fe], Al_2O_3 [Al] e SO_3 [S]) de forma a associá-las à presença dos produtos do cimento hidratado, como apresentado no Quadro 7.

No entanto, é preciso ressaltar que a técnica utilizada neste trabalho para identificação dos compostos (EDS por varredura) não possui alta precisão, uma vez que foi

realizada apenas em alguns pontos, visando auxiliar a identificação pela morfologia de partículas. Ainda, a precisão alcançada pelo microscópio não era suficiente para uma análise mais profunda.

As imagens obtidas pela análise de MEV dos concretos com idade de 7, 28 e 91 dias são mostradas nas Figuras 116 a 138.

Quadro 7 - Relações entre as massas dos principais óxidos encontrados em matrizes cimentícias e sua correlação com os compostos de interesse

Composto	Relação Ca/Si	Relação Al/Fe/Ca	Relação S/Ca
C-S-H	$0,8 \leq \text{Ca/Si} \leq 2,5$	$(\text{Al} + \text{Fe})/\text{Ca} \leq 0,2$	-
CH	$\text{Ca/Si} \geq 10$	$(\text{Al} + \text{Fe})/\text{Ca} \leq 0,04$	$\text{S/Ca} \leq 0,04$
AFt e Afm	$\text{Ca/Si} \geq 4$	$(\text{Al} + \text{Fe})/\text{Ca} > 0,4$	$\text{S/Ca} > 0,15$

Fonte: Adaptado de Rossignolo (2009).

Comparando as imagens obtidas para os concretos estudados, pode-se inferir que os concretos com adição de 5% e 10% de resíduo FGD apresentaram uma estrutura mais coesa e densa do que os outros traços avaliados (Figuras 96, 97, 98 e 99). Isto indica um possível melhoramento da zona de transição decorrente do acréscimo de finos contidos no resíduo FGD, contribuindo para redução da espessura entre a matriz cimentícia e o agregado e proporcionando uma pasta mais densa e compacta.

Este fato foi confirmado pelo ensaio físico de absorção por imersão e por capilaridade, discutidos nas seções 4.3.3 e 4.3.4, uma vez que os traços de 5% e 10% apresentaram menores valores de absorção por imersão e por capilaridade, em todas as idades, indicando um menor número de poros e sulcos capilares nos concretos, decorrentes da densificação da matriz pela incorporação do resíduo FGD.

É possível perceber ainda, a presença de microfissuras em todos os concretos avaliados, possivelmente decorrentes do ensaio de compressão axial. No entanto, verifica-se que os concretos referência e com 15% de adição de resíduo FGD apresentaram maior número de microfissuras, o que corrobora com os resultados mecânicos discutidos anteriormente.

A adição do resíduo FGD também promoveu uma maior produção de CSH, conforme visto nas figuras 116 a 158, o que provavelmente é oriundo do efeito filler, que atuou

formando pontos de nucleação para o desenvolvimento dos compostos e formação de CSH durante a hidratação do cimento.

No entanto, todos os traços apresentaram formação de etringita, sendo percebido um acréscimo nos concretos com maior teor de incorporação do resíduo FGD, provavelmente devido a alterações na solubilidade de sulfatos presentes no composto.

Ainda, pode-se verificar que nos concretos com FGD foi identificada a presença de cristais de Portlandita (CH), oriundos da composição do resíduo, que possui teores acima de 30% de óxido de cálcio. Para Mehta e Monteiro (2014) o CH não representa grandes contribuições na resistência da pasta do cimento hidratada, sendo o primeiro composto a ser solubilizado e lixiviado pela água. Porém ao acréscimo de pozolanas, o alto teor de CH traz vantagens como o aumento da resistência mecânica e da durabilidade de concretos e argamassas oriundos da reação pozolânica, o que pode ser uma opção interessante para a melhoria de desempenho dos concretos estudados.

No entanto, Neville (2015) cita que pela alta solubilidade, o CH pode contribuir para a perda da durabilidade do concreto, interferindo assim em sua resistência, uma vez que pode ser facilmente solubilizado da matriz, promovendo a criação de vazios e pode ser altamente susceptível ao ataque por sulfatos.

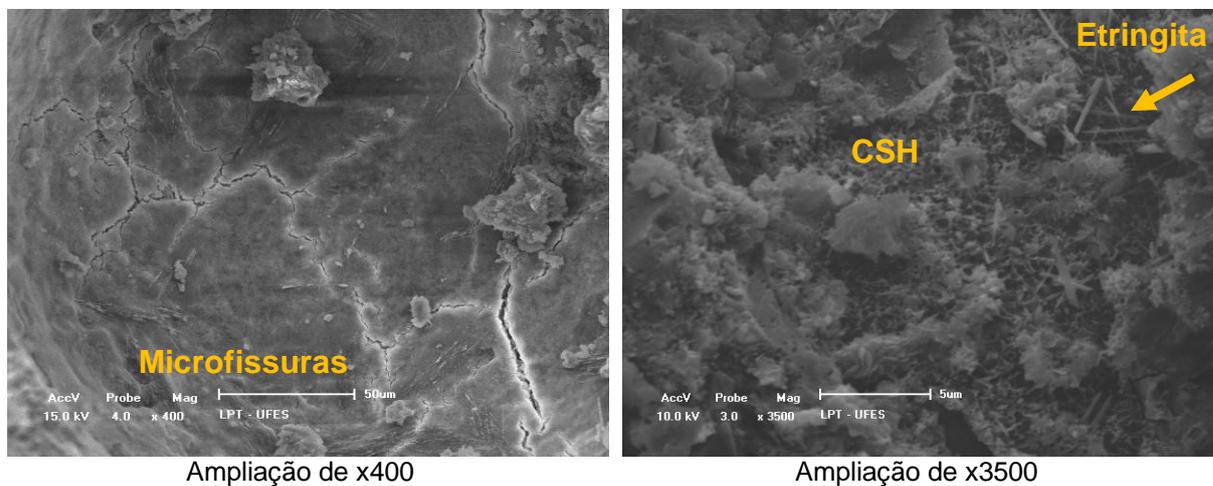
Infere-se que a elevada concentração de CH nos concretos com maiores teores de resíduo FGD (10% e 15%) possa ter contribuído para a redução da Resistência à Compressão e à Tração em comparação com o teor de 5%.

As micrografias obtidas da análise de MEV dos concretos aos 7 dias são mostradas nas Figuras 116 a 142.

Nos concretos referência com relação água/aglomerante de 0,45 (Figura 116) e 0,6 (Figura 119) foi identificado já aos 7 dias a presença de etringita em forma estável (agulhas), conforme análise de EDS mostrada nas Figuras 118 e 120. Segundo Melo (2010) isto provavelmente se deve a composição do cimento, que possibilitou quantidade suficiente de sulfato para formação da etringita AFt. Ainda, verifica-se a presença do gel CSH na forma de agulhas rombudas por toda matriz avaliada, sendo esta forma condizente com a idade avaliada (7 dias) (SCRIVENER; SNELLINGS;

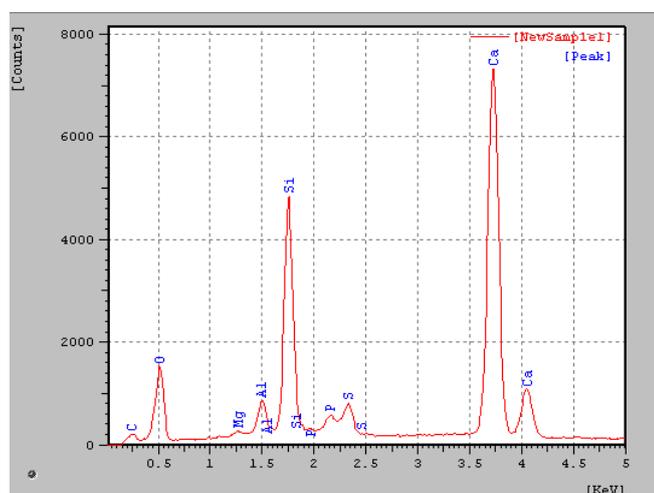
LOTTHENBACH, 2017). As Figuras 117 e 121 mostram o EDS do gel CSH presente nos concretos REF 0,45 e REF 0,6, respectivamente.

Figura 116 - Micrografia dos concretos referência (REF 0,45) - 7 dias



Fonte: Acervo pessoal da autora.

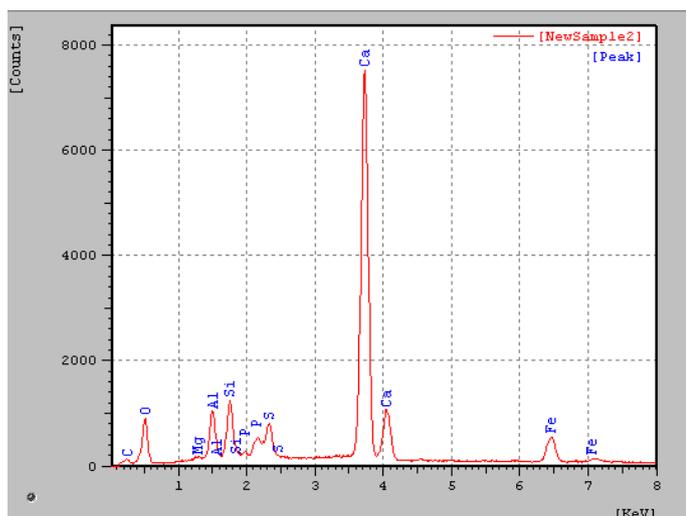
Figura 117 - Composição da fase identificada como CSH na Figura 116



Elemento	%mássico
Ca	14,9
Si	9,9
Al	1,9
Fe	-
S	1,2

Fonte: Acervo pessoal da autora.

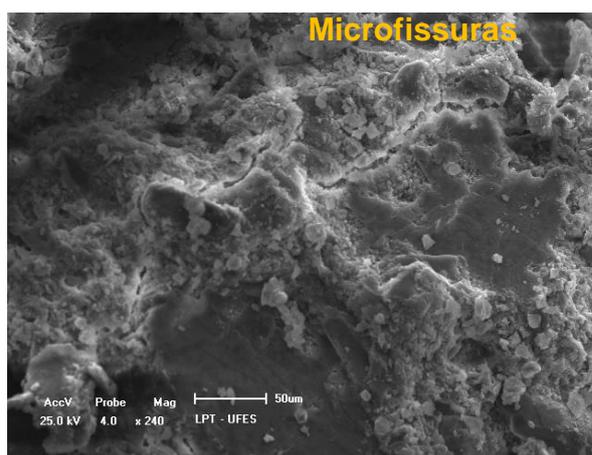
Figura 118 - Composição da fase identificada como Etringita na Figura 116



Elemento	% mássico
Ca	22,2
Si	3,4
Al	5,7
Fe	3,5
S	3,8

Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 119 - Micrografia dos concretos referência (REF 0,6) - 7 dias



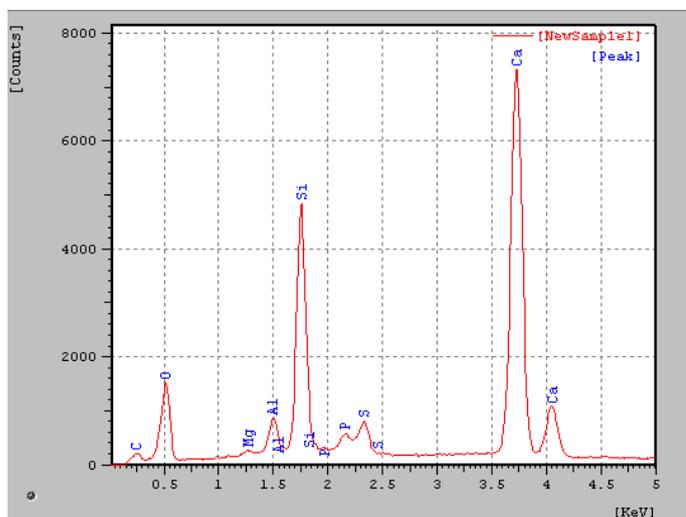
Ampliação de x240



Ampliação de x3500

Fonte: Acervo pessoal da autora.

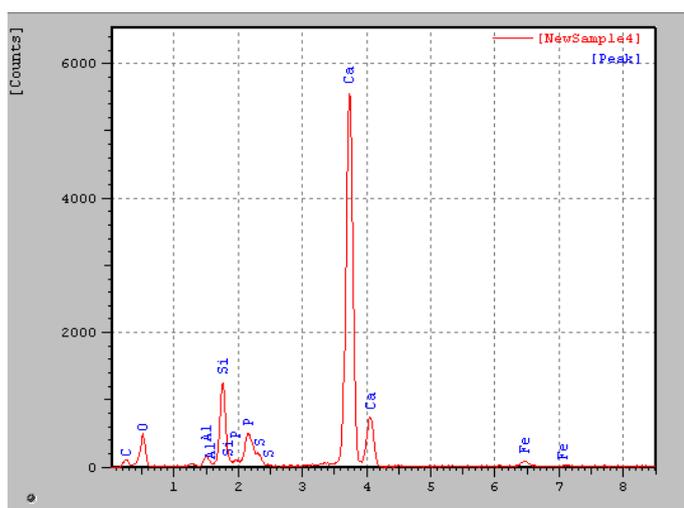
Figura 120 - Composição da fase identificada como CSH na Figura 119



Elemento	% mássico
Ca	13,9
Si	9,1
Al	2,3
Fe	-
S	1,5

Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 121 - Composição da fase identificada como Etringita na Figura 119



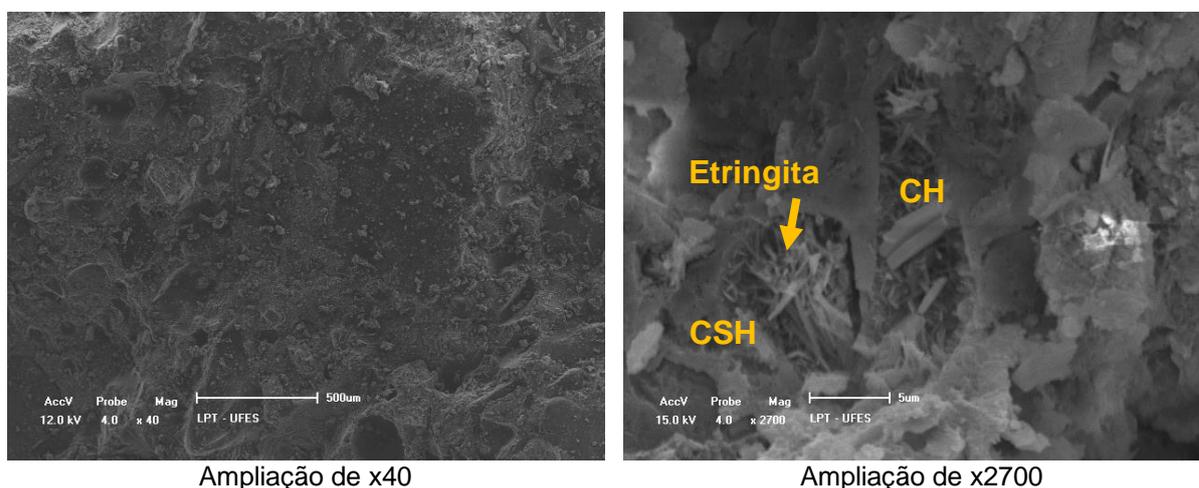
Elemento	% mássico
Ca	21,3
Si	6,1
Al	4,9
Fe	3,7
S	3,9

Fonte: Acervo pessoal da autora.

Para os traços com 5% de adição de resíduo FGD (A5 0,45 e A5 0,6) percebe-se uma estrutura mais uniforme, com menor número de microfissuras (Figuras 122 e 125), indicando que para este percentual de adição o resíduo atuou como um fíler, preenchendo poros e promovendo uma maior densificação da matriz.

Pode-se ainda observar a presença de etringita na forma de agulhas (devido a incorporação de sulfatos oriundos do resíduo), e do gel CSH, assim como visto nos concretos referência. No entanto, para os traços com 5% de adição, o CSH apresenta crescimento direcionado, indicando o progresso da hidratação (SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2017). Para os concretos com 5% de adição de resíduo FGD também é possível verificar a presença de cristais de Portlandita (Figuras 122 e 125), estes, provenientes da hidratação do resíduo.

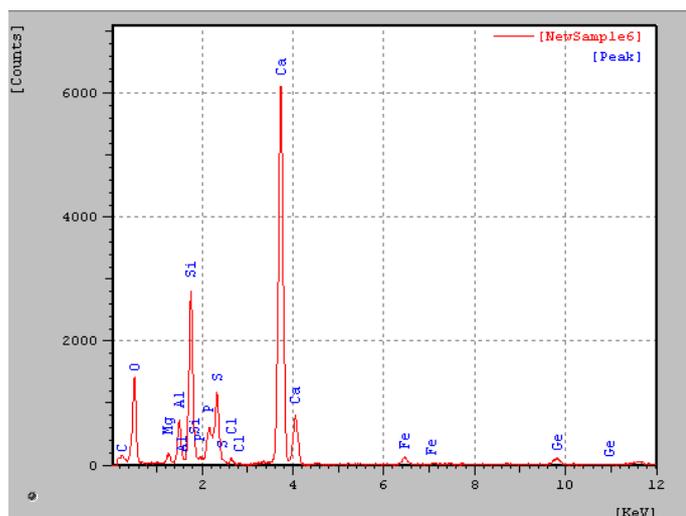
Figura 122 - Micrografia dos concretos com 5% de adição de resíduo FGD (A5 0,45) - 7 dias



Ampliação de x40

Ampliação de x2700

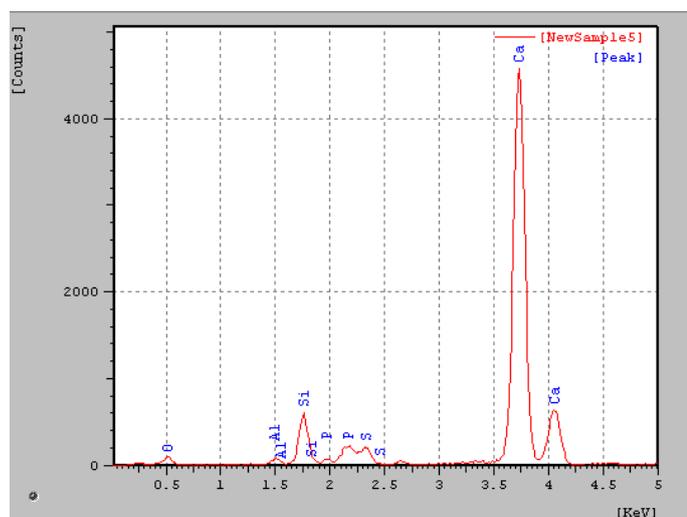
Figura 123 - Composição da fase identificada como CSH na Figura 122



Elemento	% mássico
Ca	26,9
Si	9,5
Al	2,9
Fe	1,2
S	-

Fonte: Acervo pessoal da autora.

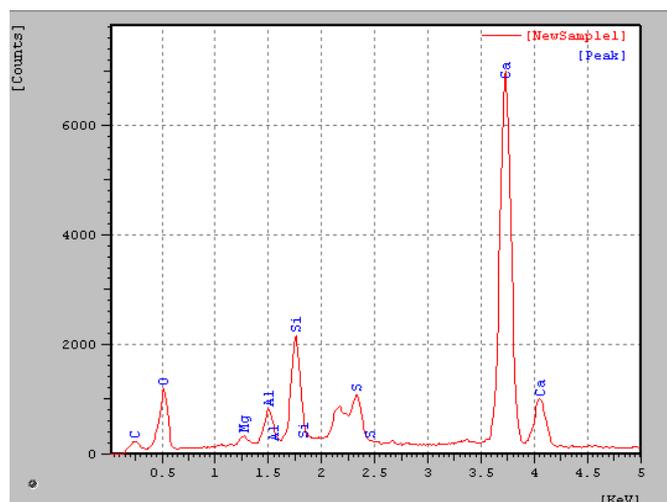
Figura 124 - Composição da fase identificada como CH na Figura 122



Elemento	% mássico
Ca	68,3
Si	6,7
Al	1,0
Fe	1,2
S	2,1

Fonte: Acervo pessoal da autora.

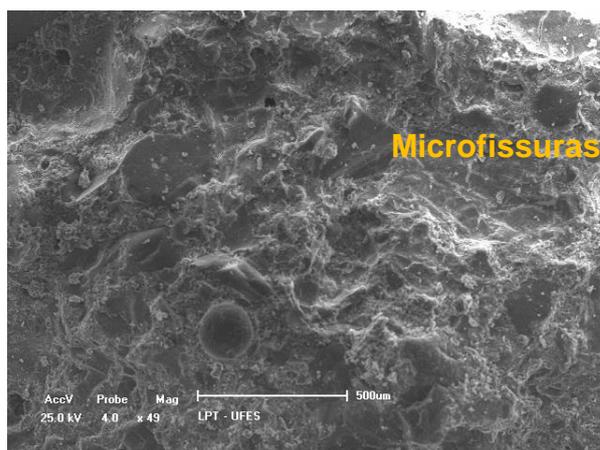
Figura 125 - Composição da fase identificada como Etringita na Figura 122



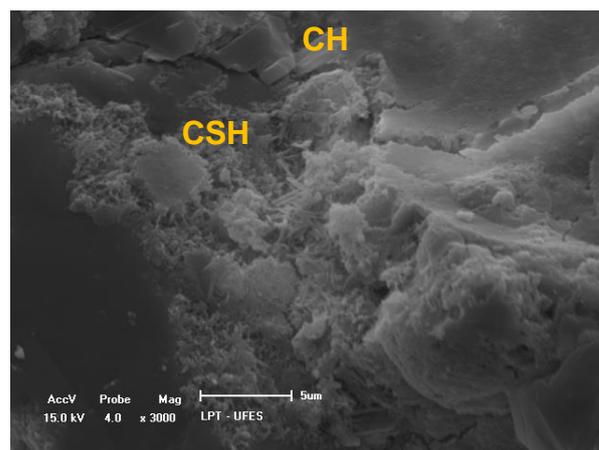
Elemento	% mássico
Ca	28,3
Si	1,7
Al	1,0
Fe	0,1
S	0,9

Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 126 - Micrografia dos concretos com 5% de adição de resíduo FGD (A5 0,6) - 7 dias

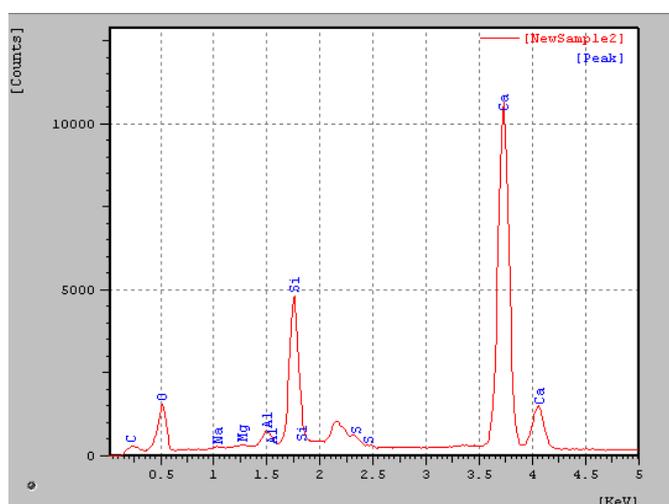


Ampliação de x49



Ampliação de x3000

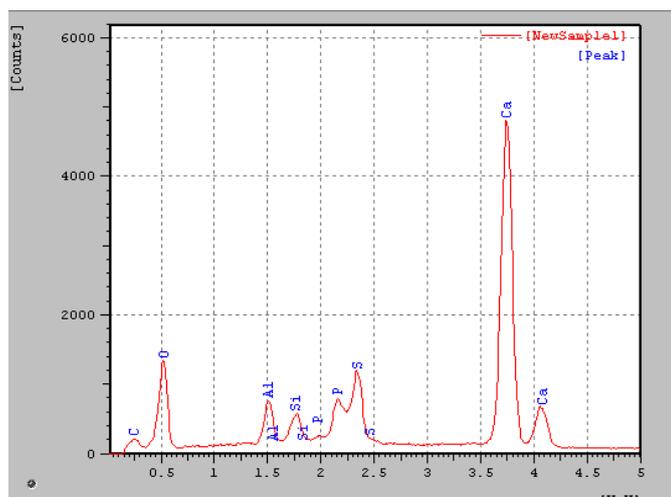
Figura 127 - Composição da fase identificada como CSH na Figura 126



Elemento	% mássico
Ca	34,5
Si	14,3
Al	1,5
Fe	0,5
S	0,8

Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 128 - Composição da fase identificada como CH na Figura 126

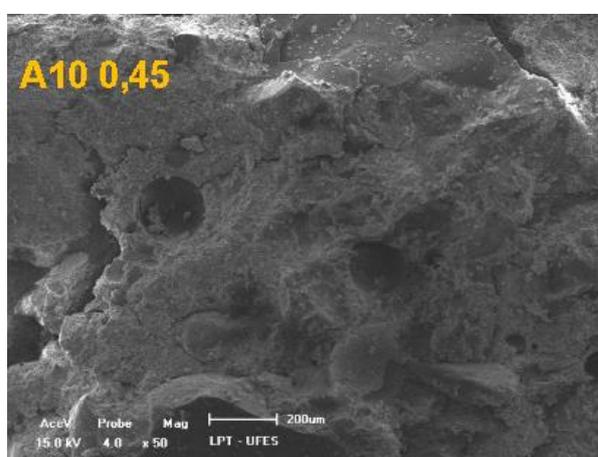


Elemento	% mássico
Ca	32,9
Si	7,0
Al	7,6
Fe	6,1
S	5,1

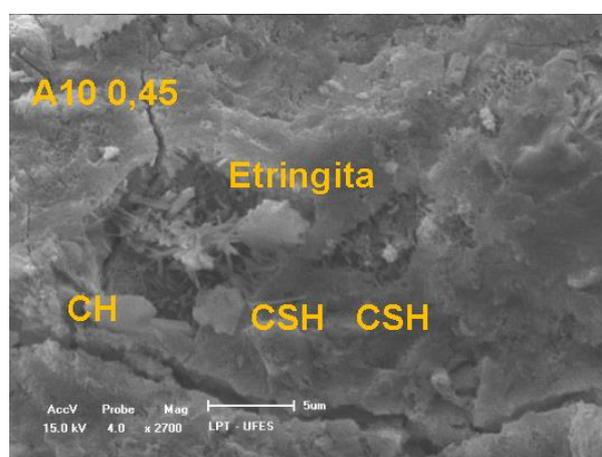
Fonte: Acervo pessoal da autora.

Para os demais traços avaliados a identificação dos compostos seguiu o mesmo procedimento realizado acima, obtendo-se como resultado as Figuras 129 a 142.

Figura 129 - Micrografia dos concretos com 10% de adição de resíduo FGD (A10 0,45) - 7 dias

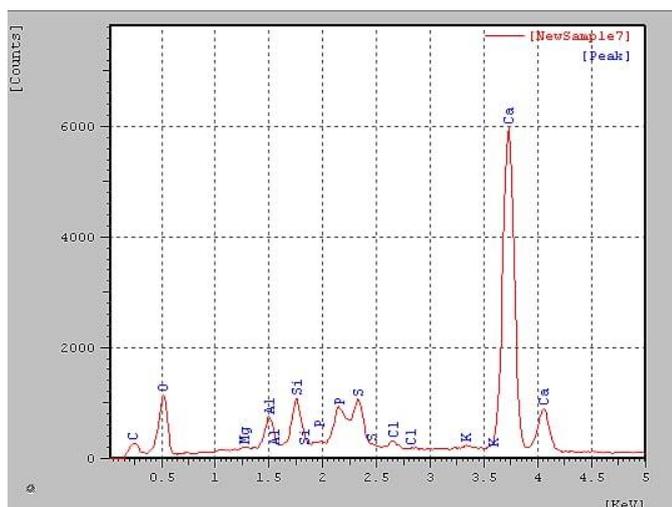


Ampliação de x50



Ampliação de x2700

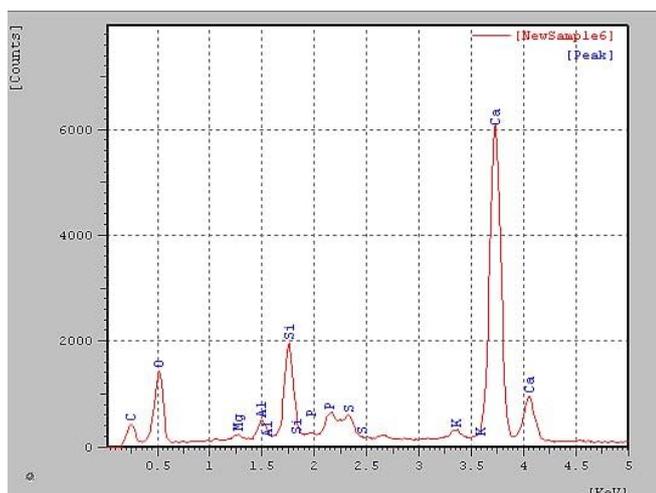
Figura 130 - Composição da fase identificada como Etringita na Figura 129



Elemento	% mássico
Ca	28,4
Si	5,1
Al	6,3
Fe	6,0
S	4,5

Fonte: Acervo pessoal da autora.

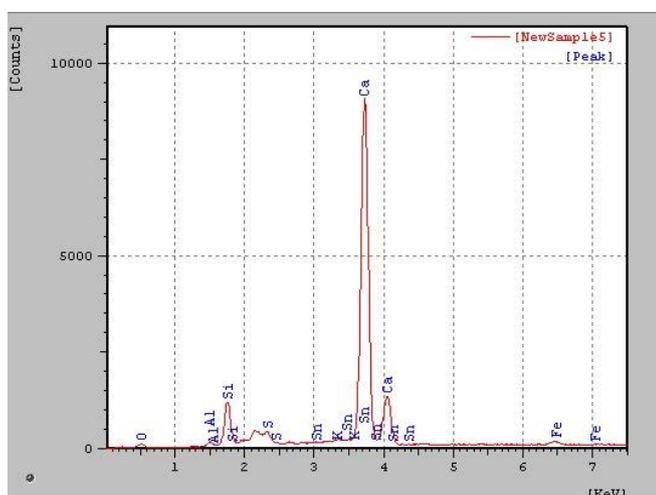
Figura 131 - Composição da fase identificada como CSH na Figura 129



Elemento	% mássico
Ca	21,7
Si	9,2
Al	4,3
Fe	6,1
S	4,5

Fonte: Acervo pessoal da autora.

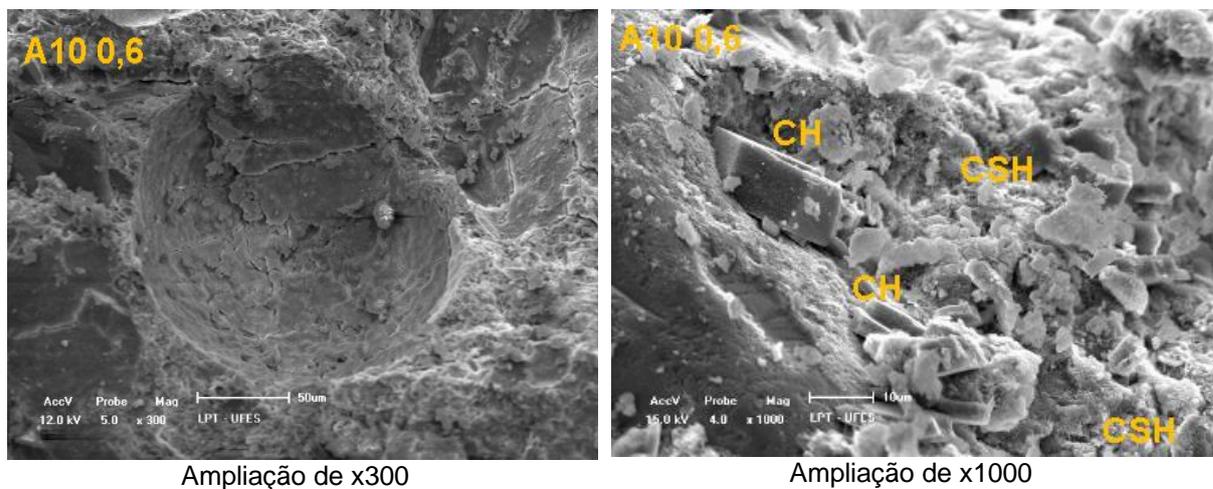
Figura 132 - Composição da fase identificada como CH na Figura 129



Elemento	% mássico
Ca	49,6
Si	4,8
Al	1,9
Fe	0,6
S	0,9

Fonte: Acervo pessoal da autora.

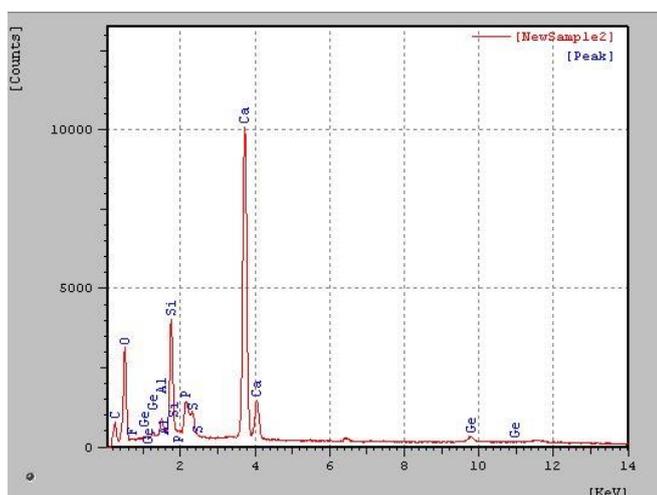
Figura 133 - Micrografia dos concretos com 10% de adição de resíduo FGD (A10 0,6) - 7 dias



Ampliação de x300

Ampliação de x1000

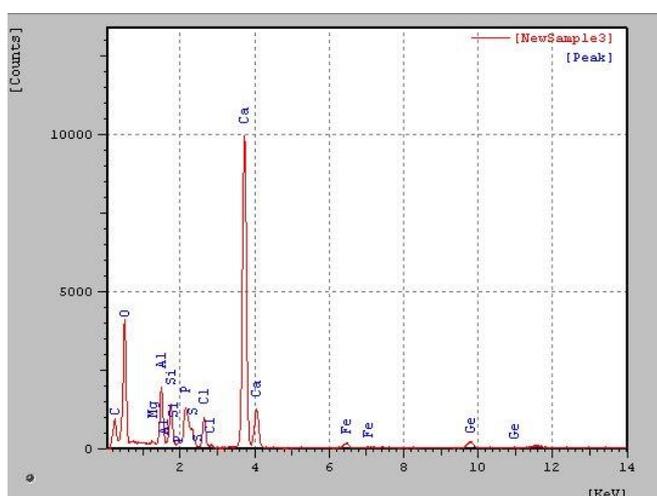
Figura 134 - Composição da fase identificada como CSH na Figura 133



Elemento	% mássico
Ca	25,7
Si	13,1
Al	1,8
Fe	1,1
S	2,1

Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 135 - Composição da fase identificada como CH na Figura 133



Elemento	% mássico
Ca	26,3
Si	2,1
Al	0,7
Fe	0,3
S	0,5

Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 136 - Micrografia dos concretos com 15% de adição de resíduo FGD (A15 0,45) - 7 dias

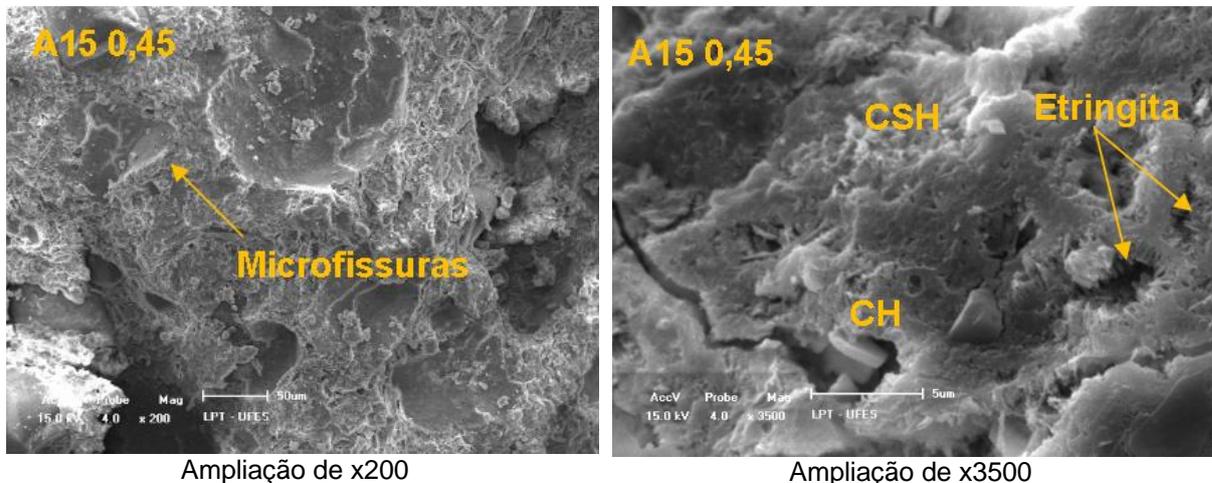
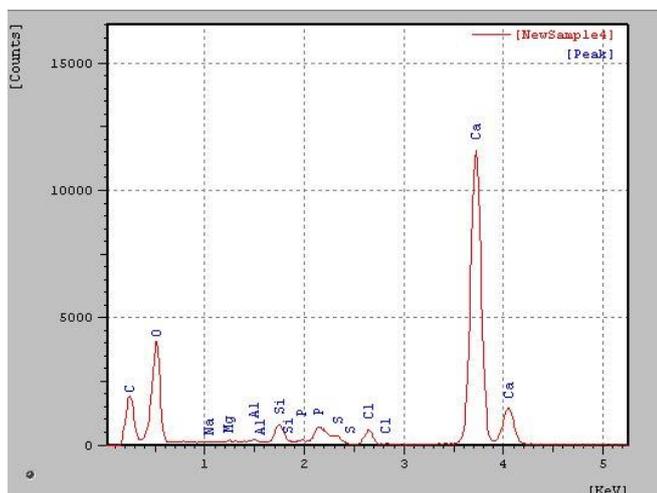


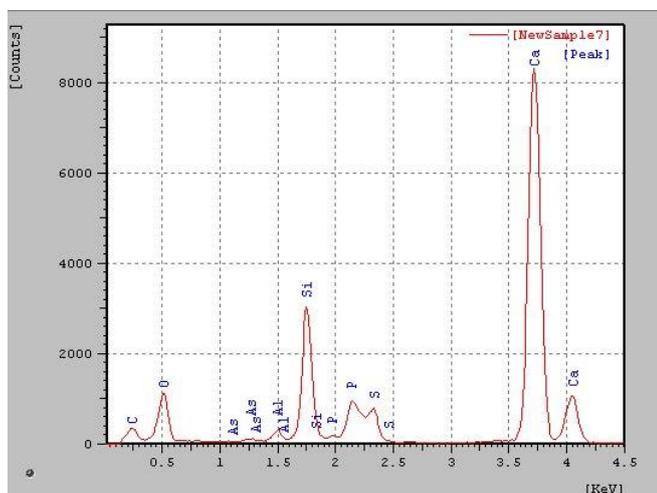
Figura 137 - Composição da fase identificada como CH na Figura 136



Elemento	% mássico
Ca	22,3
Si	1,16
Al	0,4
Fe	0,5
S	0,5

Fonte: Acervo pessoal da autora.

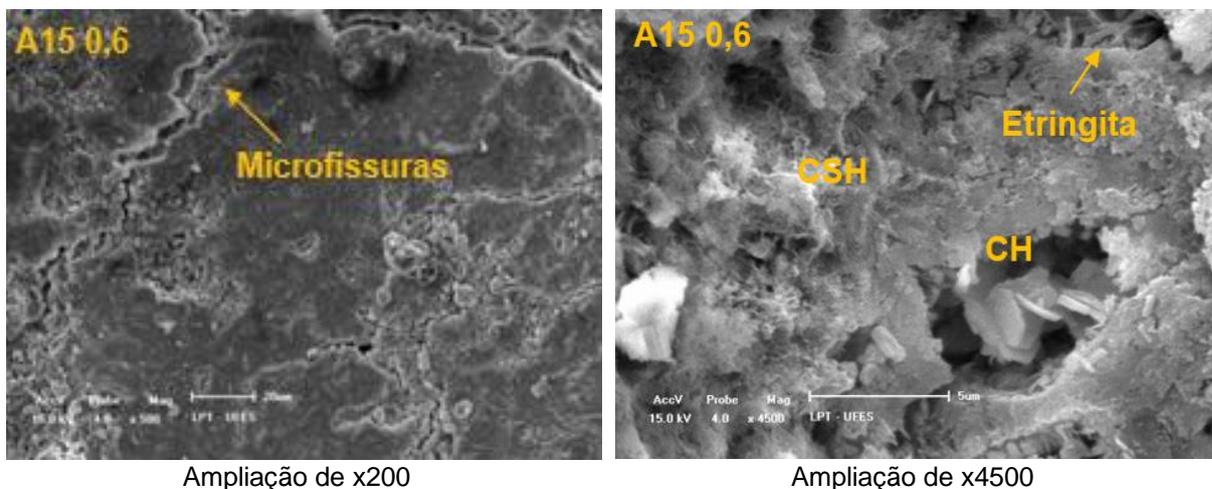
Figura 138 - Composição da fase identificada como CSH na Figura 136



Elemento	% mássico
Ca	21,1
Si	8,9
Al	1,8
Fe	0,6
S	2,1

Fonte: Acervo pessoal da autora.

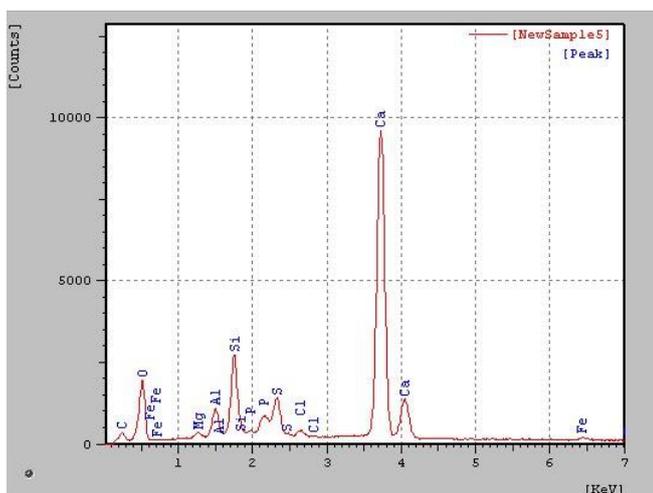
Figura 139 - Micrografia dos concretos com 15% de adição de resíduo FGD (A15 0,6) - 7 dias



Ampliação de x200

Ampliação de x4500

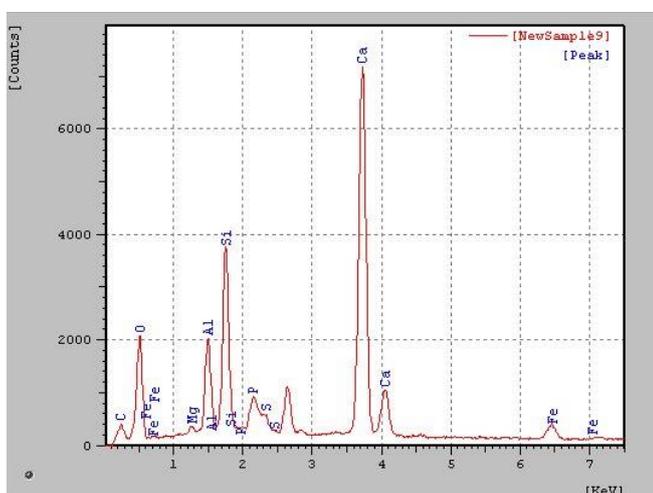
Figura 140 - Composição da fase identificada como Etringita na Figura 139



Elemento	% mássico
Ca	21,2
Si	4,5
Al	5,8
Fe	2,8
S	3,7

Fonte: Acervo pessoal da autora.

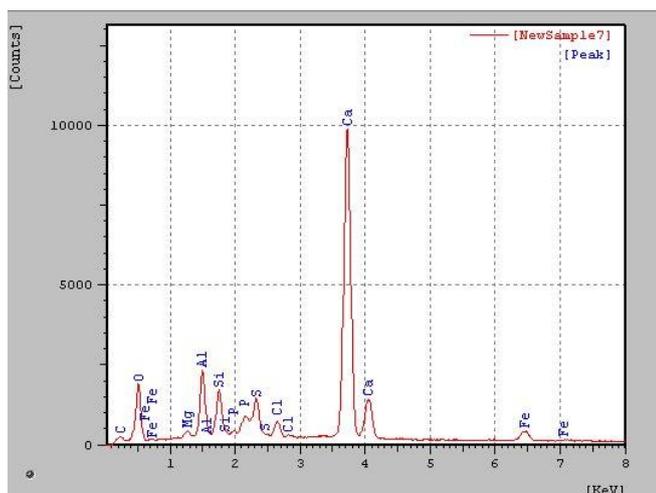
Figura 141 - Composição da fase identificada como CSH na Figura 139



Elemento	% mássico
Ca	21,5
Si	9,1
Al	2,3
Fe	1,8
S	0,8

Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 142 - Composição da fase identificada como CH na Figura 139

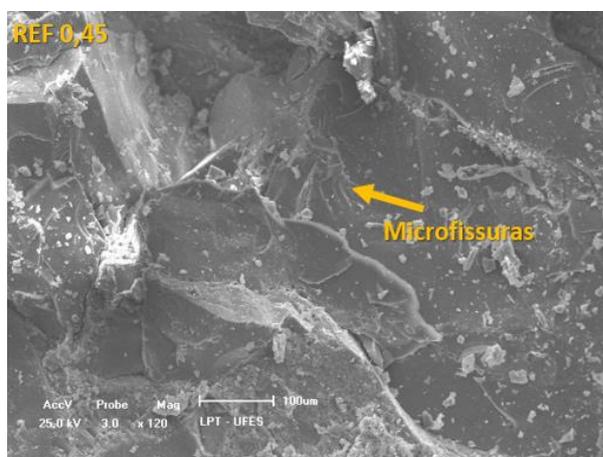


Elemento	% mássico
Ca	30,6
Si	2,8
Al	0,8
Fe	0,4
S	0,3

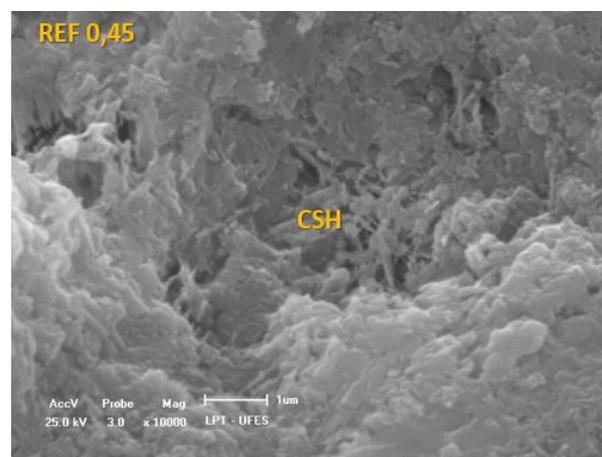
Fonte: Acervo pessoal da autora.

Para os concretos com idades de 28 e 91 dias foi realizada a mesma metodologia, obtendo-se os resultados mostrados da Figura 143 a Figura 158.

Figura 143 - Micrografia dos concretos referência (REF 0,45) - 28 dias

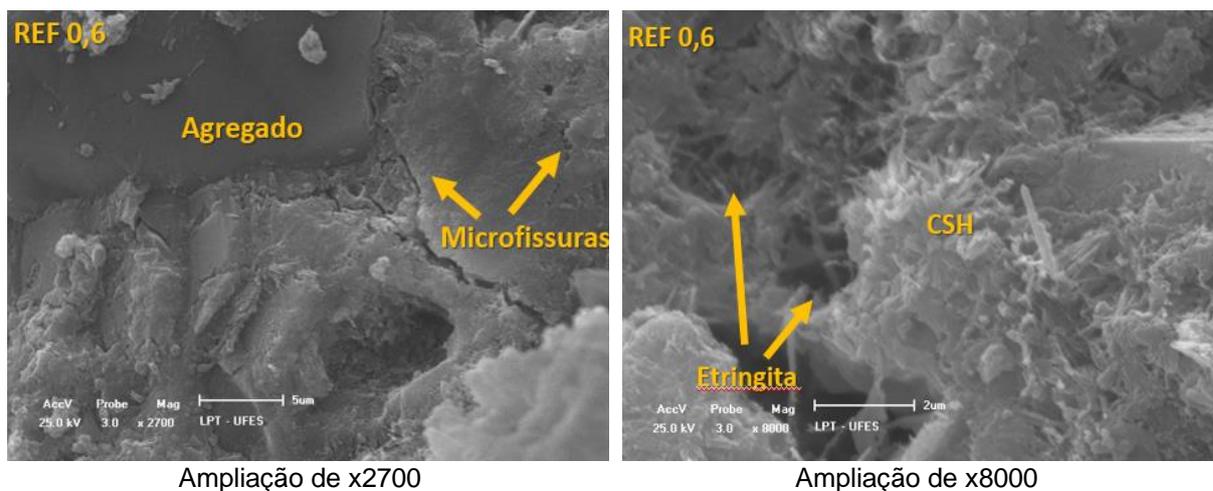


Ampliação de x120



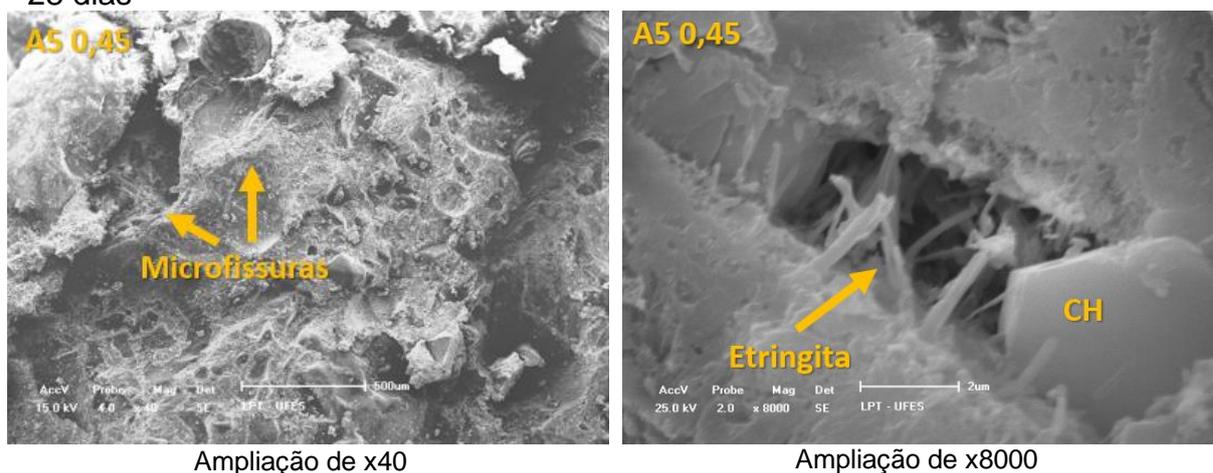
Ampliação de x10000

Figura 144 - Micrografia dos concretos referência (REF 0,6) - 28 dias



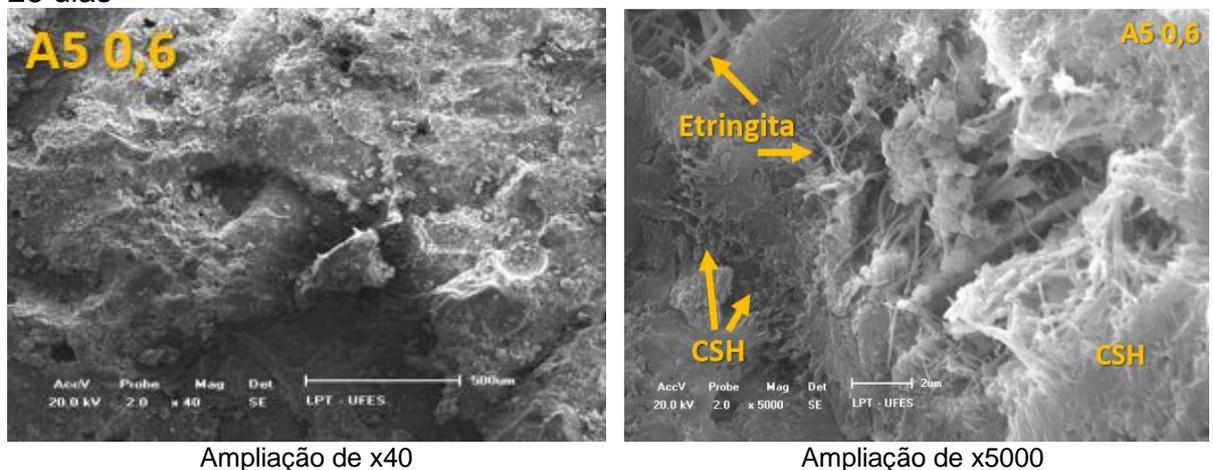
Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 145 - Micrografia dos concretos com 5% de adição de resíduo FGD (A5 0,45) - 28 dias



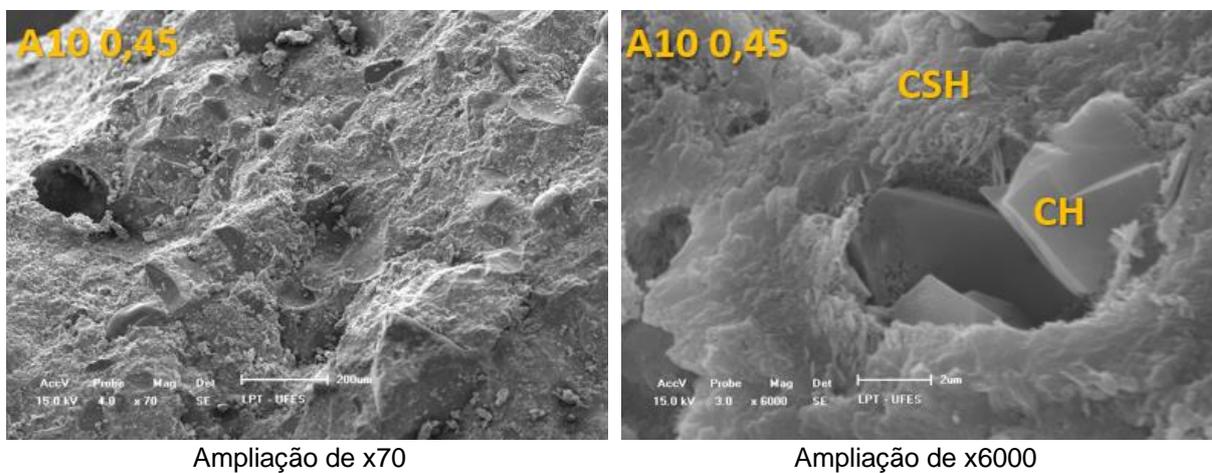
Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 146 - Micrografia dos concretos com 5% de adição de resíduo FGD (A5 0,6) - 28 dias



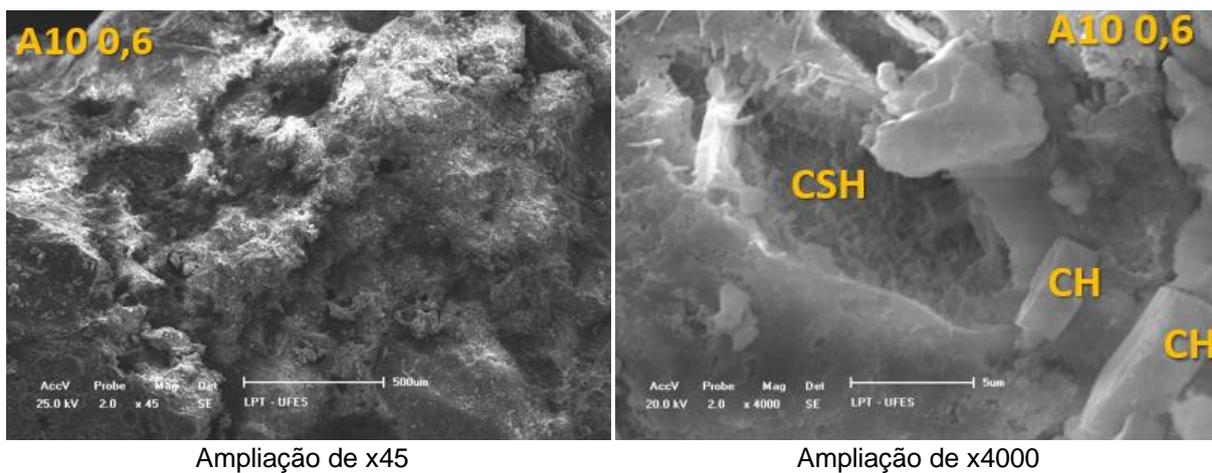
Fonte: Acervo pessoal a autora.

Figura 147 - Micrografia dos concretos com 10% de adição de resíduo FGD (A10 0,45) - 28 dias



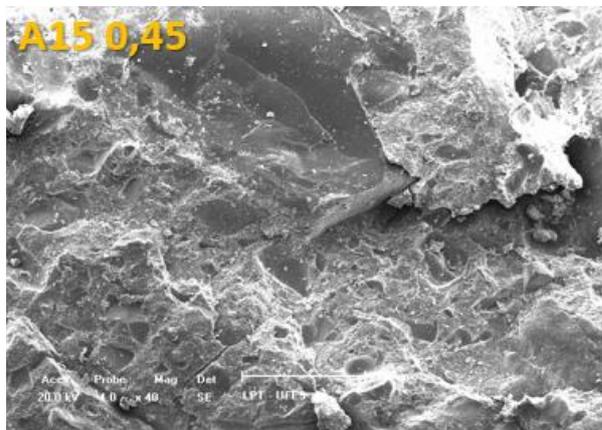
Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 148 - Micrografia dos concretos com 10% de adição de resíduo FGD (A10 0,6) - 28 dias



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 149 - Micrografia dos concretos com 15% de adição de resíduo FGD (A15 0,45) - 28 dias



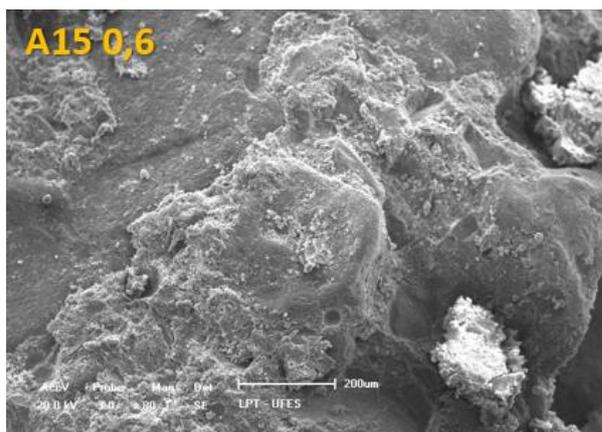
Ampliação de x40



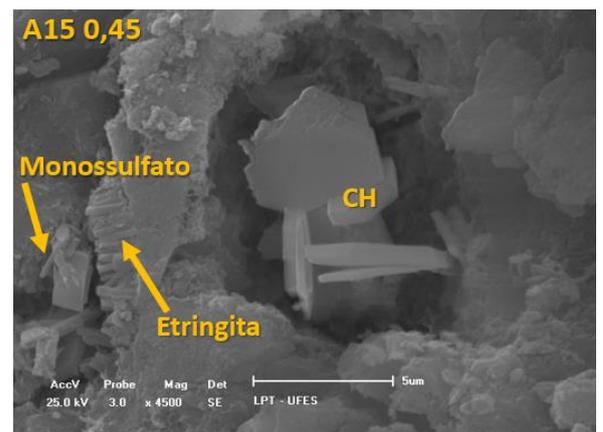
Ampliação de x2700

Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 150 - Micrografia dos concretos com 15% de adição de resíduo FGD (A15 0,6) - 28 dias



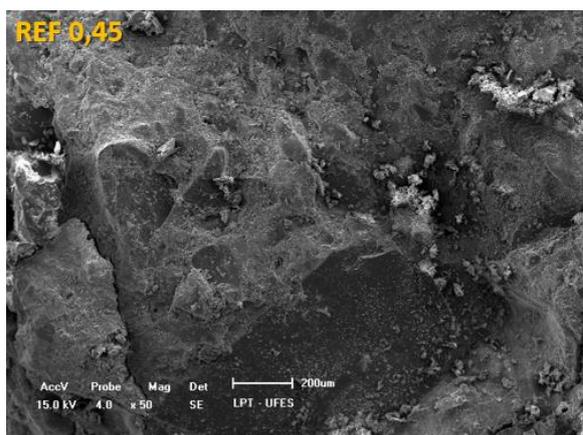
Ampliação de x80



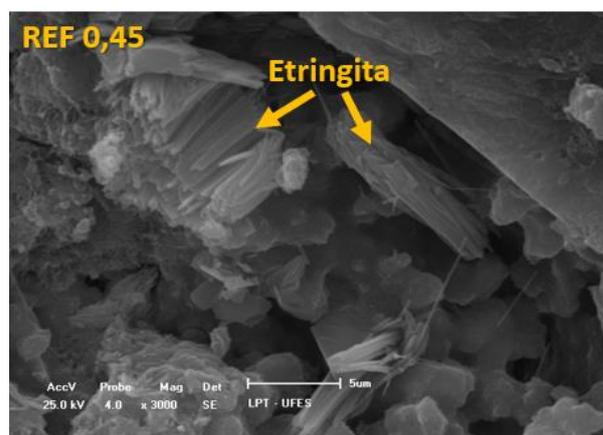
Ampliação de x4500

Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 151 - Micrografia dos concretos referência (REF 0,45) - 91 dias



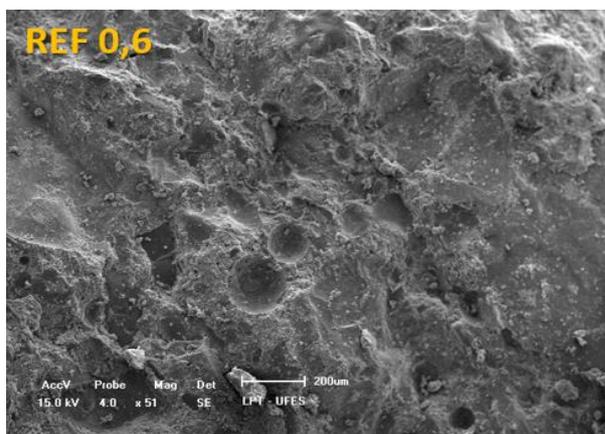
Ampliação de x50



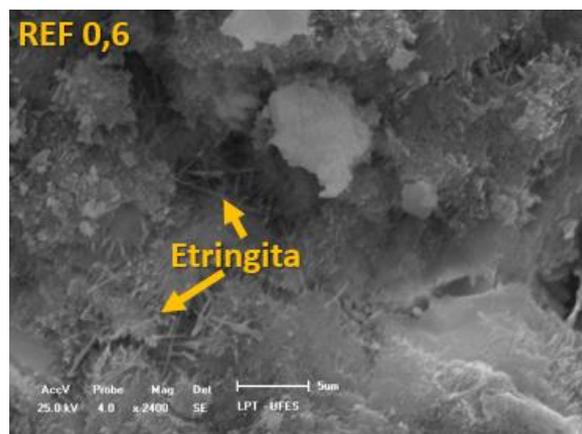
Ampliação de x3000

Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 152 - Micrografia dos concretos referência (REF 0,6) - 91 dias



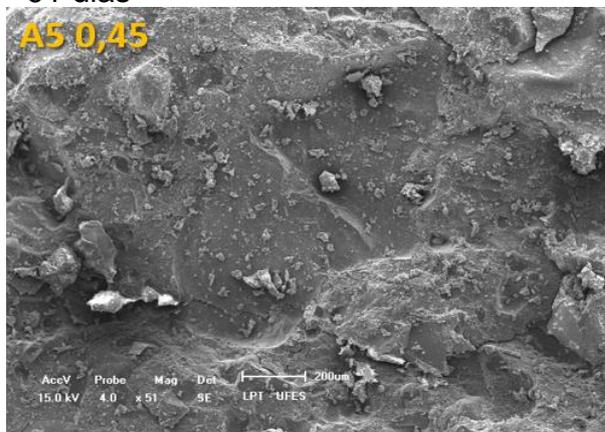
Ampliação de x51



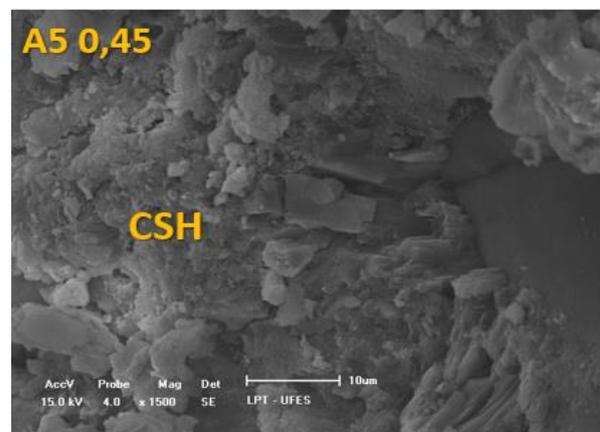
Ampliação de x2400

Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 153 - Micrografia dos concretos com 5% de adição de resíduo FGD (A5 0,45) - 91 dias



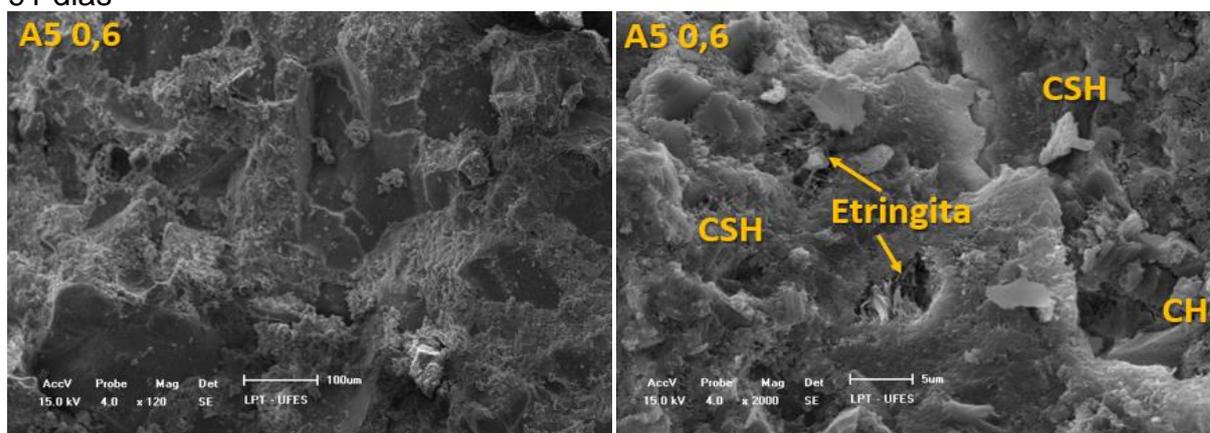
Ampliação de x51



Ampliação de x1500

Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 154 - Micrografia dos concretos com 5% de adição de resíduo FGD (A5 0,6) - 91 dias

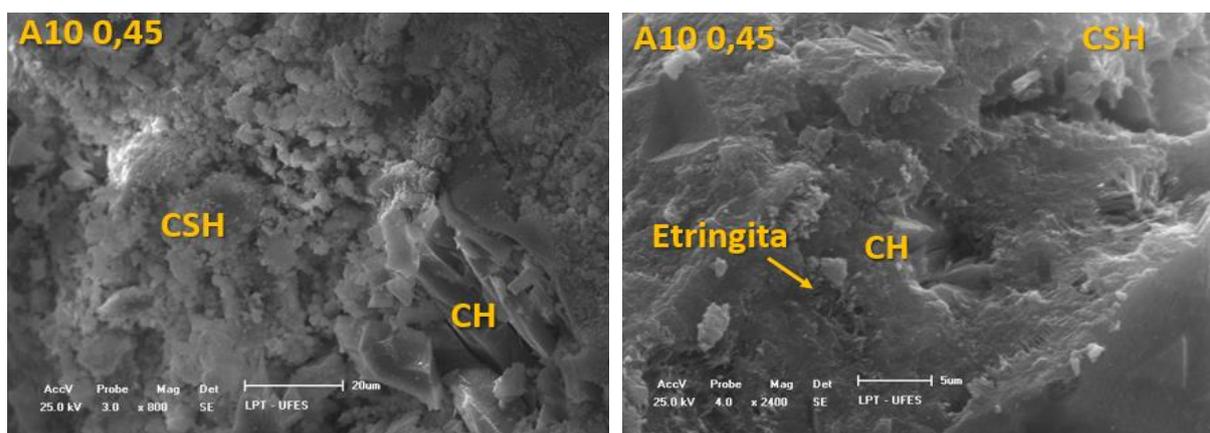


Ampliação de x120

Ampliação de x5000

Fonte: Acervo pessoal a autora.

Figura 155 - Micrografia dos concretos com 10% de adição de resíduo FGD (A10 0,45) - 91 dias

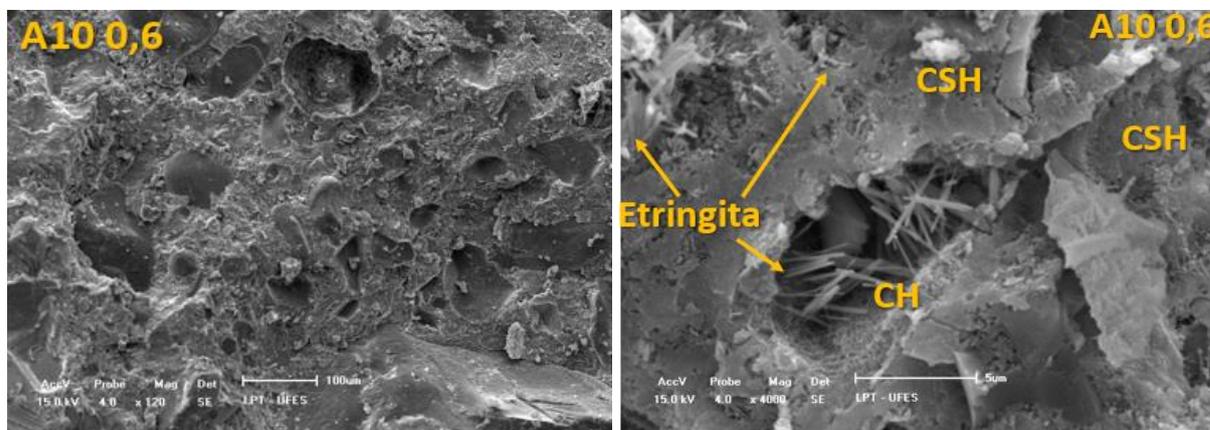


Ampliação de x800

Ampliação de x2400

Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 156 - Micrografia dos concretos com 10% de adição de resíduo FGD (A10 0,6) - 91 dias

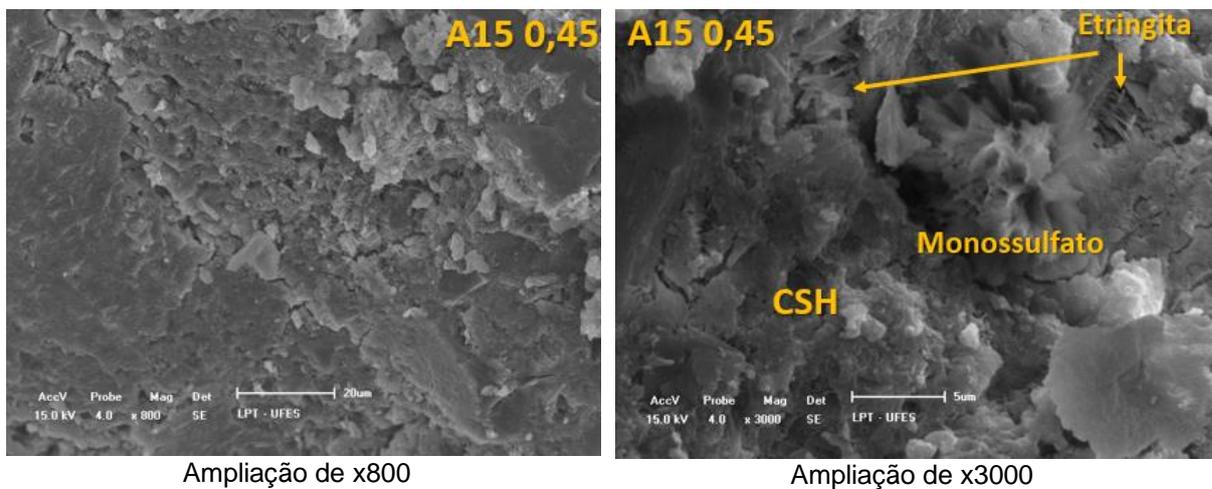


Ampliação de x45

Ampliação de x4000

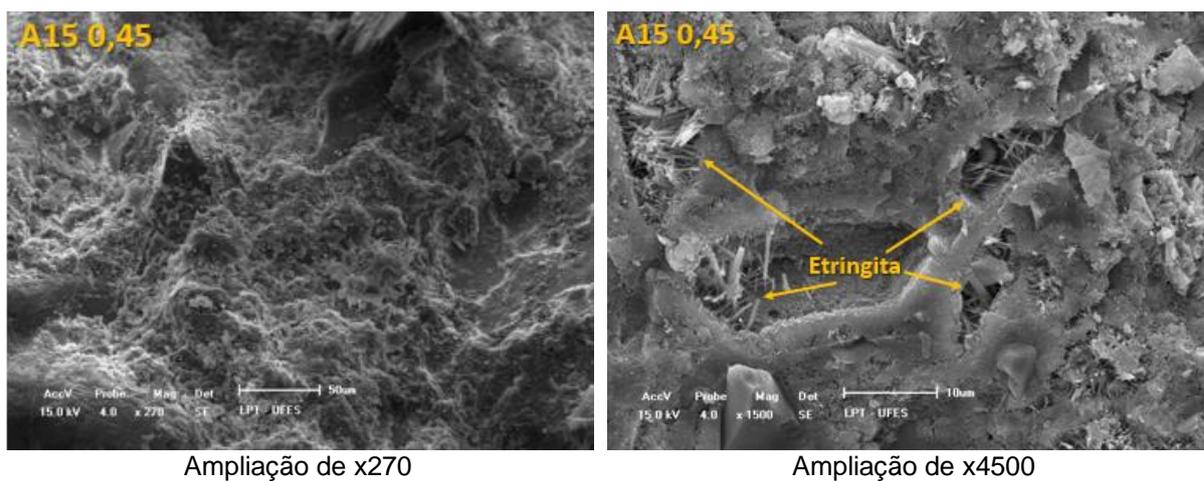
Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 157 - Micrografia dos concretos com 15% de adição de resíduo FGD (A15 0,45) - 91 dias



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Figura 158 - Micrografia dos concretos com 15% de adição de resíduo FGD (A15 0,6) - 91 dias



Fonte: Acervo pessoal da autora.

4.3.8 Avaliação da Lixiviação de Contaminantes

Apesar do resíduo FGD estudado não ser considerado perigoso após o ensaio de lixiviação (discutido na seção 4.1.2), o mesmo possui propriedades relativas a solubilidade de metais em água, que torna necessária a avaliação das propriedades de lixiviação de metais após a incorporação do resíduo FGD nos concretos.

No Brasil não existe uma norma que defina parâmetros relativos a avaliação da incorporação de resíduos em materiais de construção (do ponto de vista de segurança ambiental), devendo, no entanto, ser avaliada a classificação do resíduo gerado após cessada a vida útil matriz cimentícia (composta pelo resíduo adicionado), dando-se assim, destino adequado.

Tendo em vista a importância da valorização de resíduos industriais na construção civil, a utilização segura deve ser uma questão avaliada. Diversas pesquisas apontam que as matrizes cimentícias atuam como encapsuladores de contaminantes, como metais pesados (JOICHEM, 2017; QIAO; POON; CHEESEMAN, 2006; SPENCE; SHI, 2004). No entanto, é necessária uma avaliação criteriosa, devido aos diferentes tipos de resíduos utilizados em matrizes cimentícias, e sua diversidade de características.

Dentre as normas utilizadas para avaliação da lixiviação de contaminantes em materiais de construção no mundo, a norma europeia/holandesa NEN 7375 (NNI, 2004) tem sido muito utilizada pela facilidade de aplicação.

Conforme descrito na seção 3.6.3.8, para avaliar se a incorporação do resíduo FGD estudado é segura, do ponto de vista ambiental, realizou-se o ensaio de Tanque, cujos resultados são mostrados na Tabela 32. É importante ressaltar que a Tabela 32 apresenta o resultado da lixiviação acumulada (durante os 64 dias de ensaio), por área de concreto utilizada no ensaio.

Tabela 32 - Resultados da Lixiviação acumulada nos concretos após os 8 ciclos avaliados

Lixiviação acumulada (mg/m²)	As	Ag	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Se	Zn
REF 0,45	0,265	0,685	0,062	1,602	0,575	0,145	0,168	0,156	12,022
A5 0,45	0,176	0,284	0,041	0,993	0,683	0,099	0,025	0,154	12,233
A10 0,45	0,160	<LD	0,041	0,814	0,511	0,126	0,122	0,227	16,908
A15 0,45	0,167	<LD	0,041	0,696	0,462	0,108	0,106	0,298	13,926
REF 0,6	0,187	0,362	0,067	2,373	0,513	0,196	0,406	0,224	17,516
A5 0,6	0,161	<LD	0,042	1,454	0,459	0,116	0,024	0,258	13,691
A10 0,6	0,159	0,092	0,059	1,362	0,466	0,098	0,025	0,229	16,809
A15 0,6	0,207	<LD	0,062	1,656	0,468	0,172	0,105	0,308	27,367
U1 (mg/ m²)	40	-	1	150	50	-	-	1,5	200
U2 (mg/ m²)	300	-	7,5	950	350	-	-	9,5	1500

Fonte: Elaborado pela autora,

De acordo com a Tabela 32, pode-se verificar que a lixiviação acumulada dos metais avaliados, para todos os traços de concreto foi inferior ao limite estabelecido para uso em materiais monolíticos pela norma NEN 7375 (NNI, 2004), ou seja, inferior ao limite U1 – mostrado na Tabela 32, indicando que a adição do resíduo FGD em concretos é segura do ponto de vista ambiental.

Ainda, todas as amostras apresentaram pH dentro da faixa de 11,2 a 11,8, adequada para promover a imobilização de possíveis contaminantes (QIAO; POON; CHEESEMAN, 2006), sendo este um pH comum ao concreto.

É importante ressaltar que, segundo Spence e Shi (2004), a faixa ideal de pH para imobilização de metais pesados em sistemas de solidificação e estabilização (monólitos) encontra-se entre 8 e 12, uma vez que os metais chumbo, zinco e cobre tem a lixiviação facilitada para pH inferior a 8, e o chumbo, para pH acima de 12. Entretanto, mesmo que o pH típico do concreto seja entre 12 e 13, não houve interferência, uma vez que o mecanismo de lixiviação envolve um solvente, no caso a água.

Comparando os lixiviados obtidos, percebe-se que, dentre todos os metais, o zinco apresentou a maior lixiviação. No entanto, é importante notar que não foram encontradas concentrações deste metal acima do estabelecido pela NBR 10.004

(ABNT, 2004) para o resíduo FGD (seção 4.1.2). Desta forma, é provável que este metal tenha sido oriundo dos materiais utilizados para produzir os concretos.

O cromo foi o segundo metal mais lixiviado nas amostras de concreto, estando presente em alta concentração no extrato solubilizado do resíduo avaliado (Tabela 21), acima do limite apresentado pela NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Apesar disto, a lixiviação do cromo foi maior nas amostras de referência (que continham apenas concreto), verificando-se que não houve influência do resíduo FGD na lixiviação desse metal, ao contrário, para os concretos com menor relação água / aglomerante (0,45), houve uma diminuição na concentração deste metal no lixiviado, com o aumento do teor de resíduo FGD nos concretos.

Percebe-se ainda, de acordo com a Tabela 32, que uma menor relação água/aglomerante proporcionou um maior encapsulamento de metais, com o aumento do teor de adição de resíduo FGD. Isto corrobora com o apresentado por Jochem (2017), uma vez que para uma maior relação água/aglomerante é formado mais C-S-H, principal agente na imobilização de metais, que são ligados ao tetraedro de silício, no CSH.

Assim, percebe-se que houve o encapsulamento dos metais avaliados dentro da matriz de concreto, sendo a incorporação do resíduo FGD em concretos segura do ponto de vista ambiental.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÃO GERAL

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se inferir que a utilização do resíduo FGD como adição em concretos é viável tecnicamente, sendo o melhor desempenho obtido para o teor de 5% de adição, que além de promover um maior incremento na resistência à compressão, garantiu a resistência à tração do concreto referência e contribuiu para uma melhor compacidade do concreto, diminuindo a absorção de água por imersão e capilaridade dos concretos estudados.

Ainda, verificou-se que a adição do resíduo FGD, em todos os percentuais, promoveu um menor consumo de cimento, o que é interessante do ponto de vista da sustentabilidade, e um uso seguro, sem a lixiviação de contaminantes.

Apesar do resíduo FGD ser composto por sulfito de cálcio hemi-hidratado ($\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), os resultados obtidos neste trabalho permitem inferir que provavelmente este composto está presente em sua forma inerte, conferindo características de fíler ao resíduo. No entanto, verificou-se que possa haver a liberação de sulfatos no meio, pela solubilidade do resíduo, o que deve ser investigado.

5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.2.1 Quanto a caracterização do Resíduo FGD

A caracterização do resíduo FGD permitiu verificar que ele é composto majoritariamente por sulfito de cálcio hemi-hidratado, que possui propriedades de um composto inerte. Além disso, a granulometria do resíduo é inferior ao cimento, com uma superfície específica superior, o que demonstra a potencialidade de utilização como fíler.

5.2.2 Quanto ao concreto no estado fresco

Verificou-se que a adição do resíduo FGD, para traços mais ricos, promove uma redução da trabalhabilidade pela sua alta finura. No entanto, para maiores relações de

água/aglomerante (a/agl), uma maior adição do resíduo (nos teores de 10% e 15%) promoveu um incremento no abatimento do concreto, melhorando a sua trabalhabilidade devido ao efeito de rolamento das partículas.

Com relação a massa específica, percebeu-se que a adição do resíduo promoveu o preenchimento dos poros do concreto, elevando ligeiramente o valor da massa específica dos concretos.

5.2.3 Quanto ao concreto no estado endurecido

Quanto à resistência à compressão axial, todos os percentuais de adição de resíduo FGD promoveram resistências iguais ou superiores ao concreto referência. O melhor desempenho foi obtido com 5% de adição, para todos os traços, o que possibilitou um incremento médio de 8% nesta propriedade. No entanto, todos concretos foram classificados como de alta resistência, apresentando valores superiores a 40 MPa.

No entanto, para a resistência à tração por compressão diametral, verifica-se que apenas o teor de 5% garantiu o desempenho dos concretos referência, sendo que os demais teores promoveram redução nesta propriedade, o que já era esperado, uma vez que adições minerais não contribuem tão eficientemente para a melhoria desta propriedade;

O índice de vazios e de sulcos capilares nos concretos foram reduzidos para todos os teores de incorporação de resíduo FGD. O melhor desempenho foi obtido pelo teor de 5% de adição, que possibilitou uma redução de 14% do número de vazios e de 36% da absorção por capilaridade, com relação aos concretos referência.

Foi percebido ainda que apesar do resíduo FGD conter cloretos em sua composição, foi possibilitada o encapsulamento deste cloreto na matriz do concreto, provavelmente pela reação com os aluminatos, o que promoveu a redução dos cloretos livres, possibilitando teores compatíveis com o concreto referência.

Desta forma existe o potencial de uso dos concretos produzidos com resíduo FGD em 5% de adição, para a produção de concreto armado, para todas as classes de agressividade contidas na NBR 12655 (ABNT, 2015). Ainda, este mecanismo de encapsulamento permite o uso dos outros percentuais de adição, no entanto para classes mais restritivas. O percentual de 10% de adição pode ser utilizado para as classes I e II, no entanto 15% de adição só é recomendado para a locais com agressividade de grau I.

Com relação ao teor de sulfatos solúveis nos concretos, todas adições promoveram valores inferiores ao limite da NBR 16697 (ABNT, 2018), que normatiza o teor de

sulfatos em cimentos. Isto corrobora com a hipótese de que o resíduo FGD estudado é composto em sua maior parte por um material inerte.

Percebeu-se ainda que a incorporação do resíduo FGD em concretos é segura do ponto de vista ambiental, não sendo promovida a liberação de contaminantes no meio ambiente, conforme requerido pela NEN 7375 (NNI, 2004).

A microestrutura dos concretos avaliados demonstrou a presença de compostos compatíveis com os resultados obtidos nos ensaios mecânicos e durabilidade, indicando uma maior compacidade das matrizes de concreto produzidas com adição de 5% e 10% de resíduo FGD, além da maior presença de etringita e portlandita nos concretos com maiores teores de adição do resíduo, o que corrobora com a hipótese de que maiores adições possam promover a solubilização de sulfatos, interferindo nas propriedades dos concretos.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No desenvolvimento do trabalho surgiram aspectos que necessitam ser estudados e que, devido às limitações do programa experimental e do tempo disponível, não puderam ser abrangidos. Portanto, são apresentadas sugestões para a ampliação e prosseguimento do estudo da utilização do resíduo FGD como adição em concretos, são elas:

- Avaliação da incorporação do resíduo FGD em conjunto com alguma pozolana, de forma a avaliar a influência conjunto deste sistema, uma vez que o resíduo FGD contribui com uma formação excessiva de portlandita, utilizada na reação pozolânica, e que pode promover a produção de concretos de alto desempenho;
- Avaliação da incorporação do resíduo FGD com escórias, ricas em aluminatos, de forma a compreender o mecanismo de formação de etringita, e o ataque interno de sulfatos que pode acontecer com altos teores de incorporação do resíduo FGD, além de fornecer subsídios para avaliação do encapsulamento de cloretos;
- Avaliação de ensaios de durabilidade dos concretos com adição de resíduo FGD frente a penetração de cloretos e o ataque de sulfatos, visando fornecer subsídios quanto ao comportamento desta adição em condições agressivas;

- Avaliação do ciclo de vida dos concretos produzidos com a adição de resíduo FGD de forma a identificar se é possível reduzir os impactos ambientais advindos da produção do concreto convencional com a incorporação deste resíduo.

REFERÊNCIAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Pesquisa inédita e exclusiva revela cenário do mercado brasileiro de concreto**. 2013. Disponível em: < <http://www.abcp.org.br/cms/imprensa/noticias/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela-cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto/>>. Acesso em 07 jan. 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

_____. **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

_____. **NBR 7218**: Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR 9833** - Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos: Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR 11579:** Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (n° 200) - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR 12127:** Gesso para construção – Determinação das propriedades físicas do pó. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 12653 -** Materiais pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR 14656:** Cimento Portland e matérias-primas – Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. **NBR 15894:** Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 m. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **NBR 15900-1:** Água para amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

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

_____. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **NBR NM 15:** Cimento Portland – Análise química – Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR NM 16:** Cimento Portland – Análise química – Determinação de Anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR NM 18:** Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR NM 20:** Cimento Portland e suas matérias primas – Análise química - Determinação de dióxido de carbono por gasometria. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR NM 23:** Cimento Portland – Determinação e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. **NBR NM 46:** Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR NM 49:** Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação de massa específica e massa aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR NM 65:** Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

_____. **NBR NM 67:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

_____. **NBR NM 76:** Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de Permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

_____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ACAA – American Coal Ash Association. **Production and use of coal combustion products in the U.S.** ACAA, 2015. 48 p. Disponível em: <<https://www.acaa-usa.org/Portals/9/Files/PDFs/ReferenceLibrary/ARTBA-final-forecast.compressed.pdf>>. Acesso em 19 out. 2017.

ALMEIDA, N.; BRANCO, F.; SANTOS, J. R. Recycling of Stone Slurry in Industrial Activities: application to concrete mixtures. **Building and Environment**, v. 42, n. 2, p. 810-819, 2007.

ALSTON. **Semi-Dry FGD Process**, 2018. Disponível em: <<https://www.power-technology.com/projects/maritzaeast/>>. Acesso em 07 out. 2017.

ANDRADE, M. **Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras**. Tradução e Adaptação: Antônio Carmona e Paulo Helene. São Paulo: Pini, 1992. 104 p.

ANDRADE, D. S. **Microestrutura de pastas de cimento Portland com Nanossílica coloidal e adições minerais altamente reativas**. 2017. 296 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração de energia elétrica por tipo de fonte no Brasil – 2017**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 01 ago. 2017.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the examination of water and wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 21. ed, Washington, 2005. 937p.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1218: Standard test method for water soluble chloride in mortar and concrete**. ASTM International: West Conshohocken/ PA, 2017. 3 p.

BARRENETXEA, C. O.; SERRANO, A. P.; DELGADO, M. N. G.; VIDAL, F. J. R.; BLANCO, J. M. A. **Contaminación Ambiental: Una visión desde la Química**. 1. ed. Madrid: Thomson Editores, Spain, 2005. 682p.

BIGAS, J. P.; GALLIAS, J. L. Single-drop agglomeration of fine mineral admixtures for concrete and water requirement of pastes. **Powder Technology**, v. 130, n. 1, p. 110-115, 2003

BIGHAM, J. M.; KOST, D. A.; STEHOUWER, R. C.; BEEGHLY, J. H.; FOWLER, R.; TRAINA, S. J.; WOLFE, W. E.; DICK, W. A. Mineralogical and engineering characteristics of dry flue gas desulfurization products. **Fuel**, v. 84, p. 1839-1848, 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução n. 382 do CONAMA, de 26 de dezembro de 2006. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. **Diário Oficial da União**, Brasília, n. 1, 02. jan. 2007, Seção 1, p. 131-137. 2007. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=520>>. Acesso em: 19 dez. 2017.

BRASIL. **Proposição de limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos de fontes fixas para a indústria siderúrgica em nível nacional**. 7º GT Fontes Fixas – Sub-grupo de Minas Gerais. Belo Horizonte: MMA, 2008. 28 p.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, n. 147, 03. ago. 2010, Seção 1, p. 3-7. 2010. Disponível em: <<https://www.jusbrasil.com.br/diarios/7190464/pg-1-secao-1-diario-oficial-da-uniao-dou-de-03-08-2010/pdfView>>. Acesso em: 02 jan. 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução n. 436 do CONAMA, de 26 de dezembro de 2011. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007. **Diário Oficial da União**, Brasília, n. 247, 26. dez. 2011, Seção 1, p. 304-311. 2007. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=520>>. Acesso em: 19 dez. 2017.

BRODNY, J.; TUTAK, M. Analysis of the diversity in emissions of selected gaseous and particulate pollutants in the European Union countries. **Journal of Environmental Management**, v. 231, p. 582-595, 2019.

CAILLAHUA, M. C. **Avaliação Técnica para Uso do Gesso FGD como Aditivo Retardador do Tempo de Pega em Cimento Portland**. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos). Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2013.

CAILLAHUA, M. C.; MOURA, F. J. Technical feasibility for use of FGD gypsum as an additive setting time retarder for Portland cement. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 7, n. 2, p.190-197, 2018.

CALADO, C. F. A.; CAMÕES, A.; JALALI, S.; BARKOKÉBAS JÚNIOR, B. Concreto auto-adensável (CAA), mais do que alternativa ao concreto convencional (CC). EDUPE: UFPE, 2016. 263 p.

CALLISTER JR.; W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 8. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2012. 845 p.

CARNEIRO, F. L. **Um Novo Método para Determinação da Resistência à Tração dos Concretos**. Comunicação, 5. Reunião Associação Brasileira de Normas Técnicas, Instituto Nacional de Tecnologia, Rio de Janeiro, 1943.

CARNEIRO, A. M. P.; REGIS, P. A.; RODRIGUES, P.; BARCELAR, E. A.; ANDRADE, G. Análise da Trabalhabilidade do Concreto Fresco Dosado com Agregado Graúdo Composto a Partir de uma Curva Granulométrica Contínua Obtida por uma Equação Algébrica – O Efeito Parede. In: Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 5., **Anais...** EPUSP: São Paulo, 2003. 15 p. Disponível em: < <http://engipapers.com.br/artigos/00560COCV2003.pdf>>. Acesso em 05 jan. 2019.

CARPENTER, A. M. **Low water FGD Technologies**. London: IEA Clean Coal Centre. Nov. 2012. 73 p.

CARPENTER, A. M. **Advances in multi-pollutant control**. London: IEA Clean Coal Centre. Nov. 2013. 82 p.

CASTRO, R. P. V. **Caracterização de sólidos e desenvolvimento de metodologia analítica para monitoramento de tratamento oxidativo de resíduos sólidos de dessulfuração de gases exaustos de termelétrica a carvão**. 2016. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2016.

CEN – COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **EN 12457-4: Characterization of waste**. Leaching. Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges – Part 4: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10l/kg for materials with particle sizes below 10 mm (without or with size reduction). Bruxelas: CEN, 2002.

CHINDAPRASIRT, P.; BOONSERM, K.; CHAIRUANGSRI, T.; VICHIT-VADAKAN, W.; EAIMSIN, T.; SATO, T.; PIMRAKSA, K. Plaster materials from waste calcium

sulfate containing chemicals, organic fibers and inorganic additives. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 3193-3203, 2011.

CLA – CONSTRUÇÃO LATINO AMERICANA. **Indicadores do Concreto**. 2017. Disponível em :< <https://www.construcaolatinoamericana.com/indicadores-do-concreto/128426.article>>. Acesso em 15 fev. 2018.

CODY, A.M., LEE, H., CODY, R.D., SPRY, P.G. The effects of chemical environment on the nucleation, growth, and stability of ettringite $[Ca_3Al(OH)_6]_2(SO_4)_3 \cdot 26H_2O$. **Cement and Concrete Research**, v.34, n.5, p. 869-881, 2004.

COOPER, C. D.; ALLEY, F. C. **Air pollution control: A design approach**. 4. ed. Long Groove: Waveland Press, 2011.

COPPOLA, L.; BELZ, G.; DINELLI, G.; COLLEPARDI, M. Prefabricated building elements based on FGD gypsum and ashes from coal-fired electric generating plants **Materials and Structures**, v. 9, p. 305-311, 1996.

CÓRDOBA, P.; GONZÁLEZ, M. E.; GONZÁLEZ, A.; MAROTO-VALER, M.; MORENO, N.; SEPÚLVEDA, N.; NAVIA, R.; QUEROL, X. Evaluation of a Flue Gas Desulphurisation (FGD)-Gypsum from a Wet Limestone FGD as Adsorbent for Removal of Selenium in Water Streams, **Journal of Environmental & Analytical Toxicology**, v. 5, n. 5, 2015. 6 p.

CREVECOEUR, S.; SMITH, K. Evaluation of Wet FGD Technologies to meet requirements for post CO₂ removal of Flue Gas streams. In: INTERNATIONAL AIR QUALITY VII CONFERENCE, 7., 2007, Arlington. **Anais eletrônicos...** Virginia/EUA: Energy & Environmental Research Center, 2009. Disponível em: <<http://www.mass.gov/eea/docs/dep/air/priorities/hazeapd25.pdf>>. Acesso em 02 nov. 2018.

CROPPER, M. L.; GUTTIKUNDA, S.; JAWAHAR, P.; MALIK, K.; PARTRIDGE, I. COSTS AND BENEFITS OF INSTALLING FLUE-GAS DESULFURIZATION UNITS AT COAL-FIRED POWER PLANTS IN INDIA. IN: MOCK, C.; NUGENT, R.; KOBUSINGYE, O.; SMITH, K. R. **Disease Control Priorities: Injury Prevention and Environmental Health**, 3. ed., cap.7, p. 239-248, 2017.

CSE – CENTRE FOR SCIENCE AND ENVIRONMENT. **Status of Implementation of New Environmental Norms and Way Forward**. 2016. <Disponível em: <<http://cseindia.org/userfiles/new-environmental-norms-report.pdf>>. Acesso em 05 set. 2017.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural, In: ISAIA, G. C. **Concreto Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo, IBRACON, 2005.

DALMOLIN, D. C. C. MASUERO, A. B.; PETRY, N. S.; ABREU, A. G.; VENQUIRUTO, S. D. Metodologia para Avaliação do Potencial Deletério de Resíduos em Matrizes Cimentícias: Contribuição à Norma de Desempenho. In: KAZMIERCZAK, C. S.; FABRÍCIO, M. M. (Org.). **Avaliação de Desempenho de**

Tecnologias Construtivas Inovadoras: Materiais e Sustentabilidade. 1. ed., São Carlos: Scienza, 2016. v. 1, cap. 4, p. 77-116.

DEGEN, M. K. **Avaliação de desempenho mecânico e de durabilidade em concretos produzidos com resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente (RBROTT).** 2017. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

DIAZ, J. P. V. **Comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras de pupunha.** 2016. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica, 2016.

EIGHMY, T. T.; CRANNEL, B.S.; BUTLER, L.G.; CARTLEDGE, F.K.; EMERY, E.F.; OBLAS, D.; KZARNOWSKI, J.E.; EUSDEN, J.D.; SHAW, E.L.; FRANCIS, C.A. Heavy Metal Stabilization in Municipal Solid Waste Combustion Dry Scrubber Residue Using Soluble Phosphate. **Environ. Sci. Technol.**, v. 31, n.11, p.3330-3338, 1997.

FENG-QING, Z.; HONG-JIE, L.; LI-XIA, H.; QIAN, L. Water resistant block from desulfurization gypsum. **Construction and Building Materials**, v. 27, p.531–533, 2012.

FERNANDEZ-JIMENEZ A, PALOMO A. Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: effect of the activator. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 10, p. 1984-1992, 2005.

FHWA – FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (EUA). **User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction.** Report FHWA-RD-97-148. Washington DC: US Department of Transportation. 2016. 6 p. Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/fgd1.cfm>>. Acesso em 05 jan. 2018.

FRANÇA, S. C. A.; UGARTE, J. F.; SILVA, A. A. S. Minerais aplicados à tecnologia ambiental: minerais verdes. In: **Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações.** 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, p. 933-959, 2008.

GALLIAS, J. L.; KARA-ALI, R.; BIGAS, J. P. The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 10, p. 1543- 1549, 2000.

GOMES, S.; FRANÇOIS, M.; PELLISIER, C.; EVRARD, O. Characterization and comparative study of coal combustion residues from a primary and additional flue gas secondary desulfurization process. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 11, p. 1605–1619, 1998.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos.** 2000. 135 f. Dissertação (Mestrado). Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

GUO, X. L.; SHI, H. S. Thermal treatment and utilization of flue gas desulphurization gypsum as an admixture in cement and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1471-1476, 2008.

GUO, X.; SHI, H. Influence of Thermally Treated Flue Gas Desulfurization (FGD) Gypsum on Performance of the Slag Powder Concrete. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**, v. 28, n. 6, 2013.

HELENE, P. La Agressividad del Medio y la Durabilidad del Hormigón. **Revista Hormigón**, Barcelona, n. 10, p. 25-35, 1983.

HELENE, P., ANDRADE, T. Concreto de cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2017, p. 970-1005. 2017. 2 v.

HELENE, P.; TERZIAN, P. R. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 350 p

HERMAN, A.; LANGARO, E. A.; SILVA, S. H. L.; KLEIN, N. S. Particle packing of cement and silica fume in pastes using an analytical model. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, v.9, n.1, p. 57-65, 2016.

IAB – INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório: Produção Siderúrgica Brasileira em 2017**. Disponível em <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/estatisticas.asp>>. Acesso em 01 fev. 2018.

ISAIA, G. C. A Ciência e Engenharia de Materiais de Construção Civil. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2017, p. 1-36. 2017. 2 v.

ISAIA, G.; GASTALDINI, A. Concreto “verde” com teores muito elevados de adições minerais: um estudo de sustentabilidade. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 1., **Anais eletrônicos...** 2004. 15 p. Disponível em:

<ftp://ip20017719.eng.ufjf.br/Public/AnaisEventosCientificos/ENTAC_2004/trabalhos/PAP0270d.pdf>. Acesso em 01 dez. 2017.

ISHIZUKA, T.; UENO, T.; TATANI, A.; KOTAKE, S. Advanced flue gas treatment system using LILAC absorbent prepared from fly ash. **Coal Science and Technology**, v. 24, p. 1855-1858, 1995.

ISNUGROHO, K.; BIRAWIDHA, D. The production of pig iron from crushing plant waste using hot blast cupola. **Alexandria Engineering Journal**, v. 57, n. 1, p. 427-433, 2018.

JAMIL, R.; MING, L.; JAMIL, I.; JAMIL, R. Application and Development Trend of Flue Gas Desulfurization (FGD) Process: A Review. **International Journal of Innovation and Applied Studies**, v., 4, n. 2, p. 286-297, 2013.

JOCHEM, L. D. **Efeito do agregado reciclado dos resíduos de construção e demolição na retenção dos metais pesados em processos de solidificação e estabilização**. 2017. 299 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. 2017.

JOHNSON, B. **An Unbiased Comparison of FGD Technologies: Wet, Spray Dry and CDS**. WPCA Conference, Washington D.C, 2010.

KASSIM, T. A.; WILLIAMSON, K. J. **Environmental Impact Assessment of Recycled Wastes on Surface and Ground Waters: Concepts; Methodology and Chemical Analysis**. 1. ed. Berlim: Springer, 2005, 411 p.

KHATIB, J. M.; WRIGHT, L.; MANGAT, P. S. External chemical shrinkage of pastes containing flue gas desulphurisation (FGD) waste. **e-Journal of New World Sciences Academy**, v. 6, n. 4, 2011. 8p. Disponível em: <<http://dergipark.gov.tr/download/article-file/186212>>. Acesso em 04 jan. 2019.

KHATIB, J. M.; WRIGHT, L.; MANGAT, P.S. Effect of incorporating flue gas desulphurisation (FGD) waste on porosity and pore size distribution of cement paste. In: International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering (SISS' 2007). **Anais...** Shanghai, p. 1352–1360, 2007a.

KHATIB, J. M.; WRIGHT, L.; MANGAT, P. S. Mechanical and physical properties of concrete containing FGD waste. **Magazine of concrete Research**, v. 68, n. 11, p. 550-560, 2016.

KJELLEN, K. O.; WALLEVIK, O. H.; FJÄLLBERG, L. Microstructures and microchemistry of the paste-aggregate interfacial transition zone of high-performance concrete. **Advances in Cement Research**, v. 10, n. 1, p.33-40, 1998.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de ciência dos minerais**. 23. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 716 p.

KOHL, A.L.; NIELSEN, R. **Chapter 7: Sulfur Dioxide Removal**. In: Gas Purification. 5.ed, Houston/Texas: Gulf Publishing Company,1997.

KOUKOUZAS, N.; VASILATOS, C. Mineralogical and chemical properties of FGD gypsum from Florina, Greece. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 83, p. 20-26, 2008.

LACERDA, C. S.; HELENE, P. **Estudo da influência da substituição de cimento Portland por Metacaulin em concretos**. São Paulo, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Boletim Técnico BT/PCC/419, 2005. 20p.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2003. 310 p.

LEIVA, C.; ARENAS, C. G.; VILCHES, L. F.; VALE, J.; GIMENEZ, A.; BALLESTEROS, J.C; PEREIRA, C. F. Use of FGD gypsum in fire resistant panels. **Waste Management**, v. 30, p. 1123-1129, 2010.

LEI, D. Y.; GUO, L. P.; SUN, W.; LIU, J.P.; MIAO, C. W. Study on properties of untreated FGD gypsum-based high-strength building materials. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 765-773, 2017.

LI, J.; ZHUANG, X.; LEIVA, C.; CORNEJO, A.; FONT, O.; QUEROL, X.; MOENO, N.; ARENAS, C.; FERNÁNDEZ-PEREIRA, C. Potential utilization of FGD gypsum and fly ash from a Chinese power plant for manufacturing fire-resistant panels. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 910-921, 2015.

LIANG, H. H.; LI, J. L. The influence of hydration and swelling properties of gypsum on the preparation of lightweight brick using water supply reservoir sediment. . **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 691-700, 2015.

LIU, R. P.; GUO, B.; REN, A.; BIAN, J. F. Studies on characteristics of semi-dry FGD ash from iron industry. **Waste Manag Res.**, v. 28, n. 10, p. 865-871, 2009.

LV, L.; YANG, J.; ZHOU, Y.; LU, J. Optimizing the characteristics of calcium sulfate dihydrate in the flue gas desulfurization process: Investigation of the impurities in slurry – Cl, Fe³⁺ and Mn²⁺. **Chem. Ind. Chem. Eng. Q.**, v. 23, n. 3, p. 293-299, 2017.

MANFROI, E. P. **Desenvolvimento de aglomerantes ecoeficientes com encapsulamento de metais pesados**. 2014. 303 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2014.

MATHIEU, Y.; TZANIS, L.; SOULARD, M.; PATARIN, J.; VIERLING, M.; MOLIÈRE, M. Adsorption of SO_x by oxide materials: A review. **Fuel Processing Technology**, v. 114, p. 81–100, 2013.

MAZER, W.; MACIOSKI, G.; SOTO, N.; BAETTKER, E. Determinação do teor de íons sulfato em estruturas de concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20., Florianópolis. **Anais eletrônicos...** São Paulo: ABEQ, 2014. 7 p. Disponível em: <<http://pdf.blucher.com.br/s3-sa-east-1.amazonaws.com/chemicalengineeringproceedings/cobeq2014/0733-24251-154679.pdf>>. Acesso em 01 dez. 2018.

MCCARTHY; G. J.; BUTLER, R. D.; GRIER, D. G.; ADAMEK, S. D.; PARKS, J. A.; FOSTER, H. J. Long-term stability of landfilled coal combustion by-products. **Fuel**, v. 76, n. 8, p. 697-703, 1997.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2008. 674 p.

MEHDIPOUR, I.; KHAYAT, K. H. Effect of particle-size distribution and specific surface area of diferente binder systems on packing density and flow characteristics of cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 78, p. 120-131, 2017.

MELO, S. K. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento**. 2010. 286 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Construção Civil). Universidade Federal de Goiânia. 2010.

MORAES, R. C. **Efeitos físico e pozolânico as adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto**. 2001. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. 2001.

NAIK, T. R.; KRAUS, R. N. Wood Ash: A New Source of. Pozzolanic Material. **Concrete International - Report**, 2001. 23 p.

NAIK, T. R.; CANPOLAT, F.; KRAUS, R. N. Development and Demonstration of High-Carbon CCPs and FGD ByProducts in Permeable Roadway Base Construction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE CONSTRUCTION MATERIALS AND TECHNOLOGIES, 3., Kyoto. **Anais eletrônicos...** Kyoto: UWM, 2013. 27 p. Disponível em: < http://www.cbu-uwm.info/Presentations/e294_SCMT3-CCP-PermRoadBase-08142013.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2019.

NAKANISHI, E. Y.; DOS SANTOS, V.; CABRAL, M. R.; SANTOS, S. F.; RODRIGUES, M. S.; FRIAS, M.; SAVASTANO JUNIOR, H. Hot water treatment effect in the elephant grass ashes calcinated at different temperatures. **Matéria - Rio de Janeiro**, v. 23, n. 3, p. 1-10, 2018.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. São Paulo: Pini, 2015. 912 p.

NEVILLE, A. M. Chloride attack of reinforced concrete: an overview. **Materials and Structures**, v. 28, p. 63-70, 1995.

NGUYEN, H. A.; CHANG, T. P.; SHIH, J. Y.; CHEN, C. T. Formulating for Innovative Self-Compacting Concrete with Low Energy Super-Sulfated Cement Used for Sustainability Development. **Journal of Materials Science and Chemical Engineering**, v. 4, n. 7, p. 22-28, 2016.

NILSSON, L. O.; POULSEN, E.; SANDBERG, P.; SORENSEN, H. E.; KLINGHOFFER, O. **Chloride penetration into concrete, State-of-the-Art. Transportprocesses, corrosion initiation, test methods and prediction models**. The Danish Road Directorate: Dinamarca, Report n. 53, 1996, 225 p. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/264420368_HETEK_Chloride_penetration_into_concrete_State-of-the_art_Transport_processes_corrosion_initiation_test_methods_and_prediction_models> . Acesso em 06 out. 2019.

NNI - NETHERLANDS NORMALISATIE-INSTITUUT. **EA NEN 7375:2004: Leaching Characteristics of Moulded or Monolithic Building and Waste Materials**. Nederlands Normalisatie-instituut: Delft, The Netherlands, 2004.

OLIVEIRA JUNIOR, L. A., ARAÚJO, D. L., TOLÊDO FILHO, R. D. FAIRBARN, E. M. R.; ANDRADE, M. A. S. Influence of steel fibers and mineral additions on cracking behavior of reinforced concrete tension members. **Rev. IBRACON Estrut. Mater**, v.2, n.2, p. 142-165, 2009.

PAPAGEORGIU, A.; TZOUVALAS, G.; TSIMAS, S. Use of inorganic setting retarders in cement industry. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, p. 183-189, 2005.

PASINI, R. A. **An evaluation of Flue Gas Desulfurization gypsum for abandoned mine land reclamation**. 2009. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Ohio State University, Ohio, United States, 2009.

PEASE, R.; RAUCH, A.; LADWIG, K. **Geotechnical Properties of FGD Scrubber Material**. In: WORLD OF COAL ASH CONFERENCE, Lexington/Kentucky: University of Kentucky, 2017, 14 p.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Revista Concreto e Construções**. Ibracon, n. 53, p.14- 19, 2009.

PEREIRA, L. F. C.; CINCOTTO, M. A. **Determinação de cloretos em concreto de cimentos Portland: influência do tipo de cimento**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: Brasil, 2001. 25 p.

PIMENTA, M. F. **Flue gas desulphurization through wet limestone process – adding acids and bases to the limestone suspension**. 2010. 54 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade do Porto, Portugal. 2010.

PINHEIRO, S. M. M. **Gesso reciclado: avaliação de propriedades para uso em componentes**. 2011. 330 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2011.

POULLIKKAS, A. Review of Design, Operating, and Financial Considerations in Flue Gas Desulfurization Systems. **Energy Technology & Policy**, v.2, n. 1, 2015,13 p.

PRADO, J. M.; RODRIGUES, L. M.; SILVA, S.N. Determinação das características do subproduto da FGD (flue gas desulfurization) da combustão do carvão. In: Encontro de Ciência e Tecnologia do IFSUL Campus Bagé, 2., **Anais eletrônicos...** 2015. 5 p. Disponível em: <<http://www2.bage.ifsul.edu.br/encif2015/pdf/20150930092321000000.pdf>>. Acesso em 19 jan. 2018.

PULASKI, M. H. **Field Guide for Sustainable Construction**. Washington: Pentagon Renovation and Construction Program Office, 2004. 312 p.

QIAN, J. S.; SHI, C. J., WANG, Z. Activation of blended cements containing fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 8, p. 1121-1127, 2001.

QIAO, X.C.; POON, C.S.; CHEESEMAN, C. Use of flue gas desulphurisation (FGD) waste and rejected fly ash in waste stabilization/solidification systems. **Waste Management**, 26, p. 141-149, 2006.

QUERCIA, G.; LAZARO, A.; GEUS, J. W.; BROUWERSB, H. J. H. Characterization of morphology and texture of several amorphous nano-silica particles used in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 44, p. 77-92, 2013.

RIAZI; M. R.; GUPTA, R. **Coal production and Processing Technology**. Florida: CRC Press, 2016. 776 p.

RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUSA, C. A. C.; CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO, M. Z.; HELENE, P. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. 1. ed. Rio de Janeiro, Elsevier, 2014. 272p.

RODVINIJ, P.; WATTANACHAI, P.; CHAIWITHEE, S. The effect of FGD gypsum addition in the mixture of shotcrete used bottom ash as fine aggregate. **Geotec., Const. Mat. & Env**, v.16, n. 57, p.1 - 8, 2019.

ROHDE, G. M.; MACHADO, C. S. **Quantificação das cinzas de carvão fóssil produzidas no Brasil**. Boletim Técnico nº 36. Porto Alegre: CIENTEC, 2016. 44 p.

ROSSIGNOLO, J. A. Avaliação da zona de transição interfacial pasta-agregado leve em concretos com sílica ativa e látex SBR. **Revista Matéria**, v. 12, n. 3, p. 532 - 540, 2007.

RUNGCHET, A.; CHINDAPRASIRT, P.; WANSOM, S.; PIMRAKSA, K. Hydrothermal synthesis of calcium sulfoaluminate belite cement from industrial waste materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 115, p. 273-283, 2016.

SADIQUE, M.; NAGEIM, H. A.; ATHERTON, W.; SETON, L.; DEMPSTER, N. A new composite cementitious material for constructio. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 846-855, 2012.

SALVADOR, F. S.; ROCHA, J. C.; ANDRADE, L. B.; CHERIAF, M. Análise da influência de cinzas pesada como agregado miúdo em concreto na absorção capilar e retração plástica. In: Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, 11., Florianópolis: ENTAC, **Anais...**p. 4329-4338, 2006.

SANTOS F. B. F. **Dissolução do calcário no processo de dessulfurização de gases de combustão: abordagem experimental e numérica**. 2007. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

SCRIVENER, K.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. **Eco-efficient cements: Potential, economically viable, solutions for a low-CO₂, cement-based materials industry**. Paris: UN Environment, 2016.

SHENG, G.; HUANG, P.; MOU, Y.; ZHOU, C. Characteristics of fly ash from the dry flue gas desulfurization system for iron ore sintering plants. **Environmental Technology**, v. 33, n. 7, p. 837-844, 2012.

- SHVARZMAN, A., KOVLER, K., GRADER, G., SHTER, G. (2003). The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite, **Advances in Cement Research**, v. 33, p. 405-416, 2003
- SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. 2006. 220f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2006.
- SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica**. 1994. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- SOUZA, A. M.; ETHUR, A. B. M.; LOPES, L. F. D.; ZANINI, R. R. **Introdução a projetos de experimentos**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Departamento de Estatística, 2002. 127 p.
- SPENCE, R. D.; SHI, C. **Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive, and Mixed Wastes**. Boca Raton, Florida. Ed. CRC Press, 2004. 378p.
- SRIVASTA, R. K.; JOZEWICZ, W. Flue Gas Desulfurization: The state of art. **Journal of Air & Waste Management Association**, v. 51, p. 1676-1688, 2001.
- SUNCOKE ENERGY. **Inventário de Resíduos SOL Coqueria Tubarão S/A. Cond. Nº. 09, LO nº 276/2013. Biênio 2014/2015**. Instituto Estadual de Meio Ambiente do Estado do Espírito Santo. 2015. Acesso em 30 jun. 2018.
- STATSOFT, INC. Programa computacional Statistica 7.0. E.A.U. 2004.
- TAYLOR, H. F. W.; NEWBURY, D. E. An electron microprobe study of a mature cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 14, p. 565-73, 1984.
- TELESCA, A.; MARROCCOLI, M.; CALABRESE, D.; VALENTI, G. L.; MONTAGNARO, F. Flue gas desulfurization gypsum and coal fly ash as basic componentes of prefabricated building materials. **Waste Management**, v. 33, p. 628-633, 2013.
- TESAREK, P.; DRCHALOVA, J.; KOLISKO, J.; ROVNANIKOVA, P.; CERNÝ, R. Flue Gas Desulfurization Gypsum: Study of Basic Mechanical, Hydric and Thermal properties. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 1500-1509, 2007.
- TOMAZI, J. O.; MARQUES, A. D.; SCHNEIDER, P. S. Proposal of a computational model for a coal flue gas desulfurizer. In: Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, 5., Criciúma: CBCM, **Anais...** 2017.6 p. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/ANAIS/CBCM2017/>>. Acesso em 20 dez. 2018.
- TZOUVALAS, G.; RANTIS, G.; TSIMAS, S. Alternative calcium-sulfate-bearing materials as cement retarders: Part II. FGD gypsum. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 11, p. 2119-2125, 2004.

UNI - UNIFICAZIONE NAZIONALE ITALIANA. **Italian Standard 7928: Determinazione della penetrabilità dello tone cloruro**. Roma, 1978.

US - UNITED STATES. **Code of Federal Regulations**. Título 40, seção 260-273. 2019. Disponível em <<https://www.epa.gov/rcra/resource-conservation-and-recovery-act-rcra-regulations#haz>>. Acesso em 18 nov. 2018.

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Commodity Summaries 2019**. U.S. Geological Survey, 204 p. Disponível em: < http://prd-wret.s3-us-west2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/mcs2019_all.pdf>. Acesso em 22 jan. 2019.

VIEIRA, N. R. **Poluição do Ar: Indicadores ambientais**. Rio de Janeiro. Editora E-papers, 2009. 220 p.

WALKER, H. W.; TAERAKUL, P.; BUTALIA, T. S.; WOLFE, W. E.; DICK, W. A. Minimization and use of Coal Combustion by-products (CCBs): Concepts and Applications. In: GHASSEMI, A. (Org.). **Handbook of Pollution Control and Waste Minimization**. New York: Marcel Dekker, 2002. p. 421-437.

WALIA, M. K.; DICK, W. A. Selected soil physical properties and aggregate-associated carbon and nitrogen as influenced by gypsum, crop residue, and glucose. **Geoderma**, v. 320, p. 67-73, 2018.

WASSERMAN, R.; BENTUR, A. Interfacial interactions in lightweight aggregate concretes and their influence on the concrete strength. **Cement and Concrete Composites**, v. 18, p. 67-76, 1996.

WENYI, T.; SUPING, G.; WEI, X.; YOUXU, L.; ZIXIN, Z. Feature changes of mercury during the carbonation of FGD gypsum from different sources. **Fuel**, v. 212, p. 19-26, 2018.

WRIGHT, L.; KHATIB, J. M. Sustainability of desulphurised (FGD) waste in construction. In: KHATIB, J. M. **Sustainability of Construction Materials**. 2. ed. United Kingdom: Woodhead Publishing, p. 683-716, 2016.

WU, Z.; NAIK, T. R. Properties of concrete produced from multicomponent blended cements. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1937-1942, 2002.

WU, M. C. M.; JIANG, Y.; SU, Q.; ROBL, T.; JEWELL, R.; BUTALIA, T. S.; ZHANG, W.; WOLFE, W. **Dry FGD by-product characteristics and utilization – International Perspective**. In: WORLD OF COAL ASH CONFERENCE, Lexington/Kentucky: University of Kentucky, **Anais eletrônicos...** 2013. 13 p. Disponível em: < <http://www.flyash.info/2013/079-Wu-2013.pdf>>. Acesso em 03 jan. 2019.

XIAODONG, W.; DONGDONG, X.; YONG, Y.; ZHANGJE, X. Effect of desulfurization ash with different Calcium Sulfite content on performance of cement based materials. **Advanced Materials Research**, v. 250, p. 1054-1057, 2011.

XIE, M; PEIPEI, L.; GUO, H.; GAO, L.; YU, J. Ternary system of Fe-based ionic liquid, ethanol and water for wet flue gas desulfurization. **Chin. J. Chem. Eng**, v. 20, p. 140-145, 2012.

YANG, S.; YUESI, W.; CHANGCHUN, Z. Measurement of the vertical profile of atmospheric SO₂ during the heating period in Beijing on days of high air pollution. **Atmospheric Environment**, v.43, n.2, p.468 - 472, 2009.

YU, Q. L.; BROUWERS, H. J. H. Development of a self-compacting gypsum-based lightweight composite. **Cement & Concrete Composites**, v. 34 p. 1033-1043, 2012.

ZAREMBA, T., MOKROSZ, W., HEHLMANN, J.; SZWALIKOWSKA, A.; STAPINSKI, G. Properties of the wastes produced in the semi-dry FGD installation. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 93, n. 2, p. 439-443, 2008.

ZEVENHOVEN, R.; KILPINEN, P. Chapter 3: Sulphur. In: _____. **Control of pollutants in flue gases and fuel gases**. Finlândia: Helsinki University of Technology, 2001, 30 p. cap 3.

ZHANG, Y. PAN, F.; WU, R. Study on the performance of FGD gypsum-metakaolin-cement composite cementitious system. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 1-11, 2016.

ZHANG, Y.; WANG, T.; YANG, H.R.; ZHANG, H.; ZHANG, X.Y. Experimental study on SO₂ recovery using a sodium–zinc sorbent based flue gas desulfurization technology. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 23, n. 1, p. 241-246, 2015.

ZHONG, S.; NI, K.; LI, J. Properties of mortars made by uncalcined FGD gypsum-fly ash-ground granulated blast furnace slag composite binder. **Waste Management**, v. 32, p. 1468-1472, 2012.

ZOU, C.; ZHAO, Q.; ZHANG, G.; XIONG, B. Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era. **Natural Gas Industry B**, v. 3, n.1, p. 1-11, 2016.