

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

FERNANDA BREKAILO

**AVALIAÇÃO DA POZOLANICIDADE DE ADIÇÕES DE PÓ
DE CERÂMICA VERMELHA E PÓ DE CONCRETO
PROVENIENTE DE RCD E SEU EFEITO MITIGADOR DO
ATAQUE POR SULFATOS DE SÓDIO EM BARRAS DE
ARGAMASSA**

PONTA GROSSA

2017

FERNANDA BREKAILO

**AVALIAÇÃO DA POZOLANICIDADE DE ADIÇÕES DE PÓ
DE CERÂMICA VERMELHA E PÓ DE CONCRETO
PROVENIENTE DE RCD E SEU EFEITO MITIGADOR DO
ATAQUE POR SULFATOS DE SÓDIO EM BARRAS DE
ARGAMASSA**

Trabalho apresentado à disciplina de OTCC como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Civil, da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Pereira

PONTA GROSSA

2017

FERNANDA BREKAILO

**AVALIAÇÃO DA POZOLANICIDADE DE ADIÇÕES DE PÓ DE
CERÂMICA VERMELHA E PÓ DE CONCRETO PROVENIENTE DE
RCD E SEU EFEITO MITIGADOR DO ATAQUE POR SULFATOS DE
SÓDIO EM BARRAS DE ARGAMASSA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Ponta Grossa.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Eduardo Pereira

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof^a. MSc. Patrícia Krüger

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof. MSc. Ítalo Sérgio Grande

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Ponta Grossa, 13 de novembro de 2017.

*A Deus, autor de toda vida.
Ao meu amigo e irmão de coração, Rafael de Mello Mercer, por ser exemplo de luz.
A minha mãe, extensão de Deus na Terra, por meio da qual esta experiência terrena
me foi proporcionada, e aos que a auxiliam na tarefa de preencher todos meus dias
com amor, Tamires e Rafael.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Eduardo Pereira, que foi presente e doou-se durante todo período de orientação, provando que a docência vai muito além da sala de aula.

Ao funcionário Paulo Ubirajara dos Santos, ao acadêmico Marcelo Miranda Farias e ao Engenheiro Mestrando Elias Pereira pelo auxílio na realização do trabalho experimental. Um agradecimento especial ao último pela paciência e por sempre estar disposto a dividir conhecimento.

A Universidade Estadual de Ponta Grossa, em especial ao C-LABMU/UEPG, pela cessão de seus laboratórios. Além disso, agradeço a UEPG, seus funcionários, corpo docente, direção e administração, pelo trabalho realizado em prol de uma educação pública de qualidade.

Aos institutos LACTEC e a Universidade Federal do Paraná pela colaboração durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao apoio das empresas GR Mix e Grupo Arena, pela cessão de materiais que permitiram a continuidade dos ensaios desta pesquisa.

A Prof^a. MSc. Patrícia Krüger, pelas longas conversas e palavras de incentivo.

A todos que direta e indiretamente fizeram parte de minha formação acadêmica.

*“Busca e acharás; trabalha e produzirás; e dessa maneira serás filho das tuas obras, terás o mérito da sua realização, e serás recompensado segundo o que tiveres feito”
(O Evangelho Segundo Espiritismo).*

RESUMO

O concreto pode estar sujeito a diversos processos que causam sua degradação, que podem ter origem em fenômenos físicos, químicos e mecânicos. Entre os processos de deterioração com origem em fenômenos químicos encontra-se o ataque por sulfatos de origem externa. Neste ataque, íons sulfato reagem com os componentes da hidratação do cimento e formam compostos com volume maior que os iniciais, podendo gerar expansão e ruptura do concreto, além de perda de massa e diminuição progressiva da resistência. O uso de adições minerais junto ao material ligante provoca alterações na porosidade da matriz hidratada, podendo mitigar a degradação ocasionada neste tipo de ataque. Essas alterações ocorrem devido ao efeito fíler pela presença de pequenas partículas que tamponam os poros, combinadas com as alterações pelas reações pozolânicas no caso de adições reativas. No presente trabalho realizou-se o estudo de uma alternativa de aproveitamento para o resíduo de cerâmica vermelha, proveniente de tijolos e blocos cerâmicos, e pó de concreto de resíduo de construção e demolição (RCD), além do fíler calcário utilizado para parâmetros de referência. Avaliou-se o potencial pozolânico pelo índice de atividade pozolânica com cal segundo a NBR 5751 (ABNT, 2012) e pelo índice de desempenho com cimento conforme NBR 5752 (ABNT, 2014), e ainda, pela difratometria de raios X e pelo teor de hidróxido fixado no ensaio de Chapelle modificado conforme NBR 15895 (ABNT, 2010). Analisou-se também o potencial de mitigação do ataque por sulfatos destas adições minerais em substituição parcial do cimento nas porcentagens de 3, 5, 12 e 20%, segundo a metodologia proposta na NBR 13583 (ABNT, 2014), buscando unir melhorias no desempenho do concreto aos benefícios econômicos e ambientais promovidos pelo uso destas adições. Os resultados mostram que a adição de cerâmica vermelha atende aos requisitos químicos e físicos para pozolanas e apresenta valor acima do mínimo no índice de atividade pozolânica (IAP) com cal e índice de desempenho (ID) com cimento, porém o material não atendeu requisitos mínimos no ensaio de Chapelle modificado, e também não apresentou resultados que indiquem reatividade pozolânica na DRX. O fíler calcário não atendeu aos requisitos químicos e físicos para pozolanas, apresentou resistência abaixo da mínima no IAP com cal e ID com cimento, e não apresentou halo amorfo indicando reatividade na DRX, resultados que já eram previsíveis, confirmando o caráter inerte do fíler calcário. O pó de concreto de RCD também apresentou resistência abaixo da mínima no IAP com cal e ID com cimento, e não apresentou resultados que indiquem reatividade na DRX, além de não atender aos requisitos químicos e físicos para pozolanas. Na determinação da variação dimensional de barras de argamassa, as diferentes porcentagens de substituição do pó de cerâmica vermelha e pó de concreto de RCD estudadas apresentaram expansões maiores que a argamassa de referência, não possuindo, portanto capacidade de mitigar o ataque por sulfatos. Com teores de substituição de 12 e 20% de fíler calcário, foi possível obter expansões menores que a referência. A argamassa com maior porosidade é a com adição cerâmica, e a com menor a de referência. Com exceção da argamassa de adição cerâmica, as demais apresentaram redução na porosidade devido ao ataque por sulfatos, decorrente da formação de cristais de etringita nos poros da microestrutura.

Palavras-Chave: Adições minerais; Pozolanas; Argamassa; Ataque por sulfatos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seção polida de um corpo de prova de concreto.	19
Figura 2 – Micrografia eletrônica de varredura de cristais de monossulfato hidratado e etringita, imagem no modo de elétrons secundários.	20
Figura 3 - Micrografia eletrônica mostrando cristais de C-S-H e portlandita, imagem no modo de elétrons secundários.	21
Figura 4 - Micrografia eletrônica de varredura de cristais de portlandita.	21
Figura 5 – Representação da zona de transição e da matriz da pasta de cimento no concreto.....	22
Figura 6 – Esquema da expansão de argamassas submetidas ao ataque por sulfato de sódio em função do tempo.	24
Figura 7 - Mecanismo de ataque por sulfato de sódio – passos 1 a 3.	27
Figura 8 - Mecanismo de ataque por sulfato de sódio – passos 4 a 6.	28
Figura 9 – Expansão relativa de argamassas após 12 meses em solução de sulfato de sódio.....	29
Figura 10 – Resistência à compressão de concretos executados com adição de sílica ativa.....	31
Figura 11 – Taxa de absorção de água de concretos executados com adição de sílica ativa.....	31
Figura 12 - Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.	40
Figura 13 - Difratograma de raios X da amostra de areia.	42
Figura 14 - Prensa elétrica digital com capacidade de 1000 kN.....	47
Figura 15 – Pórtico com relógio comparador para leituras de variação linear em barras de argamassa com barra de argamassa.....	49
Figura 16 – Distribuição granulométrica do cimento e das adições minerais.....	51
Figura 17 - Difratograma de raios-X da amostra de pó de cerâmica vermelha.	53
Figura 18 - Difratograma de raios-X da amostra de pó de concreto.....	54
Figura 19 - Difratograma de raios-X da amostra de filer calcário.	55
Figura 20 - Resultados de resistência à compressão obtidos no ensaio de IAP com cal e limite imposto pela NBR 12653 (ABNT, 2014).	57
Figura 21 - Resultados de resistência à compressão obtidos no ensaio de ID com cimento e limite imposto pela NBR 12653 (ABNT, 2014).....	59

Figura 22 – Expansão das argamassas contendo diferentes porcentagens das adições minerais na composição do material ligante, até a idade de 42 dias, conforme método de ensaio.....	60
Figura 23 - Expansão resultante, aos 42 dias, das argamassas contendo diferentes porcentagens das adições minerais na composição do material ligante, conforme recomendações da NBR 13583 (2014), e limite de expansão resultante proposto por Marciano (1993 apud Hoppe Filho et al., 2015).	61
Figura 24 - Expansão das argamassas contendo diferentes porcentagens das adições minerais na composição do material ligante até a idade de 98 dias, conforme método de ensaio.....	62
Figura 25 - Expansão resultante, aos 70 dias, das argamassas contendo diferentes porcentagens das adições minerais na composição do material ligante.	63
Figura 26 – Fissuras das barras de argamassa com adição de pó de concreto após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio: (a) 3% de adição; (b) 5% de adição; (c) 12% de adição;	65
Figura 27 - Fissuras das barras de argamassa com adição de fíler calcário após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio: (a) 3% de adição; (b) 5% de adição; (c) 12% de adição;	66
Figura 28 - Imagens dos cristais presentes na microestrutura da argamassa de referência após 100 dias de imersão em solução saturada de cal: (a) C-S-H; (b) Placas de portlandita; (c) Placas de portlandita e cristais de etringita; (d) Compostos cristalinos de cálcio.	67
Figura 29 – Imagem de micrografia de um poro presente na microestrutura da argamassa de referência após 100 dias de imersão em solução saturada de cal. ...	67
Figura 30 - Imagem de micrografia de um poro presente na microestrutura da argamassa de referência após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio: (a) Poro presente na microestrutura da amostra; (b) Detalhe do poro da microestrutura.	68
Figura 31 – Imagem de micrografia da argamassa de referência após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio com detalhamento para a microfissuração da argamassa e cristais de etringita.....	69
Figura 32 - Imagem de micrografia da argamassa de referência após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio com detalhamento para a formação de etringita na microfissuração da argamassa.....	69

Figura 33 - Distribuição dos tamanhos dos poros da argamassa de referência após 100 dias de imersão em soluções saturada com cal e de sulfato de sódio.....	70
Figura 34 - Imagem de micrografia da argamassa com 20% de adição de pó de cerâmica vermelha após 100 dias de imersão em solução saturada com cal: (a) C-S-H e cristais de etringita; (b) Poro presente na microestrutura; (c) Poro presente na microestrutura com cristais de etringita; (d) Poro presente na microestrutura com cristais de etringita.	71
Figura 35 – Imagem de micrografia da argamassa com 20% de adição de pó de cerâmica vermelha após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio: poros presentes na microestrutura com destaque para os cristais de etringita e fissuras. .	72
Figura 36 - Distribuição dos tamanhos dos poros da argamassa com 20% de adição de pó de cerâmica vermelha após 100 dias de imersão em soluções saturada com cal e de sulfato de sódio.	72
Figura 37 - Imagem de micrografia da argamassa com 20% de adição de pó de concreto após 100 dias de imersão em solução de cal com destaque para os cristais de C-S-H, portlandita e etringita.	73
Figura 38 – Imagem de micrografia da argamassa com 20% de adição de pó de concreto após 100 dias de imersão em solução de cal com presença de aglomerados da adição.....	73
Figura 39 – Imagem de micrografia da argamassa com 20% de adição de pó de concreto após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio: poros presentes na microestrutura com destaque para os cristais de etringita e fissuras.	74
Figura 40 - Imagem de micrografia da argamassa com 20% de adição de pó de concreto após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio com cristais de etringita presentes na superfície.	75
Figura 41 - Distribuição dos tamanhos dos poros da argamassa com 20% de adição de pó de concreto após 100 dias de imersão em solução saturada com cal.	76
Figura 42 - Imagens dos cristais presentes na microestrutura da argamassa com 20% de adição de fíler calcário após 100 dias de imersão em solução saturada de cal: (a) C-S-H e etringita; (b) Placas de portlandita.	76
Figura 43 - Imagem de micrografia da argamassa de com 20% de adição de fíler calcário após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio: poros presentes na microestrutura com destaque para os cristais de etringita e fissuras.	77

Figura 44 - Distribuição dos tamanhos dos poros da argamassa com 20% de adição de fíler calcário de concreto após 100 dias de imersão em solução saturada com cal.	78
Figura 45 – Quadro resumo dos ensaios de avaliação da pozolanicidade.	79
Figura 46 - Imagem de micrografia da microestrutura das argamassas após 100 dias de imersão em solução saturada com cal: (a) Argamassa de referência; (b) Argamassa com adição de pó cerâmica vermelha; (c) Argamassa com adição de pó de concreto; (d) Argamassa com adição de fíler calcário.	81
Figura 47 - Imagem de micrografia da microestrutura das argamassas após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio: (a) Argamassa de referência; (b) Argamassa com adição de pó cerâmica vermelha; (c) Argamassa com adição de pó de concreto; (d) Argamassa com adição de fíler calcário.....	82
Figura 48 – Porosidades das argamassas após 100 dias de imersão em soluções saturada com cal e de sulfato de sódio.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos materiais pozolânicos.	32
Tabela 2 - Exigências físicas e químicas para materiais pozolânicos.	33
Tabela 3 - Caracterização química do cimento CII-F-40.....	40
Tabela 4- Caracterização física do cimento CII-F-40.....	41
Tabela 5 - Composição química do hidróxido de cálcio.	41
Tabela 6 – Composição química do sulfato de sódio.	41
Tabela 7 - Proporção de mistura das argamassas para IAP com cal.....	46
Tabela 8 - Proporção de mistura das argamassas para ID com cimento.	47
Tabela 9 - Proporção de mistura das argamassas para avaliação do potencial de mitigação ao ataque por sulfatos em solução de sulfato de sódio.	48
Tabela 10 - Massa específica, umidade e perda ao fogo das adições.	51
Tabela 11 - Resultados da composição química dos materiais em estudo.	52
Tabela 12 – Caracterização das adições e exigências químicas e físicas da NBR 12653 (ABNT, 2014) para pozolanas.	52
Tabela 13 – Resultados do teor de hidróxido de cálcio fixado pelas adições pelo Ensaio de Chapelle Modificado, conforme NBR 15895 (ABNT, 2010).	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivos Específicos	16
2	JUSTIFICATIVA	17
2.1	JUSTIFICATIVA AMBIENTAL	17
2.2	JUSTIFICATIVA ECONÔMICA	17
2.3	JUSTIFICATIVA TECNOLÓGICA	17
2.4	JUSTIFICATIVA SOCIAL	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	MACROESTRUTURA E MICROESTRUTURA DO CONCRETO	19
3.1.1	Microestrutura da Pasta de Cimento Hidratada	19
3.1.2	Zona de Transição	22
3.1.3	Porosidade e Permeabilidade	22
3.2	A AÇÃO DOS SULFATOS NO CONCRETO	23
3.2.1	Meio ambiente	23
3.2.2	Ataque Externo por Sulfatos	23
3.3	ADIÇÕES MINERAIS	29
3.3.1	Adições Minerais Pozolânicas	32
4	METODOLOGIA	39
4.1	VARIÁVEIS DE ANÁLISE	39
4.2	MATERIAIS UTILIZADOS	40
4.2.1	Cimento	40
4.2.2	Hidróxido de Cálcio	41
4.2.3	Sulfato de Sódio	41
4.2.4	Agregado Miúdo	42
4.2.5	Aditivo plastificante	42

4.2.6	Pó de Cerâmica Vermelha	42
4.2.7	Pó de Concreto	43
4.2.8	Fíler Calcário	43
4.3	ENSAIOS REALIZADOS	43
4.3.1	Caracterização das Adições Minerais	43
4.3.2	Atividade Pozolânica	44
4.3.3	Ensaio de Ataque por Sulfatos em Barras de Argamassa.....	48
4.3.4	Análises microestruturais	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5.1	CARACTERIZAÇÃO DAS ADIÇÕES MINERAIS	51
5.2	ATIVIDADE POZOLÂNICA.....	53
5.2.1	Difratometria de Raios X	53
5.2.2	Chapelle Modificado.....	55
5.2.3	Índice de Atividade Pozolânica com Cal	57
5.2.4	Índice de Desempenho com Cimento	58
5.3	ENSAIOS DE ATAQUE POR SULFATOS EM BARRAS DE ARGAMASSA..	59
5.3.1	Argamassa de Referência.....	66
5.3.2	Argamassa com Adição de Pó de Cerâmica Vermelha.....	70
5.3.3	Argamassa com Adição de Pó de Concreto.....	73
5.3.4	Argamassa com Adição de Fíler Calcário	76
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
6	CONCLUSÕES	84
	REFERÊNCIAS.....	86

1 INTRODUÇÃO

O concreto, devido ao seu baixo custo relativo e versatilidade, é o material mais utilizado na construção civil. Por muito tempo acreditou-se que este material não necessitava de reparos, porém atualmente já se tem conhecimento que ele está sujeito a diversos tipos de degradação que podem afetar a durabilidade de uma estrutura. Sendo assim, é grande a importância de estudos a respeito do concreto, de forma a garantir que ele suporte o processo de deterioração que estará sujeito e tenha sua vida útil estendida ou potencializada (HOPPE FILHO, 2002; MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2016).

Os processos de deterioração podem ter origem em fenômenos físicos, químicos ou mecânicos, mas raramente possuem uma única causa, podendo ocorrer por diversos fatores simultaneamente. Os danos por causas físicas podem estar relacionados aos gradientes de temperatura e umidade que causam fissuração das estruturas. As causas mecânicas podem ser o impacto, a abrasão, a erosão ou a cavitação. Os fenômenos químicos são decorrentes de mecanismos de lixiviação de água pura ou ácida, corrosão da armadura, expansões devido a reações da pasta de cimento com sulfatos ou a reações álcali-agregado (RAA) (HELENE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2016).

Neste contexto, destaca-se o ataque por sulfatos como um importante fenômeno de degradação do concreto, pois tem grande influência na durabilidade das estruturas, é de difícil identificação nos estágios iniciais e praticamente não existem métodos para reabilitação. Os sulfatos, que podem ter origem interna e externa, reagem com os compostos da hidratação do cimento formando produtos com volume maior do que os que lhe deram origem, podendo causar a expansão com conseqüente fissuração do concreto (SKALNY, 2002; PEREIRA, 2015).

Uma forma de evitar o ataque por sulfatos de origem externa é dificultar o fluxo de fluídos que possam transportar íons sulfatos para o interior da estrutura utilizando um concreto de baixa permeabilidade, sendo possível obter este material utilizando adições minerais junto ao cimento Portland, que tendem a alterar a estrutura porosa do concreto promovendo um tamponamento dos poros do material (SILVA FILHO, 1994; HOPPE FILHO et al., 2015).

O uso de adições minerais reativas provoca alterações de natureza química e física no concreto que definem o seu desempenho. Modificam a microestrutura, o que altera a porosidade da matriz hidratada, pelas reações pozolânicas unido a presença

de pequenas partículas que podem ocupar os vazios, promovendo o efeito filler (MORAES, 2001; HOPPE FILHO et al., 2015).

Além disso, a incorporação de adições minerais na composição do material ligante traz benefícios econômicos e ambientais, visto que as adições são em grande parte resíduos de outros processos. Assim, preservam-se recursos naturais pelo reuso de passivos ambientais e reduz-se o consumo de energia, questões muito importantes no ramo da indústria da construção civil, que possui elevado impacto ambiental (MEDEIROS et al., 2016).

Desta forma é possível unir benefícios econômicos e ambientais com melhorias na durabilidade do concreto sujeito ao ataque por sulfatos, aumentando a vida útil da estrutura e evitando falhas prematuras, diminuindo assim o risco de acidentes e prejuízos financeiros (HOPPE FILHO, 2002).

Estudos com o intuito de encontrar novos materiais que possam ser utilizados como adições minerais já foram e estão sendo realizados. Entre estes materiais estudados, destaca-se o resíduo de cerâmica vermelha. Este resíduo pode ter origem no descarte de peças defeituosas em olarias e também no resíduo de construção e demolição (RCD) (CABRAL, 2007; GARCIA et al., 2015). Resultados positivos de algumas pesquisas indicam ser possível a utilização deste material como adição, e também o seu uso como agregado miúdo para concretos e argamassas (AY; ÜNAL, 2000; CABRAL et al., 2009; LAVAT; TREZZA; POGGI, 2009; WADA, 2010; GOBBI, 2014; CASSOL, 2015).

Representando uma outra grande fração do RCD, o resíduo de concreto também vem sendo estudado na busca de alternativas para sua utilização, tendo em vista a grande quantidade que é produzida deste material (BRASIL, 2005; CABRAL, 2007). Algumas pesquisas já realizadas afirmam ser possível o seu uso como adição mineral e também como agregado (RAVINDRARAJAH; TAM, 1987; FLOREA et al., 2014; BARTHEL et al., 2016; FAN et al., 2016; OKSRI-NELFIA et al., 2016).

Para ambos os resíduos, destaca-se a importância de se comprovar a possibilidade de seu uso como adição, tendo em vista a grande quantidade de finos presentes nestes materiais, que de forma geral não são aproveitados. A maioria das pesquisas concentram-se no uso dos resíduos de construção como agregados. Ocorre que mesmo nestes casos uma parcela significativa dos agregados consiste em material pulverulento, sendo esta característica relevante para o desempenho dos concretos e argamassas. A indicação do potencial pozolânico do material pulverulento

dos agregados reciclados ou ainda a produção de material fino de resíduos de construção e demolição mostram-se promissores.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral neste trabalho é determinar o potencial pozolânico de adições de pó de cerâmica vermelha e de concreto e o seu efeito mitigador no ataque por sulfatos de sódio em barras de argamassa de cimento Portland.

1.1.1 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos desta pesquisa têm-se:

- Determinar o potencial pozolânico com cal das adições selecionadas segundo a NBR 5751 (ABNT, 2012);
- Determinar o índice de desempenho com cimento das adições selecionadas segundo a NBR 5752 (ABNT, 2014);
- Determinar o teor de hidróxido fixado pelas adições utilizando o Método de Chapelle modificado segundo procedimento da NBR 15895 (ABNT, 2010);
- Avaliar o potencial de mitigação do ataque por sulfatos das adições utilizando a metodologia proposta pela NBR 13583 (ABNT, 2014), com tempo de monitoramento estendido à 98 dias.
- Analisar a microestrutura das argamassas dosadas para o ensaio de ataque por sulfatos por meio da microscopia eletrônica de varredura com EDS.

2 JUSTIFICATIVA

2.1 JUSTIFICATIVA AMBIENTAL

Na produção do cimento, durante os processos de calcinação, descarbonatação da matéria-prima e na queima de combustíveis no interior do forno, são emitidos cerca de 90% do dióxido de carbono (CO₂) oriundo da fabricação de cimento, sendo este um dos principais gases de efeito estufa (BRASIL, 2010). Segundo dados de 2009 da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency - IEA*) a produção do cimento corresponde a 5% das emissões antrópicas de CO₂. No Brasil, em 2012, a fabricação do cimento ficou em 2º lugar entre os processos industriais que emitem CO₂, representando 29,6% das emissões industriais (BRASIL, 2014). A IEA aponta como uma forma de diminuir esta emissão a substituição do clínquer, o que pode ser feito com o uso de adições minerais em substituição parcial ao cimento.

Além disso, as adições minerais em grande parte são resíduos de outros processos industriais, como a cinza da casca de arroz, proveniente do beneficiamento do arroz, e a escória de alto forno, proveniente do processo de produção do ferro gusa. O material cerâmico deste estudo é oriundo de rejeitos de blocos cerâmicos, e o pó de concreto de resíduo de construção e demolição. Desta forma, é possível reduzir o impacto sobre aterros, dando um uso nobre à materiais que seriam passivos ambientais, e ainda, diminuir o consumo de cimento, reduzindo assim as emissões de CO₂ (BRASIL, 2010).

2.2 JUSTIFICATIVA ECONÔMICA

Além de benefícios ambientais, o uso de adições minerais em substituição ao cimento traz vantagens econômicas, pois à medida que se diminui a quantidade de cimento, reduz-se o custo. Ocorre também uma redução no consumo de energia durante a fabricação do cimento por este ser em menor quantidade, resultando na produção de argamassas e concretos com gasto energético menor e com menor consumo de matéria prima, permitindo a reserva de recursos naturais para as próximas gerações (HOPPE FILHO, 2002; ALBUQUERQUE; LIMA, 2014).

2.3 JUSTIFICATIVA TECNOLÓGICA

O uso de adições minerais reativas junto ao material ligante provoca alterações de natureza química, física e físico-química no concreto que definem o seu

desempenho. As adições modificam a microestrutura da pasta, o que altera a porosidade da matriz hidratada. A diminuição da porosidade se deve as reações pozolânicas unido à presença de pequenas partículas que podem ocupar os vazios, ocasionando um refinamento nos poros da matriz hidratada pelo efeito fíler (MORAES, 2001; HOPPE FILHO et al., 2015). Com a redução da permeabilidade do concreto pode-se diminuir as degradações a que este material pode estar sujeito (LYNSDALE; KHAN, 2000 apud HOPPE FILHO, 2002).

Sendo assim, as adições minerais provocam melhorias no desempenho dos concretos, justificando a importância desta pesquisa que busca verificar a possibilidade do uso de resíduos para elevar a eficiência do concreto, possibilitando uma finalidade mais nobre para um material subutilizado.

2.4 JUSTIFICATIVA SOCIAL

Caso a possibilidade de utilizar os resíduos deste estudo como adições minerais seja verificada e tenha resultados positivos, esta pesquisa pode trazer os benefícios ambientais, econômicos e tecnológicos citados acima, com uma contribuição direta para a sociedade.

Além de poder servir como base para futuros trabalhos, os benefícios ambientais que podem ser obtidos com este estudo têm uma relação direta com o bem estar das pessoas, pois permitem redução na quantidade destes resíduos em aterros e a emissão de gases do efeito estufa, e ainda garante a manutenção dos recursos naturais por mais tempo. A redução da quantidade dos resíduos evita também o seu acúmulo, que poderia gerar problemas de saúde pública e proliferação de insetos.

As vantagens econômicas trazidas pelo uso da adição afetam, além da economia pela redução da quantidade de cimento e da demanda energética, a redução no custo de manutenções e demolições, visto que as adições melhoram a eficiência do concreto. As manutenções e demolições tem influência não só na questão econômica, mas nos desgastes e inconvenientes gerados por estas intervenções ao usuário, e poderiam ser evitadas ou pelo menos adiadas com o uso de um concreto mais eficiente.

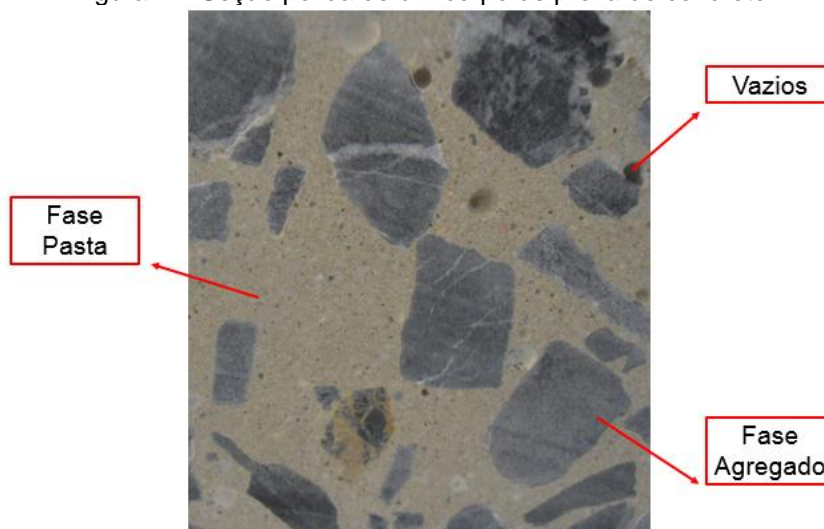
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MACROESTRUTURA E MICROESTRUTURA DO CONCRETO

O concreto é um material compósito, composto basicamente por cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo e água. Apesar da aparente simplicidade, possui uma estrutura complexa devido a heterogeneidade dos componentes e a presença de vazios (CALLISTER; RETHWISCH, 2012; RIBEIRO et al., 2014).

Sua macroestrutura é heterogênea, sendo possível identificar duas fases, como mostrado na Figura 1: a fase agregado, constituída pelas partículas de agregado, e a fase pasta, que corresponde a matriz de pasta de cimento (MAGALHÃES, 2007; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Figura 1 – Seção polida de um corpo de prova de concreto.



Fonte: A autora.

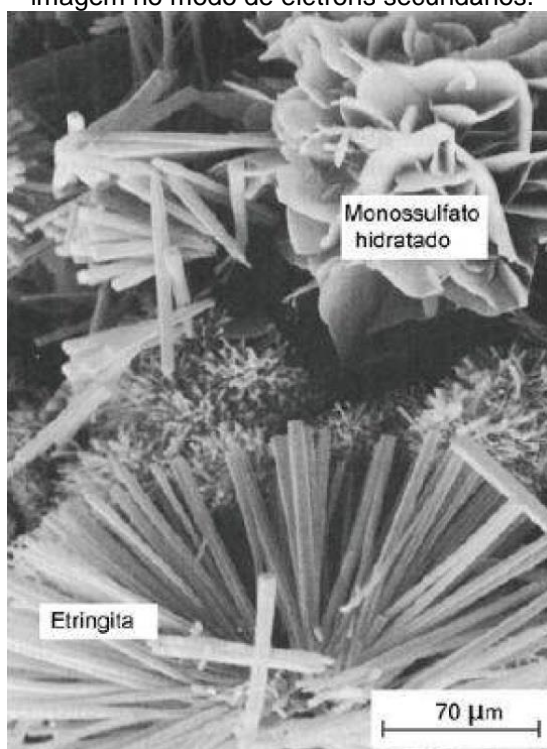
Em escala microscópica possui uma estrutura também heterogênea e ainda mais complexa. Percebe-se que as fases antes observadas não são distribuídas de forma homogênea e não são homogêneas entre si, e identifica-se uma terceira fase do concreto: a zona de transição. Esta se encontra na região de interface das outras duas fases e possui características diferentes da matriz de cimento hidratada (MAGALHÃES, 2007; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

3.1.1 Microestrutura da Pasta de Cimento Hidratada

A pasta de cimento hidratada é formada pelas reações químicas dos compostos do cimento com a água. Estes compostos são basicamente os silicatos - C_2S e C_3S - e os aluminatos - C_3A e C_4AF . Quando o cimento é colocado em contato

com a água, os compostos anidros começam a entrar em solução e a fase líquida é saturada com íons, como o cálcio, o sulfato, o aluminato e os íons hidroxila. Estes íons interagem após poucos minutos do início da hidratação do cimento e dão origem ao primeiro cristal formado, com forma acicular como mostrado na Figura 2, conhecido como etringita ($\text{CaO}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). A etringita pode tornar-se instável e depois de alguns dias se decompõe em monossulfato hidratado, que possui estrutura de placas lamelares, hexagonais ou pseudo hexagonais, como destacado na Figura 2 (BAUR et al., 2004; QUARCIONI, 2008; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

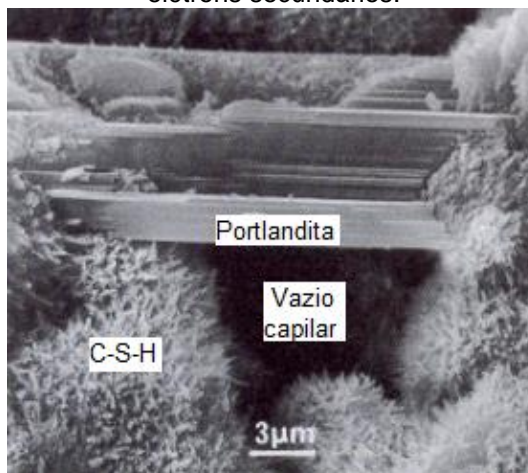
Figura 2 – Micrografia eletrônica de varredura de cristais de monossulfato hidratado e etringita, imagem no modo de elétrons secundários.



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Após a formação da etringita, a hidratação passa por um período de dormência e então pelo período de aceleração, que tem como principais produtos formados nesta etapa o silicato de cálcio hidratado ou C-S-H e o hidróxido de cálcio ou portlandita (QUARCIONI, 2008). O C-S-H não é um composto bem definido, podendo variar ligeiramente sua composição química de um ponto para outro na pasta. Sua morfologia pode ir desde fibras pouco cristalinas até redes reticulares, como ilustrado na Figura 3. Sua grande área de superfície gera forças de Van der Waals, o que torna este composto o responsável pela resistência mecânica da pasta de cimento (DIAMOND, 2004; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

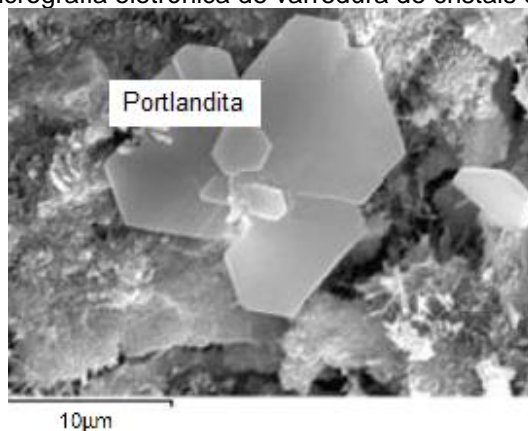
Figura 3 - Micrografia eletrônica mostrando cristais de C-S-H e portlandita, imagem no modo de elétrons secundários.



Fonte: Adaptado de Malier (1992).

Já a portlandita é um composto bem definido - $\text{Ca}(\text{OH})_2$, conhecido pela nomenclatura CH - e apresenta-se em forma prismática hexagonal, como mostrado na Figura 3 e na Figura 4. Sua área superficial é menor que a do C-S-H, não tendo grande contribuição para resistência. Este composto tem importância para estabilidade química do concreto, devido seu elevado pH (QUARCIONI, 2008; MEHTA; MONTEIRO, 2008). A portlandita torna a solução aquosa presente nos poros do concreto altamente alcalina, e esta solução é responsável pela proteção química das armaduras presentes no concreto armado, formando um filme passivo que protege as barras de aço do risco de corrosão (CHESS; BROOMFIELD, 2014; RIBEIRO et al., 2014).

Figura 4 - Micrografia eletrônica de varredura de cristais de portlandita.

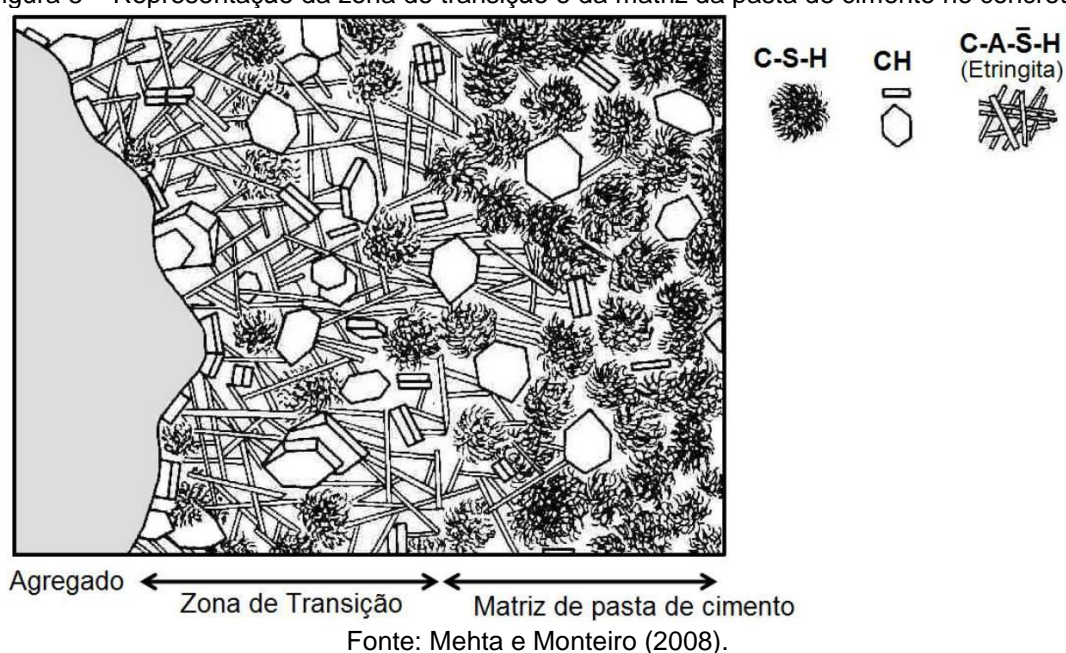


Fonte: Adaptado de Tashima et al. (2012).

3.1.2 Zona de Transição

A zona de transição é em geral a mais fraca das três fases do concreto. Isso se deve ao fato dessa região possuir um maior fator água/cimento que a fase pasta devido ao filme de água formado em volta dos agregados e a exsudação interna. Além disso, nesta zona de interface existe uma grande concentração de cristais de etringita e a formação de grandes cristais de portlandita, tornando esta estrutura mais porosa que a da matriz de cimento, como representado na Figura 5 (KAEFER, 2002; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Figura 5 – Representação da zona de transição e da matriz da pasta de cimento no concreto.



3.1.3 Porosidade e Permeabilidade

Os vazios presentes no concreto podem ter basicamente três origens: vazios devido ao ar incorporado durante a mistura do concreto onde uma pequena parte fica aprisionada, que dá origem a vazios geralmente esféricos; os espaços interlamelares no C-S-H, que formam vazios muito pequenos; e os vazios capilares que correspondem aos espaços não preenchidos por sólidos na pasta de cimento hidratada (SILVEIRA, 1996; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A capacidade de fluídos permearem no concreto está diretamente relacionada com a sua porosidade. Porém a porosidade dos espaços interlamelares no C-S-H, pequenos capilares ou poros descontínuos não contribuem para permeabilidade da pasta de cimento hidratada. A permeabilidade estará relacionada a poros maiores,

contínuos e interconectados, e a distribuição dos poros é influenciada pela dosagem do concreto, principalmente em relação ao fator água/cimento e presença de adições ou aditivos, e as suas condições de cura. Quanto maiores os poros e mais interconectados, maior a permeabilidade e conseqüente possibilidade da movimentação de fluídos no interior do concreto, aumentando a sua vulnerabilidade a ataques químicos (SILVEIRA, 1996; PAULON, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2013, 2016).

3.2 A AÇÃO DOS SULFATOS NO CONCRETO

3.2.1 Meio ambiente

O concreto deve ser durável, mantendo a capacidade de desempenhar sua função prevista, preservando sua forma, resistência e condição de utilização. Porém, a durabilidade não é só função do material, mas sim da interação do material com o meio ambiente onde ele está inserido (SILVA FILHO, 1994; MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2016).

Ambientes considerados altamente agressivos, como centros urbanos, industriais e regiões marinhas podem ocasionar a degradação de estruturas de concretos, devido a fatores como: gradientes de temperatura e umidade, ambiente envolvente com elevada concentração de cloretos e sulfatos e contaminação da água do solo (ANDRADE, 1997).

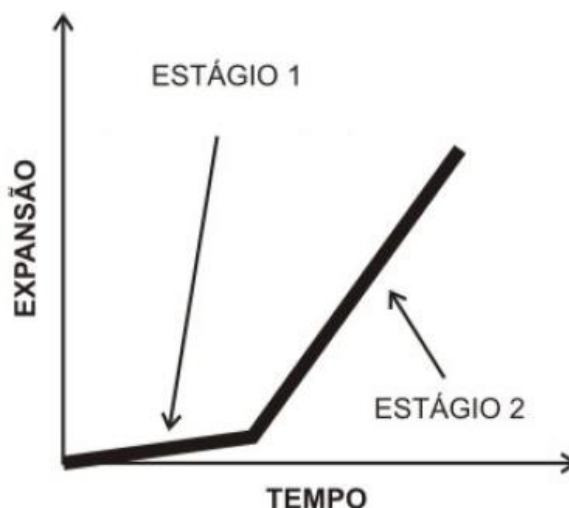
As estruturas de concreto expostas estão, portanto, suscetíveis a agressões do meio e para ser durável o concreto deve ser capaz de resistir, além dos esforços que estará sujeito, aos processos de deterioração devido aos agentes agressivos do meio ambiente (ANDRADE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2016).

3.2.2 Ataque Externo por Sulfatos

Entre os agentes agressivos do meio ambiente encontra-se o sulfato, que reage com os componentes hidratados do cimento ocasionando a degradação de estruturas de concreto. O sulfato de origem externa pode estar presente em diversos locais. Pode ser encontrado no ar, em chuvas ácidas, águas marítimas, águas de esgoto, águas residuais industriais, águas subterrâneas, águas de drenagem de solos fertilizados e no próprio solo (DAL MOLIN, 1988; SILVEIRA, 1996; HELENE, 1997; COSTA; 2004).

Apesar de poder ter origem interna, o ataque externo por sulfatos é a forma mais comum, onde íons de sulfato de fonte externa permeiam o concreto e difundem-se por meio de sua rede de poros (SOUZA, 2006). Identificam-se durante o ataque dois estágios, como ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Esquema da expansão de argamassas submetidas ao ataque por sulfato de sódio em função do tempo.



Fonte: Santhanam, Cohen e Olek (2002).

O primeiro é o período de dormência, onde pouco ou nenhum efeito é quantificado, que corresponde à fase onde os produtos expansivos formados preenchem os poros e microfissuras do concreto. Em seguida, tem-se o período de propagação, onde ocorre uma significativa expansão, pois os cristais formados já possuem tamanho maior que os poros, e provocam tensões internas no material. Devido ao aumento da expansão e das tensões internas o concreto fissa, o que gera redução na sua resistência mecânica e aumento da permeabilidade, uma vez que as fissuras tendem a conectar-se (SANTHANAM; COHEN; OLEK, 2002).

Os íons sulfatos combinam-se com os compostos do cimento basicamente devido às seguintes reações, apresentadas por Casanova, Agulló e Aguado (1996), Pinheiro-Alves, Gomà e Jalali (2007) e Mehta e Monteiro (2008):

- O hidróxido de cálcio reage com o sulfato, formando gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$);
- A gipsita reage com o C_3A não hidratado, formando etringita ($\text{CaO}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$);
- A gipsita ou o hidróxido de cálcio, combinados com o monossulfato, formam etringita ($\text{CaO}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$);

- A gipsita combinada com o carbonato de cálcio e com o C-S-H, formando taumasita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15 \text{H}_2\text{O}$).

A formação da taumasita ocorre quando o ataque por sulfatos é combinado a outros fatores, como a disponibilidade de carbonatos/bicarbonatos na matriz cimentícia, umidade e baixa temperatura predominante. Apesar de não ser comum, é um composto extremamente nocivo, pois como consome o C-S-H, tem a capacidade de tornar o concreto uma massa sem coesão, o que pode levar a completa desintegração da estrutura (RAMEZANIANPOUR; HOOTON, 2013; RAHMAN; BASSUONI, 2014).

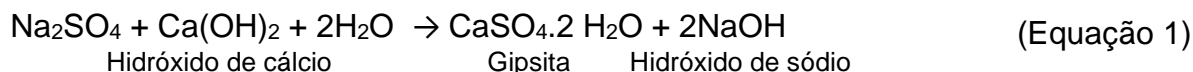
A expansão e a ruptura que ocorre no concreto pelo ataque de sulfato se devem ao fato de tanto a gipsita como a etringita formada ocuparem um volume maior do que os compostos que elas substituíram, provocando tensões de tração no interior da estrutura porosa do material, que excedem as tensões que o concreto é capaz de resistir (MÜLLAUER; BEDDOE; HEINZ, 2013; NEVILLE; BROOKS, 2013). Por mais que o ataque não seja tão agressivo a ponto de causar a ruptura do concreto, as fissuras geradas permitem a entrada de novos agentes agressivos, podendo levar a desagregação total do material (DAL MOLIN, 1988; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A agressividade do ataque está relacionada ao tipo de cátion (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , por exemplo) associado ao sulfato (SO_4^{2-}). Destaca-se entre eles o sulfato de magnésio (MgSO_4), o qual Mehta e Monteiro (2008) afirmam ser o mais severo. Além de formar gipsita, o sulfato de magnésio é capaz de interagir com a portlandita formando hidróxido de magnésio, que é insolúvel e reduz a alcalinidade do sistema. Isso torna o C-S-H instável e passível de ser atacado pela solução de sulfato, levando a uma diminuição na resistência da matriz de cimento (COSTA, 2004; MEHTA; MONTEIRO, 2008; RIBEIRO et al., 2014).

Destaca-se também entre eles o sulfato de sódio (Na_2SO_4), que junto com o sulfato de magnésio são os mais comuns de serem encontrados na natureza. O ambiente marinho e de respingos de maré encontram-se nas classes de maior agressividade ambiental, e o íon sódio possui elevada concentração na água do mar. Pode ainda ser encontrado em efluentes industriais, outro ambiente de grande agressividade a estrutura de concreto (RIBEIRO et al., 2014; SOUZA, 2016).

O sulfato de sódio interage com o hidróxido de cálcio e com o monossulfato hidratado. Na sua reação com o hidróxido de cálcio, além da formação de gipsita, o íon sódio combina-se com a hidroxila, formando hidróxido de sódio, também

conhecido como soda cáustica, conforme mostra a Equação 1. Este subproduto da reação mantém alcalinidade do concreto, o que assegura a estabilidade do C-S-H, diferentemente do que ocorre no ataque com sulfato de magnésio (MEHTA; MONTEIRO, 2008; SOUZA, 2016).

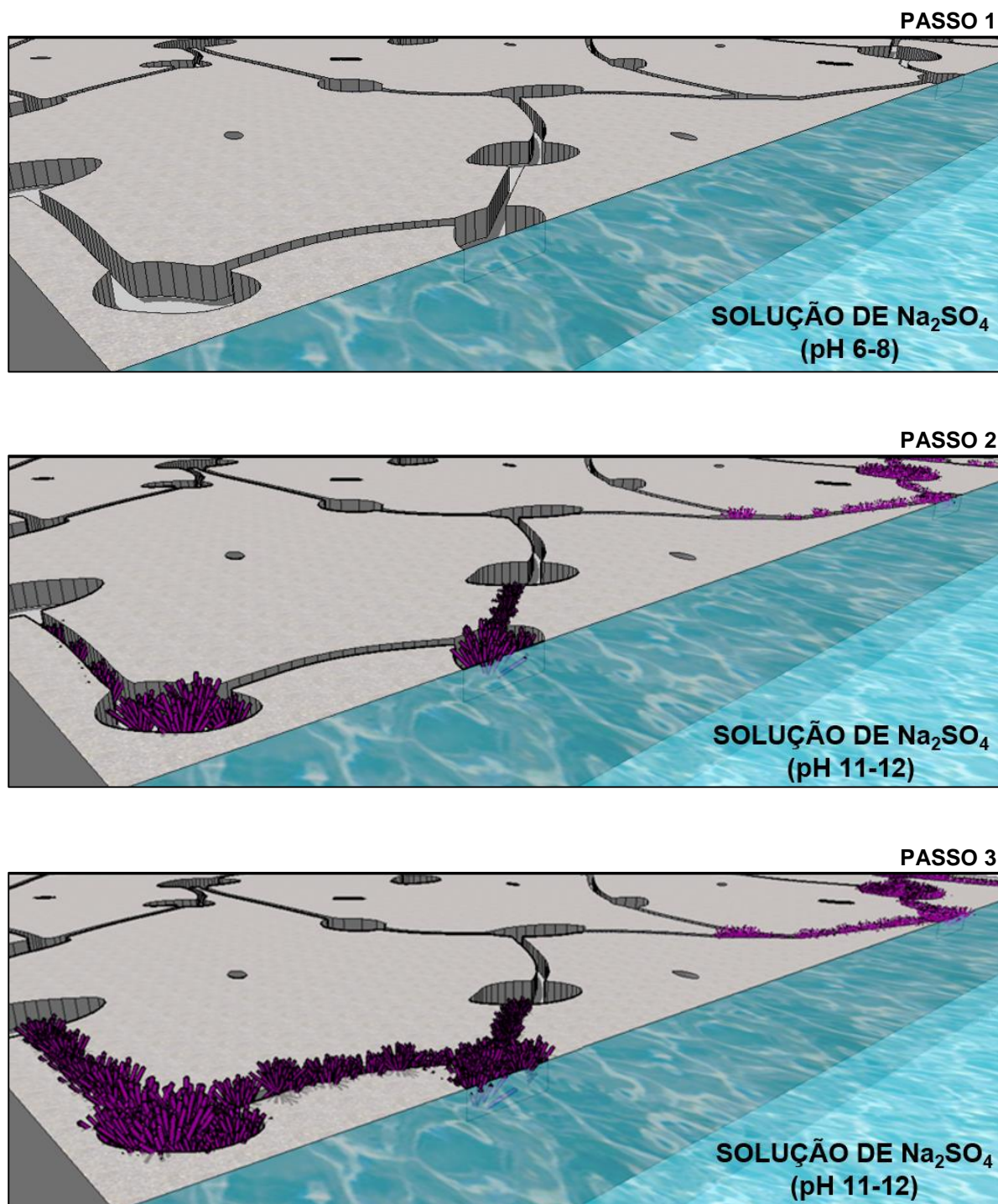


Santhanam, Cohen e Olek (2002) propuseram o mecanismo do ataque de soluções de sulfato de sódio em argamassa, mostrado na Figura 7 e Figura 8. O passo 1 corresponde a fase onde a solução, que possui pH entre 6 e 8, entra em contato com a argamassa. Devido a formação de soda cáustica, o pH da solução em torno da argamassa se eleva. Cristais de etringita e gipsita são formados na região mais superficial, que corresponde ao passo 2. No passo 3, estes cristais formados já ocuparam os vazios superficiais e passam a gerar tensões internas, ocasionando expansão da argamassa.

Quando estas tensões excedem a resistência do material, ocorre o aparecimento de fissuras, como mostrado no passo 4. As fissuras permitem a entrada da solução de sulfato de sódio em regiões mais internas da argamassa, e os cristais expansivos são formados nestas regiões, que corresponde ao passo 5. No passo 6 é possível identificar 3 zonas: a da superfície, já desintegrada, a intermediária com deposição de gipsita e etringita, onde os cristais já atingiram tamanhos que dão origem a tensões internas na argamassa, e a terceira zona já fissurada devido a estas tensões. As novas fissuras permitirão a entrada da solução agressiva para camadas cada vez mais internas da argamassa, e o ataque avançará até a desintegração da peça.

Além do tipo de cátion, a concentração de íons nos poros, a composição do cimento, a permeabilidade e a absorção capilar de água da matriz são fatores determinantes do grau de degradação por expansão, fissuração e perda de massa (CEB, 1989; HOPPE FILHO et al., 2015).

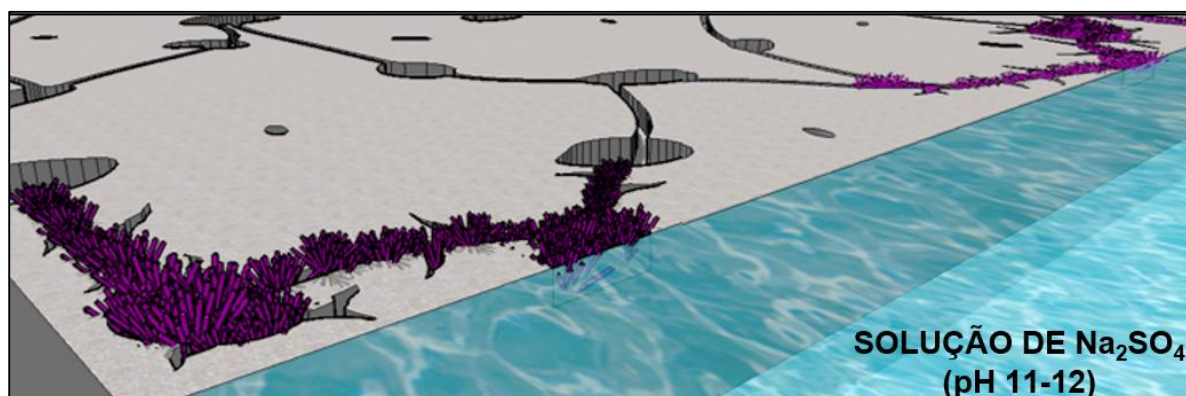
Figura 7 - Mecanismo de ataque por sulfato de sódio – passos 1 a 3.



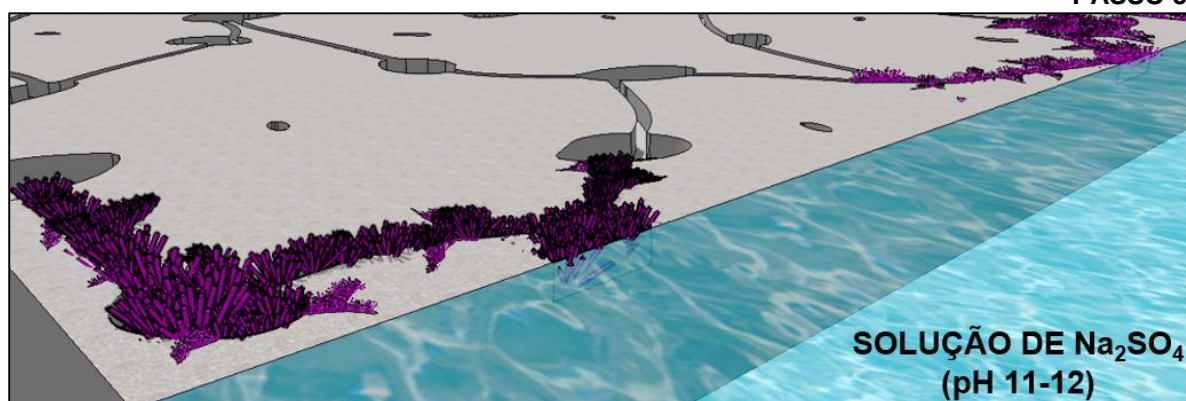
Fonte: Baseado em Santhanam, Cohen e Olek (2002).

Figura 8 - Mecanismo de ataque por sulfato de sódio – passos 4 a 6.

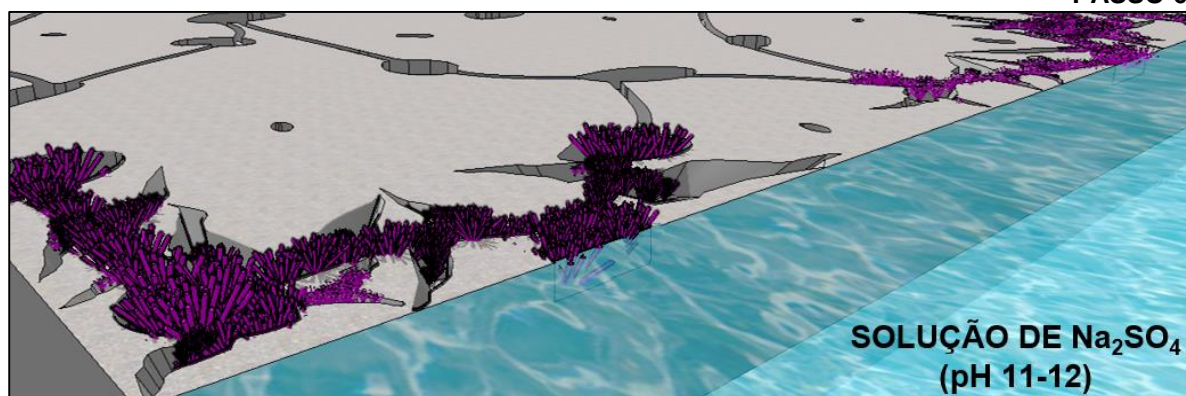
PASSO 4



PASSO 5



PASSO 6

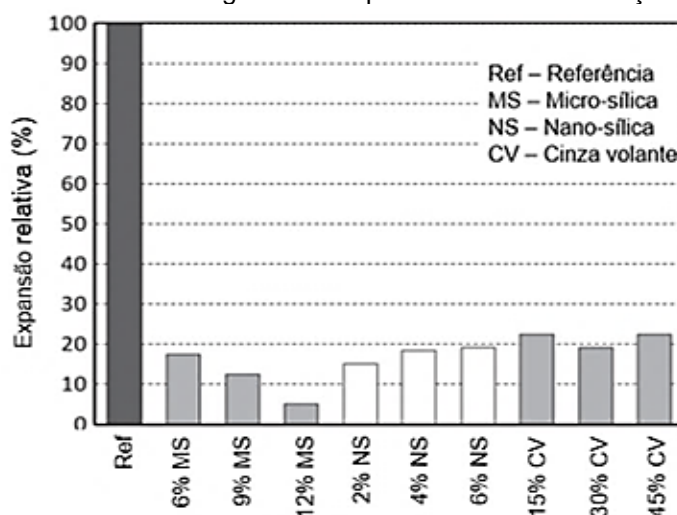


Fonte: Baseado em Santhanam, Cohen e Olek (2002).

A fim de evitar o ataque externo por sulfatos em locais onde não seja possível intervir na agressividade do meio, deve-se utilizar cimento Portland que seja capaz de resistir a sulfatos, com menor teor de C_3A (CEB, 1989; HOPPE FILHO et al., 2015; NEVILLE, 2016). Além disso, Mehta e Monteiro (2008) afirmam que a melhor maneira de prevenir o ataque externo por sulfatos é a redução da permeabilidade do concreto. A forma mais comum de atuar para redução da permeabilidade é a redução do fator

água/cimento e o uso de cimentos pozolânicos (RIBEIRO et al., 2014). A Figura 9 mostra a redução obtida na expansão relativa de argamassas após 12 meses imersas em solução com 5% de sulfato de sódio, com o uso de diversas adições minerais pozolânicas.

Figura 9 – Expansão relativa de argamassas após 12 meses em solução de sulfato de sódio.



Fonte: Adaptado de Atahan e Dikme (2011).

No estudo de Atahan e Dikme (2011), a menor expansão foi observada utilizando 12% de adição de micro-sílica, porém os autores destacam o fato de com apenas 2% de nano-sílica ser possível aumentar a resistência das argamassas aos íons sulfatos, o que atribuem a alta área superficial e pureza do material. O uso das adições pozolânicas altera a estrutura porosa do concreto, permitindo reduzir a permeabilidade da matriz pelo tamponamento dos poros, o que minimiza a difusão dos íons sulfato no concreto (SOUZA, 2006). Desta forma é possível mitigar o ataque, como evidenciado na Figura 9 pela redução na expansão das argamassas que possuem adições em sua composição.

3.3 ADIÇÕES MINERAIS

O termo adição se refere ao material utilizado no concreto além de seus componentes comuns - cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo e água - que pode ser incorporado imediatamente antes ou durante a mistura (NEVILLE, 2016; MALHOTRA; MEHTA, 1996). As adições minerais são utilizadas com o objetivo de reduzir limitações no desempenho apresentado pelo concreto quando composto apenas pelos componentes tradicionais.

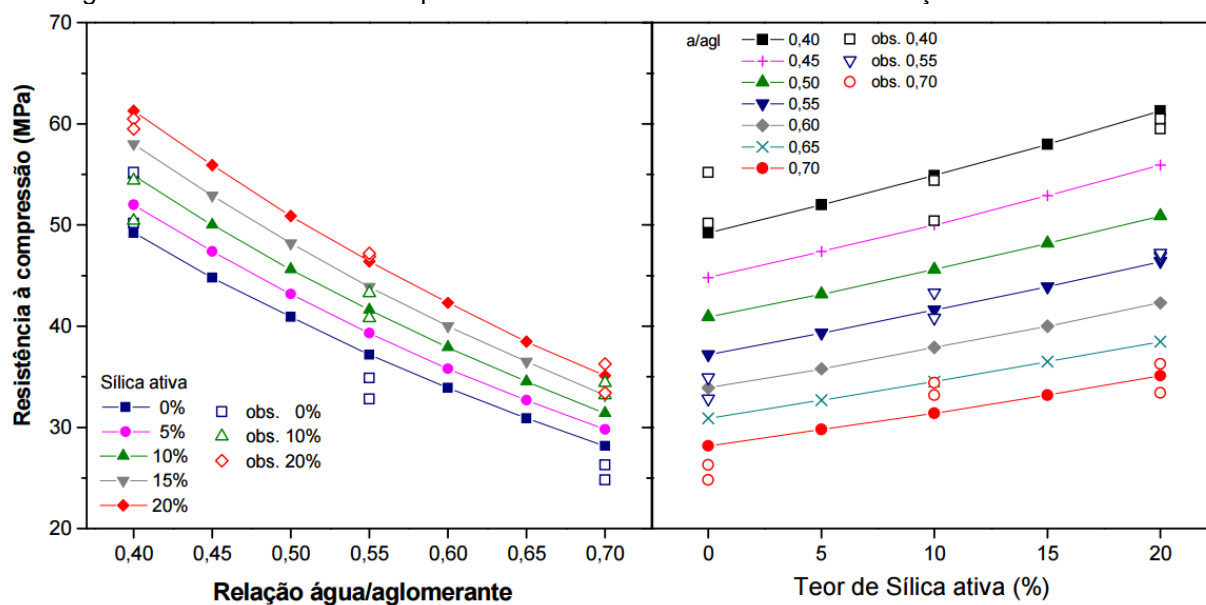
As adições podem ter origem natural ou artificial. As adições naturais são provenientes de rochas ou solos naturais de origem vulcânica, como por exemplo, as terras diatomáceas, os tufos, o vidro vulcânico, as argilas ou folhelhos calcinados. As artificiais são materiais não primários, geralmente oriundos de resíduos industriais, como as cinzas volantes, a escória granulada de alto forno e a sílica ativa (ALBUQUERQUE; LIMA, 2014).

Por razões econômicas e ambientais, o uso das adições elevou-se a partir da década de 80, e tende a crescer ainda mais (MALHOTRA; MEHTA, 1996; MEHTA; MONTEIRO, 2008). Os benefícios econômicos se dão pela redução no custo à medida que se substitui o cimento, e benefícios ambientais se devem ao fato de a maioria das adições se tratarem de resíduos de outros processos, além da redução do consumo de recursos naturais, da emissão de CO₂ e do consumo de energia durante a produção do cimento (MEDEIROS et al., 2016).

Além dos benefícios econômicos e ambientais, as adições minerais trazem vantagens tecnológicas, pois podem melhorar as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. No estado fresco, os benefícios se dão pelo aumento da coesão, viscosidade e plasticidade. Devido a sua grande finura, retém maior quantidade de água na superfície, reduzindo a exsudação, além de aumentar o contato sólido-sólido por tamponar os poros, permitindo obter um concreto mais coeso e plástico, resistente a exsudação e segregação. Ainda no estado fresco, diminui-se o calor de hidratação pela redução na quantidade de clínquer. A redução do calor de hidratação somada a redução da exsudação de um concreto com adição mineral, tem como consequência menor risco de fissuração deste concreto por dessecação superficial ou retração plástica (DAL MOLIN, 2005, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2008; GÜNEYISI et al., 2012).

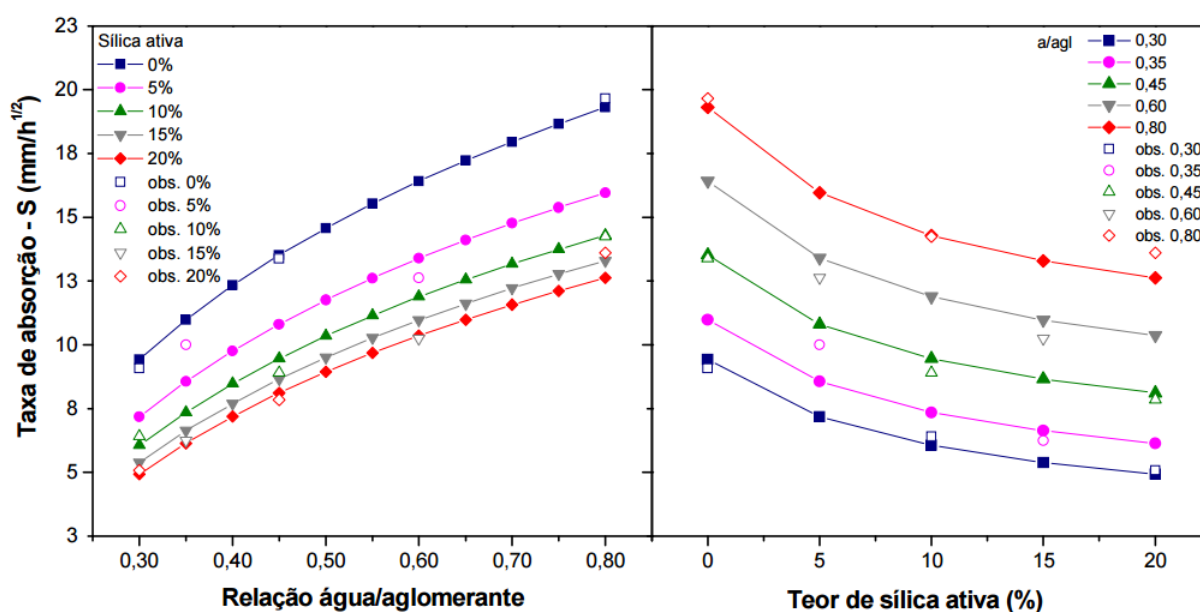
No estado endurecido, as adições permitem a redução da permeabilidade, que resulta na diminuição da absorção, aumento da resistência à tração e compressão e aumento da durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008, DAL MOLIN, 2011; GÜNEYISI et al., 2012; NAGROCKIENE; GIRSKAS; SKRIPKIŪNAS, 2017). Estes efeitos podem ser observados nos resultados dos estudos de Vieira (2003) para concretos executados com cimento CPV-ARI com adição de sílica ativa, mostrados na Figura 10 e na Figura 11, onde os pontos não preenchidos por hachura representam os valores observados nos ensaios e os pontos preenchidos representam as curvas do modelo ajustado.

Figura 10 – Resistência à compressão de concretos executados com adição de sílica ativa.



Fonte: Vieira (2003).

Figura 11 – Taxa de absorção de água de concretos executados com adição de sílica ativa.



Fonte: Vieira (2003).

As adições são divididas em três grupos: os materiais pozolânicos, os materiais cimentantes e o filler. Os materiais pozolânicos reagem com o hidróxido de cálcio na presença de umidade formando compostos com propriedades cimentantes.

Os materiais cimentantes também formam compostos cimentantes como o C-S-H, mas para isso não necessitam do hidróxido de cálcio, pois já possuem em sua composição C₂S e C₃S, como a escória granulada de alto forno. Estes materiais possuem auto hidratação lenta, porém quando são utilizados como adição ou

substituição ao cimento Portland tem a hidratação acelerada devido à presença de hidróxido de cálcio e etringita (DAL MOLIN, 2005, 2011).

O fíler é uma adição finamente dividida, como por exemplo, o fíler calcário, pó de quartzo e pó de pedra, e praticamente não exerce efeito químico, mas sim físico. Age melhorando o empacotamento de partículas, conferindo maior compacidade a mistura. Além disso, as partículas finas agem como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento (CORDEIRO, 2006; DAL MOLIN, 2011). O uso do fíler já está amplamente difundido. Esta adição pode estar presente em todos cimentos comerciais em valores de até 10% em massa dependendo do tipo de cimento, conforme NBR 5732, NBR 5733, NBR 5735, NBR 5736, NBR 11578 (ABNT, 1991) e NBR 5737 (ABNT, 1992).

3.3.1 Adições Mineraias Pozolânicas

As pozolanas são materiais silicosos ou sílico –aluminosos, tanto de origem natural quanto artificial, que possuem uma pequena ou nenhuma propriedade cimentante, porém quando finamente dividida e na presença de umidade reagem com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades cimentantes (DAL MOLIN, 2011; MALHOTRA; MEHTA, 1996). No Brasil é mais comumente utilizada como adição ao cimento durante sua fabricação, porém quando utilizada na forma de adição ao concreto possui resultado final semelhante. Tem-se como alguns exemplos tradicionais de materiais pozolânicos a sílica ativa, o metacaulim, a cinza de casca de arroz e a cinza volante (DAL MOLIN, 2011; GOBBI, 2014).

A NBR 12653 (ABNT, 2014) divide as pozolanas em três grupos, e apresenta requisitos químicos e físicos que os materiais devem atender para que possam ser classificados como pozolana, como mostrado na Tabela 1 e na Tabela 2.

Tabela 1 – Classificação dos materiais pozolânicos.

Classe	Materiais que atendem aos requisitos
N	Pozolanas naturais e artificiais, como materiais vulcânicos, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas
C	Cinza volante proveniente da queima de carvão mineral
E	Quaisquer pozolanas não contempladas nas classes N e C

Fonte: Adaptado de NBR 12653 (ABNT, 2014).

Tabela 2 - Exigências físicas e químicas para materiais pozolânicos.

Exigências físicas	Classe do material		
	N	C	E
Material retido na peneira 45µm	<20%	<20%	<20%
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90%	≥ 90%	≥ 90%
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa
Exigências químicas			
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 70	≥ 70	≥ 50
SO ₃	≤ 4	≤ 5	≤ 5
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6
Álcalis disponíveis em Na ₂ O	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5

Fonte: Adaptado de NBR 12653 (ABNT, 2014).

É importante que a pozolana esteja finamente dividida, aumentando sua área de contato para as reações, para que ela possa interagir com o hidróxido de cálcio que é formado durante a hidratação do cimento, e assim formar silicato de cálcio hidratado secundário. No caso de um concreto composto apenas por cimento Portland, na hidratação do cimento, o C-S-H é formado pelas reações apresentadas nas Equações 2 e 3, que descrevem uma reação rápida e uma moderada, respectivamente.



Já em um concreto composto por cimento Portland e adição pozolânica, as reações pozolânicas consomem o hidróxido de cálcio, ocasionando a formação de C-S-H secundário, além do C-S-H formado pela hidratação do cimento, conforme descreve a Equação 4. O C-S-H secundário é formado, diferentemente do originado na hidratação do cimento, por uma reação lenta, o que tem como consequência liberação de calor e desenvolvimento de resistência também lentos (HOPPE FILHO, 2002; GOBBO, 2009).



De acordo com Massazza (1993), a interação da pozolana com o hidróxido de cálcio depende dos seguintes fatores:

- A natureza das fases ativas da pozolana (sílica e alumina);
- O conteúdo de pozolana na mistura;

- O teor de dióxido de sílica (SiO_2) ativo na pozolana;
- A razão hidróxido de cálcio/pozolana na mistura.

As pozolanas exercem efeitos químicos e físicos no concreto do qual são parte da composição. O efeito químico, já descrito, consiste na formação de C-S-H secundário, que se precipitam nos vazios maiores da pasta reduzindo significativamente a porosidade da matriz hidratada e da zona de transição, o que influencia de forma positiva na resistência final e na estanqueidade do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008; DAL MOLIM, 2011; SIAD et al., 2014).

Entre os efeitos físicos compreende-se o efeito fíler, que é consequência da presença de partículas muito finas da adição mineral que melhoram o empacotamento granulométrico, aumentando assim a densidade e compacidade da mistura. Além disso, ocorre um refinamento dos poros e dos produtos de hidratação do cimento. Isso se deve ao fato da adição pelo pequeno tamanho tamponar os poros e também restringir os espaços de crescimento dos cristais originados na hidratação do cimento, formando um grande número de pequenos cristais. O terceiro efeito físico observado é que as partículas da adição, por possuírem grande área específica efetiva, servem como pontos de nucleação para a hidratação do cimento (CORDEIRO, 2006; GOBBO, 2009; DAL MOLIM, 2011).

Todos esses efeitos das adições pozolânicas tem como consequência uma alteração positiva na microestrutura do concreto. A diminuição da porosidade da matriz e da zona de transição tem como consequência redução na permeabilidade, diminuindo ou até impedindo completamente a difusão de agentes agressivos, como a água, sulfatos, cloretos e o gás carbônico. A redução da permeabilidade, unido ao aumento da resistência, permite a obtenção de concretos com maior durabilidade (HELENE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2008; SIAD et al., 2014; HOPPE FILHO et al., 2015).

3.3.1.1 Resíduo de cerâmica vermelha

Um dos segmentos do setor cerâmico é o de cerâmica vermelha, que correspondem aos materiais de coloração avermelhada como tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas. Estes materiais são principalmente empregados na construção civil, correspondendo a cerca de 90% das alvenarias e coberturas construídas no Brasil (ABCERAM, 2017a; ANICER, 2017).

Seu processo de fabricação se dá pelas etapas de preparação da matéria-prima e da massa, formação das peças, tratamento térmico e acabamento. O tratamento térmico corresponde a secagem e queima do produto. Caso durante o processo produtivo destas peças forem verificadas falhas antes da queima, os produtos podem ser reprocessados. Porém, se a falha ocorrer após a queima, o material deve ser descartado. Nas indústrias mais estruturadas as perdas no pós-queima variam na faixa de 5%, podendo chegar a 20% nas cerâmicas com menor controle dos processos. Estes resíduos podem ser utilizados em cascalhamento de estradas, mas de forma geral é descartado (BRASIL, 2009; ABDI, 2010; GARCIA et al., 2015; ABCERAM, 2017b).

Além do resíduo originado durante o processo produtivo, a cerâmica vermelha, juntamente com o concreto e a argamassa, são os principais constituintes do resíduo de construção e demolição (RCD), que corresponde a cerca de 50% a 70% da massa de resíduo sólido gerado no Brasil. Diante da relevância ambiental desta questão, faz-se importante a pesquisa de alternativas de uso para o resíduo de cerâmica vermelha (BRASIL, 2005; CABRAL, 2007; OLIVEIRA et al., 2011).

No que se refere ao uso do resíduo de cerâmica vermelha como substituição ao agregado, Wada (2010) utilizou o material como substituição ao agregado miúdo, visando a sua utilização em estacas do tipo moldadas *in loco*. Concluiu que o aumento causado na absorção do concreto não afetou as suas propriedades mecânicas, e com valores de até 40% de substituição foi possível aumentar resistência e o módulo de elasticidade do concreto, sendo possível seu uso com segurança para estacas moldadas *in loco*.

Cabral et al. (2009) observaram um aumento na resistência a compressão de concretos substituindo o agregado miúdo natural pelos reciclados de cerâmica vermelha. Este acréscimo não ocorreu quando substituiu-se o graúdo, nem para as propriedades de módulo de deformação e volume de poros permeáveis, as quais tiveram influência negativa pelo uso do agregado reciclado.

Outros estudos visam analisar o uso do resíduo de cerâmica vermelha como material pozolânico em matrizes cimentantes. Lavat, Trezza e Poggi (2009) afirmam que este material tem potencial para ser utilizado como adição pozolânica com substituições parciais de 20 a 30% do cimento, valores com os quais foi possível atingir cerca de 75% da resistência à compressão de uma argamassa de referência (sem substituição). Os autores analisaram também a evolução da hidratação das

amostras por meio de difratometria de raios X em várias idades, e observaram uma queda na intensidade de hidróxido de cálcio após 28 dias, o que se atribui a atividade pozolânica que consome este composto.

Cassol (2015) afirma que se moído durante 20 minutos, o resíduo cerâmico pode ser utilizado em até 20% de substituição ao cimento, e aumentando o tempo de moagem para 40 minutos, o resíduo pode-se substituir até 30% do cimento. A autora conclui ainda, por meio da análise termogravimétrica, que é possível verificar que o material cerâmico possui capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio e formar C-S-H, e que esta reação se dá de forma lenta, característica de materiais pozolânicos.

Ay e Ünal (2000) também avaliaram as propriedades pozolânicas de resíduos de cerâmica vermelha, e concluíram que o material pode ser utilizado substituindo até 35% do cimento. Notaram ainda que com o aumento na porcentagem de resíduo cerâmico utilizado, ocorre uma diminuição na densidade das amostras.

Gobbi (2014) verificou aumento na resistência a compressão de argamassas com material cerâmico no ensaio de índice de atividade pozolânica com cal aumentando o tempo de moagem da adição no moinho de bolas, e ainda um singelo acréscimo no teor de hidróxido de cálcio fixado pelo material quando calcinado a 700°C.

Assim, pode-se perceber que além da utilização como agregado, estudos apresentam resultados positivos para o uso do resíduo de cerâmica vermelha como adição mineral em determinadas porcentagens, além de características que indicam pozolanicidade neste material, que podem ser melhoradas por meio de tratamento térmico.

3.3.1.2 Resíduo de concreto

De acordo com a definição da Resolução CONAMA Nº 307/2002 (BRASIL, 2002), RCD, também chamado de resíduos da construção civil (RCC), “são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos”. Como já descrito, representam de 50 a 70% da massa de resíduo sólido gerado. Das unidades receptoras de RCD, mais de 2 milhões de toneladas do resíduo são destinadas a aterros de RCD, e este valor pode ser ainda maior, tendo em vista a carência e precariedade de informações deste setor (BRASIL, 2005, 2017).

Apesar da composição heterogênea, o concreto representa uma das grandes parcelas da composição do RCD, o que leva a diversos estudos buscando alternativas para reutilizar este material (CABRAL, 2007; OLIVEIRA et al., 2011).

Fan et al. (2016), utilizaram o concreto de RCD em duas situações: como substituição apenas ao agregado miúdo e como substituição ao agregado miúdo e graúdo. Concluíram que substituindo apenas o agregado miúdo foi possível obter concretos de maior qualidade se comparado a substituição dos dois agregados. Porém, em ambas as situações estudadas, quanto maior a porcentagem de substituição, menor a trabalhabilidade, densidade e resistência a compressão do concreto e maior a absorção, se comparado a referência, sem substituição.

Ravindrarajah e Tam (1987) substituíram a areia por concreto de RCD moído como agregado miúdo do concreto. Apesar da menor resistência a compressão inicial se comparado as amostras de referência, elaboradas com agregado miúdo natural, observaram que em idades avançadas essa diferença foi insignificante. Porém, o uso do material levou a uma redução no módulo de elasticidade do concreto e aumento na retração por secagem. Verificaram então, que utilizando cinza volante no valor de 10% do agregado miúdo junto ao concreto de RCD, os efeitos prejudiciais deste material podem ser sanados.

Outros estudos analisam a possibilidade de uso do concreto de RCD como adição mineral em matrizes cimentícias, tendo em vista a grande quantidade de finos gerados deste material e fato das adições minerais serem utilizadas na forma de pó. De forma geral, para ser utilizado o RCD é lavado afim de se remover a fração fina. Por questões ambientais o pó removido não pode ser descartado, justificando a busca de alternativas para a destinação desta parcela pulverulenta do RCD (MIRANDA, ANGULO, CARELI, 2009).

Barthel et al. (2016), utilizaram este resíduo sem tratamento térmico como substituição ao cimento no valor de 10%. Afirmam que desta forma o material possui caráter inerte, melhorando o concreto devido ao efeito de enchimento e por funcionar como ponto de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento, e que seu efeito pode ter melhor resultado se utilizado junto a uma adição reativa.

Oksri-Nelfia et al. (2016) também utilizaram o resíduo de concreto de RCD como substituição ao cimento, mas nos valores de 25, 50 e 75%. Utilizaram também como adição fíler calcário, nas mesmas porcentagens de substituição ao cimento, para fins de comparação. Concluíram que em valores de até 25% é possível utilizar o

resíduo de concreto de RCD sem alterar significativamente as propriedades das argamassas. Encontraram ainda comportamentos semelhantes para ambas as adições estudadas em relação a resistência a compressão das argamassas e a hidratação do cimento, em que aceleraram o processo e diminuíram o calor total emitido.

Florea et al. (2014) substituíram o cimento por concreto de RCD nos valores de 10, 20 e 30%, e ainda, analisando o material sem tratamento térmico, calcinado a 500°C e calcinado a 800°C, para verificar se é possível ativar a reatividade desde resíduo. Para comparação, utilizaram as mesmas porcentagens de substituição para cinza volante e escória granulada de alto forno, e ainda combinando estas adições com o resíduo de concreto. Concluíram que utilizando o material sem tratamento térmico e o tratado a 800°C em até 20%, é possível obter resistências sem perdas significativas se comparado a referência. A argamassa constituída com o resíduo de concreto calcinado a 800°C apresentou ainda um comportamento mecânico muito semelhante as cinzas volantes. A caracterização deste material sugere a formação de uma fase semelhante à do silicato de cálcio do cimento nesta temperatura. Observaram ainda que tanto o material calcinado a 500°C quanto a 800°C foram capazes de ativar a escória granulada de alto forno, e assim obter resistências maiores do que se utilizasse somente a escória como adição.

É possível observar que os estudos indicam que o pó de resíduo de concreto pode ser utilizado como adição em determinadas porcentagens de substituição, porém apresenta caráter inerte, sendo melhor utilizada quando combinada a adições reativas.

4 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos desta pesquisa, elaborou-se o programa experimental com definição das variáveis de análise, apresentação dos materiais utilizados bem como sua preparação e descrição dos ensaios realizados.

4.1 VARIÁVEIS DE ANÁLISE

Neste trabalho foram analisadas três adições minerais: pó de cerâmica vermelha, pó de concreto e fíler calcário, sendo esta última utilizada para referência. Foram realizadas a caracterização físico-química destas adições por meio dos ensaios de massa específica, umidade, perda ao fogo, granulometria a laser e fluorescência de raios X.

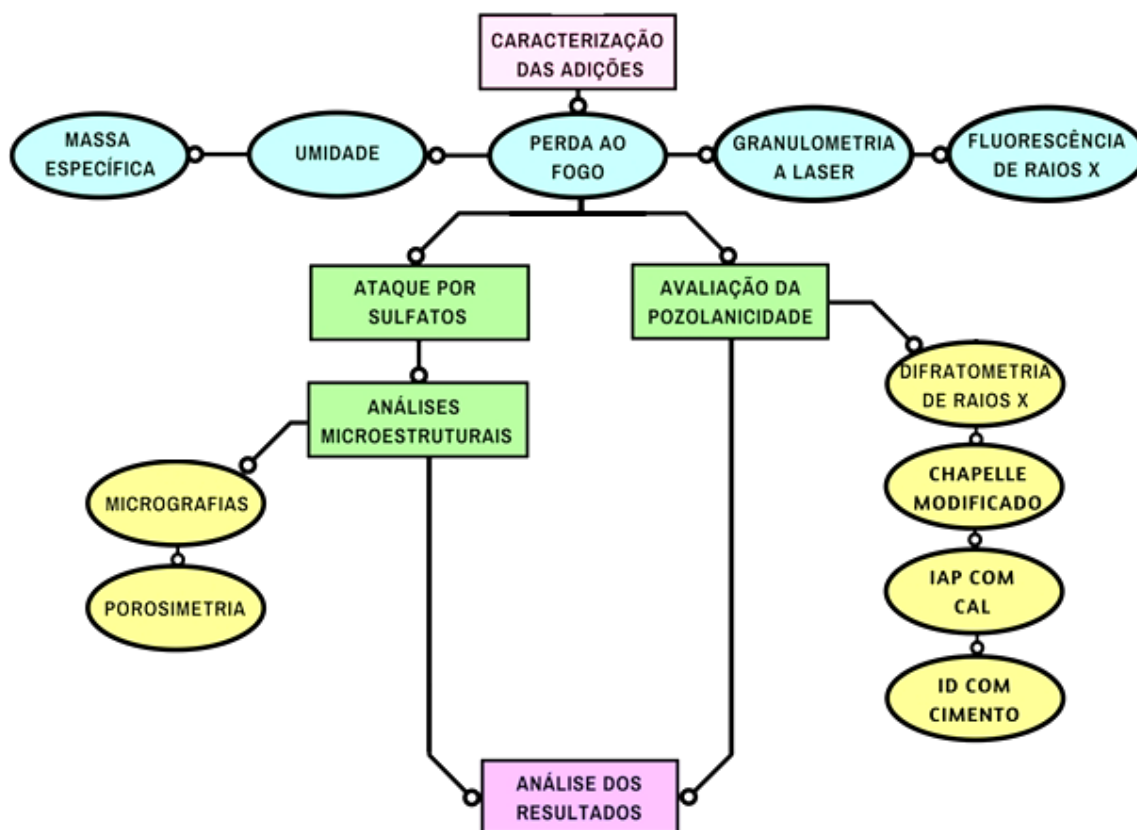
Realizou-se também a moldagem de corpos de prova para análise do índice de atividade pozolânica com cal (IAP) e índice de desempenho (ID) com cimento. Para análise da atividade pozolânica utilizaram-se também os ensaios de difratometria de raios X e Chapelle modificado.

Os materiais foram utilizados como substituição parcial ao cimento em argamassas e avaliados quanto ao potencial de mitigação ao ataque por sulfatos em solução de sulfato de sódio. Neste caso, foram estudados cinco traços, cada um com diferentes porcentagens de substituição: referência (sem adição), 3%, 5%, 12% e 20%.

A argamassa sem substituição foi utilizada como argamassa de referência. Os valores de 3 e 5% foram adotados baseados no limite máximo de material fino passante na peneira de abertura 0,075 mm que pode estar presente no agregado miúdo de origem natural, valores estes determinados pela NBR 7211 (ABNT, 2009). O limite de 12% foi adotado considerando que as adições são constituídas totalmente de grãos gerados durante a britagem, o que altera o limite máximo de material fino passante que pode estar presente no agregado miúdo, conforme determinado também pela NBR 7211 (ABNT, 2009). O valor de 20% de substituição foi adotado com base na quantidade máxima de material fino passante que pode estar presente no agregado miúdo de agregado reciclado da classe ARM (agregado de resíduo misto), determinado na NBR 15116 (ABNT, 2009).

No fluxograma apresentado na Figura 12 consta um resumo das etapas desenvolvidas nesta pesquisa.

Figura 12 - Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.



Fonte: A autora.

4.2 MATERIAIS UTILIZADOS

4.2.1 Cimento

O aglomerante utilizado para determinação do índice de desempenho com cimento e moldagem das barras de argamassas para o ensaio de ataque de sulfatos foi o cimento Portland CII-F 40. Os resultados da caracterização físico-química do cimento estão apresentados na Tabela 3 e na Tabela 4, e todos os índices apresentam valores dentro dos limites da especificação da NBR 11578 (ABNT, 1991).

Tabela 3 - Caracterização química do cimento CII-F-40.

Ensaio Químico (%)									
Perda ao fogo	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	Resíduo insolúvel
4,59	74,73	11,31	3,58	3,25	3,01	2,48	1,36	0,27	0,99

Fonte: Votorantim (2015) e a autora.

Tabela 4- Caracterização física do cimento CII-F-40.

Ensaio Físicos						
Massa Espec. (g/cm ³)	Finura (%)		Blaine (cm ² /g)	Água de Consist. (%)	Tempo Pega (min)	
	#200	#325			Início	Fim
3,05	0,00		0,36	4538,18	221,36	287,05
Expansib. a Quente (Mm)			Resistência à Compressão (MPa)			
			1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
0,32			25,28	36,53	41,66	48,06

Fonte: Votorantim (2015).

4.2.2 Hidróxido de Cálcio

Para a determinação do índice de atividade pozolânica com cal utilizou-se o hidróxido de cálcio P.A produzido pelo fabricante Dinâmica[®] Química Contemporânea Ltda, que possui massa específica 2,21 g/cm³. Os dados apresentados pelo hidróxido de cálcio constam na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição química do hidróxido de cálcio.

Especificação	Dinâmica [®] Química Contemporânea Ltda
Teor de Ca(OH) ₂	Mín. 95%
Teor de CaCO ₃	Máx. 3%
Insolúveis em HCl	Máx. 0,03%
Cloreto (Cl)	Máx. 0,03%
Compostos sulfurados (SO ₃)	<0,1%
Metais pesados (como Pb)	<0,003%
Ferro (Fe)	Máx. 0,05%
Potássio (K)	Máx. 0,05%
Sódio (Na)	Máx. 0,05%
Estrôncio (Sn)	Máx. 0,05%
Magnésio (Mg)	Máx. 0,5%

Fonte: Dinâmica Química Contemporânea Ltda.

4.2.3 Sulfato de Sódio

Para o ensaio de ataque de sulfatos em barras de argamassa utilizou-se sulfato de sódio anidro PA produzido pelos fabricantes Fmaia[®] e Biotec[®]. Os dados apresentados pelo sulfato de sódio constam na Tabela 6.

Tabela 6 – Composição química do sulfato de sódio.

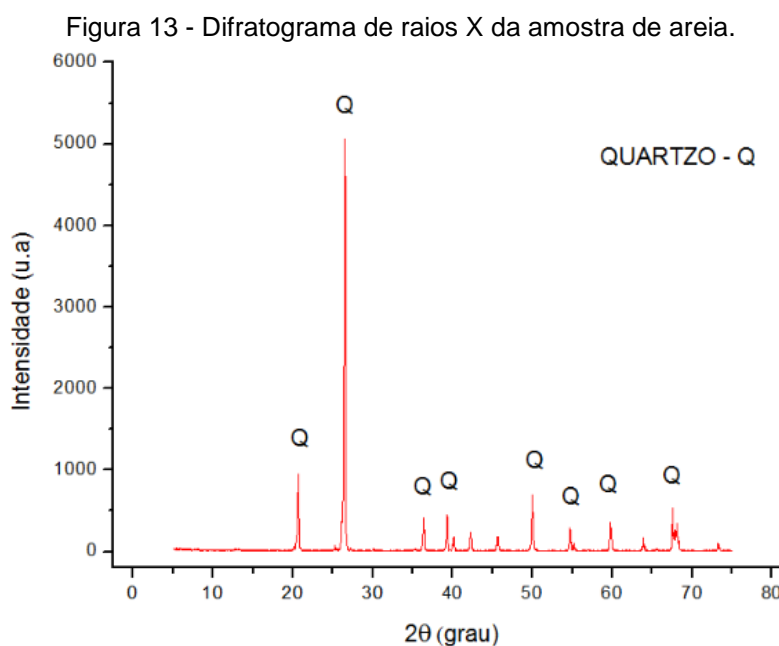
Especificação	Fmaia [®]	Biotec [®]
Teor de Na ₂ SO ₄	Mín. 99%	Mín. 99%
Material insolúvel	Máx. 0,01%	Máx. 0,01%
Perda por ignição	Máx. 0,50%	Máx. 0,50%
Cloreto (Cl)	Máx. 0,001%	Máx. 0,001%
Compostos de Nitrogênio (como N)	Máx. 0,0005%	Máx. 0,0003%
Ferro (Fe)	Máx. 0,001%	Máx. 0,001%
Metais pesados (como Pb)	Máx. 0,0005%	Máx. 0,0005%
Cálcio (Ca)	Máx. 0,01%	Máx. 0,02%
Magnésio (Mg)	Máx. 0,005%	Máx. 0,02%

Fonte: Fmaia e Biotec.

4.2.4 Agregado Miúdo

Para os ensaios de índice de atividade pozolânica com cal, índice de desempenho com cimento e avaliação quanto ao potencial de mitigação ao ataque por sulfatos em solução de sulfato de sódio foi constituída a granulometria do agregado miúdo, composta por 4 frações iguais da série normal, sendo elas as frações retidas nas peneiras de abertura da malha de 1,20, 0,60, 0,30 e 0,15 mm, conforme a NBR 7214 (ABNT, 2012).

A areia utilizada é proveniente do Rio Tibagi, e apresentou na caracterização por difração de raios X (DRX), conforme mostrado na Figura 13. Os picos principais indicam a presença majoritária de cristais de quartzo (SiO_2). Agregados miúdos provenientes de leito de rio são compostos basicamente pelo mineral quartzo, estando, portanto, os resultados de acordo com o esperado.



4.2.5 Aditivo plastificante

O aditivo plastificante utilizado foi o Eucon PL 310, do fabricante Viapol®. É um aditivo de pega normal líquido, de massa específica $1,18 \text{ g/cm}^3$, cor marrom escuro e não contém cloretos.

4.2.6 Pó de Cerâmica Vermelha

Para avaliar o efeito da incorporação de resíduo de cerâmica vermelha em compósito de cimento Portland utilizou-se material cerâmico oriundo de rejeitos de

blocos cerâmicos (tijolos de cerâmica vermelha). Os blocos passaram por um pré-beneficiamento em equipamento de abrasão Los Angeles. O resultante foi peneirado para obtenção de pulverulento. O material final é o passante na peneira #200 (abertura de 0,075 mm).

4.2.7 Pó de Concreto

O pó de concreto utilizado é proveniente RCD, e também passou pelo pré-beneficiamento no equipamento de abrasão Los Angeles e utilizado como material final o passante na peneira #200 (abertura de 0,075 mm), assim como o pó de cerâmica vermelha.

4.2.8 Fíler Calcário

O fíler calcário utilizado é proveniente da fábrica Itaú de Minas da Votorantim Cimentos, onde é utilizado na produção de cimentos e argamassas. Este material constitui uma adição inerte e foi utilizado como referência para as análises.

4.3 ENSAIOS REALIZADOS

4.3.1 Caracterização das Adições Mineraias

4.3.1.1 Massa específica

A análise das adições iniciou-se pela determinação da sua massa específica conforme NM 23 (ABNT, 2001). Este dado é necessário para determinação da quantidade de adição mineral que será utilizado na dosagem da argamassa no ensaio de índice de atividade pozolânica com cal. Para este ensaio utilizou-se como reagente a água e um frasco volumétrico de Le Chatelier de vidro de borossilicato com capacidade de 250 cm³ até a marca zero da escala e graduação que permite leituras com precisão de 0,05 cm³, conforme preconiza a NM 23 (ABNT, 2001).

4.3.1.2 Umidade

A determinação da umidade das adições estudadas foi determinada conforme metodologia da NM 24 (ABNT, 2002), onde cerca de 1 g de amostra foi mantida durante 30 minutos em estufa à temperatura de 105 ± 5 °C e em períodos subsequentes de 10 minutos até obter-se constância de massa. A umidade é calculada com base na diferença de massa entre a amostra antes e depois da secagem. A umidade para materiais pozolânicos deve ser menor que 3%.

4.3.1.3 Perda ao fogo

A perda ao fogo das adições foi realizada de acordo com o método nº 1 da NM 18 (ABNT, 2004). Neste ensaio, cerca de 1 g das adições foi mantida em mufla à temperatura de 900 a 1000 °C durante 50 minutos. A perda ao fogo foi calculada com base nos valores de massa da amostra ensaiada e da amostra com o cadinho antes e depois da calcinação. Para materiais pozolânicos da classe N a perda ao fogo deve ser menor que 10%, e menor que 6% para classes C e E.

4.3.1.4 Granulometria a laser

O ensaio de granulometria a laser foi realizado afim de conhecer as curvas de distribuição granulométrica das adições minerais estudadas. Para tanto, utilizou-se o granulômetro a laser do modelo CILAS 920, instalado no Departamento de Engenharia de Materiais da UEPG, com faixa de medição de 0,03-400 µm.

4.3.1.5 Fluorescência de raios X

A caracterização química quantitativa e qualitativa das adições minerais foi feita por meio do espectrômetro de fluorescência de raios X (FRX) por energia dispersiva (EDX). O ensaio de FRX foi realizado em um espectrômetro EDX 700 da marca SHIMADZU, instalado no Departamento de Engenharia de Materiais da UEPG. Foram utilizadas amostras em pó com material passante na peneira de abertura 0,075 mm.

4.3.2 Atividade Pozolânica

4.3.2.1 Difratometria de raios X

A técnica de difração de raios X foi utilizada para identificação das fases cristalinas constituintes das adições. Este método consiste na incidência de raios X sobre a amostra, onde essa incidência ocorre em vários ângulos (varredura da amostra), e nos ângulos que cumprirem a Lei de Bragg ocorrerá a difração. Nos ângulos que ocorre a difração é observado um pico no difratograma. Cada composto cristalino apresenta um padrão difratométrico característico, permitindo sua identificação por meio de comparação com os padrões difratométricos fornecidos pelo *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) (ALBERS et al, 2002; CALLISTER; RETHWISCH, 2012; GOBBO, 2009).

O ensaio de DRX foi realizado em um difratômetro Rigaku Ultima IV, instalado no Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-LABMU) da UEPG. A preparação das pastilhas foi realizada pela prensagem manual no próprio porta-amostra. O passo adotado no ensaio foi de $0,02^\circ$ e tempo por passo de 1 s, o intervalo de varredura entre 5° e 75° (2θ). Utilizou-se a radiação Cu-K α (40 kV, 30 mA) e uma fenda divergente de 1° . As fases químicas minerais foram identificadas por comparação com os padrões do ICDD (*International Centre for Diffraction Data*).

A reatividade de uma pozolana está relacionada a quantidade de material que se encontre no estado amorfo, pois quando no estado cristalino sua reatividade é muito baixa (HOPPE FILHO, 2002; GOBBI, 2014). Os difratogramas típicos de pozolanas apresentam um halo característico de material amorfo, o que permite utilizar o resultado deste ensaio para atribuir potencialidade pozolânica ao material.

4.3.2.2 Chappelle modificado

Para determinação de atividade pozolânica por meio da determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado adotou-se o método do Chappelle modificado, conforme NBR 15895 (ABNT, 2010).

O método consiste em manter uma solução de 1g do material pozolânico, 2 g de óxido de cálcio e 250 g de água livre de dióxido de carbono sob agitação por 16 ± 1 h a temperatura de $90\pm 5^\circ\text{C}$. Após as 16 h adiciona-se 250 mL de solução de sacarose. A mistura é então filtrada. O teor de óxido de cálcio livre é posteriormente medido por meio da titulação de solução de ácido clorídrico, usando solução de fenolftaleína. O teor de hidróxido de cálcio fixado é expresso em miligramas de Ca(OH)_2 por grama do material pozolânico.

O valor mínimo atribuído por Raverdy et al. (1980) a materiais pozolânicos é consumo de 330 mg CaO/g pozolana, o que corresponde por estequiometria a 436 mg Ca(OH)_2 /g pozolana.

4.3.2.3 Índice de atividade pozolânica com cal

A determinação do índice de atividade pozolânica (IAP) com cal foi feita seguindo procedimento sugeridos pela NBR 5751 (ABNT, 2012). Para tanto, moldaram-se seis corpos de prova cilíndricos de 5 x 10 cm para cada adição.

A massa do hidróxido de cálcio e de areia normal utilizada teve base nos valores fornecidos pela norma. A massa da adição é determinada pela equação

fornecida pela NBR 5751 (ABNT, 2012), que relaciona a massa específica do hidróxido de cálcio, a massa específica da adição e a quantidade de hidróxido de cálcio utilizado. A água adicionada foi a necessária para obter-se a consistência da argamassa em 225 ± 5 mm pelo ensaio da mesa de espalhamento (Flow Table), conforme NBR 7215 (ABNT, 1996). A Tabela 7 apresenta as proporções de mistura das argamassas em massa para determinação dos índices de atividade pozolânica com cal.

Tabela 7 - Proporção de mistura das argamassas para IAP com cal.

Argamassas	Massa dos materiais (g)			
	Hidróxido de cálcio	Areia normal	Adição Mineral	Água
Material cerâmico			476,4	478,2
Pó de concreto	208	1872	449,8	397,3
Fíler calcário			508,2	330,7

Fonte: A autora.

A mistura dos materiais foi feita conforme recomendações da NBR 7215 (ABNT, 1996), porém os materiais secos foram misturados e homogeneizados antes de serem colocados na argamassadeira para garantir que as adições, que são pós muito finos, estivessem bem misturadas aos materiais e evitar a formação de grumos. Este procedimento de mistura foi adotado também na determinação do ID com cimento e no ensaio de ataque de sulfatos.

Os corpos de prova foram mantidos em cura nos próprios moldes durante 24h a temperatura de 23 ± 2 °C e durante 6 dias a temperatura de 55 ± 2 °C, até 4h antes do rompimento. Realizou-se o rompimento aos 7 dias com os corpos de prova a temperatura de 23 ± 2 °C. A argamassa deve apresentar resistência à compressão mínima de 6,0 MPa para que o material possa ser classificado como adição mineral pozolânica, conforme determinado pela NBR 12653 (ABNT, 2014). Utilizou-se para o rompimento dos corpos de prova prensa elétrica digital com capacidade de 1000 kN, instalada no Departamento de Engenharia Civil da UEPG, mostrada na Figura 14.

Figura 14 - Prensa elétrica digital com capacidade de 1000 kN.



Fonte: A autora.

4.3.2.4 Índice de desempenho com cimento

De acordo com os procedimentos da NBR 5752 (ABNT, 2014) determinou-se o índice de desempenho com cimento. Moldaram-se seis corpos de referência (A), sem adição mineral, composta apenas por cimento, areia normal e água com o traço fornecido pela norma. Além destes, moldaram-se seis corpos de prova de argamassa com 25% em massa de adição mineral, em substituição à igual porcentagem de cimento, areia normal e água (B). O aditivo plastificante é utilizado para manter o índice de consistência da argamassa B em ± 10 mm do obtido com a argamassa A, pelo ensaio da mesa de espalhamento, conforme NBR 7215 (ABNT, 1996). Na Tabela 8 é apresentado as proporções de mistura das argamassas em massa para determinação dos índices de atividade pozolânica com cimento.

Tabela 8 - Proporção de mistura das argamassas para ID com cimento.

Argamassas		Massa dos materiais (g)				
		Cimento	Areia normal	Adição Mineral	Água	Aditivo Plastificante
Referência	A	624		-	300,00	-
Material cerâmico	B	468	1872	156	295,79	4,21
Pó de concreto	B	468		156	298,60	1,40
Fíler calcário	B	468		156	300,00	-

Fonte: A autora.

Os corpos de prova foram mantidos em cura e rompidos aos 28 dias conforme a NBR 7215 (ABNT, 1996). A argamassa com substituição deve apresentar

resistência maior que 90% em relação a argamassa de referência para que o material possa ser classificado como adição mineral pozolânica, conforme determinado pela NBR 12653 (ABNT, 2014). Para rompimento dos corpos de prova utilizou-se prensa elétrica digital com capacidade de 1000 kN, instalada no Departamento de Engenharia Civil da UEPG.

4.3.3 Ensaio de Ataque por Sulfatos em Barras de Argamassa

Utilizando a metodologia proposta pela NBR 13583 (ABNT, 2014), as adições minerais foram utilizadas como substituição parcial ao cimento em argamassas e avaliadas quanto ao potencial de mitigação ao ataque por sulfatos em solução de sulfato de sódio.

Para isso, moldaram-se oito prismas com o traço fornecido pela NBR 13583 (ABNT, 2014) que é o traço de referência (sem adição). Moldaram-se também para cada adição mineral, oito prismas para cada traço, sendo eles com as seguintes porcentagens de substituição parcial ao cimento: 3%, 5%, 12% e 20%. Foram adotadas duas camadas com 20 golpes cada na moldagem dos prismas, a fim de garantir o adequado preenchimento dos moldes pela argamassa. Na Tabela 9 está apresentado as proporções de mistura das argamassas em massa para as diferentes porcentagens da adição mineral.

Tabela 9 - Proporção de mistura das argamassas para avaliação do potencial de mitigação ao ataque por sulfatos em solução de sulfato de sódio.

Argamassas	Massa dos materiais (g)			
	Cimento	Areia normal	Adição	Água
Argamassa com 0% de substituição	750		-	
Argamassa com 3% de substituição	727,5		22,5	
Argamassa com 5% de substituição	712,5	2400	37,5	450
Argamassa com 12% de substituição	660		90	
Argamassa com 20% de substituição	600		150	

Fonte: A autora.

Conforme NBR 13583 (ABNT, 2014), a cura inicial dos corpos de prova foi feita ao ar por 2 dias, com eles ainda nos moldes. Foram então desmoldados e transferidos para cura intermediária em água saturada com cal por 12 dias. Após este período, realizou-se a leitura inicial do comprimento de cada barra que serviu como referência para as análises. A leitura foi realizada por meio de um pórtico com relógio

comparador, mostrado na Figura 15, que foi calibrado com uma barra padrão de aço. Após as leituras, os corpos de prova foram submetidos a cura final.

Nesta etapa quatro corpos de prova de cada traço foram imersos em solução de sulfato de sódio, com concentração de 100 g de Na_2SO_4 por litro. Os demais prismas do traço foram imersos em água saturada com cal, que foi utilizada para fins de referência. As leituras dos comprimentos das barras foram realizadas a cada 7 dias. Visando uma avaliação mais completa da expansão das barras, elas foram mantidas nas soluções e as leituras continuaram além dos 42 dias, sendo feitas leituras até os 98 dias e mantendo-as imersas até os 100 dias.

Figura 15 – Pórtico com relógio comparador para leituras de variação linear em barras de argamassa com barra de argamassa.



Fonte: A autora.

Para os dados obtidos no ensaio de ataque por sulfatos, a análise estatística foi realizada utilizando o valor σ_{adotado} , que corresponde à diferença entre o desvio padrão das expansões das barras imersas em solução de sulfato de sódio (σ_{sulfato}) e o desvio padrão das barras em solução saturada de cal (σ_{cal}), conforme descreve a Equação 5.

$$\sigma_{\text{adotado}} = \sigma_{\text{sulfato}} - \sigma_{\text{cal}}$$

(Equação 5)

Este valor de desvio padrão foi adotado tendo em vista que o cálculo da expansão resultante é função da diferença entre as médias das leituras das barras imersas em cada solução.

4.3.4 Análises microestruturais

Após os 100 dias em imersão, foram preparadas amostras do traço de referência e dos traços contendo 20% de adição mineral, com dimensão aproximada de 5 mm para análise no microscópio eletrônico de varredura com EDS e para análises de distribuição de poros em porosímetro.

As imagens em microscopia foram obtidas com o uso de um microscópio FEG SEM, Tescan, Mira 3, com detectores SE, BSE e microsonda analítica de raios X Oxford X-Maxⁿ 50 (EDS), instalado no C-LABMU da UEPG, com metalização superficial das amostras em ouro. As amostras para ambos os testes foram preparadas pela redução de amostras dos corpos de prova com serra de precisão. Para as análises em FEG as faces analisadas são as de superfície de ruptura. A porosidade das amostras foi determinada em porosímetro por intrusão de mercúrio Micromeritics AutoPore IV 9500, também instalado no C-LABMU da UEPG.

Os procedimentos de preparação do material são os mesmos utilizados para caracterização das adições, onde o material foi moído e o resultante peneirado, tendo como material final o passante na peneira #200.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ADIÇÕES MINERAIS

A Tabela 10 apresenta os resultados de massa específica, umidade e perda ao fogo das adições.

Tabela 10 - Massa específica, umidade e perda ao fogo das adições.

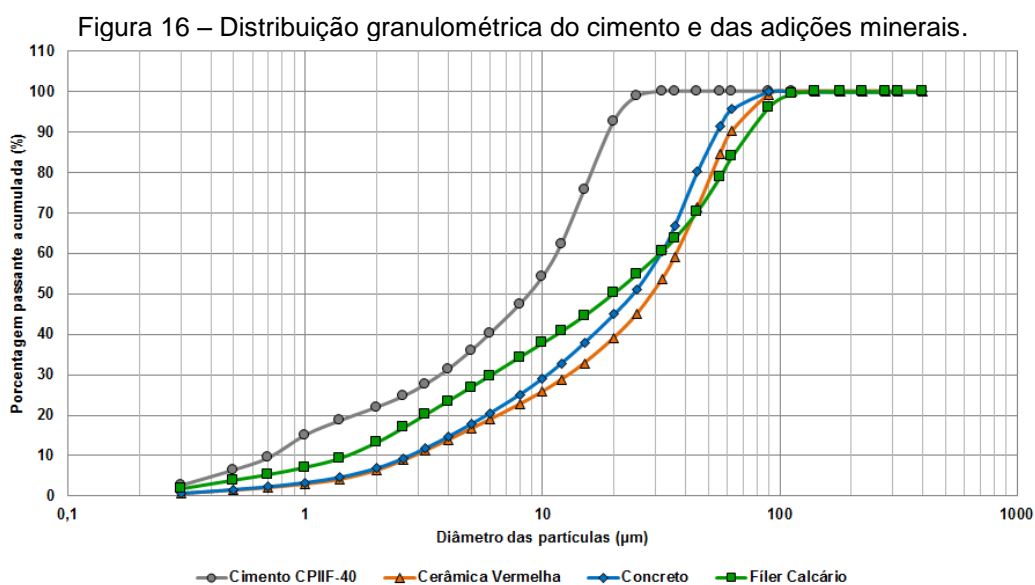
Adições Minerais	Massa específica (g/cm ³)	Umidade (%)	Perda ao fogo (%)
Pó de cerâmica vermelha	2,53	0,1	5,6
Pó de concreto	2,39	0,2	20,0
Fíler calcário	2,70	0,1	43,1

Fonte: A autora.

Nota-se que a adição mais densa é o fíler calcário, seguido pelo pó de cerâmica vermelha e de concreto. A umidade de todas adições apresentou valores baixos, o que era esperado, tendo em vista que os materiais foram armazenados em laboratório em condições de baixa umidade.

O ensaio de perda ao fogo apresentou resultados significativamente diferentes entre as adições. Enquanto a cerâmica vermelha teve menor perda de massa após a calcinação, seguida pelo pó de concreto, o fíler calcário foi a adição que apresentou a maior perda ao fogo, quase 8 vezes maior que o material cerâmico.

As curvas de distribuição granulométrica das adições minerais utilizadas, além do cimento utilizado na execução das argamassas, estão apresentadas na Figura 16.



A distribuição média de partículas foi de 30 µm para o material cerâmico, 25 µm para o resíduo de concreto, 20 µm para o fíler calcário e o cimento, em torno de 8 µm, o qual foi o menor entre todas as amostras medidas.

A composição química das adições, obtidas pelo ensaio de FRX, constam na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados da composição química dos materiais em estudo.

Adições Minerais	Composição química, em %										
	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	ZnO	MnO	MgO	Álcalis totais*
Pó de cerâmica vermelha	55,32	0,19	5,27	35,50	1,28	1,23	1,09	0,01	0,04	-	0,84
Pó de concreto	27,41	52,23	8,60	7,35	1,45	1,15	1,33	-	0,48	-	0,95
Fíler calcário	2,97	78,03	0,44	1,73	0,31	1,21	-	-	-	15,06	0,41

Fonte: A autora.

Nota: * Álcalis totais = (%Na₂O) + 0,658*(%K₂O).

A Tabela 12 apresenta um comparativo entre os resultados apresentados pelas adições nos ensaios de caracterização e as exigências químicas da NBR 12653 (ABNT, 2014).

Tabela 12 – Caracterização das adições e exigências químicas e físicas da NBR 12653 (ABNT, 2014) para pozolanas.

Determinações (%)	Limite da NBR 12653 (ABNT, 2014)			Pó de cerâmica vermelha	Pó de concreto	Fíler Calcário
	N	C	E			
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 70	≥ 70	≥ 50	96,09	43,36	5,14
SO ₃	≤ 4	≤ 5	≤ 5	1,23	1,15	1,21
Álcalis disponíveis em Na ₂ O	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	0,84	0,95	0,41
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3	0,1	0,2	0,1
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6	5,6	20,0	43,1
Material retido na peneira 45 µm*	<20	<20	<20	28,69	19,76	29,62

Fonte: A autora.

Nota: * Ensaio realizado por granulometria a laser.

O material cerâmico atendeu aos requisitos químicos especificados pela NBR 12653 (ABNT, 2014) quanto ao somatório dos teores SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃, onde apresentou o valor de 96,09%, superior ao mínimo para todas classes de pozolanas, bem como teor abaixo do máximo para SO₃ e álcalis totais. A adição também atendeu o teor de umidade e perda ao fogo máxima para materiais pozolânicos. O pó de cerâmica apresentou um percentual de material retido na peneira 45 µm acima do

máximo estabelecido para pozolanas, porém o ensaio foi realizado em granulômetro a laser e não conforme NBR 15894-3 (ABNT, 2010).

O pó de concreto não atendeu a somatória mínima de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ para nenhuma das classes na NBR 12653 (ABNT, 2014), tendo composição química que atende somente ao teor de SO_3 e álcalis totais. Apesar da baixa umidade, a adição apresentou perda ao fogo superior à permitida para todas classes de material pozolânico. O resíduo de concreto foi a única das adições que atendeu o percentual de material retido na peneira 45 μm .

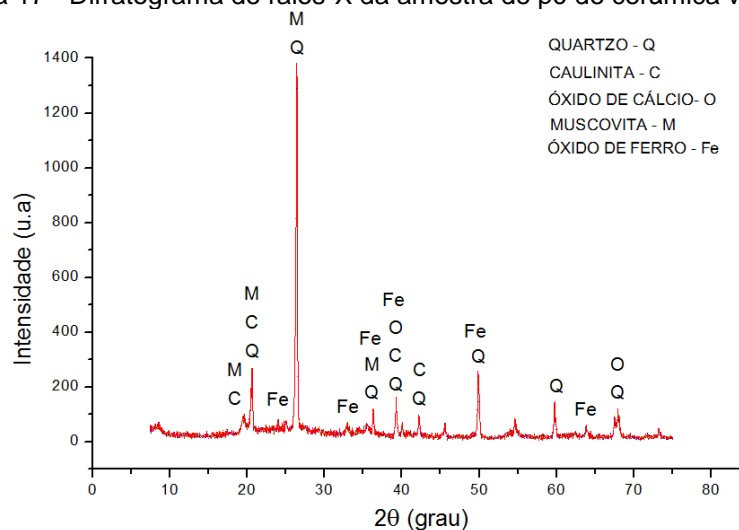
Já o filer calcário, apesar de atender à exigência quanto ao teor máximo de SO_3 , álcalis e umidade, não atende ao mínimo exigido no somatório dos teores de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, o que era esperado tendo em vista que esta é uma adição reconhecidamente inerte. Além disso, o filer apresentou resultado no ensaio de perda ao fogo muito superior ao permitido para materiais pozolânicos. O percentual de material retido na peneira 45 μm também foi acima do máximo estabelecido para pozolanas.

5.2 ATIVIDADE POZOLÂNICA

5.2.1 Difratometria de Raios X

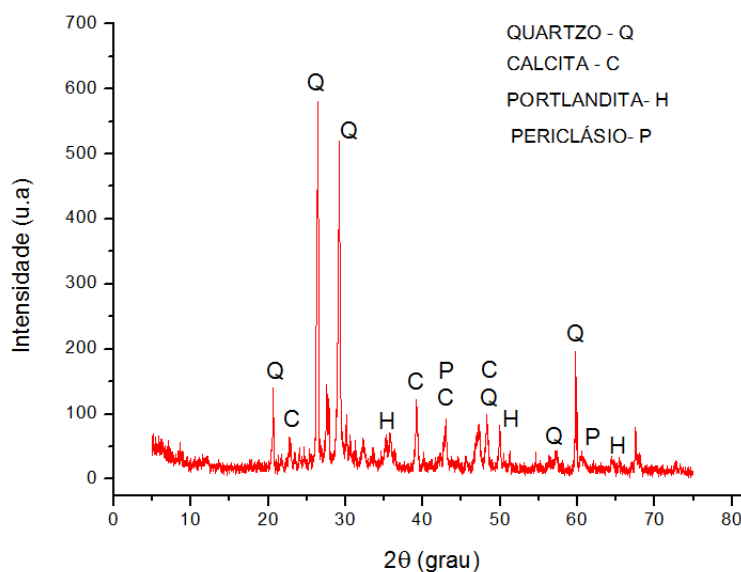
Na Figura 17 está apresentado o resultado de DRX do pó de cerâmica vermelha. Foram encontrados picos predominantemente referentes ao quartzo, com pequenas quantidades de caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), muscovita ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$), óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de cálcio (CaO).

Figura 17 - Difratograma de raios-X da amostra de pó de cerâmica vermelha.



O difratograma do pó de concreto (Figura 18) apresentou picos predominantes de quartzo, calcita (CaCO_3), portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e periclásio (MgO). Nota-se que o composto periclásio não havia sido identificado no ensaio de FRX. Acredita-se que o ensaio de DRX foi mais sensível a presença da brita do concreto do que o FRX, onde os outros compostos estavam em maior quantidade. As fases cristalinas identificadas justificam a perda ao fogo apresentada pelo material, tendo em vista que a calcita é estável até $600\text{ }^\circ\text{C}$ e a partir de $700\text{ }^\circ\text{C}$ se decompõe em óxido de cálcio e dióxido de carbono. A portlandita desidrata até $100\text{ }^\circ\text{C}$ e decompõe-se rapidamente em óxido de cálcio entre 500 e $550\text{ }^\circ\text{C}$. Como o ensaio de perda ao fogo foi realizado até a temperatura de $950\text{ }^\circ\text{C}$, ambas fases foram decompostas (CANOVAS, 1977; LIMA et al., 2004; HAGER, 2013).

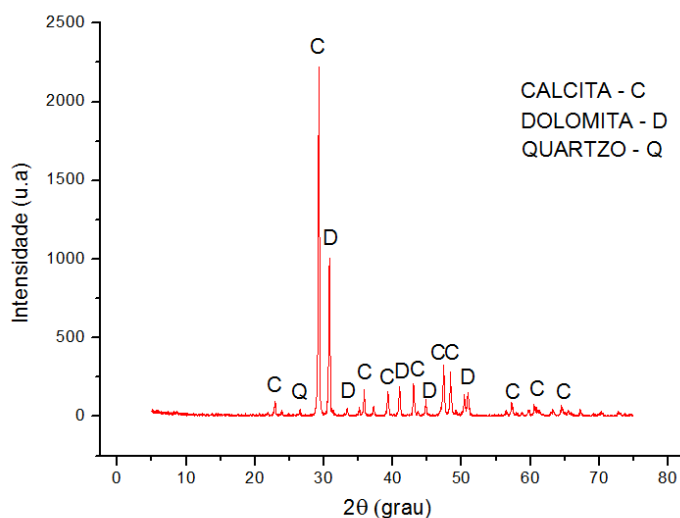
Figura 18 - Difratograma de raios-X da amostra de pó de concreto.



Fonte: A autora.

Na amostra de fíler calcário (Figura 19), o difratograma apresentou picos de calcita, dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) e quartzo. Sua composição também está de acordo com o resultado de perda ao fogo, pois a dolomita, assim como a calcita, é estável somente até $600\text{ }^\circ\text{C}$ e se decompõe a partir de $700\text{ }^\circ\text{C}$ (CANOVAS, 1977; HAGER, 2013).

Figura 19 - Difratoograma de raios-X da amostra de fíler calcário.



Fonte: A autora.

Nenhum dos materiais apresenta halo amorfo, não podendo ser, por este ensaio, atribuído potencialidade pozolânica as adições minerais. Os resultados deste ensaio indicam que os materiais constituem adições de caráter inertes. Apesar disto, o uso de adições do tipo fíler possibilitam atribuir melhora nas propriedades de concreto no estado fresco, pelo aumento de coesão, viscosidade, plasticidade, maior resistência a exsudação e segregação e menor calor de hidratação, conforme indicado por Dal Molin (2005, 2011), Mehta e Monteiro (2008) e Güneyisi et al. (2012). Dal Molin (2005) cita ainda que pós inertes podem ser utilizados para melhorar o empacotamento granulométrico e agir como pontos de nucleação das partículas de cimento, podendo contribuir com o refinamento de poros na matriz hidratada dos compostos de cimento Portland, permitindo redução da permeabilidade do concreto no estado endurecido.

5.2.2 Chapelle Modificado

A Tabela 13 apresenta os resultados das adições minerais no ensaio de Chapelle Modificado.

Tabela 13 – Resultados do teor de hidróxido de cálcio fixado pelas adições pelo Ensaio de Chapelle Modificado, conforme NBR 15895 (ABNT, 2010).

Adição Mineral	Teor de Ca(OH)_2 fixado ($\text{mg Ca(OH)}_2/\text{g amostra}$)
Pó de cerâmica vermelha	395
Pó de concreto	Não se aplica
Fíler calcário	Não se aplica

Fonte: A autora.

O ensaio não foi realizado para as adições de pó de concreto e fíler calcário tendo em vista que ambas já possuem cálcio em sua composição. O pó de concreto possui calcita e portlandita e o fíler calcário apresenta em sua composição por calcita e dolomita. Como o ensaio consiste em uma mistura de óxido de cálcio, com a adição e água para determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado, a composição destes materiais inviabiliza a quantificação da cal remanescente.

O consumo mínimo atribuído a materiais pozolânicos é de 330 mg CaO/g pozolana, o que corresponde por estequiometria a 436 mg Ca(OH)₂/g pozolana (RAVERDY et al., 1980). O resíduo de cerâmica vermelha apresentou resultados abaixo do mínimo, não podendo então ser classificado como pozolana. O resultado do ensaio Chappelle corrobora o estudo de Gobbi (2014), onde quanto maior o tempo de moagem, ainda mais quando associado à calcinação, maior o teor de hidróxido de cálcio fixado, indicando maior reatividade, ainda que de forma singela. No presente estudo o material não foi moído no moinho de bolas e nem calcinado, apresentando resultados inferiores ao de Gobbi (2014).

Optou-se por não fazer a moagem e a calcinação do material pela demanda energética que estes processos demandam, fugindo das questões ambientais relacionadas à redução o impacto gerado por este passivo ambiental. Outro aspecto relevante é que durante o uso de agregados reciclados, a fração pulverulenta é adicionada as misturas cimentícias na forma *in natura*, sendo então relevante esta análise sem manipulação do material cerâmico.

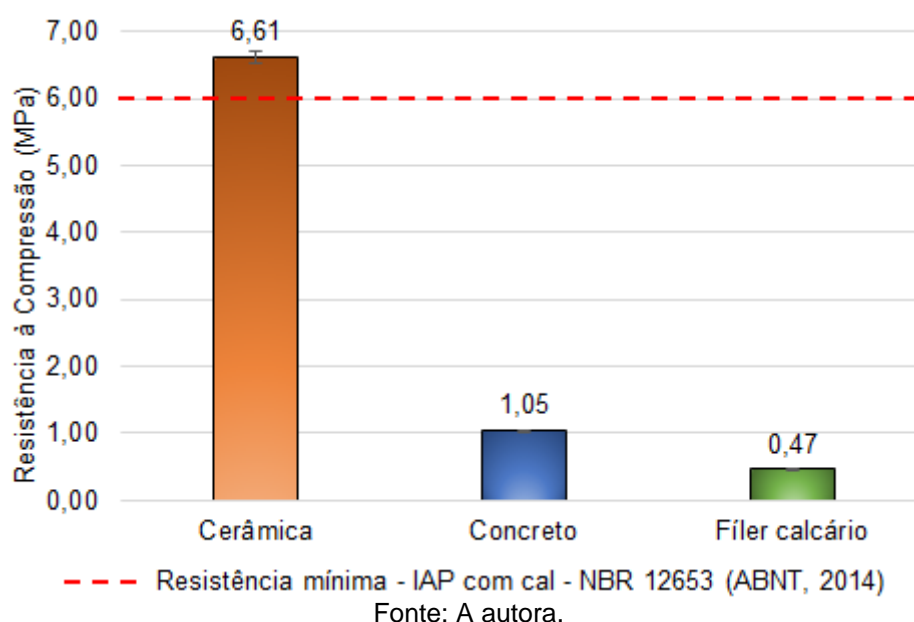
Gobbi (2014) encontrou valores de 454 a 545 mg Ca(OH)₂/g de adição cerâmica, aumentando a fixação com o aumento do tempo de moagem e associando a calcinação. Garcia et al. (2015), analisando amostras de resíduos cerâmicos também moídos, obteve valores de fixação de 434 a 599 mg Ca(OH)₂/g de adição. Percebe-se que material cerâmico tem potencial de obter maior reatividade por meio da moagem. Deve-se, no entanto, ressaltar que sendo o resíduo proveniente de resíduos de construção e demolição, esta fração deve ser produzida no próprio processo de beneficiamento do RCD, estando o material na finura inerente ao processo. Caso o material fosse manipulado para uso exclusivo como adição mineral seria possível associar seu beneficiamento a outro processo industrial de forma a melhorar suas propriedades como finura e cristalinidade. A alternativa ideal seria encontrar uma forma de moer este material sem que haja gasto energético adicional.

5.2.3 Índice de Atividade Pozolânica com Cal

Os dados obtidos no ensaio de IAP com cal foram tratados com o intuito de identificar e eliminar os valores discrepantes. Para tanto adotou-se procedimento similar ao de Lima (2005) e Pereira (2009), onde os dados cujo valor absoluto subtraído da média de suas repetições era maior que o desvio padrão foram considerados espúrios. Assim, as médias e desvio padrões dos grupos foram recalculados sem considerar estes valores. Esta mesma análise foi adotada para os resultados do ensaio de ID com cimento.

A Figura 20 apresenta os resultados de resistência à compressão obtidos no ensaio de índice de atividade pozolânica com cal para as argamassas com as diferentes adições minerais. Somente o pó de cerâmica apresentou resultado acima do limite de 6,0 MPa determinado pela NBR 12653 (ABNT, 2014), classificando-se por este ensaio como adição mineral pozolânica. O resultado do fíler calcário é coerente com o apresentado por Hoppe Filho et al. (2017) para este material, confirmando seu caráter inerte.

Figura 20 - Resultados de resistência à compressão obtidos no ensaio de IAP com cal e limite imposto pela NBR 12653 (ABNT, 2014).



Hoppe Filho et al. (2015) conseguiram aumento na resistência da argamassa no ensaio de IAP com cal aumentando o tempo de moagem da cerâmica, o que os autores afirmam ocorrer pela alteração no empacotamento das partículas e maior formação de compostos hidratados por atividade pozolânica. Porém, com nenhum dos

três valores de moagem estudados, obtiveram resistências acima da mínima exigida pela NBR 12653, atingindo valor máximo de 4,8 MPa. No presente estudo, o material que não foi moído apresentou argamassas com resistência à compressão superior. Isso pode ocorrer pelo aumento da finura da adição com o processo de moagem. Como a cerâmica utilizada por Hoppe Filho et al. (2015) é mais fina, apesar de poder melhorar o empacotamento de partículas, requer mais água para atingir a mesma consistência.

Este ensaio não deve ser utilizado para comparar as resistências obtidas pelas diferentes adições, e sim utilizar somente para comparação com o valor normatizado de 6 MPa. Isto se deve ao fato da NBR 5751 (ABNT, 2012) apresentar um índice de consistência pré-determinado, que deve ser obtido por um volume de água variável, o que interfere na porosidade da argamassa e influencia consequentemente na sua resistência à compressão (HOPPE FILHO et al., 2017).

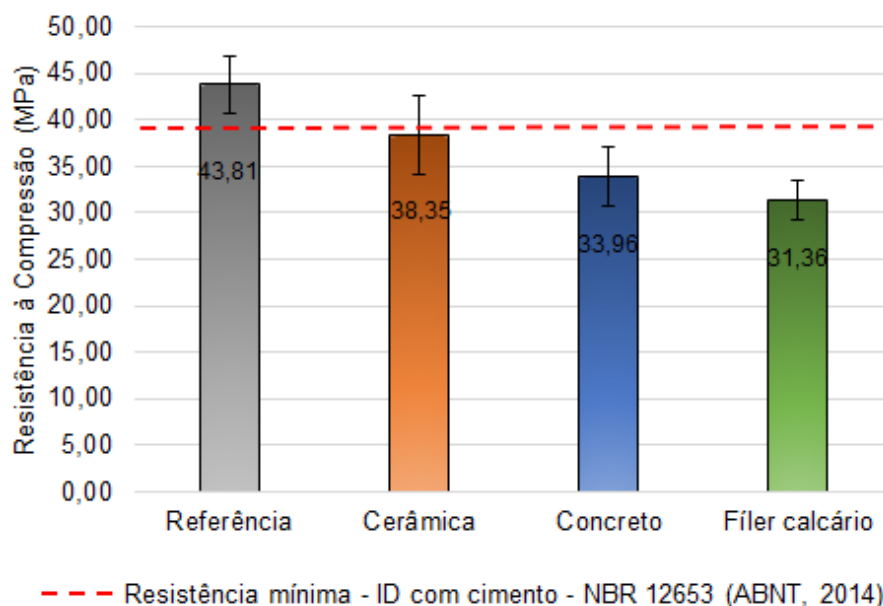
5.2.4 Índice de Desempenho com Cimento

Na Figura 21 constam os resultados de resistência à compressão obtidos no ensaio de índice de desempenho com cimento para as argamassas com as adições de pó de cerâmica vermelha e de resíduo concreto. De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), para ser considerada pozolana, a argamassa com 25% de adição deve apresentar 90% da resistência obtida pela argamassa de referência. No presente estudo a média apresentada pela referência foi de 43,81 MPa. Assim sendo, o valor de 90% corresponde a 39,43 MPa, limite apresentado na Figura 21.

De acordo com a análise estatística da resistência obtida pela argamassa com adição de cerâmica vermelha, que atingiu 87,52% da resistência da referência, pode-se afirmar que a mesma atingiu o limite mínimo, também sendo classificada como pozolana por este ensaio.

Já a argamassa com adição de resíduo de concreto obteve 77,50% da resistência à compressão em relação a referência, resultado coerente com o comportamento observado por Florea et al. (2014). O filer calcário obteve 71,59% da resistência à compressão em relação a referência. Ambas as argamassas, que tiveram resistência à compressão média com valores muito próximos, apresentaram resultado inferior ao limite mínimo, não sendo classificadas como adições pozolânicas, resultados que corroboram com os obtidos no ensaio de IAP com cal.

Figura 21 - Resultados de resistência à compressão obtidos no ensaio de ID com cimento e limite imposto pela NBR 12653 (ABNT, 2014).



Fonte: A autora.

A argamassa com adição de pó de concreto apresentou comportamento similar a com fíler calcário neste ensaio, o que também foi observado por Oksri-Nelfia et al. (2016). Apesar de não ter caráter pozolânico, o pó de resíduo de concreto apresenta comportamento que indica a possibilidade de seu uso como fíler, atuando como ponto de nucleação para a hidratação do cimento e melhorando a compacidade da mistura.

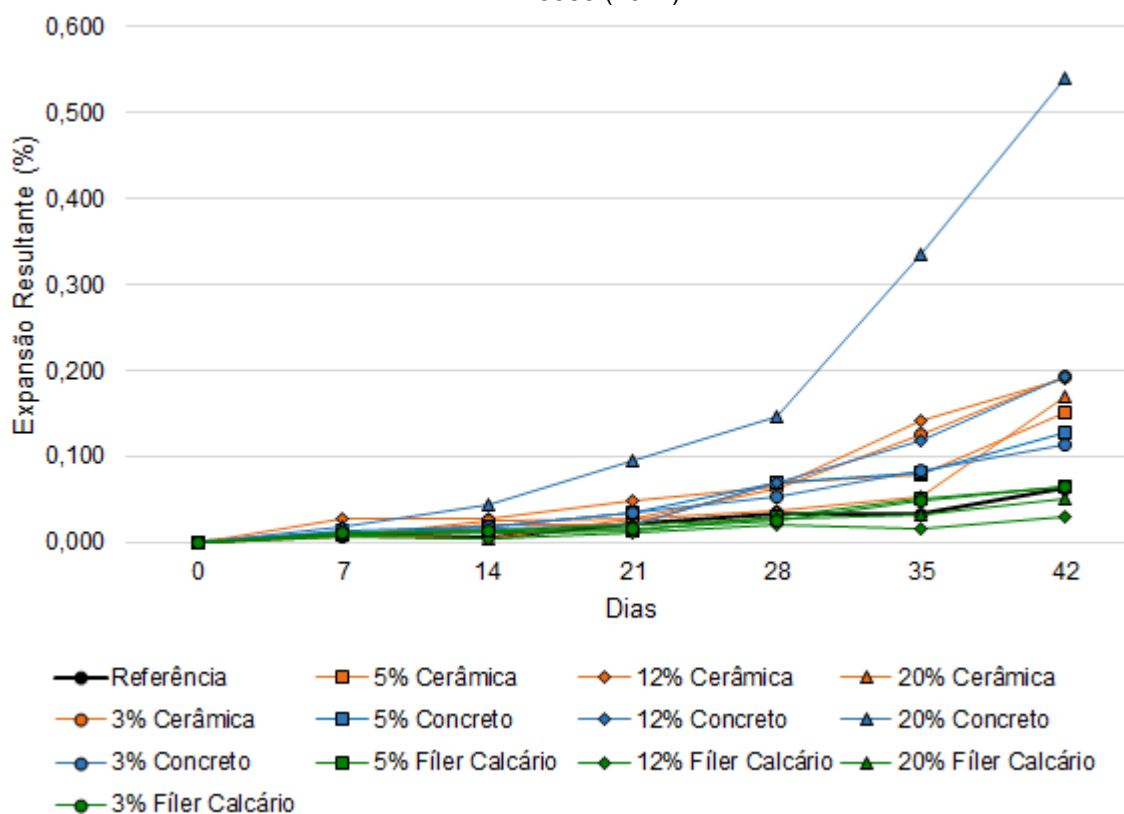
5.3 ENSAIOS DE ATAQUE POR SULFATOS EM BARRAS DE ARGAMASSA

Para os dados obtidos no ensaio de ataque por sulfatos, a análise estatística foi realizada utilizando o valor da diferença entre o desvio padrão das leituras das barras imersas em solução de sulfato de sódio e o desvio padrão das barras em solução saturada de cal, tendo em vista que o cálculo da expansão resultante é função da diferença entre as médias das leituras das barras imersas em cada solução.

A expansão resultante das barras da argamassa padrão e das argamassas com diferentes porcentagens de substituição por pó de cerâmica vermelha, de concreto e fíler calcário expostas à solução de sulfato de sódio até a idade de 42 dias está apresentada na Figura 22, conforme NBR 13583 (ABNT, 2014). Os resultados mostram que com as substituições de parte do cimento Portland pelas adições de pó de cerâmica vermelha e pó de concreto, a expansão resultante das barras de argamassa aumentou, evidenciando que ambas as adições não possuem potencial

em mitigar o ataque por íons sulfato de origem externa. Por outro lado, as argamassas com substituição por fíler calcário apresentaram expansões abaixo ou muito próximas a referência para todas porcentagens de substituição.

Figura 22 – Expansão das argamassas contendo diferentes porcentagens das adições minerais na composição do material ligante, até a idade de 42 dias, conforme método de ensaio NBR 13583 (2014).



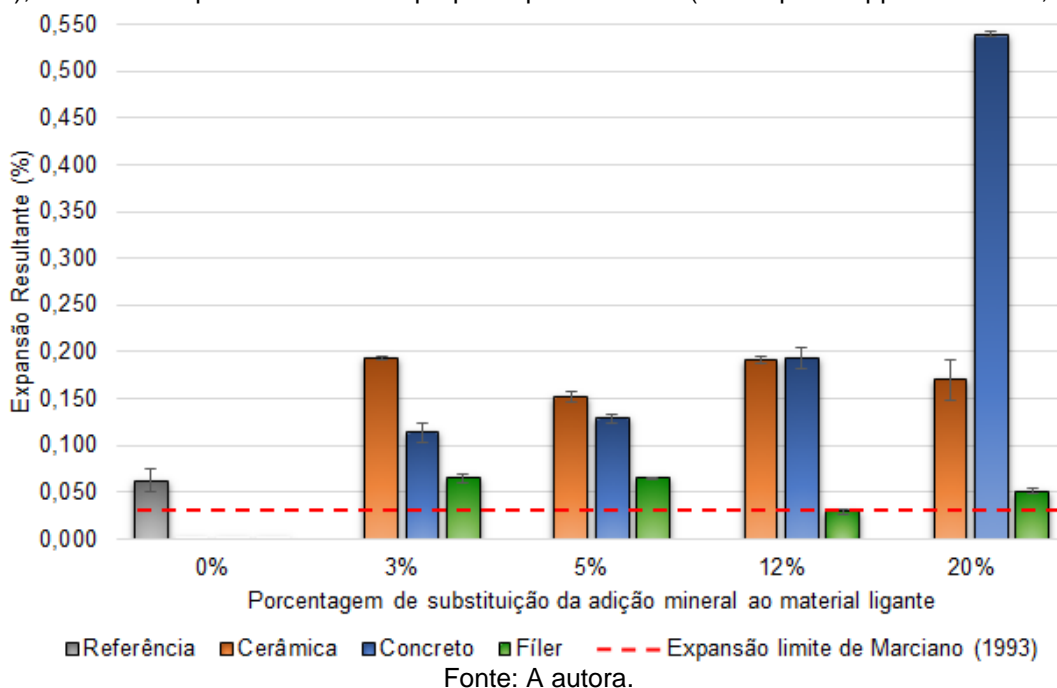
Fonte: A autora.

Nesta idade, a argamassa com 20% de substituição do cimento por pó de concreto foi a que apresentou a maior expansão, aproximadamente 3 vezes maior que a próxima argamassa no quesito da expansão resultante aos 42 dias, que corresponde argamassa com 12% de concreto. Em seguida, encontram-se a argamassa com 12 e 3% de cerâmica vermelha, cujas expansões foram muito próximas. Na sequência estão as argamassas com 20 e 5% de cerâmica, 5 e 3% de concreto, respectivamente.

Após a argamassa com 3% de concreto, encontra-se a argamassa com 3 e 5% de fíler calcário, que apresentaram expansões iguais aos 42 dias. Em seguida, encontra-se a argamassa de referência, e na sequência a com 20% de fíler calcário. A argamassa com menor expansão foi a com 12% de adição de fíler calcário.

Marciano (1993 apud Hoppe Filho et al.,2015) propõe que aos 42 dias a expansão resultante limite é de 0,030%, e argamassas que apresentem expansões abaixo deste valor podem ser consideradas resistentes ao ataque por sulfatos. A Figura 23 apresenta as expansões resultantes das argamassas estudadas nesta idade, bem como o limite proposto por Marciano (1993 apud Hoppe Filho et al.,2015).

Figura 23 - Expansão resultante, aos 42 dias, das argamassas contendo diferentes porcentagens das adições minerais na composição do material ligante, conforme recomendações da NBR 13583 (2014), e limite de expansão resultante proposto por Marciano (1993 apud Hoppe Filho et al., 2015).



Como evidenciado na Figura 23, a argamassa de referência não é resistente ao ataque por sulfatos, apresentando valor de expansão superior a 0,030%, e nenhuma das porcentagens de substituição das adições de pó de cerâmica e de concreto apresentou uma redução capaz de atingir o limite proposto, pelo contrário, aumentaram a expansão resultante, deixando este valor ainda mais distante de 0,030%.

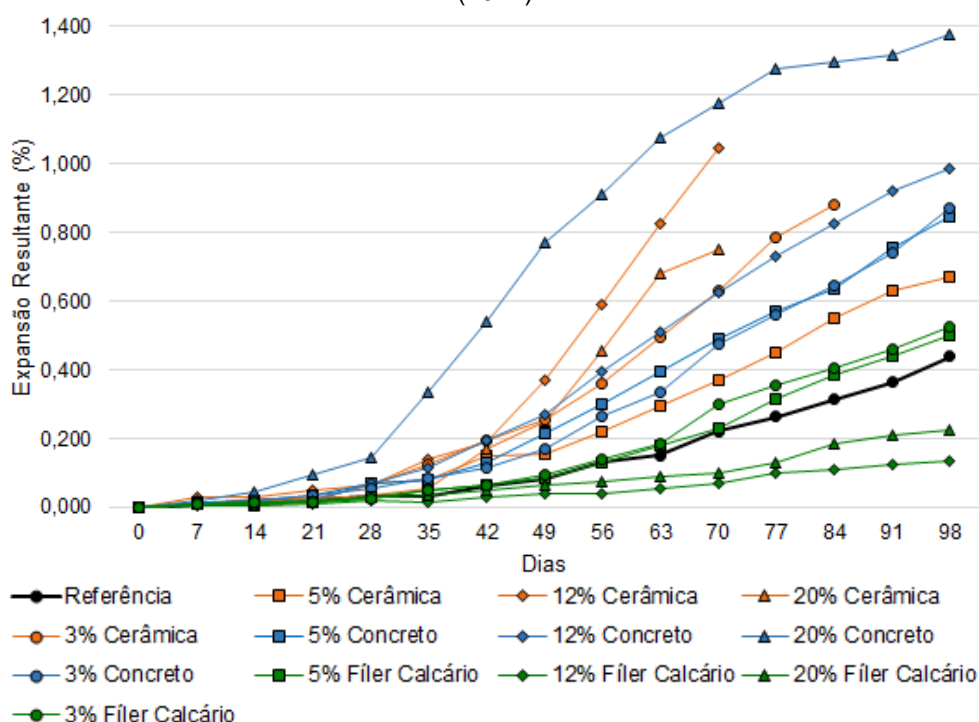
Já as argamassas com adição de fíler calcário obtiveram expansões iguais ou menores que a de referência, e a argamassa contendo 12% desta adição conseguiu atingir o limite proposto por Marciano, com expansão resultante aos 42 dias de 0,030%, podendo ser considerada resistente ao ataque por sulfatos.

Visando uma avaliação mais completa da expansão das barras, as leituras foram prolongadas além dos 42 dias, sendo expandidas até 98 dias, e mantendo as barras em imersão até os 100 dias. A expansão resultante das barras aos 98 dias está

apresentada na Figura 24. Nesta idade, o comportamento das argamassas com substituição do cimento por pó de concreto não alterou o comportamento verificado aos 42 dias. Já das argamassas com substituição por cerâmica vermelha, não se pode afirmar mudanças no comportamento, pois com exceção do traço com 5%, nos demais teores de substituição todas as barras imersas em solução de sulfato de sódio quebraram ou atingiram tamanho maior que o possível para serem encaixadas no pórtico, inviabilizando as leituras até os 98 dias.

As barras de argamassa com 3 e 5% de fíler calcário, que aos 42 dias tinham expansões resultantes iguais, passam a ter valores diferenciados, sendo que a com 5% apresentou o menor valor entre as duas. As argamassas contendo 20% e 12% de fíler calcário mantêm o comportamento, mantendo-se com as menores expansões e as únicas com expansões menores que a da argamassa de referência. Acredita-se que estes teores de fíler proporcionaram melhor empacotamento granulométrico em relação a referência, o que provavelmente alterou sua absorção, justificando este comportamento.

Figura 24 - Expansão das argamassas contendo diferentes porcentagens das adições minerais na composição do material ligante até a idade de 98 dias, conforme método de ensaio NBR 13583 (2014).

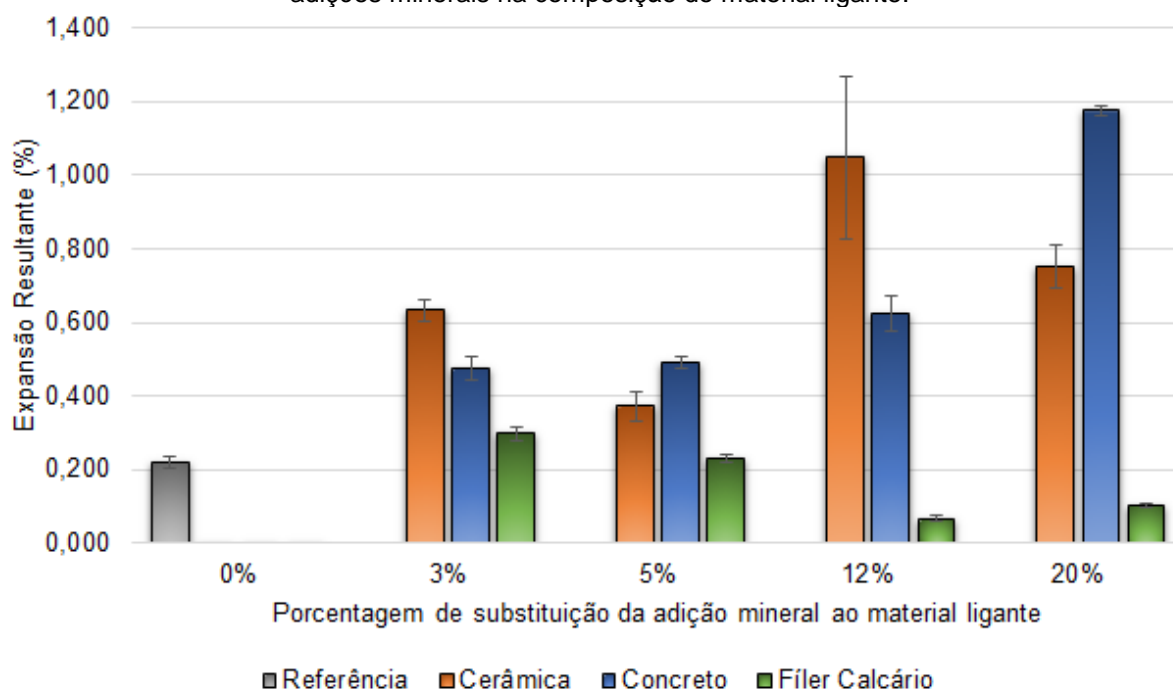


Fonte: A autora.

Tendo em vista que as leituras nas argamassas com 3, 12 e 20% de pó de cerâmica vermelha não foram possíveis até os 98 dias, fez-se análise da expansão

resultante das barras aos 70 dias, idade na qual há dados de leitura de todas barras, mostrada na Figura 25.

Figura 25 - Expansão resultante, aos 70 dias, das argamassas contendo diferentes porcentagens das adições minerais na composição do material ligante.



Fonte: A autora.

Percebe-se uma mudança de comportamento nas expansões das barras em relação aos 42 dias. A barra com 5% de pó de concreto passa a ter expansão maior que a argamassa de cerâmica com mesma porcentagem de substituição. Além disso, a barra com 12% de cerâmica, que antes tinha comportamento similar a com 12% de concreto, passa a ter uma expansão muito maior, obtendo junto com a barra com 20% de concreto as maiores expansões aos 70 dias.

A barra com 5% de fíler continua com expansão similar a referência, assim como aos 42 dias, e apenas as argamassas com 12 e 20% possuem expansões menores que a argamassa sem substituição. Todas as demais apresentam expansões superiores à referência.

Nota-se que nas argamassas contendo adição cerâmica e fíler calcário, as expansões não aumentaram necessariamente a medida que se elevou o teor de adição. A argamassa contendo 5% de cerâmica vermelha apresentou expansão significativamente menor que a com teor de 3%. Acredita-se que com valores próximos a 5% para a cerâmica e 12% para o fíler é possível obter-se o melhor

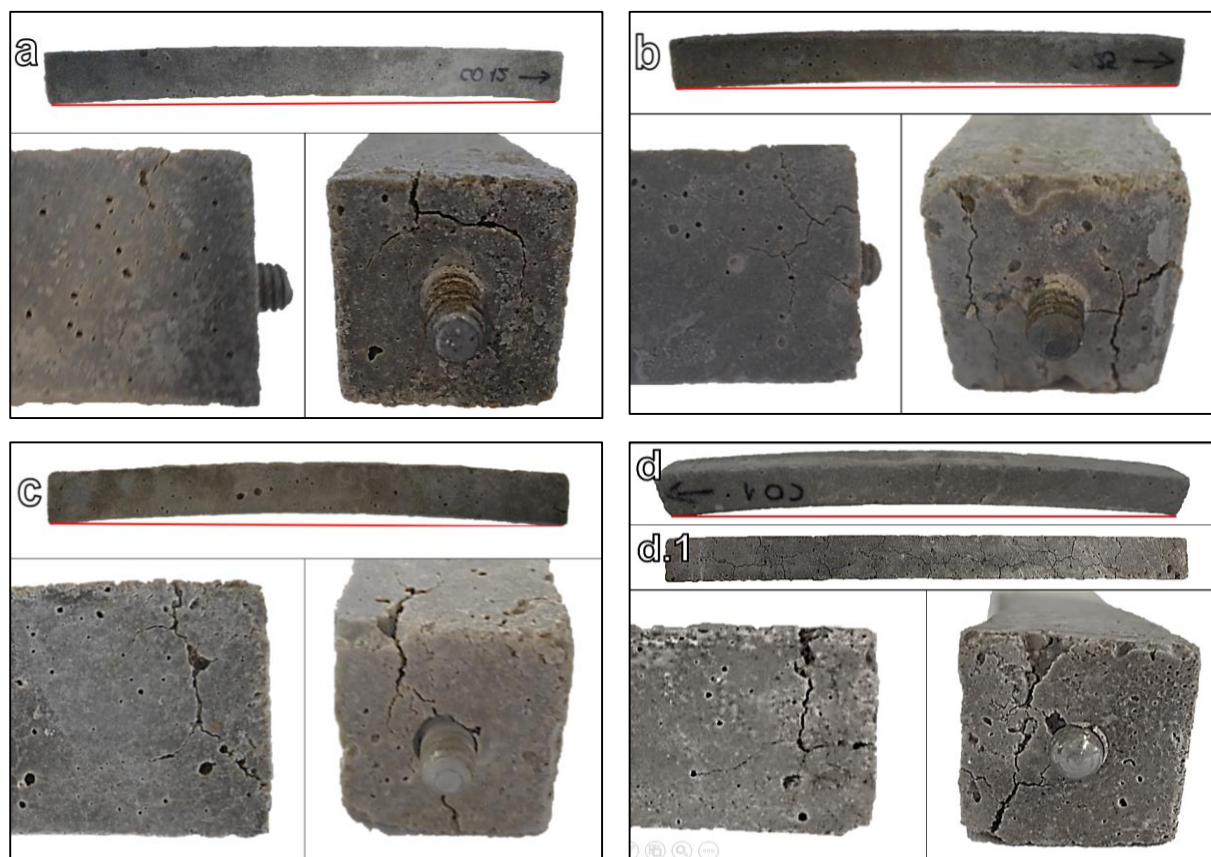
empacotamento das partículas, tendo em vista que as pequenas partículas de adição tamponam os poros, e ainda, no caso da cerâmica, das reações pozolânicas que podem estar ocorrendo, além do efeito benéfico das adições em promover pontos de nucleação durante a hidratação da pasta. Assim, a porosidade destas argamassas é reduzida, e conseqüentemente a intensidade do ataque por sulfatos também. Porém, a comparação entre os teores de adição cerâmica poderia ter resultados diferentes se tivesse sido possível a continuidade das leituras, pois os comportamentos poderiam ter sofrido alterações. Percebe-se o maior efeito de fragilização nestas argamassas.

Com o prolongamento das leituras até os 98 dias, foi possível observar todas as barras imersas na solução de sulfato de sódio iniciarem a apresentar fissuras e a forma destas fissuras, com exceção da barra contendo 12% de fíler calcário que não fissurou até esta idade. As barras de argamassa de referência apresentaram fissuras após 98 dias em imersão, de forma muito singela. As fissuras das barras com adição de cerâmica vermelha iniciaram aos 35 (argamassa com 20%), 56 dias (12%), 63 (5 e 3%), e na forma de microfissuras nesta idade para o traço de 3%.

Para as argamassas contendo pó de concreto, as fissuras iniciaram aos 35 (argamassa com 20%), 56 (12 e 5%) e 84 dias (3%), e novamente na forma de microfissuras nestas idades para o traço de 3%. Percebeu-se que, em ambas adições, quanto maior a porcentagem de substituição, além da diferença de idade, as fissuras se apresentaram com maiores aberturas e comprimentos, além da maior tendência em conectarem-se, indicando que as argamassas ficaram mais frágeis. Isso é evidenciado pelas argamassas com 5 e 3% de adição de pó de concreto, que possuem expansões muito próximas, porém as barras com 3% só apresentaram fissuras em idades maiores.

A Figura 26 mostra as barras de argamassa com adição de pó de concreto após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio. Nota-se que com o aumento da porcentagem de adição, as fissuras apresentam-se com maior tamanho e abertura, e o abaulamento nas barras é maior, evidenciado pelos traços vermelhos na Figura 26. Devido ao abaulamento, as barras ficam parte tracionadas e parte comprimidas. No traço com 20% de adição, a face tracionada (Figura 26d.1) apresentou uma grande quantidade de fissuras. Além disso, o abaulamento sofrido pelas barras influencia no valor de leitura obtido pelo pórtico, alterando os resultados de expansão.

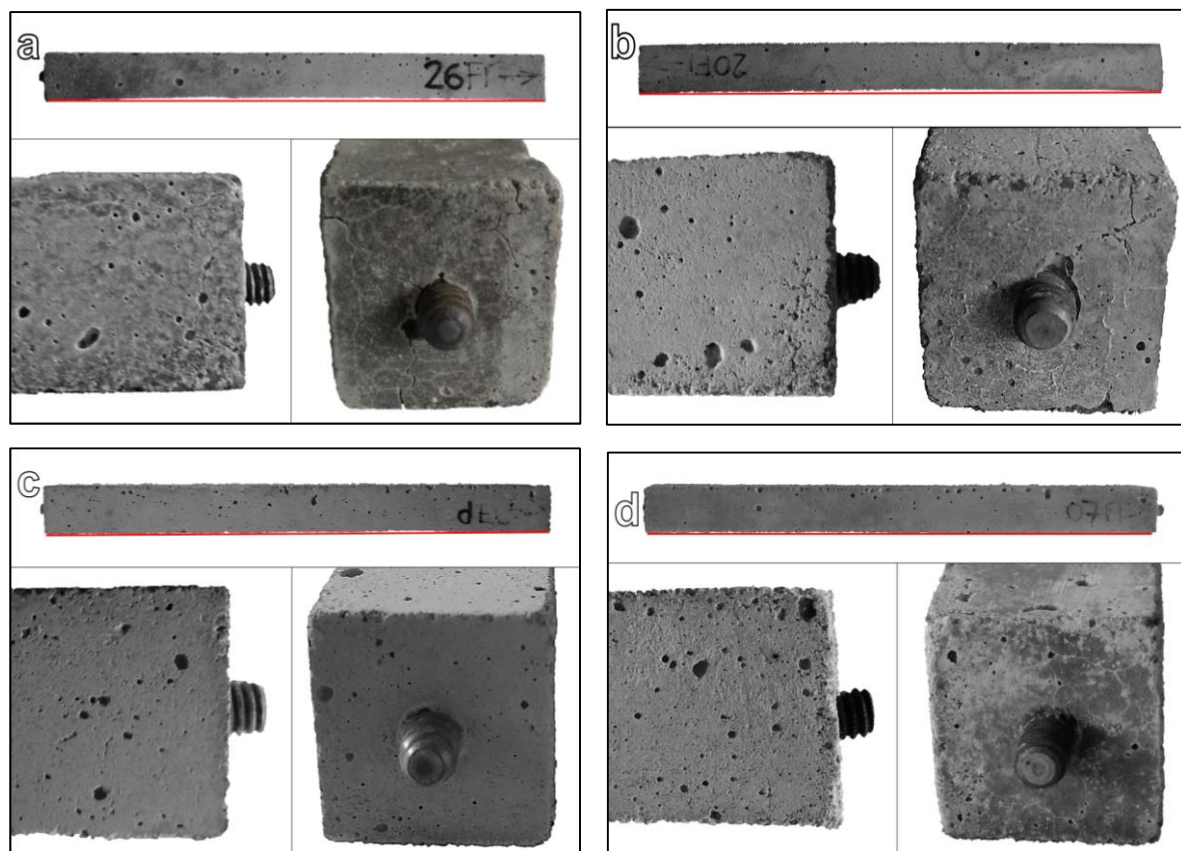
Figura 26 – Fissuras das barras de argamassa com adição de pó de concreto após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio: (a) 3% de adição; (b) 5% de adição; (c) 12% de adição; (d) 20% de adição; (d.1) face tracionada da barra com 20% de adição.



Fonte: A autora.

As barras de argamassa com adição de fíler calcário fissuraram aos 98 (argamassa com 20%) e 63 dias (5 e 3%). Percebe-se pela Figura 27 que em comparação com as barras contendo resíduo de concreto, as fissuras em todos os percentuais são mais amenas, bem como o abaulamento sofrido pelas barras, que chega a ser imperceptível para os traços de 12 e 20% (Figura 27c e Figura 27d, respectivamente). A argamassa contendo 12% de fíler calcário não apresentou fissuras visíveis macroscopicamente no tempo de exposição deste trabalho.

Figura 27 - Fissuras das barras de argamassa com adição de filer calcário após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio: (a) 3% de adição; (b) 5% de adição; (c) 12% de adição; (d) 20% de adição.

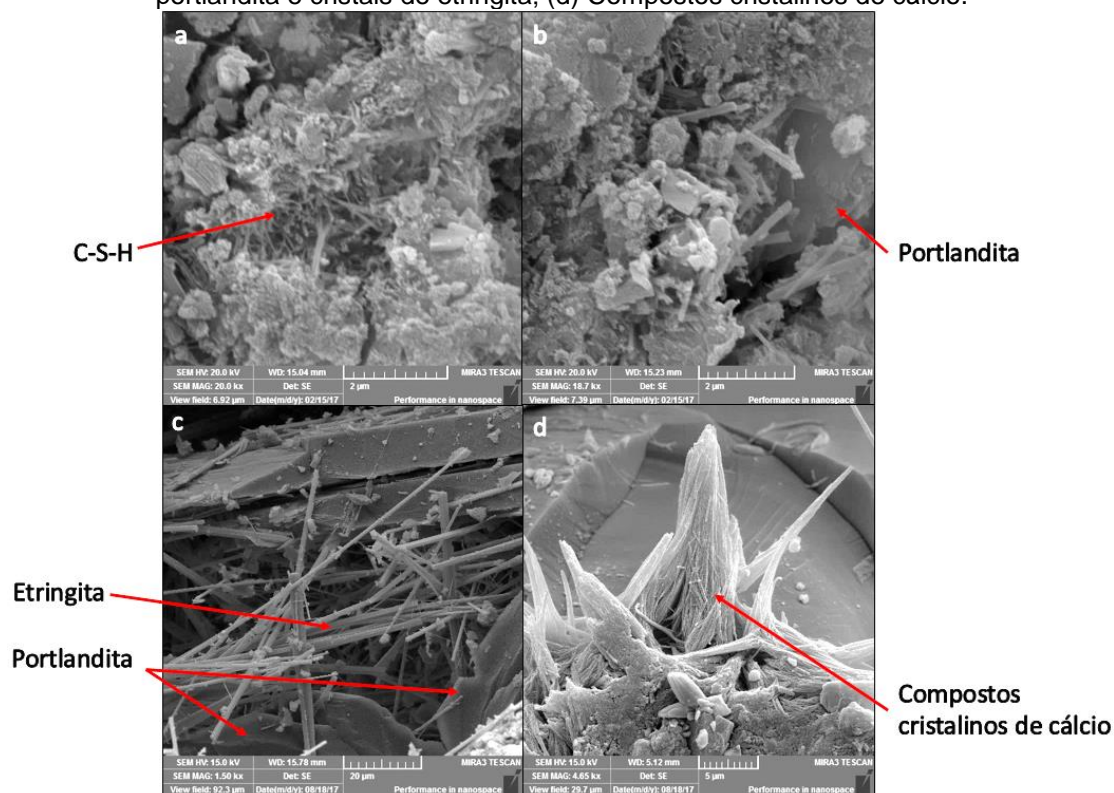


Fonte: A autora.

5.3.1 Argamassa de Referência

A Figura 28 apresenta a microestrutura da argamassa de referência após 100 dias de imersão em solução saturada de cal. Pela análise das micrografias, percebe-se a presença de formações amorfas de C-S-H (Figura 28a), placas lamelares em formato hexagonal correspondentes a portlandita (Figura 28b e Figura 28c), além de uma pequena quantidade de cristais aciculares de etringita em poro da microestrutura (Figura 28c). Os compostos cristalinos identificados estão de acordo com os componentes gerados pela hidratação do cimento e apresentam a forma relatada por Mehta e Monteiro (2008) e Quarcioni (2008). Observou-se também uma grande quantidade de compostos cristalinos de cálcio, oriundos da solução saturada de cal na qual as amostras estavam imersas. (Figura 28d).

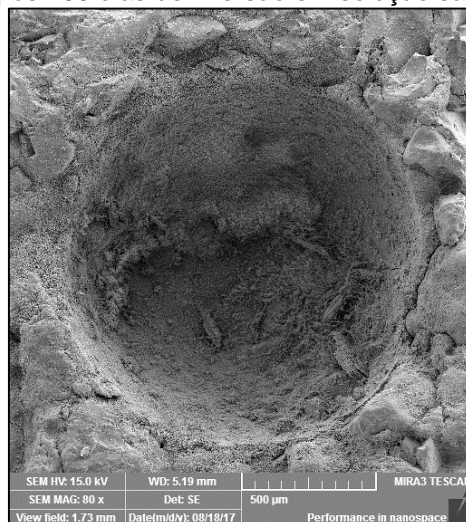
Figura 28 - Imagens dos cristais presentes na microestrutura da argamassa de referência após 100 dias de imersão em solução saturada de cal: (a) C-S-H; (b) Placas de portlandita; (c) Placas de portlandita e cristais de etringita; (d) Compostos cristalinos de cálcio.



Fonte: A autora.

Ao analisar os poros da argamassa de referência que ficou imersa em solução de cal, observa-se que a quantidade de cristais formados pela hidratação do cimento presente neles é relativamente pequena, não sendo capazes de ocupar todo o volume do poro (Figura 29).

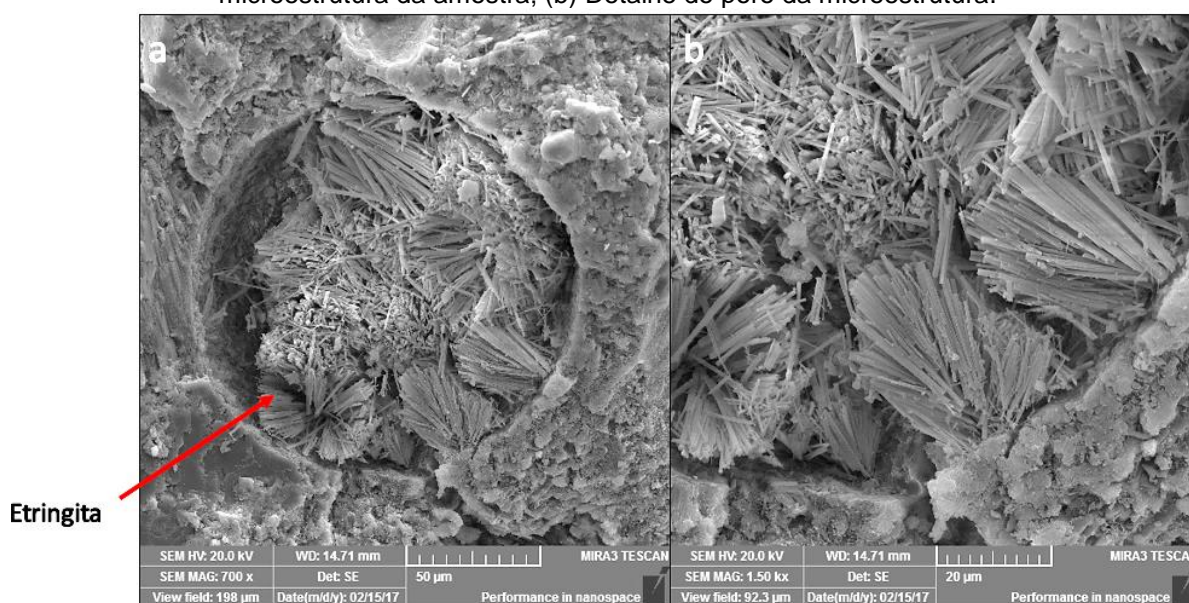
Figura 29 – Imagem de micrografia de um poro presente na microestrutura da argamassa de referência após 100 dias de imersão em solução saturada de cal.



Fonte: A autora.

Já os poros presentes na microestrutura da argamassa de referência após 100 dias de imersão em solução sulfato apresentaram uma grande quantidade de cristais aciculares de etringita (Figura 30), originados pela reação entre os íons sulfato da solução e os compostos da hidratação do cimento, que primeiramente ocupam os poros e microfissuras da argamassa (SANTHANAM; COHEN; OLEK, 2002; SKALNY, 2002).

Figura 30 - Imagem de micrografia de um poro presente na microestrutura da argamassa de referência após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio: (a) Poro presente na microestrutura da amostra; (b) Detalhe do poro da microestrutura.

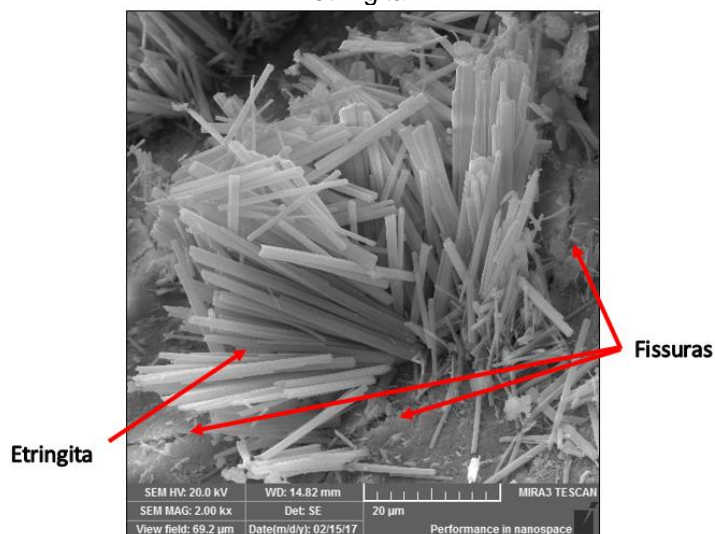


Fonte: A autora.

Os cristais ocupam todo volume do poro e passam a gerar tensões de tração no interior no material, que ao excederem a resistência do material geram fissuras (Figura 31). Este comportamento foi constatado em todas argamassas submetidas ao ataque por sulfato.

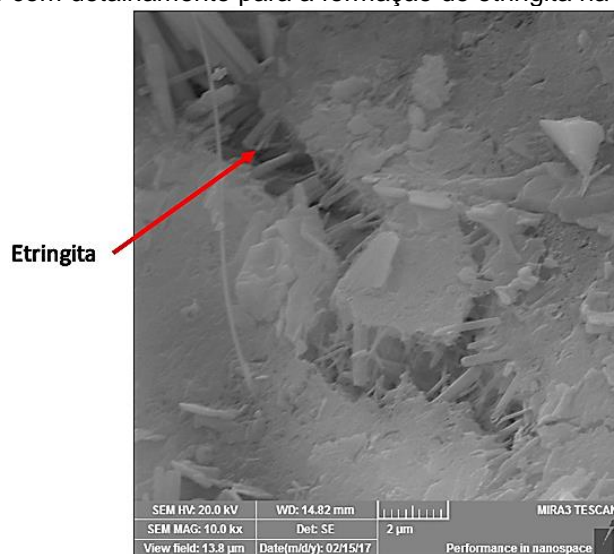
Os cristais passam a depositar-se nas fissuras originadas pelas tensões (Figura 32), aumentando-as de tamanho e permitindo a entrada da solução de sulfato para regiões cada vez mais internas do material, avançando então o ataque. Esta sequência observada está de acordo a apresentada por Santhanam, Cohen e Olek (2002).

Figura 31 – Imagem de micrografia da argamassa de referência após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio com detalhamento para a microfissuração da argamassa e cristais de etringita.



Fonte: A autora.

Figura 32 - Imagem de micrografia da argamassa de referência após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio com detalhamento para a formação de etringita na microfissuração da argamassa.

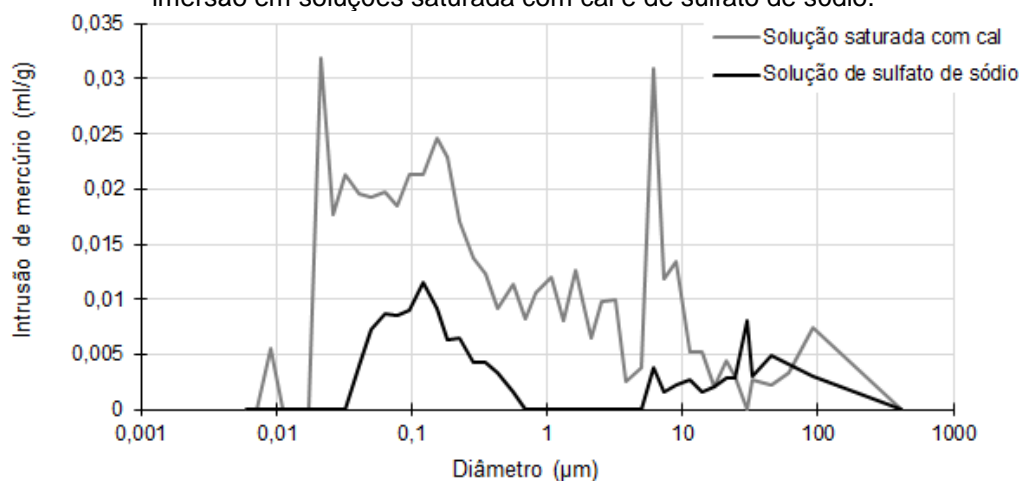


Fonte: A autora.

As argamassas de referência apresentaram porosidade de 11,05 e 2,55% depois de 100 dias de imersão em solução saturada com cal e solução de sulfato de sódio, respectivamente. É possível observar uma redução de quase 77% na porosidade da argamassa quando submetida ao ataque por sulfatos. Este resultado está de acordo com a as imagens da microestrutura das argamassas, tendo em vista que as argamassas sujeitas a imersão em solução agressiva tiveram seus poros ocupados por cristais de etringita, enquanto as argamassas imersas em solução

saturada com cal apresentaram pequena quantidade de cristais nos poros. Na Figura 33 é apresentada a distribuição dos tamanhos dos poros da argamassa de referência.

Figura 33 - Distribuição dos tamanhos dos poros da argamassa de referência após 100 dias de imersão em solução saturada com cal e de sulfato de sódio.



Fonte: A autora.

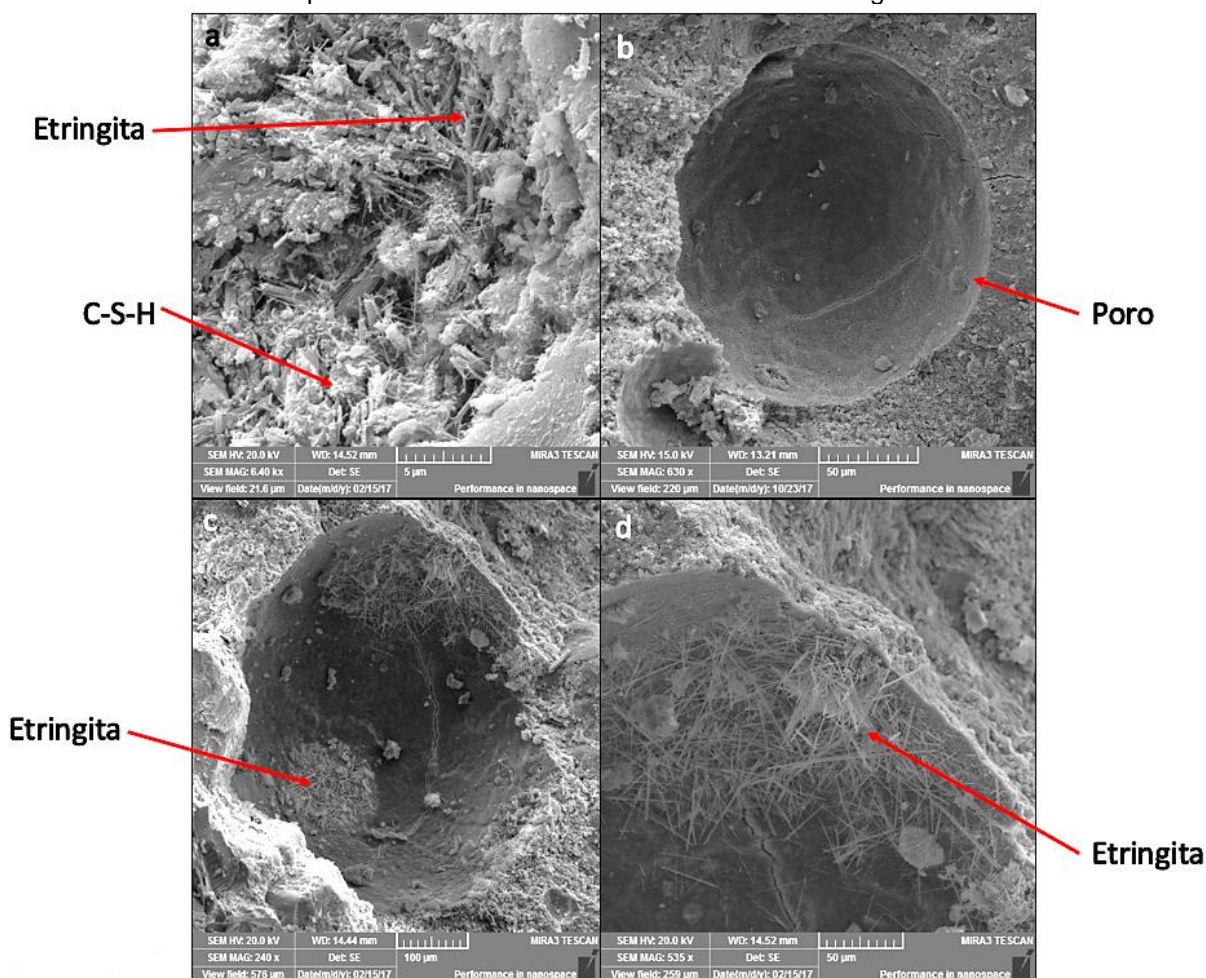
É possível notar que, apesar da porosidade total ter reduzido, a argamassa que sofreu o ataque apresenta maior quantidade os poros com diâmetros maiores em relação a quantidade total do que a argamassa imersa em solução de cal, não possuindo mais poros com diâmetro inferior a $0,03 \mu\text{m}$ nem poros entre $0,8$ e $5 \mu\text{m}$. Esta alteração possivelmente se deve ao fato dos cristais formados tamponarem os poros menores. Também pode-se observar um aumento nos poros com diâmetro em torno de $30 \mu\text{m}$, que atribui-se as microfissuras originadas pelo tensionamento causado pelos cristais expansivos. Estes resultados corroboram com o estudo de Müllauer et al. (2013), que também observaram tamponamento dos poros de menor diâmetro pelos cristais de etringita, e aumento nos poros maiores pelo tensionamento gerado por estes cristais.

5.3.2 Argamassa com Adição de Pó de Cerâmica Vermelha

A argamassa contendo 20% de adição de pó de cerâmica vermelha que ficou imersa em solução saturada com cal apresentou microestrutura semelhante a argamassa de referência nesta mesma solução. Identificaram-se formações amorfas de C-S-H e concomitantemente cristais aciculares de etringita (Figura 34), sendo estes compostos formados pela hidratação do cimento. Além disso, os poros encontravam-se praticamente vazios, com poucos cristais de etringita (Figura 34b, Figura 34c e

Figura 34d), evidenciando a diferença para os poros das argamassas imersas em solução de sulfato de sódio. Ressalta-se que a etringita encontrada deve-se somente a hidratação do cimento, pois a adição possui baixo teor de enxofre, conforme identificado no ensaio de FRX.

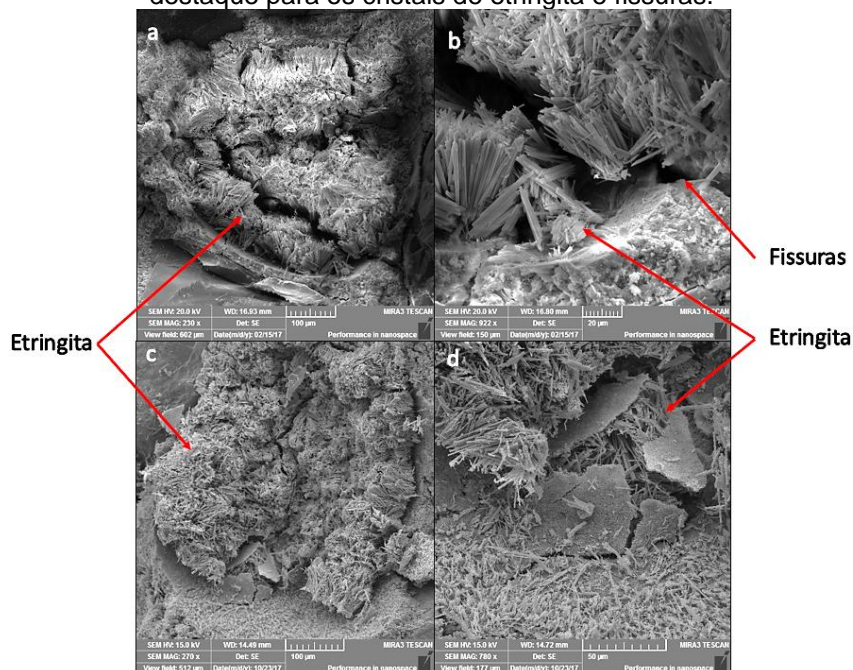
Figura 34 - Imagem de micrografia da argamassa com 20% de adição de pó de cerâmica vermelha após 100 dias de imersão em solução saturada com cal: (a) C-S-H e cristais de etringita; (b) Poro presente na microestrutura; (c) Poro presente na microestrutura com cristais de etringita; (d) Poro presente na microestrutura com cristais de etringita.



Fonte: A autora.

Já a argamassa com 20% de adição de pó de cerâmica vermelha imersa em solução de sulfato apresentou microestrutura que corresponde a formada pelo ataque por sulfatos: poros preenchidos por cristais de etringita, gerando fissuras no material (Figura 35). Na Figura 35d é possível verificar ainda que as paredes do poro quebraram em forma de placas, devido ao tensionamento originado pelos cristais nas paredes do poro.

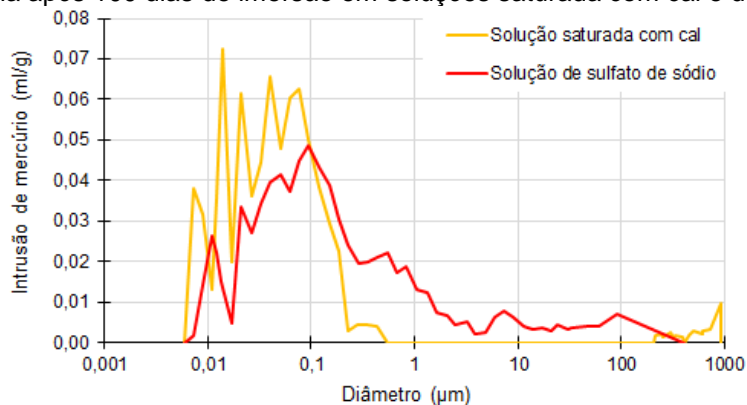
Figura 35 – Imagem de micrografia da argamassa com 20% de adição de pó de cerâmica vermelha após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio: poros presentes na microestrutura com destaque para os cristais de etringita e fissuras.



Fonte: A autora.

A argamassa com adição de pó de cerâmica vermelha, imersa em solução saturada com cal, apresentou porosidade de 16,25%, enquanto a imersa em solução de sulfato de sódio, porosidade de 15,48%, uma redução de aproximadamente 5%. Acredita-se que a porosidade praticamente não foi alterada, apesar da colmatação dos poros por cristais de etringita, devido as microfissuras geradas pelo tensionamento originado pelos cristais e pela maior porosidade da argamassa com adição cerâmica. A Figura 36 apresenta a distribuição dos tamanhos dos poros da argamassa com 20% de adição de pó de cerâmica vermelha.

Figura 36 - Distribuição dos tamanhos dos poros da argamassa com 20% de adição de pó de cerâmica vermelha após 100 dias de imersão em soluções saturada com cal e de sulfato de sódio.



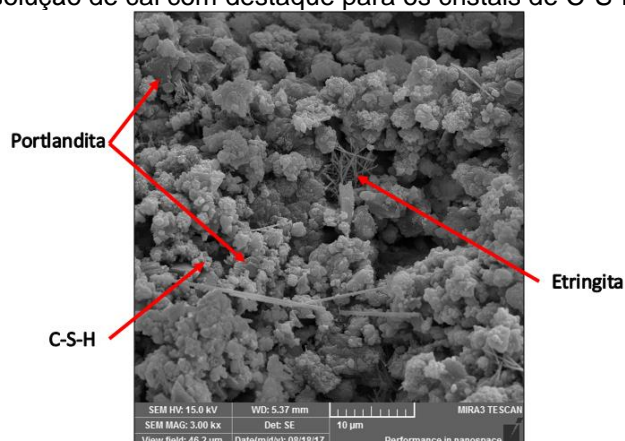
Fonte: A autora.

Percebe-se que com o ataque os poros menores foram parcialmente tamponados devido a formação dos cristais de etringita, e o houve aparecimento de poros com diâmetros entre 0,2 e 200 μm , que se atribuem as fissuras originadas com o avanço da manifestação patológica. Os poros com diâmetros acima de 400 μm também foram tamponados.

5.3.3 Argamassa com Adição de Pó de Concreto

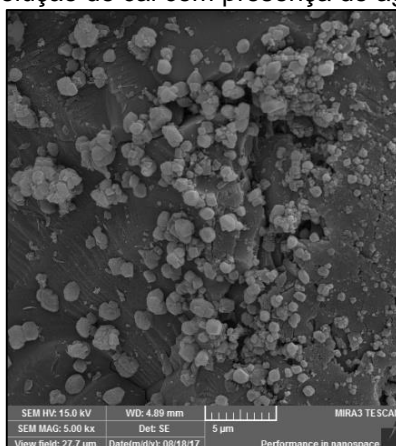
A Figura 37 mostra a microestrutura da argamassa contendo 20% de pó de concreto após 100 dias em imersão em solução saturada com cal, onde identifica-se a presença dos componentes da hidratação do cimento: formações amorfas de C-S-H, placas hexagonais paralelas de portlandita e cristais aciculares de etringita. Além disso, é possível observar pontos aglomerados na pasta pela presença da adição de resíduo de concreto que não reagiu (Figura 38).

Figura 37 - Imagem de micrografia da argamassa com 20% de adição de pó de concreto após 100 dias de imersão em solução de cal com destaque para os cristais de C-S-H, portlandita e etringita.



Fonte: A autora.

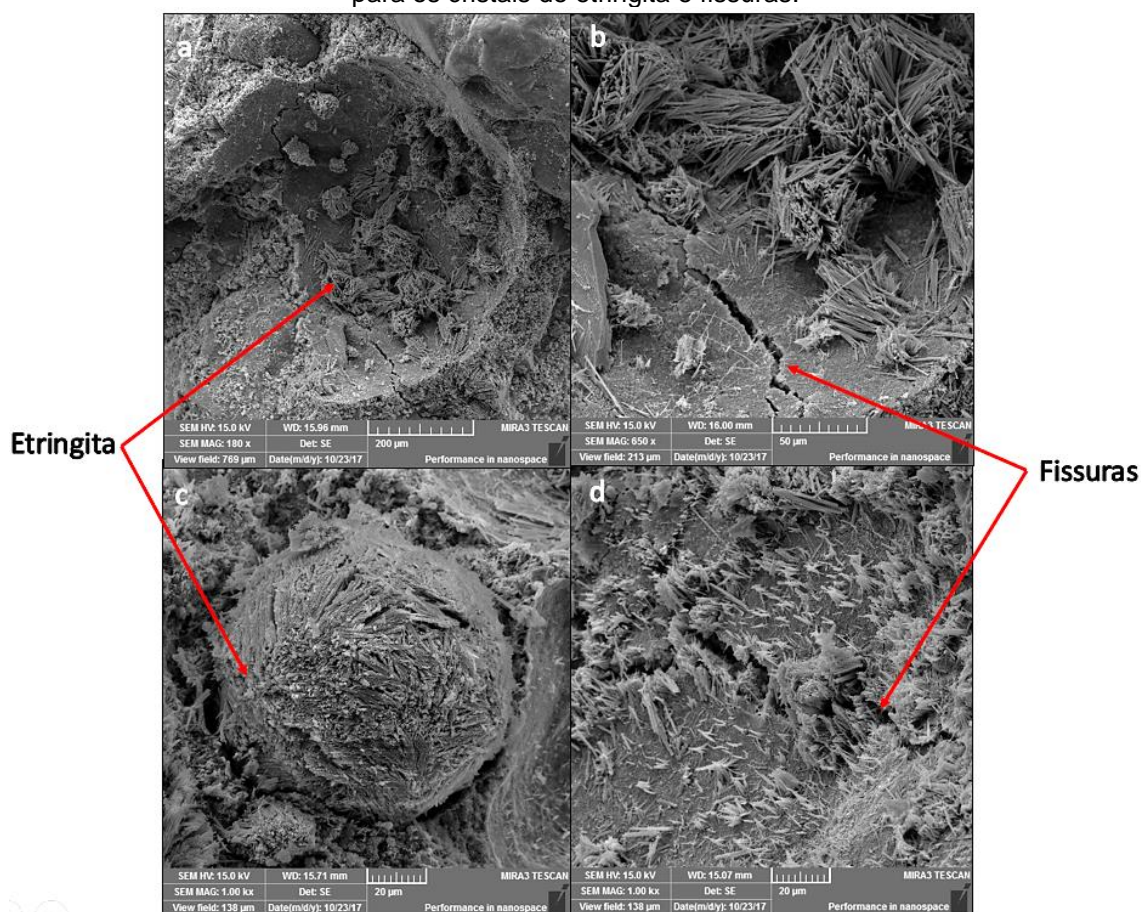
Figura 38 – Imagem de micrografia da argamassa com 20% de adição de pó de concreto após 100 dias de imersão em solução de cal com presença de aglomerados da adição.



Fonte: A autora.

A argamassa com 20% de adição de resíduo de concreto que ficou imersa em solução de sulfato de sódio (Figura 39), assim como a de referência e a contendo adição de cerâmica que ficaram sujeitas as soluções agressivas, apresentou cristais de etringita preenchendo seus poros e a ocorrência de microfissuras devido ao tensionamento gerado por estes compostos, o que está de acordo com a microestrutura de uma peça que sofreu o ataque por sulfatos (SANTHANAM; COHEN; OLEK, 2002; SKALNY, 2002). Nesta argamassa, verificou-se ainda em alguns casos os cristais ocupando um volume maior que o do poro (Figura 39c).

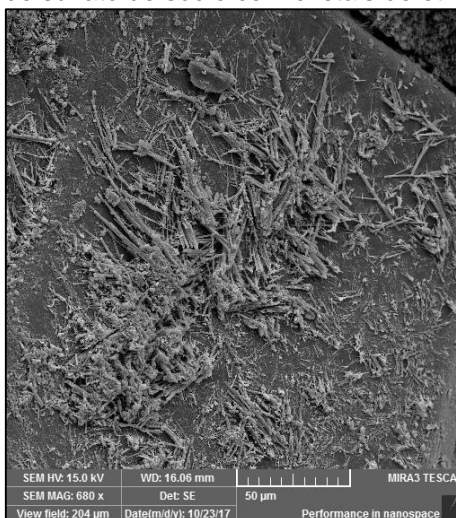
Figura 39 – Imagem de micrografia da argamassa com 20% de adição de pó de concreto após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio: poros presentes na microestrutura com destaque para os cristais de etringita e fissuras.



Fonte: A autora.

Além disso, diferentemente do que foi observado nas demais argamassas submetidas a imersão na solução agressiva, a argamassa contendo resíduo de concreto os cristais de etringita não restringiram-se aos poros da microestrutura, mas também se apresentaram na superfície da pasta (Figura 40).

Figura 40 - Imagem de micrografia da argamassa com 20% de adição de pó de concreto após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio com cristais de etringita presentes na superfície.



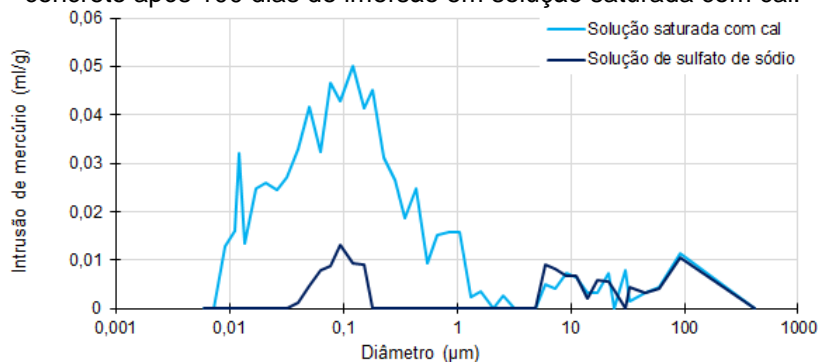
Fonte: A autora.

Destaca-se que esta foi a argamassa que sofreu a maior expansão resultante durante o ataque, e sua microestrutura condiz com a agressividade do ataque, pois observou-se uma maior quantidade de etringita unido ao fato destes cristais estarem distribuídos em uma maior parte da argamassa. Acredita-se que este comportamento se deve a composição da adição. Ao substituir-se parcialmente o cimento, diminui-se a quantidade de portlandita passível de reagir com os íons sulfatos. Porém, o resíduo de concreto possui portlandita e calcita em sua composição, servindo de fonte de íons cálcio para as reações de uma forma distribuída na argamassa.

Notou-se também que neste caso os cristais de etringita originados formaram aglomerados de cristais (Figura 39b). Acredita-se que a adição, pela disponibilidade de portlandita e calcita, agiu como ponto de nucleação para a formação da etringita.

As argamassas com adição de pó de concreto imersas em solução saturada com cal e solução com sulfato de sódio apresentaram, respectivamente, porosidade de 13,56 e 3,78%. Percebe uma redução de mais de 70% da porosidade na argamassa sujeita a solução agressiva, que corrobora com os resultados encontrados nas imagens da microestrutura, tendo em vista a grande quantidade de produtos expansivos do ataque por sulfatos formados colmatando os poros da argamassa. A Figura 41 apresenta a distribuição dos tamanhos dos poros das argamassas contendo resíduo de concreto.

Figura 41 - Distribuição dos tamanhos dos poros da argamassa com 20% de adição de pó de concreto após 100 dias de imersão em solução saturada com cal.



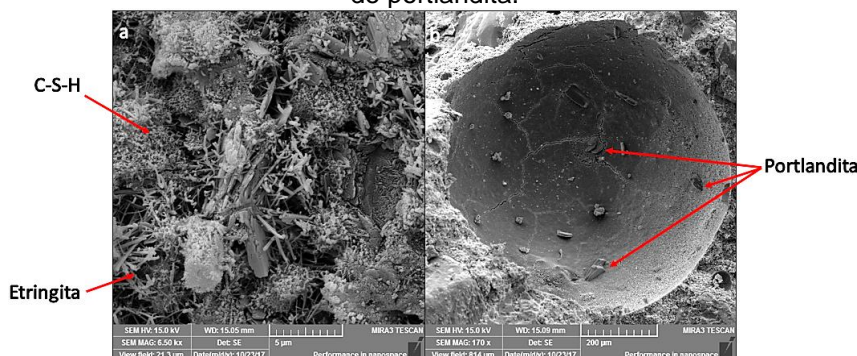
Fonte: A autora.

Percebe-se que, além da redução da porosidade, há um deslocamento da distribuição dos tamanhos dos poros para regiões de maiores diâmetros e não há mais poros com diâmetros abaixo de 0,03 µm e nem entre aproximadamente 0,2 e 5 µm na argamassa sujeita ao ataque por sulfatos, evidenciando que os poros menores foram tamponados pelos cristais expansivos originados no ataque por sulfatos.

5.3.4 Argamassa com Adição de Fíler Calcário

Na argamassa contendo 20% de fíler calcário que ficou exposta a solução saturada com cal, assim como nas demais imersas neste tipo de solução, foi possível identificar compostos amorfos de C-S-H (Figura 42a), cristais aciculares de etringita (Figura 42a) e placas hexagonais de portlandita (Figura 42b). Além disso, os poros desta argamassa (Figura 42b) também não são completamente preenchidos por compostos como ocorre nas argamassas sujeitas ao ataque por sulfatos.

Figura 42 - Imagens dos cristais presentes na microestrutura da argamassa com 20% de adição de fíler calcário após 100 dias de imersão em solução saturada de cal: (a) C-S-H e etringita; (b) Placas de portlandita.

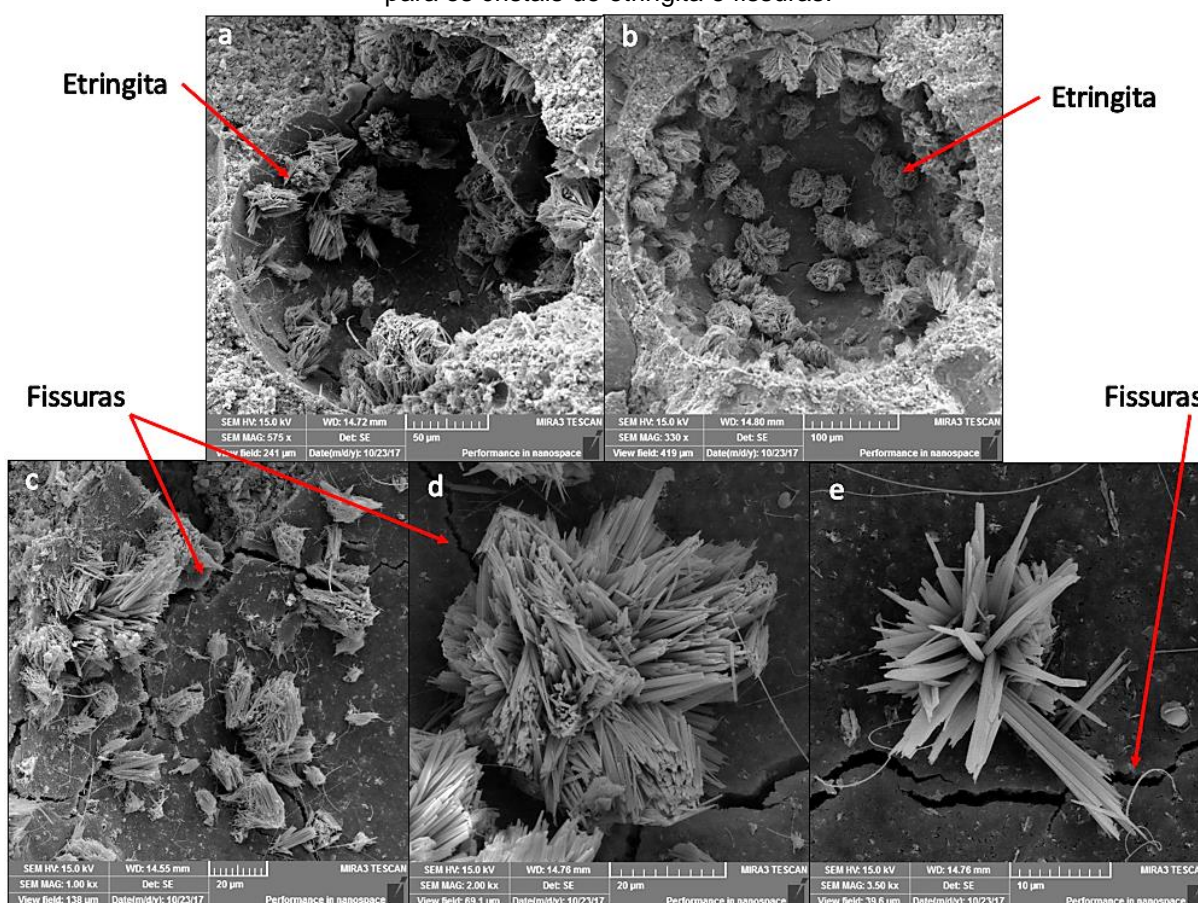


Fonte: A autora.

Na argamassa de mesma composição, após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio é possível observar a presença dos cristais de etringita nos poros

da argamassa (Figura 43a e Figura 43b), bem como as microfissuras geradas por eles (Figura 43c, Figura 43d e Figura 43e), características do ataque por sulfatos. Nota-se que, assim como na argamassa contendo resíduo de concreto, os cristais expansivos se formaram de maneira aglomerada, o que atribui-se aos componentes compostos por cálcio agirem como ponto de nucleação para formação da etringita.

Figura 43 - Imagem de micrografia da argamassa de com 20% de adição de fíler calcário após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio: poros presentes na microestrutura com destaque para os cristais de etringita e fissuras.



Fonte: A autora.

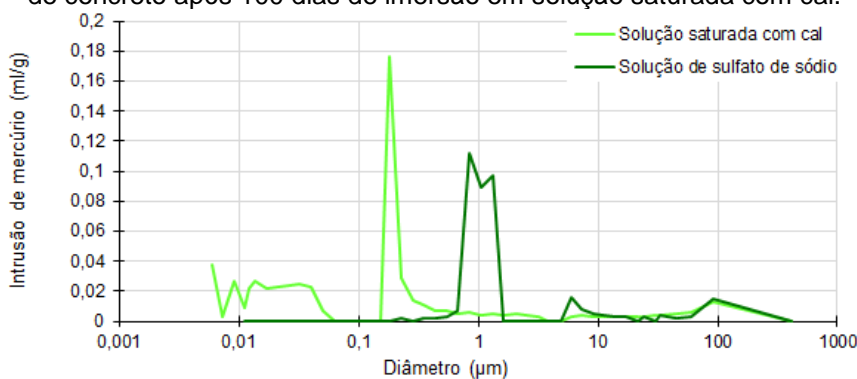
Destaca-se que, apesar de ser verificada a presença de etringita, os poros desta argamassa não encontram-se completamente preenchidos pelos cristais, como nas demais argamassas submetidas a exposição de solução de sulfato de sódio (Figura 30, Figura 35 e Figura 39). Esta característica da microestrutura evidencia um ataque por íons sulfato de menor intensidade, o que está de acordo com a expansão apresentada pela argamassa contendo 20% de fíler calcário, que apresentou o menor valor de expansão resultante, acima somente da argamassa com 12% de substituição por fíler calcário. Acredita-se que, apesar de haver cálcio em sua composição, ele não

se encontre de forma reativa como o presente no resíduo do concreto, não havendo assim disponibilidade de cálcio para formar etringita. Além disso, o fíler calcário pode ter mitigado o ataque por sulfatos por poder melhorar o empacotamento granulométrico das partículas, o que talvez não seja possível com as outras adições, tendo em vista suas porosidades e demanda de água na mistura.

Nas argamassas com 20% de adição de fíler calcário, após 100 dias de imersão em solução saturada com cal e solução de sulfato de sódio, encontrou-se uma porosidade de 13,04 e 8,29%, respectivamente, que corresponde a uma redução de aproximadamente 36% na porosidade de argamassas sujeitas ao ataque por íons sulfato. Este resultado está de acordo com as micrografias apresentadas pela argamassa com fíler calcário, onde observou-se a presença de etringita nos poros da microestrutura da argamassa imersa na solução agressiva, e também está de acordo com a avaliação da expansão das barras de argamassa e com as porosimetrias das argamassas de referência, com 20% de adição de cerâmica vermelha e 20% de pó de concreto, pois foi a argamassa com menor expansão resultante e menor redução de porosidade, evidenciando a menor formação de cristais expansivos e intensidade do ataque.

Na Figura 44 consta a distribuição dos tamanhos dos poros das argamassas com adição de fíler calcário, imersas durante 100 dias nas diferentes soluções utilizadas.

Figura 44 - Distribuição dos tamanhos dos poros da argamassa com 20% de adição de fíler calcário de concreto após 100 dias de imersão em solução saturada com cal.



Fonte: A autora.

Nota-se que também há um deslocamento da curva para regiões de maiores diâmetros de poros na argamassa imersa em solução de sulfato de sódio, não apresentando mais poros com diâmetro inferior a 0,2 µm, e ainda, apresentando uma maior proporção de poros com diâmetros em torno de 1 µm do que comparado a

argamassa de mesma composição imersa em solução saturada com cal. Acredita-se que os poros menores tenham sido tamponados devido a presença dos cristais de etringita, e o aumento nos poros de 1 μm tenham ocorrido devido a formação das microfissuras.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para análise completa dos ensaios realizados quanto a pozolanicidade das adições, elaborou-se um quadro com os resultados apresentados nos ensaios, mostrado na Figura 45.

Figura 45 – Quadro resumo dos ensaios de avaliação da pozolanicidade.

Parâmetro	Adição mineral		
	Pó de cerâmica vermelha	Pó de concreto	Fíler calcário
Requisitos químicos da NBR 12653 (ABNT, 2014)			
Valor mínimo de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	Atende	Não atende	Não atende
Valor máximo de SO_3	Atende	Atende	Atende
Valor máximo de álcalis disponíveis em Na_2O	Atende	Atende	Atende
Perda ao fogo máxima	Atende	Não atende	Não atende
Teor de umidade máximo	Atende	Atende	Atende
Requisitos físicos da NBR 12653 (ABNT, 2014)			
Valor máximo de material retido na peneira 45m (realizado por granulometria a laser)	Não atende	Atende	Não atende
Resistência mínima no IAP com cal	Atende	Não atende	Não atende
Resistência mínima no ID com cimento	Atende	Não atende	Não atende
Outros ensaios			
Presença de halo amorfo na DRX	Não atende	Não atende	Não atende
Fixação mínima de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ no Chapelle modificado estabelecida por Raverdy et al. (1980)	Não atende	Não se aplica	Não se aplica

Fonte: A autora.

Analisando primeiramente a adição de pó de cerâmica vermelha, identifica-se que, apesar de neste estudo o resultado ser positivo em relação aos parâmetros exigidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014) para pozolanas, os valores encontrados, tanto para estes ensaios, quanto no de Chapelle modificado e DRX, que não são exigências da norma, quando comparados a outras pesquisas, não se observa um padrão no comportamento. Isso pode ocorrer devido a variações na composição da massa cerâmica e dos ciclos e temperaturas de queima adotados no processo produtivo. Além disso, variações na preparação do material levam a diferenças na finura, distribuição granulométrica, demanda de água para as argamassas e distribuição de poros das argamassas, por exemplo.

Já o pó de concreto, além de não apresentar halo amorfo indicando reatividade, não atendeu a todos parâmetros da NBR 12653. Oksri-Nelfia et al. (2016), encontraram comportamento semelhante para esta adição e o fíler calcário. Neste estudo, o resíduo de concreto apresentou resultados superiores aos do fíler nos ensaios de avaliação da pozolanicidade. Ressalta-se que o concreto utilizado como adição nas pesquisas possui composições, idades e condições de exposições variadas. Na prática, isso também ocorrerá.

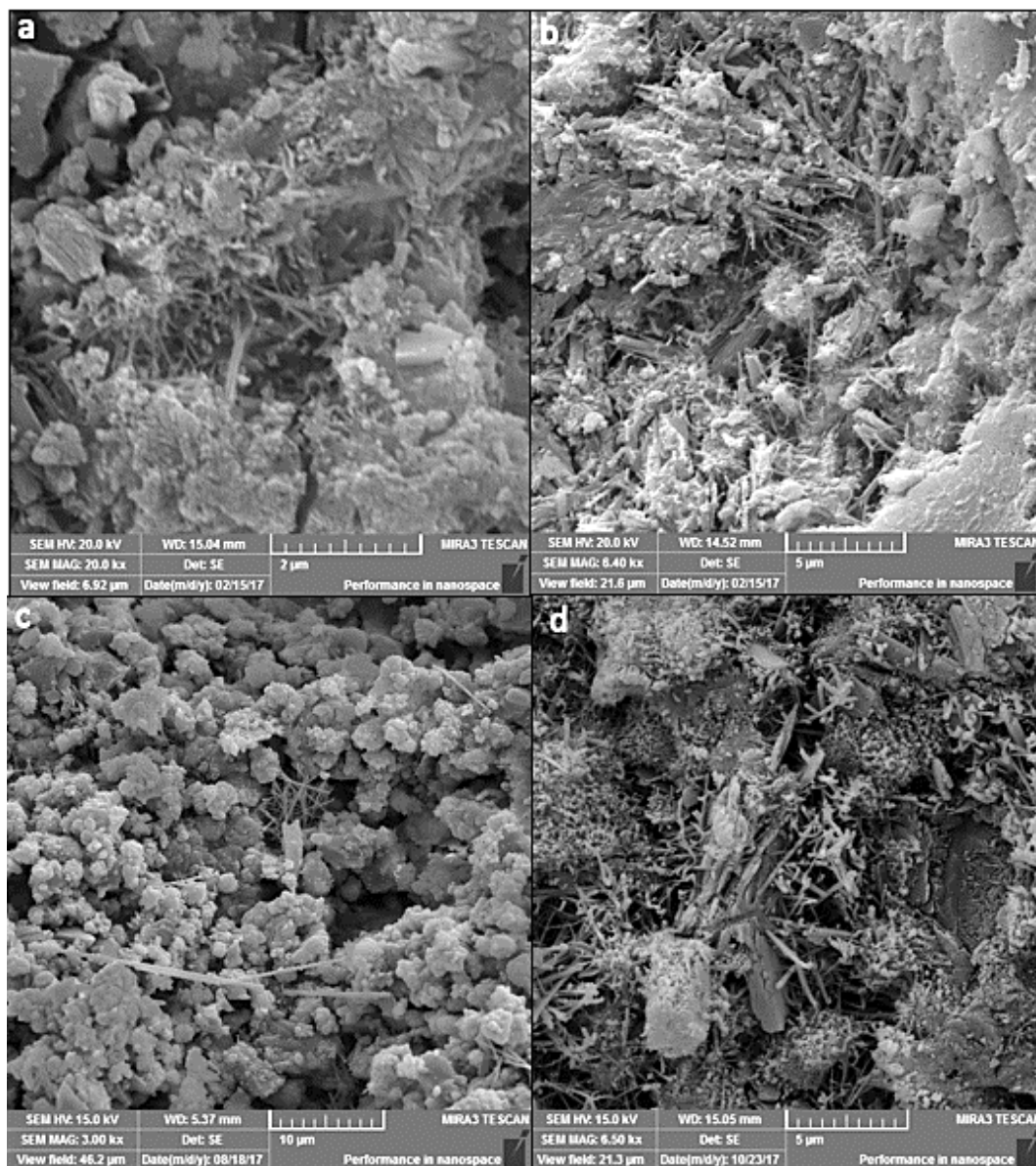
Tendo em vista a variabilidade dos materiais estudados, recomenda-se análise do resíduo que será efetivamente utilizado, verificando sua atividade pozolânica ou possibilidade de uso como material de enchimento, para assim determinar a porcentagem ideal de substituição de forma a não comprometer o desempenho da estrutura.

A NBR 12653 (ABNT, 2014), exige uma quantidade mínima de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$. Porém, a normativa não exige ensaios que avaliem se a sílica é amorfa ou não, e se ela estiver cristalina não é reativa. Desta forma, destaca-se a importância de realizar ensaios que avaliem o estado cristalino da sílica, realizado nesta pesquisa pelo ensaio de DRX.

No que diz respeito ao ataque por sulfatos, as adições de pó de cerâmica vermelha e de concreto não foram capazes de mitigar o ataque em nenhuma das porcentagens adotadas. As argamassas contendo 12 e 20% de adição de fíler calcário foram as únicas que apresentaram expansão resultante inferior a referência em todas idades a partir dos 42 dias, sendo que a primeira atendeu ainda ao limite proposto por Marciano (1993 apud Hoppe Filho et al., 2015), sendo considerada resistente ao ataque por sulfatos. Os teores de melhor desempenho para cada adição foram a substituição do cimento em 5% para o material cerâmico e de resíduo de concreto, e para o fíler calcário o teor de 12%.

As imagens da microestrutura da argamassa de referência e das argamassas com as adições utilizadas estão de acordo com o apresentado pela literatura tanto na morfologia dos cristais quanto no comportamento frente ao ataque por sulfatos. Nas argamassas imersas em solução saturada com cal foi possível observar-se cristais aciculares de etringita, formações amorfas de C-S-H e placas hexagonais de portlandita, sendo estes compostos formados pela hidratação do cimento (Figura 46).

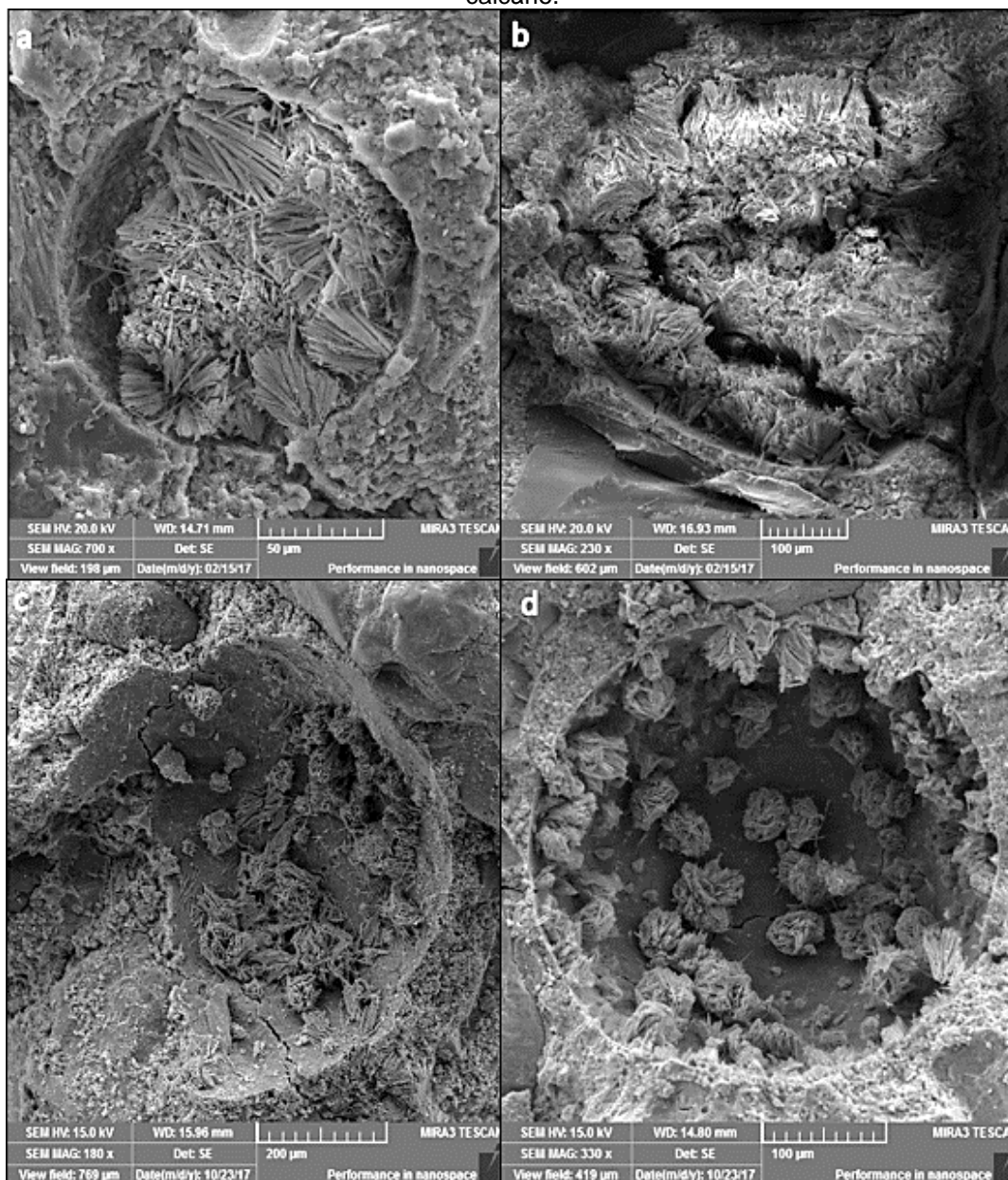
Figura 46 - Imagem de micrografia da microestrutura das argamassas após 100 dias de imersão em solução saturada com cal: (a) Argamassa de referência; (b) Argamassa com adição de pó cerâmica vermelha; (c) Argamassa com adição de pó de concreto; (d) Argamassa com adição de fíler calcário.



Fonte: A autora.

Já as argamassas sujeitas ao ataque por sulfatos apresentaram uma grande quantidade de cristais de etringita nos poros da argamassa, composto expansivo formado pela reação entre os componentes da hidratação do cimento e os íons sulfatos presentes na solução (Figura 47). Observou-se que os cristais se formaram nos poros da microestrutura, e no caso da argamassa com adição de resíduo de concreto, também na superfície da pasta, distribuindo-se por toda argamassa. Além disso, foi possível observar a formação de microfissuras devido ao tensionamento gerado pelos cristais de etringita, e ainda, a formação de cristais dentro das microfissuras.

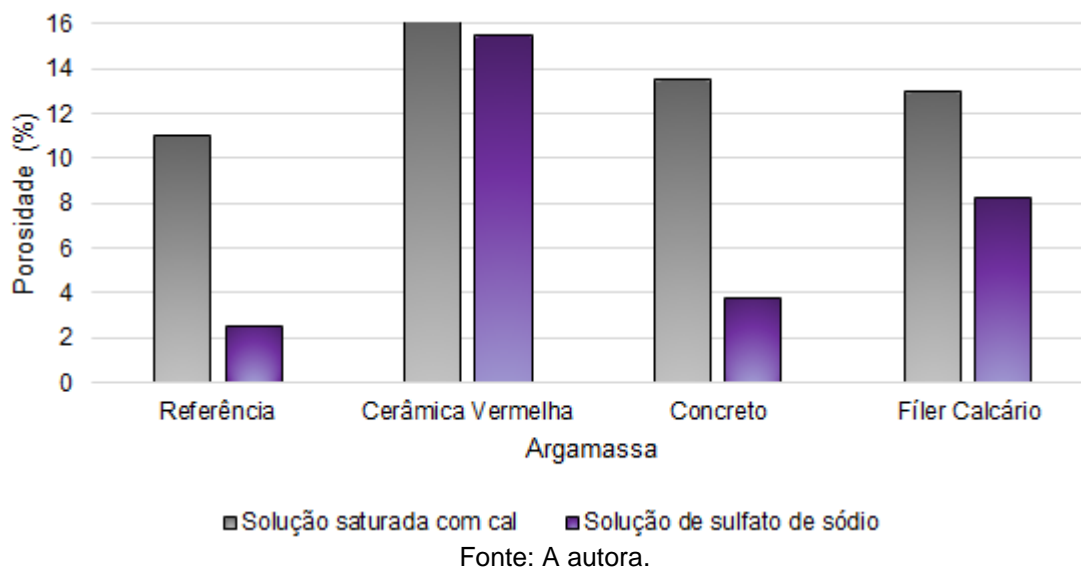
Figura 47 - Imagem de micrografia da microestrutura das argamassas após 100 dias de imersão em solução de sulfato de sódio: (a) Argamassa de referência; (b) Argamassa com adição de pó de cerâmica vermelha; (c) Argamassa com adição de pó de concreto; (d) Argamassa com adição de fíler calcário.



Fonte: A autora.

Para avaliação completa dos resultados de porosimetria, elaborou-se um gráfico contendo as porosidades das argamassas analisadas imersas em solução saturada com cal e de sulfato de sódio (Figura 48).

Figura 48 – Porosidades das argamassas após 100 dias de imersão em soluções saturada com cal e de sulfato de sódio.



Entre as argamassas imersas em solução de cal, a de referência foi a que apresentou menor porosidade e a com adição de cerâmica vermelha a maior porosidade. Nas imersas em solução de sulfato de sódio o comportamento foi o mesmo. As argamassas que sofreram o ataque por sulfatos apresentaram redução na porosidade quando comparadas as de mesma composição em solução com cal. Este comportamento se deve a presença dos cristais de etringita nos poros da microestrutura da argamassa atacada, resultando em uma diminuição da porosidade. Com o ataque por sulfatos, percebe-se que as curvas de distribuição de tamanho dos poros se deslocam para regiões de maiores diâmetros, indicando que os poros de menor diâmetro foram tamponados.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal a avaliação da pozolanicidade de adições de pó de cerâmica vermelha e pó de concreto, e ainda, o potencial destas adições em mitigar o ataque por sulfatos de sódio em barras de argamassa, utilizando também fíler calcário como adição para comparações. Sendo assim, seguem as conclusões com base nas análises dos ensaios realizados.

O pó de cerâmica vermelha, apesar de não atingir o valor mínimo de fixação de hidróxido de cálcio no ensaio de Chapelle modificado, atendeu aos requisitos apresentados pela NBR 12653 (ABNT, 2014) para pozolanas na composição química, umidade, perda ao fogo, IAP com cal e ID com cimento.

O resíduo de concreto atendeu somente os parâmetros de umidade, teor de óxido de enxofre e de álcalis disponíveis determinados pela NBR 12653 (ABNT, 2014). A adição apresentou perda ao fogo acima do limite máximo, teores de óxido de sílica, óxido de alumínio e óxido de ferro abaixo do limite mínimo e ainda resistências inferiores as mínimas nos ensaios de IAP com cal e ID com cimento.

O fíler calcário atendeu somente aos mesmos parâmetros que o pó de concreto, porém com desempenho inferior a ele em todos ensaios de avaliação de pozolanicidade, com exceção da umidade, que apresentou valor pouco menor que do resíduo de concreto.

Em nenhuma das adições utilizadas nessa pesquisa pode-se identificar halo amorfo nos difratogramas de raios X, indicando que não há reatividade nos materiais, não caracterizando caráter pozolânico. Conclui-se assim que, para essas condicionantes, as adições não são consideradas pozolanas, podendo atribuir seus comportamentos nos ensaios ao efeito fíler que exerceram nas argamassas.

A substituição parcial do cimento Portland pelas adições minerais, nos diferentes teores utilizados, propiciou a redução da expansão resultante apenas com o fíler calcário nos teores de 12 e 20%. As adições de pó de cerâmica vermelha e pó de concreto não foram eficientes em mitigar o ataque por sulfatos, sendo que a última apresentou os maiores valores de expansão resultante observados neste trabalho. As argamassas sujeitas ao ataque por sulfatos apresentaram a presença de cristais de etringita nos poros da microestrutura, justificando a expansão das barras.

Observou-se uma redução na porosidade das argamassas sujeitas a solução de sulfato de sódio, que se deve a formação dos cristais de etringita nos poros na microestrutura. Com o ataque, as argamassas mudaram também a distribuição do

tamanho dos poros, indicando que os poros de menores diâmetros foram tamponados pelos cristais expansivos.

Apesar dos resultados observados indicarem uma redução no desempenho das argamassas com o uso das adições de pó cerâmica vermelha e de concreto, entende-se que a presença destas adições é inevitável em matrizes cimentícias de compósitos que contenham resíduos e construção e demolição. Por isso, estudos devem ser desenvolvidos buscando entender as variáveis que podem potencializar seu uso a fim de minimizar seus aspectos negativos.

Destaca-se como uma alternativa o estudo de adições combinadas buscando-se potencializar suas propriedades e minimizar sua influência negativa no desempenho, investigando as mudanças microestruturais associadas as propriedades mecânicas de concretos e argamassas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL - ABDI. **Estudo técnico setorial da cerâmica vermelha**. 2010. Disponível em: <http://www.abdi.com.br/Estudo/05prova_p%C3%A1gina%20%C3%BAnica%20-%20Cer%C3%A2mica%20Vermelha.pdf>. Acesso em julho de 2017.

ALBERS, A. P. F.; MELCHIADES, F. G.; MACHADO, R.; BALDO, J. B.; BOSHI, A.O. **Um método simples de caracterização de argilo-minerais por difração de raios X**. Cerâmica, vol. 48, nº305, p. 34-37, 2002.

ALBUQUERQUE, R. T. O.; LIMA, N. L.. **Adições minerais ao concreto: melhores propriedades, maior economia e mais sustentabilidade**. Revista Interdisciplinar da Universidade Veiga de Almeida. Página 57. Julho/Dezembro de 2014.

ANDRADE, J. J. O.. **Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA - ABCERAM. **Informações técnicas – definição e classificação**. 2017a. Disponível em: <<http://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>>. Acesso em julho de 2017.

_____. **Informações técnicas - processos de fabricação**. 2017b. Disponível em: <<http://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>>. Acesso em julho de 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732: Cimento Portland comum**. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5735: Cimento Portland de alto forno**. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5736: Cimento Portland pozolânico**. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5737: Cimento Portland resistente a sulfatos**. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 5751: Materiais pozolânicos — Determinação da atividade pozolânica — Índice de atividade pozolânica com cal — Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 5752: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7211: Agregados para Concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 7214:** Areia Normal para ensaio de Cimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 11578:** Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 13583:** Cimento Portland – Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 15116:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15894-3:** Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15895:** Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 pm. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR NM 18:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 23:** Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 24:** Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA - ANICER. **Setor.** 2017. Disponível em: <<http://anicer.com.br/setor/>>. Acesso em julho de 2017.

ATAHAN, H.N.; DIKME, D.. **Use of mineral admixtures for enhanced resistance against sulfate attack.** Construction and Building Materials 25 (2011) 3450–3457.

AY, N.; ÜNAL, M.. **The use of waste ceramic tile in cement production.** Cement and Concrete Research 30 (2000) 497 - 499.

BARTHEL, M.; RÜBNER, K.; KÜHNE, H.C; ROGGE, A.; DEHN, F.. **From waste materials to products for use in the cement industry.** Advances in Cement Research, 2016, 28(7), 458–468.

BAUR, I.; KELLER, P.; MAVROCORDATOS, D.; WEHRLI, B.; JOHNSON, C. A.. **Dissolution-precipitation behaviour of ettringite, monosulfate, and calcium silicate hydrate.** Cement and Concrete Research 34 (2004) 341 – 348.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa.** 2010. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0228/228962.pdf>. Acesso em janeiro de 2017.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil.** 2ª Edição. 2014. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0235/235580.pdf>. Acesso em janeiro de 2017.

BRASIL. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos - 2015.** Brasília, DF, 2017.

BRASIL. Ministério das Cidades. Ministério do Meio Ambiente. **Área de manejo de resíduos da construção e resíduos volumosos: Orientação para o seu licenciamento e aplicação da resolução CONAMA 307/2002.** Brasília, DF, 2005.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Análise-síntese da transformação mineral no país.** 2009. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256652/P53_RT79_Analise_Sxntese_da_Transformaxo_Mineral_no_Paxs.pdf/90464f97-1fe0-4833-9363-e1fd41c147a4>. Acesso em julho de 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA Nº 307, de 05 de julho de 2002.** Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial de União, Brasília, DF. 17 de julho de 2002.

CABRAL, A. E. B.. **Modelagem de propriedades mecânicas e durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD.** Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. São Carlos. 2007.

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C. C; RIBEIRO, J. L. D.; RAVINDRARAJAH, R. S.. **Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha.** Cerâmica 55 (2009) 448-460.

CALLISTER Jr, W. D.; RETHWISCH, D. G.. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 8ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CANOVAS, M. F.. **Patologia y Terapeutica del Hermigon Armado**. 1ª Edição. Madrid: Editorial Dossat, 1977.

CASANOVA, I.; AGULLÓ, L.; AGUADO, A. **Aggregate expansivity due to sulfide oxidation – I. Reactions system and rate model**. Cement and Concrete Research. vol. 26, n. 7, p. 993-998, 1996.

CASSOL, G.. **Caracterização e utilização do resíduo de cerâmica vermelha como material pozolânico em matrizes cimentantes**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Ilha Solteira, 2015.

CHESS, P. M.; BROOMFIELD, J. P.. **Cathodic Protection os Steel in Concrete and Masonry**. 2ª Edição. Nova York: CRC Press, 2014.

Comité Euro-International du Béton - CEB. **Durable Concrete Structures: Design Guide**. 2ª Edição. Londres: Thomas Telford Ltd, 1989.

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

COSTA, R. M.. **Análise de Propriedades Mecânicas do Concreto Deteriorado pela Ação de Sulfato Mediante Utilização do UPV**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2004.

DAL MOLIN, D. C. C.. Capítulo 8: **Adições minerais**. In: G. C. Isaia. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1ª Edição. Editora IBRACON. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2011.

_____. Cap. 12. **Adições Minerais para Concreto Estrutural**. pp. 345 – 379. In: G. C. Isaia. (Org.). Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. 1ª Edição. vol. 1. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2005.

_____. **Fissuras em Estruturas de Concreto Armado: Análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1988.

DIAMOND, S.. **The microstructure of cement paste and concrete—a visual primer**. Cement & Concrete Composites 26 (2004) 919–933.

FAN, C. C.; HUANG, R.; HWANG, H; CHAO, S. J.. **Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes**. Construction and Building Materials 112 (2016) 708–715.

FLOREA, M.V.A.; NING, Z.; BROUWERS, H.J.H.. **Activation of liberated concrete fines and their application in mortars.** Construction and Building Materials 50 (2014) 1–12.

GARCIA, E.; CABRAL JUNIOR, M.; QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F.. **Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo.** Cerâmica vol.61 no.358 São Paulo Apr./June 2015.

GOBBI, A.. **Atividade Pozolânica de Adições Mineraias pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012:** uma análise crítica a partir de métodos complementares. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

GOBBO, L. A.. **Aplicação da difração de raios-X e método de Rietveld no estudo de cimento Portland.** Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M.; KARAOĞLU, S.; MERMERDAŞ K.. **Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes.** Construction and Building Materials 34 (2012) 120–130.

HAGER, I.. **Behaviour of cement concrete at high temperature.** Bulletin of the Polish Academy of Sciencetechnical Sciences, Vol. 61, n°1, 2013.

HELENE, P. R. L. **Introdução da Durabilidade no Projeto das Estruturas de Concreto.** Ambiente Construído, vol. 1, n°2, p. 45-57. São Paulo, 1997.

HOPPE FILHO, J.. **Efeitos da adição de cal hidratada sobre a permeabilidade ao oxigênio e absorção capilar de concreto com altos teores de adições mineraias.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2002.

HOPPE FILHO, J.; SOUZA, D.J.; MEDEIROS, M. H. F. de; PEREIRA, E.; PORTELA, K. F.. **Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições mineraias como agentes mitigadores.** Cerâmica 61, 168-177. 2015.

HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; QUARCIONI, V.A.; MEDEIROS, M.H.F. **Atividade pozolânica de adições mineraias para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria(TG/DTG) e Chapelle modificado.** Revista Matéria, v.22, n.3, 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Technology Roadmap: Cement.** 2009. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-cement.html>>. Acesso em janeiro de 2017.

KAEFER, L. F.. **Considerações sobre a microestrutura do concreto.** Notas de aula. Escola politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

LAVAT, A. E.; TREZZA, M. A.; POGGI, M.. **Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture.** Waste Management 29 (2009) 1666–1674.

LIMA, R. C. A. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

LIMA, R. C. A.; KIRCHHOF, L. D.; CASONATO, C. A.; SILVA FILHO, L. C. P.. **Efeito de altas temperaturas no concreto.** II Seminário de Patologia das Edificações – Novos Materiais e Tecnologias Emergentes – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

MAGALHÃES, A. G.. **Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimentos contendo escórias de alto-forno.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais. 2007.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and Cementitious Materials.** Advances in Concrete Technology. Vol 1, CANEMET. Canadá, 1996.

MALIER, Y.. **Hight Performance Concrete from Material to structure.** Londres: E & FN Spon, 1992.

MASSAZZA, F.. **Cement & Concrete Composites.** Itália, 1993.

MEDEIROS, M. H. F. de; SOUZA, D. J.; HOPPE FILHO, J.; ADORNO, C. S.; QUARCIONI, V. A.; PEREIRA, E. **Resíduo de cerâmica vermelha e fíler calcário em composto de cimento Portland: efeito no ataque por sulfatos e na reação álcali-silica.** Matéria, vol.21, nº 2, p.282-300. Rio de Janeiro, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 3ª Edição. São Paulo: IBRACON, 2008.

MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, E. D.. **A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 57-71, jan./mar. 2009.

MORAES, R. C.. **Efeitos físicos e pozolânicos das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2001.

MÜLLAUER, W., BEDDOE R. E., HEINZ D.. **Sulfate attack expansion mechanisms.** Cement and Concrete Research 52 (2013) 208–215.

NAGROCKIENĖ, D.; GIRSKAS, G.; SKRIPKIŪNAS, G.. **Properties of concrete modified with mineral additives.** Construction and Building Materials 135 (2017) 37–42.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 5ª Edição. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J.. **Tecnologia do concreto.** 2ª Edição. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OLIVEIRA, M. E. D.; SALES, R. J. M.; OLIVEIRA, L. A. S.; CABRAL, A. E. B.. **Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE.** Engenharia Sanitária e Ambiental, jul/set 2011. Vol16 n.3, pp.219-224.

OKSRI-NELFIA, L.; P-Y. MAHIEUX, P. Y.; AMIRI, O.; TURCRY, P.; LUX, J.. **Reuse of recycled crushed concrete fines as mineral addition in cementitious materials.** Materials and Structures, 2016, Vol.49(8), pp.3239-3251.

PAULON, V. A.. Cap. 19. **A Microestrutura do Concreto Convencional.** pp. 583 – 604. In: G. C. Isaia. (Org.). Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. 1ª Edição. vol. 1. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2005.

PEREIRA, E.. **Avaliação do processo de corrosão acelerada para diferentes dosagens de concreto e espessuras de cobrimento.** Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2009.

PINHEIRO-ALVES, M. T.; GOMÀ, F; JALALI, S.. **Um cimento mais sustentável frente a um ataque severo por sulfatos.** Congresso Construção 2007 - 3.º Congresso Nacional. Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal, 2007.

_____. **Investigação e Monitoramento do Ataque Por Sulfatos de Origem Interna em Concretos nas Primeiras Idades.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

QUARCIONI, V. A.. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland – Estudo em pasta.** Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

RAHMAN, M. M.; BASSUONI, M. T.. **Thaumasite sulfate attack on concrete: Mechanisms, influential factors and mitigation.** Construction and Building Materials 73 (2014) 652–662.

RAMEZANIANPOUR, A. M.; HOOTON, R. D.. **Thaumasite sulfate attack in Portland and Portland-limestone cement mortars exposed to sulfate solution.** Construction and Building Materials 40 (2013) 162–173.

RAVERDY M., BRIVOT F., PAILLIERE A.M., DRON, R.. **Appreciation de l'activite pouzzolanique des con-stituants secondaires.** In: 7th Int. Congr. Chem. Cem. Paris, 1980.

RAVINDRARAJAH, R. S.; TAM, C.. **Recycling concrete as fine aggregate in concrete.** The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Volume 9, Number 4 (1987) 235-241.

RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUZA, C. A. C.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO, M. Z.; HELENE, P.. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise.** 1ª Edição. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

SANTHANAM, M.; COHEN, M. D.; OLEK J. **Mechanism of sulfate attack: A fresh look. Part 1: Summary of experimental results.** Cement and Concrete Research, nº32, p.915-921, 2002.

SIAD, H; MESBAH, H. A.; MOULI, M.; ESCADEILLAS, G.; KHELAF, H.. **Influence of Mineral Admixtures on the Permeation Properties of Self-Compacting Concrete at Different Ages.** Arab J Sci Eng (2014) 39:3641–3649.

SILVA FILHO, L. C. F.. **Durabilidade do Concreto à Ação de Sulfatos: uma análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1994.

SILVEIRA, A. A.. **A Utilização de Cinza de Casca de Arroz com Vistas a Durabilidade de Concretos: estudo do ataque por sulfatos.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1996.

SKALNY, J.; MARCHAND, J.; ODLER, I.. **Sulfate attack on concrete.** New York. Spon spress. 2002.

SOUZA, D. J.. **Capacidade de adições minerais em mitigar o ataque por sulfatos de sódio e magnésio em argamassas de cimento portland.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

SOUZA, R. B.. **Suscetibilidade de Pastas de Cimento ao Ataque por Sulfatos - método de ensaio acelerado.** Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

TASHIMA, M. M.; FIORITI, C. F.; AKASAKI, J. L.; BERNABEU, J. P.; SOUSA, L. C.; MELGES, J. L. P.. **Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de**

produção e atividade pozolânica. *Ambiente Construído*, vol.12, nº2. Porto Alegre, 2012.

VIEIRA, F. M. P.. **Contribuição ao Estudo da Corrosão de Armaduras em Concretos com Adição de Sílica Ativa**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

WADA, P. H.. **Estudo da Incorporação de Resíduos de Cerâmica Vermelha na Composição de Concreto para Uso em Estacas Moldadas In Loco**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Ilha Solteira, 2010.