

ANÁLISE DO DESEMPENHO DO CONCRETO UTILIZADO EM FUNDAÇÕES SUBMETIDO A ATAQUE POR SULFATO

Andressa Pelegrin Cesário (1), Bruno do Vale Silva (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)andressa_cesario@hotmail.com, (2)dvsilva@unesc.net

RESUMO

Dentre os maiores agentes agressivos ao concreto de fundações está o sulfato, atuando a partir de fenômenos físico-químicos. O sulfato tem ocorrência natural nos solos e em suas águas. Estudos feitos nas águas dos rios de Criciúma/SC e região encontraram sulfatos em uma concentração aproximada de 1500 mg/l, destacando-se entre os sulfatos característicos o sulfato de ferro (ALEXANDRE *et al*, 1995). Com o objetivo de estudar as alterações mecânicas e físico-químicas que o ataque por sulfato de sódio (Na_2SO_4), magnésio (MgSO_4) e ferro (FeSO_4) provocam em um concreto típico destinado a fundações, foram realizados ensaios laboratoriais de resistência à compressão axial, potencial hidrogeniônico (pH), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios X (DRX) nos corpos de provas submersos em água contendo o sulfato característico. Além dos ensaios de laboratório foi realizado um estudo de campo onde foram coletadas amostras de pontes de concreto supostamente atacadas por sulfatos, dos rios de Criciúma/SC e região. De maneira geral os ataques geram um ganho de resistência nas idades iniciais e uma perda de resistência aos 139 dias. Sendo o sulfato de magnésio o que apresenta maior ataque, chegando a 6% de redução de resistência à compressão em relação ao de referência, seguido pelo sulfato de ferro com 2%. A partir dos 182 dias as resistências dos corpos de provas em todos os sulfatos apresentaram um comportamento de estabilização, convergindo para diferenças não superiores a 1% em relação à referência. As pontes sobre os rios estudados apresentam indícios microscópicos de manifestações patológicas devido ao ataque por sulfato, sendo que, as pontes mais degradadas são as que recebem contribuição de rejeitos de atividade de beneficiamento de carvão.

Palavras-Chave: Ataque por sulfato; Sulfato de sódio; Sulfato de magnésio; Sulfato de ferro.

1. INTRODUÇÃO

Sabe-se que a água é a causa de vários processos físicos de degradação em sólidos porosos. Atuando como veículo para o transporte de íons agressivos, ela também pode ser fonte de processos químicos de degradação. Portanto, fenômenos físico-químicos associados ao movimento da água são determinados principalmente pela porosidade do material. Sendo o concreto uma pasta resultante da relação água/cimento, a sua deterioração será tanto menor quanto menores forem os

índices de permeabilidade e porosidade. Em estruturas de fundação a ocorrência de lençol freático alto pode acarretar fatores não considerados em projeto.

Segundo Falconi *et al* (1998, p. 336 - 339), as estacas escavadas mecanicamente com trado helicoidal estão restritas a escavações acima do nível do lençol freático. [...] Neste caso, algumas observações importantes devem ser consideradas neste tipo de estaca (1) quando a vazão de água aflorante for tal que impeça o esgotamento da água, (2) argilas muito moles saturadas e em areias submersas, o risco de seccionamento fuste pela entrada de solo, (3) o controle rigoroso da concretagem é indispensável. A NBR 6122/2010 permite para pequenas cargas perfuração abaixo do nível de lençol freático, desde que o furo possa ser esgotado antes do lançamento do concreto.

Segundo Ciria Report C569 (2002, apud MILITITSKY *et al*, 2005, p.168), o mais significativo agente agressivo ao concreto de fundações é o sulfato, que tem ocorrência natural nos solos e em suas águas. De acordo com o Building Research Establishment (2001, apud MILITITSKY *et al*, 2005, p.168), os fatores que influenciam o ataque por sulfatos são: (1) a quantidade e natureza do sulfato presente (quanto maior a concentração de sulfatos no solo ou na água subterrânea, mais severo será o ataque), (2) o nível da água e sua variação sazonal, (3) o fluxo da água subterrânea e a porosidade do solo, (4) a forma da construção e (5) a qualidade do concreto.

Os sulfatos originam-se dos materiais que compõem o concreto ou no contato do concreto com os solos ou águas ricas com este agente. O ataque produzido por sulfatos é a sua ação expansiva, que pode gerar tensões capazes de fissurá-lo. (SILVA, 1988 apud LAPA, 2008, p. 16).

A água com presença de sulfato penetra pelos poros da pasta de cimento endurecida e reage com os compostos da hidratação do cimento, formando compostos como etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{12} \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) e gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). No processo de hidratação do cimento forma-se etringita primária, após o sulfato de cálcio (CaSO_4) ser consumido ela se converte em monossulfato ($\text{Ca}_4\text{Al}_2(\text{OH})_{12} \cdot \text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Quando entra em contato com o sulfato externo se transforma novamente em etringita, denominada como etringita tardia, o que gera a expansão do composto e a possível desagregação. Em situações onde a presença de compostos de Al^{2+} for consumida, sobram SO_4^{2-} livres, assim a partir da reação do monossulfato e com o SO_4^{2-} e Ca^{2+} ocorrerá a formação da gipsita e não mais

etringita. Quando há presença simultânea de sulfatos, carbonatos e baixas temperaturas pode ocorrer formação de taumasita ($\text{Ca}_3[\text{Si}(\text{OH})_6]\text{CO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$). Segundo Neville (1997, p. 506), o sulfato de magnésio ataca os silicatos de cálcio hidratados ($x\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$), formando sulfoaluminatos de cálcio (etringita), bem como $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e aluminato de cálcio hidratado (C_3AH_6 , C_4AH_{19} E C_2AH_8). Esta reação gera gipsita, brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e silicato de magnésio ($\text{SiO}_2 \cdot \text{aq}$). Portanto o sulfato de magnésio é mais severo ao concreto, pois gera Mg^{2+} , ocorrendo formação de compostos que não possuem propriedades cimentícias.

De maneira geral o pH do concreto varia entre de 12,6 a 13,5. Valores de pH menores que os encontrados normalmente são observados quando há ocorrência de contato do concreto com o sulfato externo. De acordo com Rheinheimer *et al* (2013, p.40), o pH da solução saturada de hidróxido de magnésio (brucita) é de 10,4, o que torna o C-S-H instável.

Quando for inexistente o impedimento de contato da água com sulfato com o concreto, a única maneira de defesa será por meio da efetividade do controle de qualidade. A baixa permeabilidade do concreto é a melhor proteção contra ataque por sulfatos. Entre os fatores que contribuem para reduzir a permeabilidade do concreto estão a espessura adequada, baixa relação água-cimento, compactação e cura.

Observa-se que a taxa de ataque em uma estrutura de concreto, com todas as faces expostas à água com sulfato, é menor do que se a umidade for perdida por evaporação a partir de uma ou mais superfícies. Portanto, porões, galerias, muros de arrimo e lajes no solo são mais vulneráveis que fundações e estacas. (VILASBOAS, 2004, p.42)

Segundo Vilasboas (2004, p. 83), para qualificação das fontes de água, deve-se efetuar ensaios para determinar o pH, os tempos de início e fim de pega, a resistência à compressão, os teores de sulfetos, cloretos, matéria orgânica, bem como, sólidos dissolvidos, totais e em suspensão. Uma das maneiras de determinar se uma água é adequada para o concreto, consiste em comparar a resistência de corpos de prova curados com água suspeita e com água potável comum em idades avançadas.

A partir desse contexto, esta pesquisa tem por objetivo geral analisar a influência de diferentes tipos de sulfatos na perda da resistência à compressão do concreto e os compostos gerados por eles. E a partir dos resultados obter um parâmetro

comparativo entre os tipos de sulfatos para um traço de concreto usualmente utilizado em fundações.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa desenvolvida consiste em avaliar as implicações dos íons sulfato sobre a resistência à compressão axial do concreto, alterações de pH e microscopia do concreto. Sendo a permeabilidade a melhor proteção do concreto frente a ataque por sulfatos, baixa relação água/cimento ou elevadas resistências podem ser necessárias para a obtenção da baixa permeabilidade. Em casos de ataque severo devem ser utilizados concretos resistentes a sulfatos. A NBR 12655/2006, define os requisitos para os concretos expostos a soluções contendo sulfato (Tabela 1).

Tabela 1: Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos.

Condições de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água (SO ₄) presente no solo % em massa	Sulfato solúvel em água (SO ₄) presente na água ppm	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal*	Mínimo f _{ck} (para concreto com agregado normal e leve) MPa
Fraca	0,00 a 0,10	0 a 150	-	-
Moderada**	0,10 a 0,20	150 a 1500	0,50	35
Severa***	Acima de 0,20	Acima de 1500	0,45	40

* Baixa relação água/cimento ou elevada resistência podem ser necessárias para obtenção de baixa permeabilidade do concreto ou proteção contra a corrosão de armadura ou proteção à processos de congelamento e degelo.

**Água do mar

***Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos.

Fonte: NBR 12655/2006

Para simular um ataque por sulfatos foram moldados corpos de provas cilíndricos com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm, com f_{ck} de 20 MPa, que permaneceram submersos em água com sulfato em um período de 182 dias, sendo analisados periodicamente como demonstrado na Tabela 2.

O f_{ck} de 20 MPa foi adotado por ser a resistência à compressão mínima permitida em fundações conforme a ABNT 6118/2014 e o mais utilizado regionalmente. Os sessenta e quatro corpos de provas cilíndricos foram moldados no mesmo dia. Para controle de trabalhabilidade, foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*), onde se obteve 14 cm.

Tabela 2: Procedimento experimental com as quantidades de corpos de provas submersos em água com sulfato.

Dias	7	28	84	139	182	MEV DRX	Total Parcial
Água Potável	3	3	3	3	3	1	16
Sulfato de Magnésio	3	3	3	3	3	1	16
Sulfato de Sódio	3	3	3	3	3	1	16
Sulfato de Ferro	3	3	3	3	3	1	16
Total							64

Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

Sabendo-se antecipadamente que quanto maior porosidade e menor resistência, maior será o ataque, o concreto empregado foi dimensionado para se obter valores mais significativos em um curto prazo. O fator água/cimento (a/c) obtido foi de 0,65, cimento do tipo CP IV (Cimento Portland com pozolana) em um traço unitário de 1:3,4:3,6, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Características do Traço para o f_{ck} característico.

Características do traço			
1 : m = areia + brita			7
a/c = água/cimento			0,65
aditivo superplastificante (%)			0,7
Traço unitário (1 : a : b)	1	3,40	3,60
teor de ar incorporado (%)			1
α_1 = teor de argamassa seca			55,00%
α_2 = teor de argamassa úmida			58,38%

Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

A Tabela 4 demonstra o quantitativo de material empregado para a obtenção do volume utilizado.

Tabela 4: Material a ser pesado para Concretagem.

Concretagem	
Volume total (litros)	120
Material	Qt (kg)
Cimento	33,99
Areia	115,55
Brita	122,35
Água	22,09
Superplastificante	0,238

Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

Cada corpo de prova foi adensado em uma mesa vibratória em duas etapas, sendo a primeira na metade do volume total e a segunda com o volume total. Posteriormente, foram desmoldados após 24h e numerados sequencialmente de 1 a 64, sendo separados em conjuntos de 16 corpos de provas e submersos em água contendo o sulfato característico.

O teor de sulfato adotado se justifica a partir de estudos realizados na região sul de Santa Catarina onde em média se obtém um teor de sulfato próximo a 1500 mg/l. A Tabela 5, demonstra os valores obtidos nas análises das águas superficiais no município de Criciúma.

Figura 1: Corpos de Provas



Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

Foram analisadas três formulações de sulfato nesta mesma concentração, são eles: sulfato de sódio, sulfato de magnésio e sulfato de ferro. O sulfato com presença de ferro é muito encontrado em regiões onde aconteceram explorações do minério de carvão, forma-se como produtos da decomposição da pirita, a região sul catarinense de destaca há vários anos na exploração deste minério, excepcionalmente Criciúma ficou conhecida como a capital do carvão. O sulfato de magnésio é abordado em diversas literaturas como o sulfato com maior índice de ataque, pode ser encontrado nas águas subterrâneas, marinhas e em alguns efluentes industriais. O sulfato de sódio é o mais comumente encontrado em diversos projetos de pesquisa onde se tem ataque de sulfato ao concreto, este por ser comumente aplicada na indústria de celulose, produção de vidros, detergentes e corantes para tecidos.

Segundo Vilasboas (2004, p. 42), no ataque por sulfato de sódio, a formação do hidróxido de sódio (NaOH) como um subproduto da reação assegura a continuidade da alcalinidade do sistema que é essencial para a estabilidade da principal fase cimentícia de silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Tabela 5: Qualidade das águas superficiais do município de Criciúma, SC.

Código	Nome	Localização	Descrição	Sulfatos (mg/l)
RC 01	Rio Criciúma	Nascente do rio, montante do Criciúma Clube	Sofre contaminação de drenagem de mina de subsolo, não recebe contribuição de esgoto doméstico e industrial.	199,2
RC 02	Rio Criciúma	À jusante da MECRIL, fundos da estofaria Dudu.(Angeloninho)	Recebe contribuição de esgotos domésticos, comerciais e industriais. Contribuição da MECRIL - Metalúrgica Criciúma Ltda.	208,38
RC 03	Rio Criciúma	À jusante da CESACA, na ponte em frente a CBCA (Energia)	Intensa contribuição de despejos domésticos, comerciais e industriais. Recebe também contribuição de Canal Auxiliar e CECRISA Unidade Industrial II.	192,7
RC 04	Rio Criciúma	Na rua Domêneco Sônego, fundos do pátio de máquinas P.M.C	Contribuição de despejos, comerciais e industriais. Grande Contribuição de despejos do Cuturme Dal Bó.	165,57
RC 05	Rio Criciúma	Na foz com Rio Criciúma, atrás da cinco estrelas, Bairro Santa Augusta a montante da confluência com o Rio Sangão. (UNESC)	Contribuição de despejos domésticos, comerciais, bem como provenientes de atividades de beneficiamento de carvão mineral.	267,88
RM 01	Rio Maina	Vila Visconde, na ponte. (Trevo do Rio maina /Avenida dos imigrantes)	Recebe intensa contribuição de despejos oriundos de atividades de mineração de carvão	2267,21
RM 02	Rio Maina	Próximo a foz do Rio Sangão, ponte de acesso Cidade Mineira	Recebe intensa contribuição de despejos oriundos de atividades de mineração de carvão e/ou beneficiamento de carvão mineral, além de esgotos domésticos	1035,63
RS 01	Rio Sangão	Ponte sobre SC 445 que liga Criciúma à Siderópolis.	Recebe contribuição de efluentes característicos de atividades de mineração e/ou beneficiamento de carvão mineral.	1304,73
RS 02	Rio Sangão	Após confluência com Rio Criciúma	Servirá para avaliar a influência deste rio no Sangão	1035,63
RS 03	Rio Sangão	Na localidade do Verdinho, na ponte CRI 447.	Recebe intensa contribuição de despejos provenientes de atividades de mineração e/ou beneficiamento de carvão mineral. Em épocas de cheias o rio extravasa neste ponto ocupando a planície aluvial.	1200,4
RLA 01	Rio Linha Anta	Na localidade de Linha Batista, na ponte da CRI 270	Recebe contribuição de mineração à céu aberto.	271,58
RLA 02	Rio Linha Anta	Ponte sobre SC 443	Recebe contribuição de mineração de carvão e industriais.	338,42
RLA 03	Rio Linha Anta	Ponte próximo a Cabomar	Recebe contribuição de mineração a céu aberto e beneficiamento de carvão.	240,27

Fonte: (ALEXANDRE *et al*, 1995).

No ataque por sulfato de magnésio, a conversão do hidróxido de cálcio (CaOH_2) em gipsita é acompanhada pela formação do hidróxido de magnésio (brucita), reduzindo a estabilidade do silicato de cálcio hidratado no sistema. Portanto, o sulfato de magnésio é mais severo ao concreto.

Os 64 (sessenta e quatro) corpos de provas moldados foram subdivididos em 7 (sete) recipientes, sendo um recipiente contendo a totalidade de corpos de provas curados em solução de hidróxido de cálcio, segundo as recomendações de cura da NBR 5738/2003 e os demais contendo as composições de sulfato de sódio, magnésio e ferro; sendo cada composição dividida em dois recipientes.

Foram adicionados 32 (trinta e dois) litros de água potável por recipiente, sendo que cada composição contém 1500 mg/l do sulfato característico. A Tabela 6 apresenta em valores quantitativos as respectivas quantidades em gramas (g) de sulfato adicionadas em cada recipiente.

Tabela 6: Composição das concentrações de sulfato por amostra

	Peso molecular (g)	Peso H_2O (g)	Peso do sulfato (g)	Proporção	Concentração (mg/l)	Ensaio (g)
Sulfato de Magnésio - $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	246,47	126	120,47	0,488781596	3068,86	98,203
Sulfato de Sódio - Na_2SO_4	142,04	0	142,04	1	1500,00	48,000
Sulfato de Ferro - $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	278,01	126	152,01	0,546778893	2743,34	87,787

Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

Tais avaliações consistiam em identificar as alterações na propriedade mecânica dos corpos de prova de concreto atacados, em relação aos de referência, e assim relacioná-las com os produtos provenientes das reações químicas entre os compostos hidratados do cimento e os íons sulfato presentes na solução.

Figura 2: Concentrações de Sulfato



Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

Figura 3: Corpos de Provas imersos em Sulfatos de Sódio, Magnésio e Ferro.



Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Ao longo do ataque químico, os corpos de prova cilíndricos ($\varnothing 10$ cm x 20 cm) pré-estabelecidos foram retirados da solução agressiva para a realização dos ensaios de resistência à compressão. Foram analisados periodicamente, sendo subdivididos em seis idades: 07, 28, 84, 139 e 182 dias. Para cada idade de ruptura, foram ensaiados três corpos de provas segundo as recomendações da norma 12655/2006, como já demonstrado na Tabela 2.

2.2 ESTUDO DE CAMPO

Com a finalidade de se obter dados regionais, a partir de um levantamento de dados em pontes da região de Criciúma, o presente relatório destaca algumas evidências patológicas encontradas, sendo elas possivelmente causadas por ataque de sulfato. As pontes aqui estudadas foram algumas das apresentadas na Tabela 5. O estudo de campo se desenvolveu nos rios RC 05, RM 01, RM 02, RS 01, RS 02, RS 03; pois apresentavam teores de sulfatos elevados. A partir de uma análise visual foram retiradas amostras dos pontos com possíveis ataques, estas foram analisadas por microscopia, para identificação de compostos gerados através do ataque por sulfatos.

Figura 4: Amostras retiradas para ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), das pontes sobre os rios RM 02¹⁾, RS 01²⁾, RC 05³⁾, RC 05⁴⁾ e RM 02⁵⁾.



Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

2.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Na idade de 172 dias, os corpos de prova que permaneceram imersos em solução agressiva foram submetidos a uma avaliação microestrutural através da técnica de análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV). O ensaio foi realizado com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura ZEISS (Figura 6), modelo MA10, contendo espectrômetro de energia dispersiva (EDS) BRUKER, modelo QUANTAX 200. O objetivo era identificar e, ao mesmo tempo, fazer uma análise dos compostos e produtos gerados nos concretos atacados em correlação ao de referência.

Foram retiradas amostras cúbicas com 5,0 mm dos corpos de provas cilíndricos ($\varnothing 100 \times 200$ mm), sendo elas cortadas com equipamento de precisão milimétrica (ISOMET 1000), apresentado na Figura 5. As amostras dos corpos de provas e as amostras do estudo de campo foram mantidas anteriormente à realização do ensaio, durante duas horas, em estufa a 80°C .

Figura 5: ISOMET 1000



Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

Figura 6: MEV/EDS



Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

2.4 POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH)

Verificou-se o pH do concreto aos 182 dias submerso no sulfatos de sódio, magnésio e ferro, através da leitura do pHmetro em uma solução de 10 ml de água destilada e 2 g de material passante na peneira n° 200 da amostra de concreto submersa nos seus respectivos sulfatos. O ensaio tem por objetivo avaliar se o concreto apresentou redução do teor de pH devido à acidez da água.

2.5 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

O ensaio de difração de raios X (DRX) permite identificar sólidos cristalinos, através dos picos gerados na difração dos raios produzidos pelos átomos característicos do

mineral. Identificando a formação dos compostos do concreto, tais como etringita, gipsita, taumasita, brucita, silicato de magnésio hidratado e monossulfatos. O ensaio foi realizado com o equipamento Lab X, modelo XRD 6000 (Figura 7), operando a 30kV e 30mA, com radiação de $\text{CuK}\alpha$, ângulo de varredura de 10° a $80^\circ 2\theta$, passo de 0,02 e tempo de contagem de 0,6s por passo, ou seja, $2^\circ/\text{min}$.

Figura 7: Amostras retiradas para ensaio de Difração de raios X (DRX)¹⁾, Equipamento²⁾ e Equipamento com a amostra posicionada³⁾.



Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

3. RESULTADOS

3.1 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL

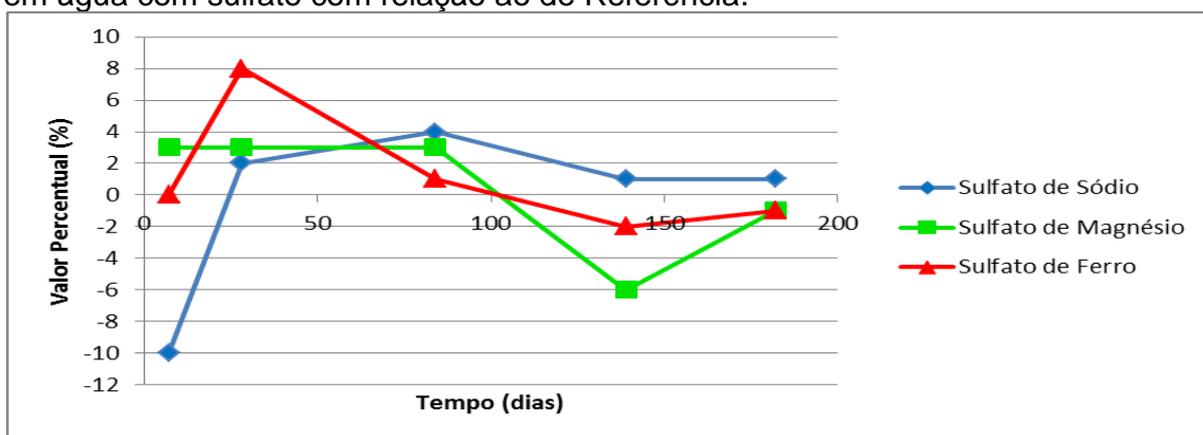
Em análise comparativa a métodos tradicionais como, o Mehta Test (MEHTA e GJORV, 1974 apud VEIGA, 2011, p.54) que utiliza oito corpos de prova cúbicos de pastas, com a/c iguais a 0,5, submersos em solução de sulfato de sódio a 4%, avaliando através da comparação da média de resistência à compressão após cura em água potável com outros expostos à solução de sulfato de sódio. Considera-se o cimento como sendo resistente ao ataque de sulfato se a queda de resistência, aos 28 dias de imersão, for inferior a 20%. Sendo a concentração de sulfato de sódio adotada nesta pesquisa de 0,15% e a variação média da resistência aos 28 dias foi de um ganho de 2%, em uma interpretação superficial pode-se considerar o cimento empregado como cimento resistente a sulfato.

No entanto, os hidratos formados durante o ataque podem gerar um ganho de resistência. Somente quando começa a haver a fissuração é que se inicia a perda da resistência. Gomides *et al* (2011, p. 11), observaram em seus estudos que de uma forma geral, os corpos de prova atacados durante os 130 dias submersos apresentaram resistências superiores aos de referência na mesma idade. Isto

acontece porque, sendo os concretos estudados bastante porosos, durante o período de ataque ocorreu um preenchimento dos poros com os produtos de reação, etringita e gipsita. Esse preenchimento levou a uma compactação dos poros e, conseqüentemente o aumento da resistência. Aos 130 dias de ataque a diferença do concreto atacado em relação ao de referência variou de 0 a 13%, sendo o CCR (Concreto Compactado com Rolo) 70 variou 13%.

Os valores de ganho de resistência não apresentaram um comportamento linear, mas como regra geral apresentaram um ganho de resistência nas idades iniciais, com exceção ao sulfato de ferro, ambos continuaram a ganhar resistência nas idades posteriores: 28 e 84 dias. O sulfato de ferro apresentou uma perda de resistência já aos 84 dias, também se observa que foi o que apresentou maior ganho de resistência já aos 28 dias em relação aos demais (Figura 8).

Figura 8: Variação da Resistência à Compressão dos corpos de provas submersos em água com sulfato com relação ao de Referência.



Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

Estudos realizados aplicam métodos onde a concentração de sulfato é desproporcionalmente grande à da prática, tal concentração se aplica com o objetivo de se obter resultados significativos e um menor prazo.

Estudos correlatos como o de Shannag *et al* (2002, p. 365), onde a concentração submerso na solução de sulfato de magnésio e de sódio era de 20% ou 200.000 mg/l, apresentam redução da resistência a compressão já nas idades iniciais. Porém valores significativos são apontados em idades posteriores, chegando a uma redução expressiva (cerca 30%) aos 360 dias de ataque.

De maneira geral, os corpos de provas apresentaram redução de resistência a partir da terceira idade de rompimento, aos 139 dias. A partir dos 182 dias as resistências

apresentaram um comportamento de estabilização, pode ser justificada pela não renovação do sulfato presente nas amostras. (Tabela 7).

Tabela 7: Composição das concentrações de sulfato por amostra

DIAS	7		28		84		139		182	
	MPa	Variação % com relação ao de referência	MPa	Variação % com relação ao de referência	MPa	Variação % com relação ao de referência	MPa	Variação % com relação ao de referência	MPa	Variação % com relação ao de referência
Referência	20,2 ± 1,4	-	27,5 ± 1,6	-	37,1 ± 0,5	-	40,6 ± 3,9	-	41,7 ± 0,3	-
Sulfato de Sódio	18,7 ± 0,9	-10%	28,1 ± 1,9	2%	38,5 ± 2,1	4%	41 ± 1,7	1%	42,2 ± 1,6	1%
Sulfato de Magnésio	20,8 ± 1,0	3%	28,3 ± 2,7	3%	38,1 ± 1,8	3%	38,1 ± 1,1	-6%	41,1 ± 2,9	-1%
Sulfato de Ferro	20,3 ± 1,2	0%	29,7 ± 0,1	8%	37,3 ± 0,7	1%	39,8 ± 4,4	-2%	41,3 ± 0,7	-1%

Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

Esses resultados estão em concordância com estudos anteriores (VILASBOAS, 2004, p.42; LAPA, 2008, p. 16), de que o sulfato de magnésio apresenta maior ataque. De maneira geral pode se dizer que o sulfato de sódio não apresenta redução significativa da resistência, porém apresenta significativa expansão. (AL AMOUDE, MASLEHUDDIN E SAADI, 1995 apud VEIGA, 2011, p.56).

Segundo Neville (2004, p. 1278), utilizar concentrações altas de sulfatos que não se encontram em campo para acelerar o ataque não representa adequadamente a realidade, pois como explica o autor, o progresso no campo prático do concreto nos últimos 40 anos, em alguns casos, mostra que o volume de pesquisa em laboratório é desproporcional à prática para o problema. Por outro lado, o conhecimento técnico e a compreensão sobre ataque de sulfato no campo continuam sendo limitados. Os resultados obtidos na resistência à compressão e no potencial hidrogeniônico (pH) decrescem seguindo a mesma ordem de elementos, ou seja, os sulfatos de magnésio e ferro apresentaram menor valor de pH (Tabela 8), assim como um maior decréscimo na resistência à compressão.

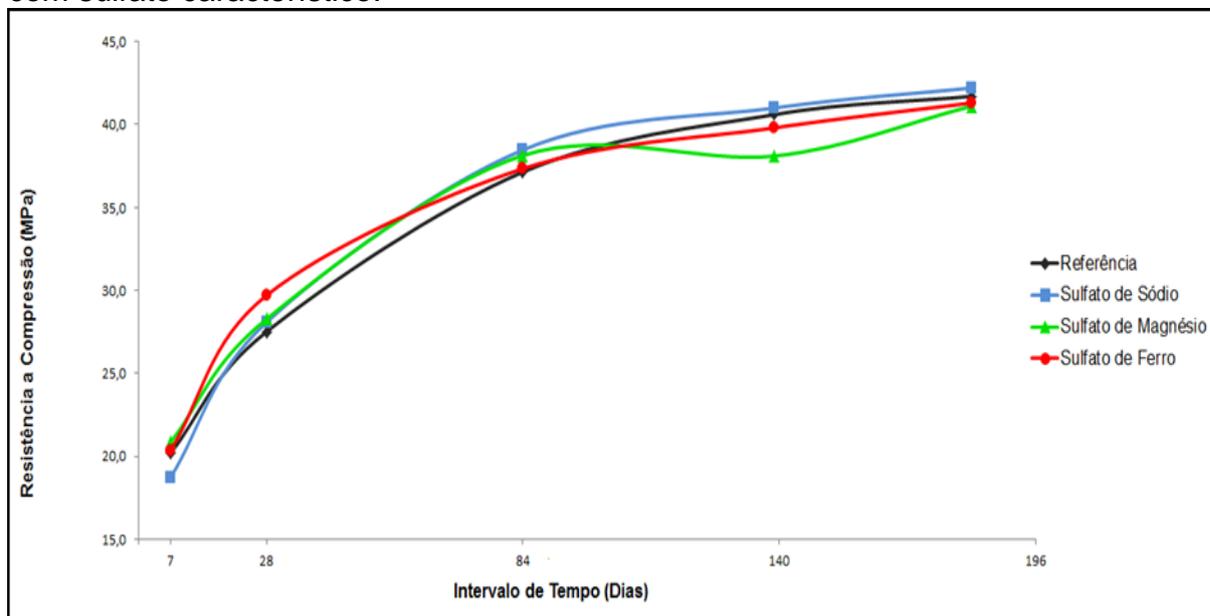
Tabela 8: Potencial hidrogeniônico (pH) das amostras submersas nos sulfatos de sódio, magnésio, ferro e na água potável.

	Sulfato de Magnésio (MgSO ₄)	Sulfato de Sódio (Na ₂ SO ₄)	Sulfato de Ferro (FeSO ₄)	Água Potável
Potencial Hidrogeniônico (pH)	10,02	11,44	10,13	11,68
Temperatura (°C)	20,6	20,5	19,3	20,5

Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

A Figura 09 demonstra o processo de ataque ao longo do tempo.

Figura 09: Resistência à Compressão dos corpos de provas submersos em água com sulfato característico.



Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

3.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

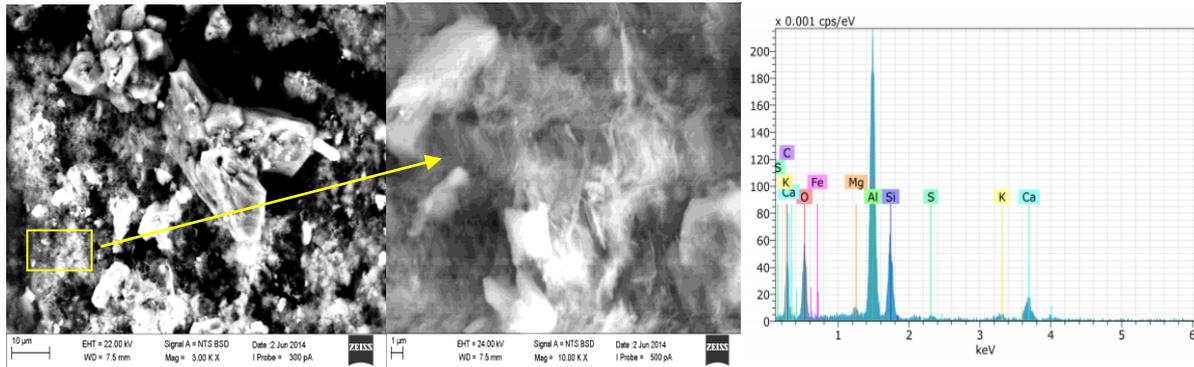
As amostras submersas em sulfato quando visualizadas microscopicamente apresentam fissuras superficiais, sendo estas não detectadas na amostra submersa em água potável. A formação de calcita (CaCO_3) está presente nas amostras submersas em sulfato de sódio, magnésio e ferro. Matschei, Lothenbach e Glasser (2007 *apud* VEIGA, 2011, p.88), afirmam que a formação de calcita pode ser caracterizada por duas funções: ativa ou inerte. Em adições de 5% de calcário, o calcário se comportará como adição reativa. Neste caso a calcita será consumida e na reação de formação dos carboaluminatos e o sulfato liberado reage com a água e com o hidróxido de cálcio, formando etringita.

A formação de calcita também está associada à taumasita, em um primeiro estágio ocorre a carbonatação da superfície da argamassa e a pasta se torna rica em calcita; e no segundo estágio, os sulfatos atacam o C-S-H da zona carbonatada e formam taumasita.

A formação de Sulfoaluminatos de cálcio hidratado (etringita) foi identificada nas amostras de concreto submersas em sulfato de ferro, apresentadas na Figura 11. O surgimento de fissuras também foi observado (Figura 10), sendo que elas devem ser

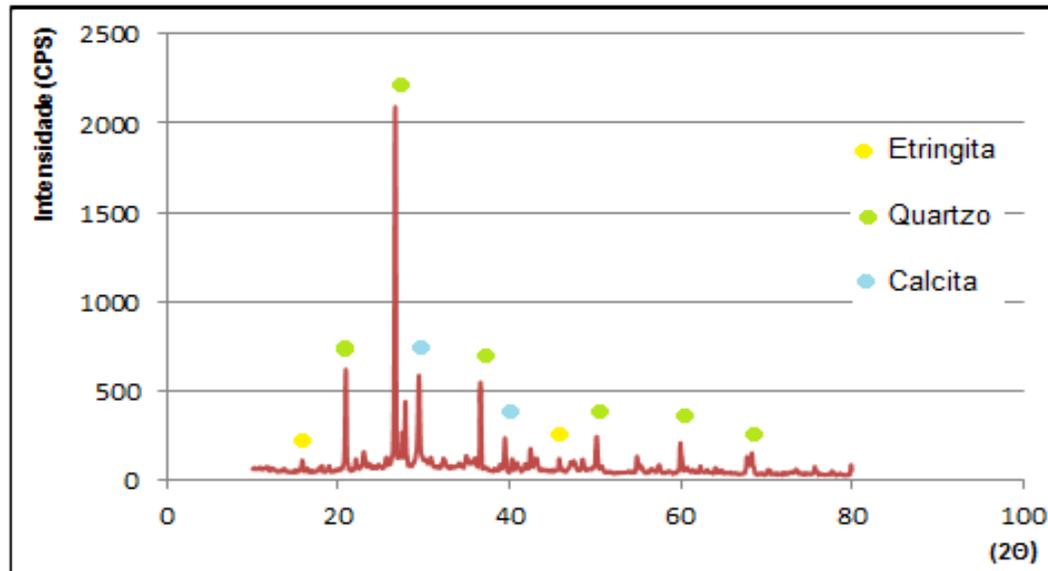
oriundas da expansão gerada pelo processo de hidratação do cimento em contato com o sulfato externo. As formações de um aglomerado de agulhas ao lado esquerdo da fissura sugerem a formação de etringita, identificada pelo elevado teor de alumínio e a existência de enxofre na análise química.

Figura 10: Microscopia eletrônica de varredura da amostra submersa em Sulfato de Ferro.



Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

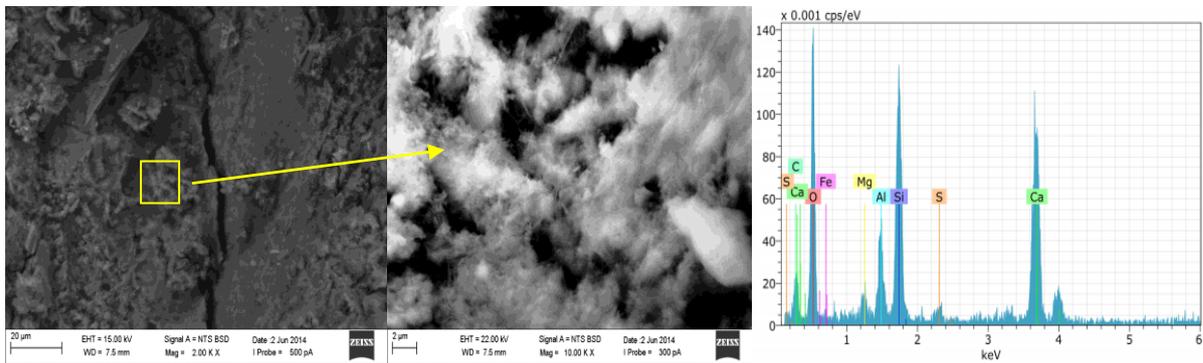
Figura 11: Difração de raios X (DRX) da amostra submersa em Sulfato de Ferro.



Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

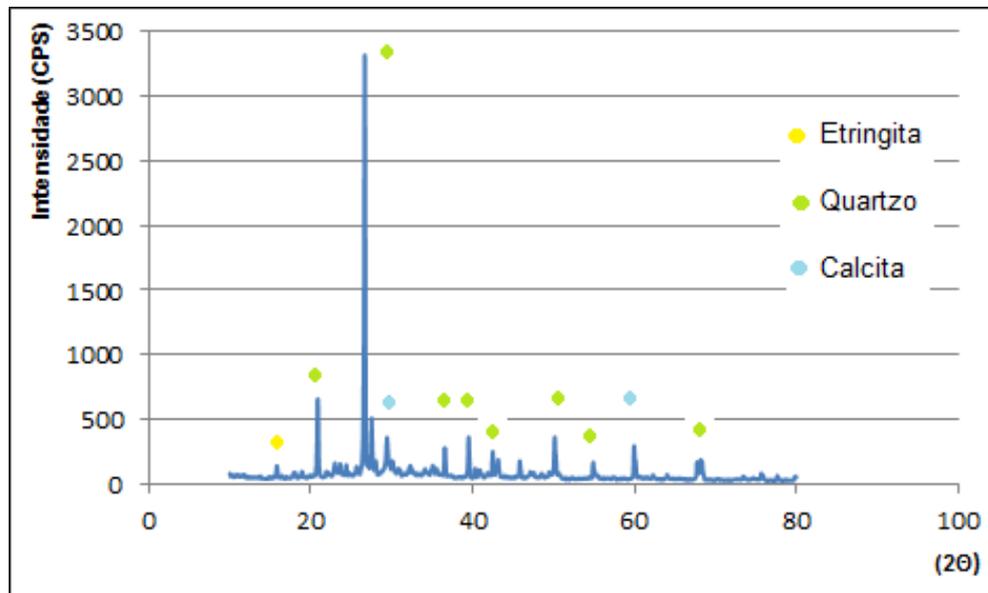
Assim como nas amostras de sulfato de ferro, as amostras submersas em sulfato de sódio apresentaram fissuração e formação de etringita e calcita (Figura 12 e 13).

Figura 12: Microscopia eletrônica de varredura da amostra submersa em Sulfato de Sódio.



Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

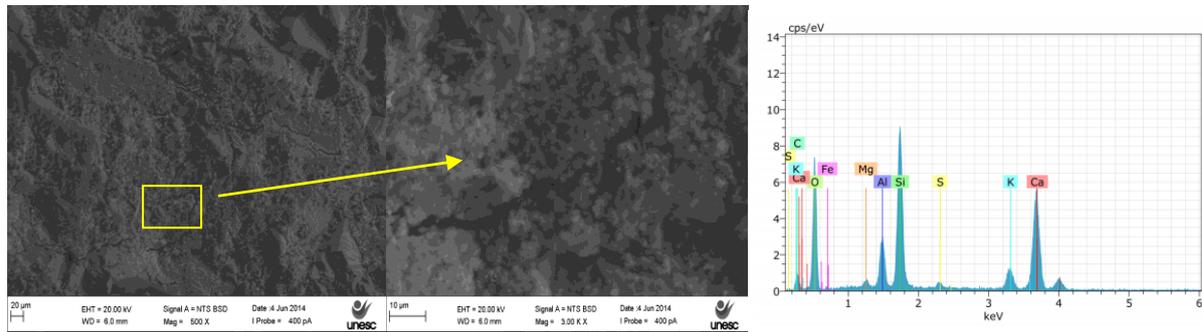
Figura 13: Difração de raios X (DRX) da amostra submersa em Sulfato de Sódio.



Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

Como já observado em estudos anteriores, o sulfato de magnésio gerou a formação de silicato de magnésio hidratado (M-S-H). Sendo este oriundo da descalcificação da fase do C-S-H, caracterizando a formação de compostos sem propriedades cimentícias. A presença de fissuras foi observada na amostra de sulfato de magnésio com maior intensidade às demais (Figura 14). A formação de compostos de etringita e calcita vêm a somar nas semelhanças com as amostras submersas em sulfato de sódio e ferro.

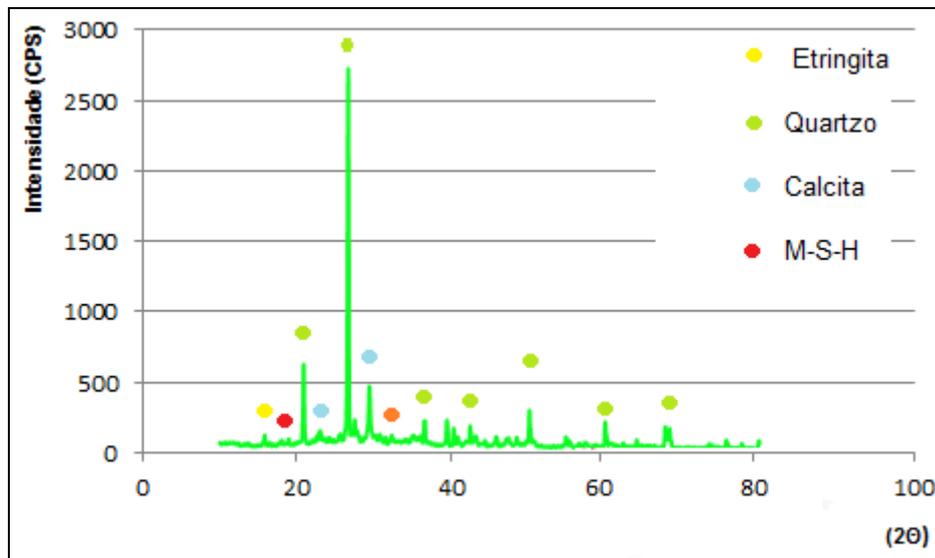
Figura 14: Microscopia eletrônica de varredura da amostra submersa em Sulfato de Magnésio.



Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

A baixa formação de etringita é justificada, pois antes que haja maior produção a pasta de cimento pode ter ocorrido a desagregação da fase do C-S-H e formação de M-S-H (Figura 15).

Figura 15: Difração de raios X (DRX) da amostra de submersa em Sulfato de Magnésio.

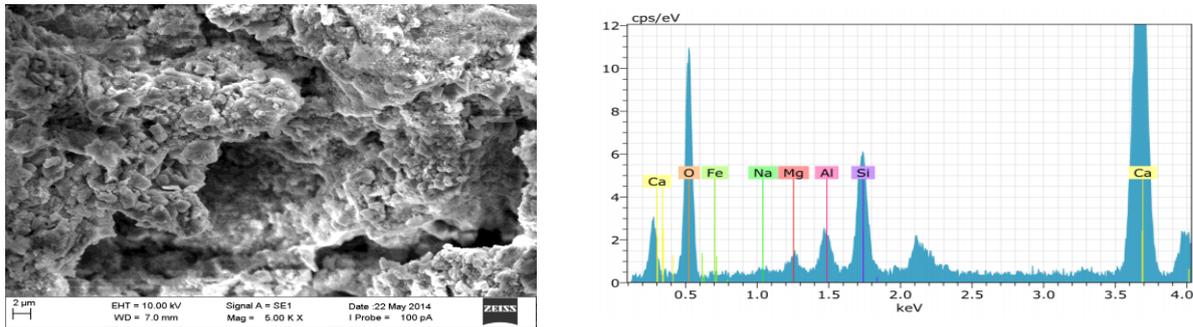


Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

3.2.1 ANÁLISE MICROESTRUTURAL: ESTUDO DE CAMPO

Os resultados obtidos através do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas amostras retiradas das pontes sobre os rios de Criciúma/SC e região foram encontrados sinais visuais de alterações da pasta de cimento. Concentrações elevadas de cálcio e oxigênio apresentadas na análise química (Figura 16) revelam a possível incidência de hidróxido de cálcio ou portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) na amostra.

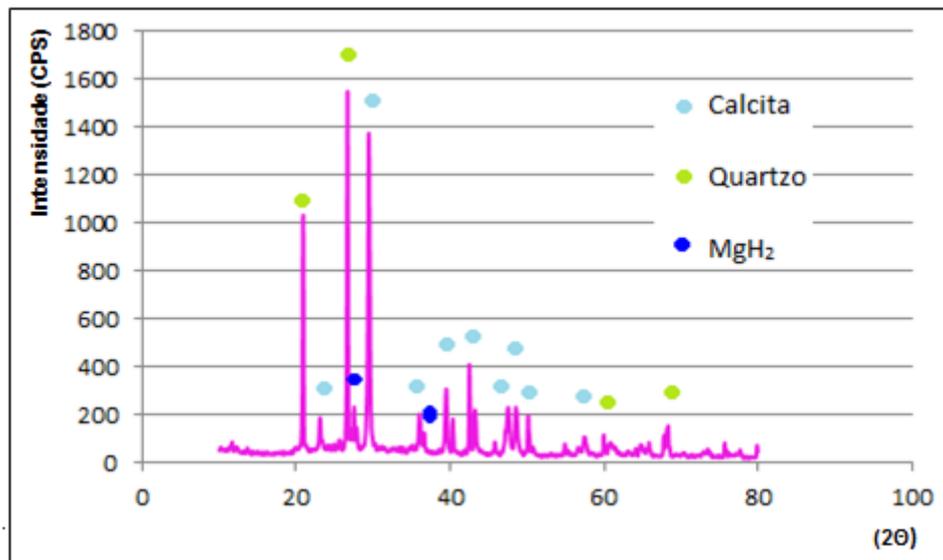
Figura 16: Microscopia eletrônica de varredura da amostra RM 02¹⁾.



Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

A Figura 17 demonstra a formação de Hidreto de magnésio (MgH_2), este reage com a água com liberação de gás hidrogênio ($2H_2$), formando hidróxido de magnésio ($Mg(OH)_2$). A amostra foi retirada de um ponto aonde possuía armadura exposta, portanto, o surgimento de calcita deve estar ligado ao processo de carbonatação do concreto. A formação de hidróxido de magnésio sugere a presença de sulfato de magnésio, que reage com hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) formando sulfato de cálcio ($CaSO_4$) e hidróxido de magnésio ($2Mg(OH)_2$).

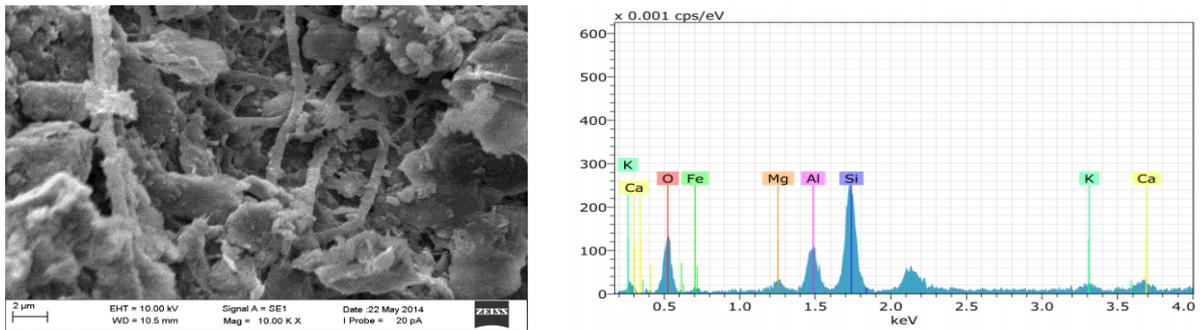
Figura 17: Difração de raios X (DRX) da amostra RM 02¹⁾.



Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

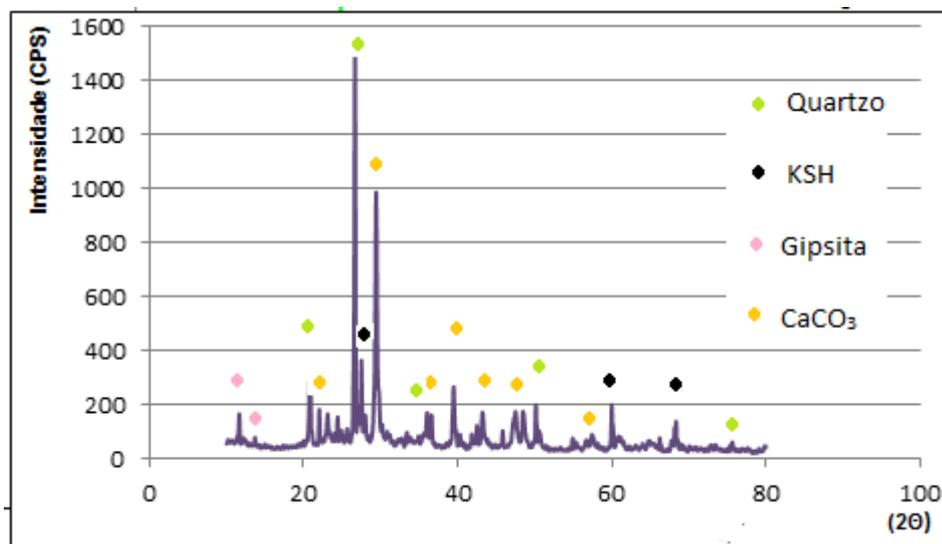
A Figura 18 retrata a aparente formação de compostos gerados na fase do C-S-H. Foi detectada no DRX (Figura 19) a formação de gipsita e calcita, assim como a presença de Sulfato de Potássio e hidrogênio (KSH).

Figura 18: Microscopia eletrônica de varredura da amostra RC 05⁴⁾.



Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

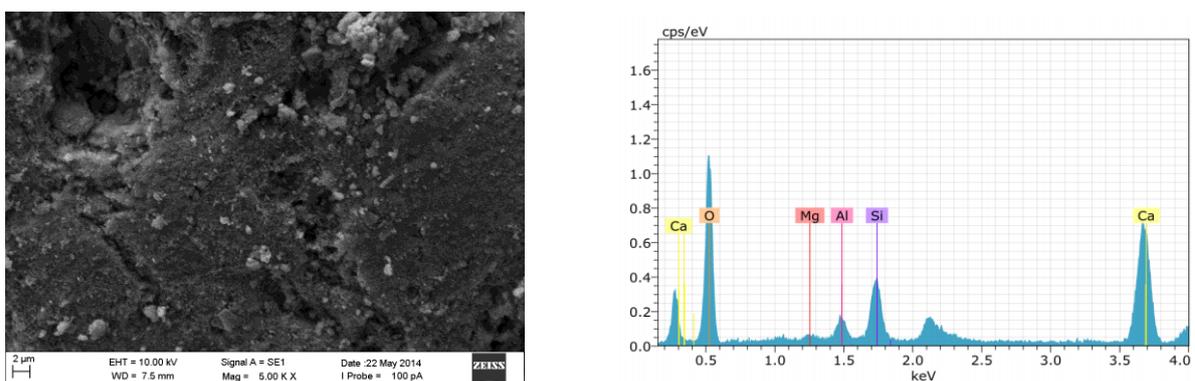
Figura 19: Difração de raios X (DRX) da amostra RC 05⁴⁾.



Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

O estudo microestrutural apresentado na Figura 20 sugere a existência dos produtos resultantes do sulfato e a pasta de cimento, com o aparecimento de fissuras ao redor dos poros do concreto.

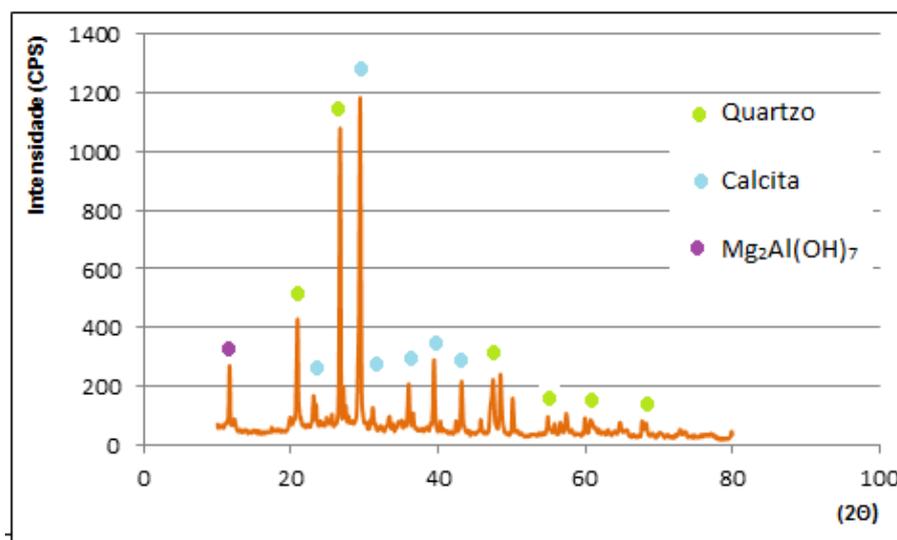
Figura 20: Microscopia eletrônica de varredura da amostra RS 01²⁾.



Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

A formação de hidróxido de magnésio e alumínio ($Mg_2Al(OH)_7$) possivelmente surgiu da reação da pasta com os sulfatos presentes nas águas do rio, o hidróxido de magnésio novamente sugere a presença de sulfato de magnésio. Como aqui apresentado, o corpo de prova curado em sulfato de ferro apresenta elevados teores de alumínio (Figura10), portanto, o hidróxido de alumínio pode estar ligado ao sulfato de ferro, sendo que tal amostra está localizada em um rio que recebe intenso despejo de rejeitos de carvão.

Figura 21: Difração de raios X (DRX) da amostra RS 01²⁾.



Fonte: Andressa Pelegrin Cesário, 2014.

4. CONCLUSÕES

Nesse estudo fica evidenciado que a água com presença de sulfato em concentrações reais de campo apresenta alterações ao concreto, porém são mais expressivas em longo prazo. A partir da análise da perda de resistência do concreto se observou que a não renovação do sulfato e variações de fluxo submeteram a amostra a uma possível estabilização. A formação de pequenas proporções de etringita, e a inexistência da formação de gipsita nas amostras ensaiadas em laboratório pode ser justificada pela baixa concentração de sulfato e curto período de ataque. Assim como a inexistência da formação da taumasita é justificada, pois as amostras foram submetidas somente a ataque por sulfatos e ficaram em temperatura ambiente ($>10^{\circ}C$), eliminando assim as principais características favoráveis à formação da mesma. As microscopias das amostras de estudo de campo sugerem a

existência do ataque por sulfato, os resultados obtidos neste caso deixam dúvidas sobre o real tamanho do ataque em campo, aprofundando estudos de casos, considerando todos os parâmetros envolvidos.

Neste artigo se destacou a influência da água como agente transportador, porém não considerou o sulfato presente nos solos. Portanto, estudos de campo onde teores de sulfatos são encontrados nas águas e nos solos são sugestões para trabalhos futuros. Analisar os resultados obtidos em comparação ao processo de gelo e degelo, carbonatação e a influência do ataque de sulfato com a corrosão de armadura. Comparações de ataque de sulfatos com diferentes teores, relações de água/cimento e valores alterados de f_{ck} podem ser estudados.

5. REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, Nadja Zim; KREBS, Antônio Silvio Jornada; VIERO, Ana Cláudia. **Qualidade das águas superficiais do município de Criciúma, SC – Dados Preliminares**. Revista Tecnologia e Ambiente FUCRI/UNESC, Criciúma, v. 1, p. 29-54, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2010. 91p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: projeto de estruturas de concreto; procedimento**. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland; preparo, controle e recebimento; procedimento**. Rio de Janeiro, 2006. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto; procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

FALCONI, Frederico; FILHO, João de Souza; FIGARO, Nélcio Descio. **Estaca escavada sem lama bentonítica**. In HACHICH, Waldemir; FALCONI, Frederico; SAES, José Luís; FROTA, Celso Carvalho; NIYAMA, Sussumu. (2º ed.). **Fundações - Teoria e Prática**. Editora: Pini, São Paulo, 1998, 336-344.

GOMIDES, Maria de Jesus; CARASEK, Helena; CASCUDO, Oswaldo. **Ataque por sulfatos ao concreto compactado com rolo**. Goiás, 2011, 16 p.

LAPA, José Silva. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**. 2008. 56p. Monografia (especialização em Construção Civil), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MILITITSKY, Jarbas; CONSOLI, Nilo Cesar; SCHNAID, Fernando. **Patologia das Fundações**. Editora: oficina de Textos, São Paulo, 2005, 207 p.

NEVILLE, Adam M. (2^oed.) **Propriedades do concreto**. Editora: Pini, São Paulo, 1997, 828 p.

NEVILLE, Adam. **The confused world of sulfate attack on concrete**. Cement and Concrete Research, v. 34, London, 2004, p. 1275–1296.

RHEINHEIMER, Bianca; KHOE, Sarah Shima. **Ataque por sulfatos em estações de tratamento de efluentes**. 2013. 19 p. Trabalho de final (engenheiro civil), Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

SHANNAG. M. J; SHAIA. H. A. **Sulfate resistance of high- performance concrete**. Cement and Concrete Composites, v. 25, Jordan, 2003, p. 363-369.

VEIGA, Karina Kozoroski. **Desempenho do cimento Portland branco com escória de alto-forno e ativador químico frente ao ataque por sulfato de sódio**. 2011. 209 p. Dissertação (mestre em engenharia civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

VILASBOAS, José Márcilio Ladeia. **Durabilidade das edificações de concreto armado em Salvador: Uma contribuição para implantação da NBR 6118:2003**. 2004. 231p. Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que rege e comanda todas as coisas do universo.

Ao laboratório Experimental de Estruturas (LEE), especialmente ao meu professor orientador Bruno do Vale Silva, pela esplendida orientação, apoio permanente, dedicação e paciência em todas as fases deste trabalho.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), na pessoa do professor Fernando Pelisser pela disponibilidade e apoio nos ensaios de Resistência à Compressão e potencial hidrogeniônico (pH).

Ao laboratório de Cerâmica Técnica (CerTec), na pessoa do professor Oscar Rubem Klegues Montedo, pela disponibilização e apoio nos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Ao Laboratório de Caracterização de Materiais (CECAM), na pessoa do Engenheiro de Materiais Mateus Milanez, pela disponibilização e apoio nos ensaios de Difração de raio X (DRX).

Ao Laboratório de Águas e Efluentes Industriais (CECAM), na pessoa Engenheira Química, MSc. Maria da Glória da Silva Santos, pela disponibilização e apoio nas caracterizações dos sulfatos.

Aos meus pais, que me ensinaram a estudar com prazer.

O meu noivo, Felipe Darós Tomazi, pela paciência, apoio contínuo e participação durante todas as etapas desta trajetória.

Finalmente, a todas as pessoas que contribuíram direta e indiretamente para a concretização deste trabalho.