

Cimento Supersulfatado (CSS): preparação dos materiais constituintes e estudo de suas composições químicas com enfoque à influência do teor de alumina presente na escória de alto-forno

Supersulfated Cement (SSC): preparation of constituent materials and study of their chemical compositions focusing on the influence of alumina content present in blast furnace slag

RESUMO

Aline Oliveira Mattos
alineomattos@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

Caroline Angulski da Luz
angulski@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

A produção do Cimento Portland (CP) libera grandes quantidades de gás carbônico na atmosfera e possui elevado gasto energético em seu processo. Por isso, o estudo de uma alternativa mais sustentável para a construção civil, como o CSS, é de suma importância, tendo em vista aspectos que comprovam a relevância de pesquisas a seu respeito: utilização de subprodutos como a escória de alto-forno e o fosfogesso, reduzindo assim o uso de matérias-primas; resistência à água do mar, a sulfatos e a ambientes de ácidos fracos; menor calor de hidratação. Este trabalho objetiva a preparação dos materiais componentes do CSS, o estudo de suas composições químicas e a influência que estas possuem sobre seu desempenho. Os resultados apontam para o bom desempenho do CSS com o uso do fosfogesso como fonte de sulfato de cálcio e para a influência positiva do elevado teor de alumina da escória de alto-forno no desenvolvimento de resistência à compressão do CSS.

PALAVRAS-CHAVE: Cimento. Sustentabilidade. Alumina. Desempenho.

ABSTRACT

The production of Portland Cement (CP) releases large amounts of carbon dioxide into the atmosphere and has a high energy expenditure in its process. For this reason, the study of a more sustainable alternative for civil construction, such as SSC, is of paramount importance, considering aspects that prove the relevance of research on it: use of by-products such as blast furnace slag and phosphogypsum, thus reducing the use of raw materials; resistance to sea water, sulfates and weak acid environments; lower heat of hydration. This work aims at the preparation of the SSC component materials, the study of their chemical compositions and the influence they have on their performance. The results point to the good performance of the SSC with the use of phosphogypsum as a source of calcium sulfate and to the positive influence of the high alumina content of the blast furnace slag in the development of resistance to compression of the SSC.

KEYWORDS: Cement. Sustainability. Alumina. Resistance. Performance.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

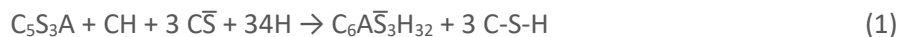
Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

Em 1990, a indústria cimentícia brasileira era responsável pela emissão de 700 Kg de CO₂ por tonelada de Cimento Portland produzido e, em 2014, esta quantidade baixou para 564 Kg/tonelada, chegando em 2019/2020 a 540 Kg/tonelada, quantidade que apesar de ter diminuído, ainda representa grande parte das emissões anuais do gás (PENNA, 2020). Ademais, sua produção gera grande gasto energético (GRACIOLI, 2016), evidenciando a necessidade de pesquisas para a obtenção de um produto que substitua o CP, com menor impacto ambiental. Uma possível substituição é o cimento supersulfatado (CSS) que, conforme Santos (2015), é constituído por 70-90% de escória de alto-forno, 10-20% de sulfato de cálcio e um pouco menos de 5% de um ativador alcalino, sendo o CP o mais empregado.

Conforme Santos (2015), como a utilização da escória dispensa a fase de clínquerização na produção do CSS, o consumo de energia é reduzido significativamente e a emissão de CO₂ diminui em 73-90% em comparação ao CP. O teor de alumina (Al₂O₃) presente na escória tem grande influência no desempenho do CSS. Masoudi (2018) realizou estudos voltados diretamente aos efeitos do teor de alumina da escória no CSS, sendo este considerado alto quando representa 13% ou mais da escória e baixo quando inferior a tal porcentagem. Teores baixos de alumina, segundo a autora, proporcionam algumas desvantagens: formação de menor quantidade de etringita e C-S-H, menor grau de reação da escória, menor desempenho mecânico, maior porosidade. A etringita (3CaO.Al₂O₃.3CaSO₄.32H₂O) é um dos principais produtos de hidratação responsável pelo desenvolvimento inicial de força e, para sua formação, é necessário que haja quantidade suficiente de alumina (Al₂O₃) disponível para reagir com a anidrita (CaSO₄) (MASOUDI, 2018). A autora explica que a adição do ativador alcalino no CSS, quando hidratado, produz hidróxido de cálcio (CH), proporcionando o aumento da alcalinidade do meio, o que promove a dissolução da escória. Com isso, os íons dissolvidos da escória (C₅S₃A) reagem com o sulfato de cálcio (C $\bar{S}$) presente na mistura e formam os dois produtos principais de hidratação: etringita (C₆A $\bar{S}$ ₃H₃₂) e hidrato de silicato de cálcio (C-S-H), conforme a equação 1 abaixo (MASOUDI, 2018):



Gruskovnjak et al. (2008) afirmam que deve haver no mínimo 13% de Al₂O₃ na escória para que o CSS alcance um bom desempenho mecânico, visto que escórias com uma alta proporção de Al₂O₃ e CaO são mais reativas e produzem maiores resistências à compressão, necessitando de menor ativação alcalina. Porém, a norma EN 15743 (2010) adotada na Europa não estabelece um teor mínimo de alumina para a escória utilizada na produção do CSS. Gruskovnjak et al. (2008) estudaram o processo de hidratação e desenvolvimento de força do CSS com dois diferentes tipos de escória, um com teor de alumina alto (12%) e outro baixo (7,7%), sendo a maior formação de etringita observada na mistura de CSS com escória de alto teor de alumina. Também, Angulski da Luz e Hooton (2015) realizaram estudo com CSS no qual foram examinadas duas escórias, uma com teor

de Al_2O_3 de 8% e a outra com teor de 13,7%: os autores observaram que as misturas de CSS com alto teor de alumina obtiveram maiores resistências à compressão aos sete dias de idade em comparação às amostras de baixo teor de alumina.

Masoudi (2018) comparou duas misturas de CSS, B (13% de Al_2O_3) e D (11,79% de Al_2O_3), e verificou que para o CSS com maior teor de alumina (B), doses mais baixas de CP foram necessárias para a ativação alcalina da escória. Em verificação a outras duas amostras, C (13,07% de Al_2O_3) e F (7,43% de Al_2O_3), Masoudi (2018) notou que o desenvolvimento da resistência inicial da mistura F de argamassa de CSS foi muito inferior ao desenvolvimento da mistura C de CSS, fator atribuído pela autora à menor dissolução da escória de baixo teor de alumina devido à composição de seu produto químico e deficiência de Al_2O_3 .

Em seus estudos, Masoudi (2018) também analisou a eficácia de algumas técnicas de ativação que poderiam resultar em melhorias significativas no desenvolvimento da resistência à compressão e hidratação do CSS produzido com escória de alto-forno de baixo teor de alumina. A autora, dentre todos os resultados obtidos, observou que o aumento da finura Blaine do material proporciona um desempenho mecânico aprimorado das misturas de CSS com baixo teor de alumina. Ademais, a adição de fontes externas de aluminatos à mistura de CSS para aumentar a quantidade de Al_2O_3 não melhorou o desenvolvimento da resistência à compressão (MASOUDI, 2018). A autora esperava promover a formação de etringita usando fontes externas de aluminatos como cimento de aluminato de cálcio, metacaulim e sulfato de alumínio, mas não notou melhorias com a técnica. Entretanto, Pimenta (2020) obteve conclusão diferente em sua pesquisa. Segundo o autor, todas as amostras produzidas com diferentes teores de metacaulim (MK) mostraram ganho de resistência ao longo do tempo e uma reação mais rápida de hidratação das pastas, evidenciando o MK como uma alternativa promissora de fonte de Al_2O_3 mesmo ele possuindo limitações devido às suas características físicas. Porém, em detrimento de tais características, Pimenta (2020) afirma que a presença de MK “é limitada a um teor ótimo e quando esse teor é superado, pode comprometer a reatividade e consequentemente a resistência mecânica”. O autor considera que a presença, até 10%, de MK nas pastas de CSS contribui com o aumento do teor de alumina, o que proporciona maior formação de etringita no CSS e consequente aumento da resistência.

Outro componente de grande relevância na composição do CSS é o sulfato de cálcio. De acordo com Gracioli et al. (2017) e Pinto, Medeiros-Junior, Angulski da Luz (2018), o CSS possui maior teor de sulfato de cálcio que o CP (10% a 20%) o que possibilita que o material possa ser retirado de diferentes fontes, como os resíduos industriais fosfogesso e fluorgesso, provenientes respectivamente das indústrias produtoras de ácido fosfórico e ácido hidrófluórico. Gracioli et al. (2017) expõem que essas fontes podem ser inseridas em sua fase di-hidratada ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), como o fosfogesso, hemididratada ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) ou anidra (CaSO_4), sendo essa última mais comum e também chamada de anidrita, ressaltando que, para tal utilização, é necessário a calcinação das fontes para que as moléculas de água sejam eliminadas, obtendo-se a anidrita. Canut et al. (2008) apud Gracioli (2016), aponta que a cada tonelada de ácido fosfórico produzido, são gerados de 4 a 5 toneladas de fosfogesso. Assim, a utilização deste material no CSS como fonte de sulfato de cálcio também tem objetivo de tornar a produção de cimento mais sustentável.

Gracioli et al. (2016) afirmam que o fosfogesso possui semelhança química com a gipsita, principalmente representada pelos teores de sulfato (SO_3) e óxido de cálcio (CaO) e, por isso, pode ser utilizado para a produção de cimento. Por testes, os autores puderam constatar que as amostras confeccionadas com anidrita proveniente do fosfogesso apresentam um processo de hidratação mais lento, o que foi posteriormente confirmado por testes realizados que mostraram a ausência de etringita e C-S-H aos 3 dias nas amostras com fosfoanidrita.

Gracioli et al. (2017) realizou experimentos feitos com fosfogesso para produção de CSS e constatou que este atendeu aos requisitos mínimos de resistência à compressão exigidos pela norma europeia para cimentos supersulfatados EN 15743/2010, sendo que a taxa de calor de hidratação observada foi baixa devido principalmente à influência do teor de ativador alcalino. Pinto (2019) ressalta ainda que, pelo fato de no Brasil grande parte do fosfogesso ainda não ser reaproveitado, necessitando de grandes áreas para descarte, sua utilização na produção do CSS também atende a uma questão ambiental.

A fase mais aquosa do sulfato de cálcio é a gipsita, que começa a desidratar quando submetida a aquecimento a partir de 100°C (GRACIOLI, 2016). Em seu trabalho, a autora expõe que um estudo sobre CSS produzido com gesso (sulfato de cálcio hemihidratado) apresentou tempo de pega inicial pequeno e, além disso, o uso do fosfogesso em sua forma anidra mostrou melhor eficiência quando comparada à sua forma in natura, tendo em vista que o uso da fase di-hidratada gerou atraso no processo: o fosfogesso sem tratamento térmico gera resistências iniciais baixas que só tendem a aumentar em idades posteriores, não proporciona as reações necessárias para o ganho de resistência à compressão e, no caso da fase hemihidratada em CSS, a trabalhabilidade do cimento é afetada pela pega instantânea (GRACIOLI, 2016).

Além da redução do uso de matérias-primas naturais, Rubert (2015) afirma que o CSS possui maior resistência à água do mar, a sulfatos e a ambientes de ácidos fracos em comparação ao CP. Pinto, Medeiros-Junior, Angulski da Luz (2018) afirmam que, apesar da maior suscetibilidade do CSS ao ataque por águas ácidas, o material possui boa resistência a águas marinhas, explicando que o CSS é resistente ao ataque por sulfatos principalmente pois seus aluminatos já estão combinados em compostos sulfoaluminatos, o que não ocorre no CP, existindo assim uma menor disponibilidade de portlandita (Ca(OH)_2), produto necessário para as reações expansivas. Gracioli et al. (2017) complementa, apontando que o CSS possui menor calor de hidratação em relação ao CP, fator que aponta o cimento supersulfatado como uma solução válida para evitar a ocorrência de fissuras com origem térmica.

A pesquisa em questão teve como objetivo: fazer a revisão bibliográfica de estudos já realizados na área de cimentos supersulfatados e preparar materiais constituintes do CSS dando enfoque ao estudo de suas composições químicas, principalmente ao teor de alumina presente na escória de alto-forno. Este artigo é resultado de iniciação científica iniciada em fevereiro de 2020, cujo plano de trabalho sofreu alterações: não foi realizada a etapa de calcinação do fosfogesso, preparação das pastas, argamassas e concretos à base de CSS, análise do pH, de calorimetria e índice de vazios, devido à suspensão das atividades presenciais nas universidades, a partir do dia 16 de março de 2020, por conta da pandemia mundial causada pelo Covid-19.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizados os materiais escória de alto-forno com baixo teor de alumina e fosfogesso. Também, fez-se uso dos seguintes equipamentos: moinho, jarros para moinho, esferas cerâmicas para moagem, peneira com abertura da malha 9,50 mm, recipiente de fundo, tampa e pincel, peneira de abertura 150 µm e almofariz com pistilo.

O fosfogesso, fonte de sulfato de cálcio usada para este artigo, é composto majoritariamente por sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e algumas impurezas, sendo este transformado em anidrita (CaSO_4) após o processo de calcinação (PINTO, 2019). Este foi preparado com o auxílio de peneiras 150 µm e um pincel, sendo o material passante reservado para posterior calcinação. O almofariz com pistilo foi utilizado para moagem rápida do fosfogesso, de modo a aumentar a quantidade de material passante pela peneira.

A escória utilizada para preparação do material era pertencente ao mesmo lote e foi disponibilizada por uma empresa brasileira que utiliza carvão mineral como fonte de combustível. Esta foi submetida à moagem por 3 horas em moinho de bolas da marca Servitech, modelo CT 242, sem necessidade de passar por peneiração. Segundo estudos prévios de Rubert (2015), Gracioli (2016) e Pinto (2019), antes da moagem, a escória foi seca em estufa por aproximadamente 24 horas em temperatura controlada de 105°C. A peneira 9,50 mm e o pincel foram utilizados para facilitar a separação entre a escória moída e as esferas cerâmicas. O material pronto foi armazenado em recipiente com identificação.

As etapas de preparação dos materiais acima citados foram executadas no Laboratório de Materiais, localizado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, campus Pato Branco. As atividades laboratoriais tiveram início no dia 06 de fevereiro: no primeiro mês, as quantidades dos materiais triturados e peneirados não foram registradas. A partir de março, nas duas semanas em que a universidade funcionou normalmente, as quantidades produzidas foram registradas, podendo ser conferidas na Tabela 2 no item Resultados e Discussão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 constam as quantidades dos materiais preparados em laboratório:

Tabela 1 – Resumo das quantidades de escória e fosfogesso produzidas em laboratório

Materiais	Período	
	02/03 a 06/03	09/03 a 13/03
Escória básica triturada	6,3605 Kg	6,0045 Kg
Fosfogesso peneirado	190,50 g	502,50 g

Fonte: Autoria própria (2020).

Foi utilizado, para meio de comparação e análise, a composição química de uma escória de alto-forno com alto teor de alumina, presente em trabalho de Trentin (2020) e, para este relatório, a escória utilizada foi de baixo teor de alumina. As composições químicas de ambas escórias citadas, com alto e baixo teor de alumina, constam na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Composição química da escória de alto-forno

Óxidos	Escória com baixo teor de alumina (%)	Escória com alto teor de alumina (%)	EN 15473/2010
SiO ₂	34,7	31,3	-
Al ₂ O ₃	8,9	13,3	-
Fe ₂ O ₃	0,6	0,7	-
CaO	47,5	42,8	-
MgO	4,3	4,8	-
SO ₃	1,6	2,6	-
Na ₂ O	0,1	-	-
K ₂ O	0,4	0,4	-
TiO ₂	0,5	0,6	-
MnO	0,9	-	-
CaO/SiO ₂	1,37	1,37	-
CaO + MgO + SiO ₂	86,5	78,9	≥ 66,7
(CaO + MgO) / SiO ₂	1,49	1,52	≥ 1
Massa específica [g/cm ³]	3,04	2,83	-
Superfície específica (método de Blaine) em [cm ² /g]	4663	4460	-

Fonte: Autoria própria (2020).

Em análise à Tabela 2 conclui-se que a composição química de ambas escórias apresentadas atendem à norma EN 15743/2010: a soma (CaO+MgO+SiO₂) é superior a dois terços (2/3) ou 66,7 em massa e a relação em massa (CaO+MgO)/(SiO₂) é maior do que 1,0. Portanto, as escórias podem ser utilizadas para a produção do CSS. Ademais, a quantidade de Al₂O₃ (13,3%) na escória estudada por Trentin (2020), classifica a escória como de alto teor de alumina, o que proporciona a maior formação de etringita e um processo de hidratação mais rápido. Já a quantidade de Al₂O₃ (8,9%) presente na escória preparada para este artigo, a classifica como de baixo teor de alumina, aspecto que proporciona a menor formação de etringita e C-S-H, menor grau de reação da escória, menor desempenho mecânico e maior porosidade.

Para a utilização do fosfogesso na produção do CSS, o mesmo passou por etapa prévia de calcinação. O material, de fórmula química CaSO₄.2H₂O, possui composição de acordo com a Tabela 3 a seguir:

Tabela 3 – Composição química de fontes de sulfato de cálcio

Elementos	Variação Percentual (%)	
	Gipsita	Fosfogesso
SO ₃	59,4	43,5
CaO	28,7	35,2
SiO ₂	0,2	0,5
Al ₂ O ₃	0,2	0,1

Elementos	Variação Percentual (%)	
	Gipsita	Fosfogesso
Fe ₂ O ₃	0,1	0,7
P ₂ O ₅	-	0,6
MgO	0,5	-
SrO	-	0,7
TiO ₂	-	0,4
K ₂ O	0,1	-
BaO	-	0,3
CeO ₂	-	0,2
F	-	0,2
Na ₂ O	1,0	-
Perda ao fogo	9,9	17,7

Fonte: Autoria própria (2020).

A norma EN 15743/2010, especifica apenas que o sulfato de cálcio pode ser de gesso di-hidratado (CaSO₄.2H₂O), hemihidratado (CaSO₄.0,5H₂O), anidrita (sulfato de cálcio anidro, CaSO₄) ou qualquer mistura deles.

CONCLUSÃO

A revisão bibliográfica contribuiu de maneira significativa para o embasamento sobre o tema da pesquisa e melhor assimilação das atividades laboratoriais propostas. Também pode-se destacar que o suporte oferecido por membros mais experientes do programa de iniciação científica, mestrado e pós-doutorado, foi essencial para entender o funcionamento prático das atividades laboratoriais requisitadas.

Do estudo das pesquisas realizadas sobre o CSS, muito pode-se compreender: a importância da produção de um cimento de qualidade que traga menos impacto ao meio ambiente, além da utilização de resíduos industriais para tal processo, dando uma utilidade para tais materiais; pontos positivos do CSS em relação ao ataque por sulfatos e sua resistência a águas marítimas; vantagens de sua produção quando realizada com escória de alto-forno com alto teor de alumina; variedade das fontes de sulfato de cálcio, sendo a utilização do fosfogesso ponto que agrega ao CSS o fato de utilizar outro resíduo industrial; importância da calcinação para a utilização do fosfogesso. Muitos outros fatores puderam ser agregados a este artigo, formando uma base de informações ótima para futuros estudos sobre o cimento supersulfatado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à UTFPR, pela oportunidade de participar do Programa de Iniciação Científica Voluntário (PIVICT), à orientadora Prof^(a). Dr^(a). Caroline Angulski da Luz e às pesquisadoras Isabel Cristina Mago, Mariana Perardt e Janaína Bonini pelo suporte durante a execução desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ANGULSKI DA LUZ, C.; HOOTON, R. D. Influence of curing temperature on the process of hydration of supersulfated cements at early age. **Cement and concrete research**, p. 69-75, 24 jul. 2015.

EN 15743, Supersulfated cement — **Composition, specifications and conformity criteria**, 2010.

GRACIOLI, Bruna et al. Considerações sobre a resistência mecânica e o processo de hidratação de cimentos supersulfatados (CSS) formulados com fosfogesso. **Revista Matéria**, [S. l.], v. 22, n. 01, p. 5-7. 2017.

GRACIOLI, Bruna et al. **II Congresso luso-brasileiro de materiais de construção sustentáveis. Uso do fosfogesso em substituição à fonte convencional (gipsita) visando à formulação de cimentos supersulfatados (CSS) com alto teor de sulfato de cálcio**. João Pessoa, PB. 2016. 8 p.

GRACIOLI, Bruna. **Influência da temperatura de calcinação do fosfogesso no desempenho de cimentos supersulfatados**. Orientador: Dr^a. Caroline Angulski da Luz. 109 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2016.

GRUSKOVNJAK, A., LOTHENBACH, B., WINNEFELD, F., et al., **Hydration mechanisms of super sulphated slag cement**, *Cement and Concrete Research*, v. 32, pp.983–992, Mar, 2008.

MASOUDI, Rana. **Examining compositions, hydration mechanisms and properties of supersulfated cement for use in concrete**. 2018. 304 p. Dissertação (Engenharia Civil) - University of Toronto, Toronto, CA, 2018.

PENNA, Paulo Camillo. Coprocessamento: uma solução definitiva para o resíduo: Roadmap tecnológico do cimento pretende reduzir emissões de CO₂. **Associação Brasileira de Cimento Portland**, São Paulo - SP, ano 2020, p. 1-1, 11 mar. 2020. Disponível em: <https://coprocessamento.org.br/estudo-roadmap-tecnologico-do-cimento-pretende-reduzir-emissoes-de-co2/> . Acesso em: 1 set. 2020.

PIMENTA, Samuel Fernandes. **Uso de metacaulim como fonte de alumina em escórias de alto-forno visando à produção de cimento supersulfatado**. Orientador: Prof^a. Dr^a. Caroline Angulski da Luz. 2020. 69 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2020.

PINTO, Sabrina Requião. **Durabilidade de matrizes cimentícias de cimento supersulfatado e de cimentos portland: ataque por sulfatos, carbonatação e penetração de cloretos.** Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Alves de Medeiros-Junior. Coorientadora: Profª. Drª. Caroline Angulski da Luz. 199 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Curitiba, PR, 2019.

PINTO, Sabrina Requião; MEDEIROS-JUNIOR, Ronaldo A.; ANGULSKI DA LUZ, Caroline. **Durabilidade de concretos com cimento supersulfatado: uma revisão da literatura.** 3º Simpósio paranaense de patologia das construções, p. 156-165. 2018.

RUBERT, Sílvia. **Contribuição ao estudo de cimentos supersulfatados: formulação e mecanismos de hidratação.** Orientador: Profª. Drª. Caroline Angulski da Luz. 115 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos - Área de concentração: Química de materiais) - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Pato Branco, PR, 2015.

SANTOS, Diana Margarida Câmara. **Desenvolvimento de novos cimentos amigos do ambiente.** Orientador: Prof. Dr. Rogério Anacleto Cordeiro Colaço. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Técnico Lisboa, Lisboa, 2015.

TRENTIN, Priscila Ongaratto. **Comportamento do cimento supersulfatado (CSS) exposto ao ataque por sulfatos de origem externa.** Orientador: Profª. Drª. Caroline Angulski da Luz. 2020. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2020.