Cimento Supersulfatado e sua durabilidade frente à reação álcali-agregado

SUPERSULFATED CEMENT AND ITS DURABILITY AGAINST ALKALI-AGGREGATE REACTION

Aline Oliveira Mattos*, Caroline Angulski da Luz†, Erica Caroline Szydloski ‡

RESUMO

O cimento supersulfatado mostra resultados promissores em relação à sua durabilidade frente à reação álcali-agregado, tendo grande influência dos teores de alumina e cálcio em sua composição. Este artigo teve como objetivo analisar o comportamento do cimento supersulfatado produzido com diferentes proporções de escória e sulfato de cálcio, por meio do método acelerado de argamassa, para encontrar a melhor composição em relação à expansão da reação álcali-agregado, levando em consideração sua resistência mecânica. Observou-se que o cimento supersulfatado com maiores teores de alumina e menores teores de cálcio apresentam bons resultados em relação à mitigação da reação álcali-agregado. A amostra de cimento supersulfatado com 10% de escória de alto-forno, demostrou melhores resultados em comparação com a amostra de 20% de escória. Ambos os CSS apresentaram menores variações dimensionais que o cimento Portland, empregado como comparação.

Palavras-chave: cimento supersulfatado, reação álcali-agregado, durabilidade, variação dimensional.

ABSTRACT

The supersulfated cement shows promising results in relation to its durability against the alkali-aggregate reaction, with great influence of the alumina and calcium contents in its composition. This article aimed to analyze the behavior of supersulfated cement produced with different proportions of slag and calcium sulfate, by means of the accelerated mortar method, to find the best composition in relation to the expansion of the alkali-aggregate reaction, taking into account its resistance mechanics. It was observed that the supersulphated cement with higher alumina and lower calcium contents presented good results in relation to the alkali-aggregate reaction mitigation. The supersulphated cement sample with 10% blast furnace slag showed better results compared to the 20% slag sample. Both CSS had smaller dimensional variations than Portland cement, used as a comparison.

Keywords: supersulfated cement, alkali-aggregate reaction, durability, dimensional variation.

1 INTRODUÇÃO

O cimento supersulfatado (CSS) possui composição 70-90% de escória de alto-forno, 10-20% de sulfato de cálcio e 5% de um ativador alcalino (SANTOS, 2015). Com isso, segundo Santos (2015), a grande porcentagem de escória de alto-forno em sua composição diminui significativamente a emissão de gás carbônico, já que este componente não precisa passar pela fase de clinquerização, responsável pela emissão do

* Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil; alinemattos@alunos.utfpr.edu.br
† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco; angulski@hotmail.com
‡ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil; ericaszy@hotmail.com

gás poluente. Quanto à sua durabilidade em relação à RAA, para que o CSS possa ser amplamente utilizado é preciso que este atenda a normas e parâmetros estabelecidos por estas. O desempenho do CSS depende do teor de alumina (Al_2O_3) presente na escória e esse teor é considerado alto quando igual ou maior que 13% da composição da escória (MASOUDI, 2018) e baixo quando inferior a esta porcentagem. A norma EN 15743 (2010) adotada na Europa, um dos principais documentos vigentes que normatizam o CSS, não estabelece um teor mínimo de alumina para a escória utilizada na produção do cimento supersulfatado.

A RAA, foco de estudo deste artigo, é definida pela norma brasileira ABNT NBR 15577-1 (2018) e é a reação entre íon alcalinos, por exemplo do clínquer do cimento, e os minerais reativos do agregado, gerando um gel na superfície destes agregados que acaba se acumulando nos vazios da pasta de cimento e, em contato com a água, se expande e gera pressão interna podendo fissurar a estrutura caso exceda a resistência à tração do concreto (MUNHOZ, 2007). Dentre as metodologias utilizadas pelos autores para avaliar a RAA no cimento, temos o método acelerado das barras que é descrito pela ASTM C 1260 (1994). No Brasil, a norma que traz os parâmetros para o método acelerado das barras é a ABNT NBR 15577-4 (2008). O valor limite de expansão indicado pela NBR 15577- 1 (2018) para classificação do grau de reatividade do agregado em reativo ou inócuo é de até 0,19%.

Porém, mesmo o CSS apresentando boa durabilidade frente à RAA, existem poucos estudos sobre qual a melhor composição a ser utilizada. Então, qual a relação de componentes do CSS que melhor atende aos requisitos necessários e apresenta um bom desempenho frente à RAA? Este estudo, realizado em conjunto com uma dissertação de mestrado, teve como objetivo analisar o comportamento do CSS produzido com diferentes proporções de escória e sulfato de cálcio, por meio do método acelerado de argamassa, para encontrar a melhor composição em relação à expansão da RAA, sem que houvesse perda de resistência mecânica. Realizado na cidade de Pato Branco (Paraná), o agregado reativo foi obtido na região e os resultados foram comparados com os dos cimentos comerciais CP IV e CP V. Esses cimentos foram escolhidos pois o CP IV, segundo a NBR 15577-1 (2018), apresenta bom desempenho em relação à mitigação da RAA e o CP V apresenta um mau desempenho frente à reação.

2 MÉTODOS

Esta pesquisa foi realizada na UTFPR, no período de agosto de 2020 a agosto de 2021. Moldou-se argamassas de CSS de duas composições distintas e argamassas produzidas de cimento CP IV 32 RS e CP V, com formato prismático e dimensões de 25mm x 25mm x 285mm, para análise de variação dimensional de cada combinação de cimento/agregado. Foram produzidos 3 corpos de prova para cada composição, com sistema de parafuso e pinos nas laterais, de acordo com o procedimento apresentado pela ABNT NBR 7215 (2019), com as relações cimento/agregado de 1:2,25 e água/cimento de 0,47. Após moldados, os corpos de prova foram cobertos por saco plásticos e armazenados em um recipiente com tampa e uma lâmina de água, mantendo a umidade a 95% e temperatura constante de 23 ± 2°C, por 48 horas em sala climatizada. Os prismas de CSS não possuem resistência suficiente para desmolde a 24 horas, sendo assim, os corpos de prova de CP seguiram o mesmo procedimento de molde e desmolde. Após o período de cura, as barras foram desmoldadas, identificadas e armazenadas em uma bacia de aço inox com água destilada, totalmente submersas, colocadas então em estufa a 80 ± 2°C por 24 horas. Depois desse período, foram transferidas para solução de NaOH com concentração de 1N, na qual permaneceram até o final do ensaio, voltando para a estufa a 80 ± 2°C por 28 dias. Realizou-se a primeira leitura 24 horas após a desmoldagem e aos 7, 14 e 28 dias contados a partir da data da imersão em solução de NaOH. Decidiu-se continuar o acompanhamento das expansões, então aos 42 dias as amostras foram retiradas da estufa, transferidas para recipiente de plástico com a solução de NaOH e

armazenadas em sala climatizada a 23 ± 2°C, com leituras realizadas semanalmente. O acompanhamento se deu até o 152° dia das misturas CSS75 e CSS85, 105° dia do CP IV e 70° dia do CP V, sendo os períodos diferentes pois realizou-se a confecção das barras em datas diferentes devido à falta de bacias de aço inox.

Para ensaio de resistência mecânica, moldou-se 6 corpos de prova prismáticos, de cada combinação, com dimensões de 4cm x 4cm x 16cm, seguindo o mesmo procedimento citado acima: foram utilizados moldes para que fosse possível a realização do ensaio de flexão e, em seguida, com as metades rompidas dos corpos de prova, fosse possível a realização dos ensaios de compressão. Após o período de cura, 3 corpos de prova foram desmoldados, identificados e armazenados em uma bacia de aço inox com água destilada, totalmente submersos, colocados então em estufa a 80 ± 2°C por 24 horas. Depois desse período, foram transferidos para solução de NaOH com concentração de 1N, na qual permaneceram até o final do ensaio, voltando para a estufa a 80 ± 2°C por 28 dias. Os corpos de prova permaneceram em solução de NaOH na estufa a 80 ± 2°C por 28 dias, data na qual se realizou o primeiro rompimento por meio do ensaio de flexão e, em seguida, foram transferidos suas metades para bacia plástica com a solução e armazenados em sala climatizada a 23 ± 2°C até o segundo rompimento por meio do ensaio de compressão: este foi realizado em datas diferentes para cada composição, pois foram confeccionados em momentos separados. Os outros 3 corpos prismáticos foram desmoldados, identificados e submersos em solução de 3 g/L de cal em bacias de plástico, sendo armazenados em sala climatizada a 23 ± 2°C durante todo o período dos ensaios, para posterior comparação no teste de resistência mecânica. A Tab. 1 traz a caracterização química dos materiais utilizados na composição do CSS:

Tabela 1 – Caracterização química dos materiais que compõe o CSS

Materiais Componentes do CSS	Variação Percentual dos Elementos										
	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	SO_3	MgO	K_2O	TiO_2	P_2O_5	SrO	ZrO_2
Escória de alto-forno	21,05	1,13	10,18	54,77	8,87	2,07	0,76	0,67	-	0,09	0,07
Anidrita	0,158	0,079	0,154	34,27	63,75	0,189	0,092	-	0,999	0,102	0,015
Ativador Alcalino	19,32	3,07	4,58	61,86	3,05	1,97	-	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria (2021).

A escória de alto-forno atende às especificações da norma EN 15743 (2010), podendo então ser usada da produção de CSS. Adotou-se para composição do CSS neste estudo, os teores de 75% (CSS75) e 85% (CSS85) de escória de alto-forno. A anidrita foi obtida a partir de uma gipsita moída de Araripina (PE), que passou por peneiramento na malha 150 µm e então por calcinação em temperatura de 650°C por 60 minutos e taxa de aquecimento de 50°C/min. O teor empregado deste material foi de 20% para o CSS75 e 10% para o CSS85. Como ativador alcalino, utilizou-se o cimento Portland CP V ARI de alta resistência inicial, da marca Itambé, que compõe 5% de cada CSS. Na Tab. 2 abaixo encontram-se as composições químicas do CP IV e CP V:

Tabela 2 – Caracterização química do CP IV e CP V

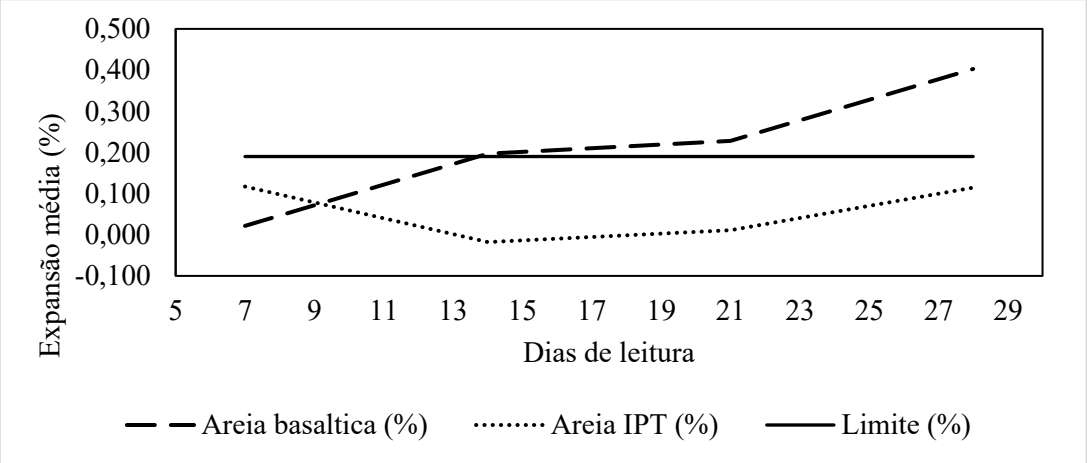
	Teores dos elementos (%)							
	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	SO_3	MgO	CaO livre	Equivalente Alcalino
CP IV	30,32	4,24	9,55	45,17	2,10	1,60	0,64	1,22
CP V	-	-	-	-	4,18	1,35	-	0,60

Fonte: Adaptado do Fornecedor (2021).

Para imersão das argamassas no ensaio acelerado de expansão, utilizou-se para a solução o hidróxido de sódio- P.A (NaOH) da marca Dinamica, em microperolas, com 99% de pureza. Como agregado reativo,

utilizou-se uma areia artificial proveniente da britagem de rocha basáltica de uma jazida localizada em Pato Branco (PR). Lavou-se o agregado para eliminar o material pulverulento, colocado então em estufa por 24 horas a 100°C para secagem e posteriormente peneirado em um agitador de peneiras para ter sua granulometria selecionada, sendo a norma que regulamenta a granulometria requerida para o material a ABNT NBR 15577-4 (2008). A reatividade do material foi comprovada neste estudo através do ensaio pelo método acelerado de barras de argamassa, com limite normatizado de 0,19% regido pela ABNT NBR 15577-4 (2008). Utilizou-se barras moldadas com areia normatizada como referência, sendo as argamassas produzidas com cimento Portland CP V ARI. Os resultados obtidos são apresentados na Fig. 1:

Figura 1 – Variação dimensional das barras do ensaio de reatividade da areia basáltica de Pato Branco



Fonte: Autoria própria (2021).

3 RESULTADOS

As amostras foram classificadas em potencialmente inócuas (expansão menor que 0,19%) e potencialmente reativas (expansão maior que 0,19%), de acordo com a NBR 15577-1 (2018), em relação a seu tamanho inicial e após 28 dias em solução de NaOH. Os resultados podem ser verificados na Tab. 3:

Tabela 3 – Variação dimensional média no 14° e 28° dia, teores de Al e Ca e classificação das amostras

Amostra	Teor (%)		Variação dimensional média (%)		Classificação
	Al	Ca	14 dias	28 dias	
CSS75	7,89	51,02	0,004	0,031	Potencialmente inócuo
CSS85	8,89	53,07	-0,011	-0,005	Potencialmente inócuo
CP IV	9,55	45,17	0,013	0,039	Potencialmente inócuo
CP V	-	-	0,03069	0,223	Potencialmente reativo

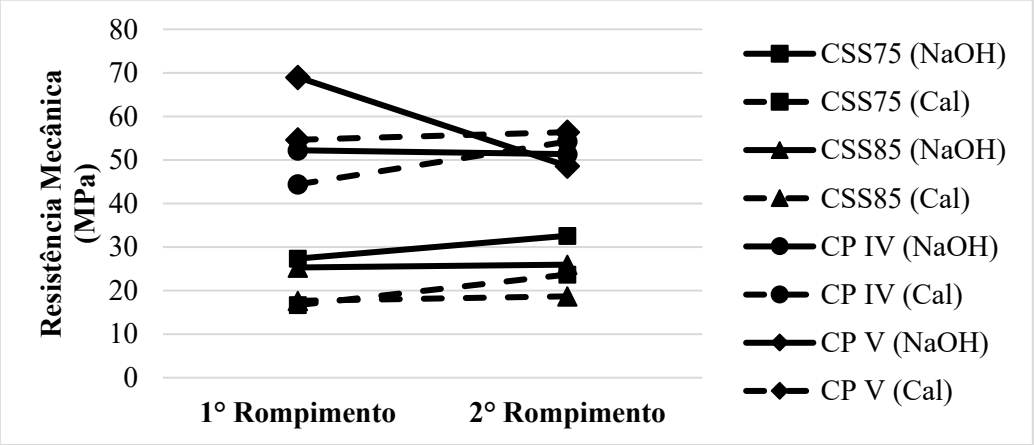
Fonte: Autoria própria (2021).

O CP V apresentou expansão média de 0,120% aos 28 dias, mas esse valor provavelmente é resultado de um problema ocorrido com a estufa, no qual ela se desligou. Aos 33 dias foi refeita a leitura de medida, obtendo-se expansão média de 0,223%, classificando a amostra como potencialmente reativa. Com esses dados, observa-se que as menores expansões ocorreram para as amostras com maior teor de alumínio e menor

teor de cálcio, na ordem: CSS85 - CSS75 - CP IV - CP V. Com objetivo de verificar comportamentos expansíveis, manteve-se as barras em estufa a 80 ± 2°C do 28° ao 42° dia. Notou-se uma estabilização na expansão das barras de CSS e CP IV, mas uma contínua expansão nas barras de CP V.

Para análise da resistência mecânica, foram rompidos corpos de prova que passaram pelo método acelerado das barras em solução de NaOH, e corpos de prova que permaneceram no mesmo período em solução de cal. Os valores obtidos podem ser observados na Fig. 3:

Figura 3 - Resistências mecânicas das argamassas produzidas com diferentes tipos de cimentos



Fonte: Autoria própria (2021).

O primeiro rompimento ocorreu no 28° dia para todas as amostras e o segundo ocorreu no 182° dia para o CSS75, 111° dia para o CSS85 e o CPV, e 62° dia para o CPIV. Para o CSS75, houve ganho de resistência entre o 28° e 182° dia, sendo que as amostras em solução de cal tiveram aumento de 42,25% de resistência e as amostras em solução de NaOH um ganho de 19,20%. Para o CSS85, as amostras em solução de cal tiveram aumento de 5,84% de resistência e as amostras em solução de NaOH um ganho de 2,57%. Para o CP IV, observa-se um ganho de 22,17% de resistência nas amostras em solução de cal e uma redução de 1,74% nas amostras curadas em solução de NaOH, mostrando a influência negativa do hidróxido de sódio nas propriedades mecânicas dos corpos de prova. O CP V, entre o 28° e 111° dia, mostrou um aumento de 3,2% na resistência das amostras em solução de cal e uma queda de 29,58% nas amostras em solução de NaOH.

Com esses dados, percebe-se o melhor comportamento do CSS em relação aos outros cimentos, pois este sofreu menor impacto pela RAA. Observou-se uma menor resistência mecânica do CSS em comparação ao CP, o que se deve à composição do C-S-H com baixa relação Ca/Si. Quanto ao aparecimento de fissuras, não se observou nenhuma considerável nos corpos de prova, o que já era esperado para o CSS75, CSS85 e CP IV, mas não para o CP V. Vale ressaltar que a alta resistência observada para o CP V no primeiro rompimento pode estar relacionada à sua cura inicial em estufa a 80 ± 2°C em solução de NaOH.

4 CONCLUSÃO

As amostras de CSS75, CSS85 e CP IV mostraram-se potencialmente inócuas com expansão abaixo do limite de norma de 0,19%. Portanto, os CSSs deste estudo podem ser considerados eficazes na mitigação da RAA. Já o CP V não estabilizou sua expansão, excedendo os 0,19%, e classificou-se como potencialmente reativo. As amostras de CSS apresentaram eficácia frente à RAA, sofrendo menores expansões em comparação

ao CP. Estas possuem maior teor de alumina e menor teor de cálcio, sendo ainda os resultados de expansão do CSS85 melhores que do CSS75. Para o teor de cálcio, percebeu-se que a maior relação Ca/Si foi encontrada nos géis do CSS e que, conforme essa relação aumenta, a absorção de água pelos géis diminui. A resistência mecânica nas amostras de CSS obtiveram ganho tanto para os corpos de prova de solução de Cal quanto para os de solução de NaOH, o que não ocorreu para o CP IV e CP V, que foram prejudicados pela solução.

O uso do CSS com agregados reativos mostrou-se eficaz na mitigação da RAA e sua expansão, principalmente na mistura de CSS85, sendo as proporções usadas neste estudo interessantes como ponto de partida para futuras pesquisas. Porém, com resultados de resistência mecânica inferiores ao CP, deve ser analisada a viabilidade da utilização do CSS para cada caso. Estudos mais aprofundados ainda são necessários para compreender-se melhor qual composição pode aumentar a resistência mecânica do CSS, mantendo seus bons resultados frente à RAA. Ensaios mais lentos, em condições mais próximas da realidade, também são interessantes para futura comparação de resultados.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à UTFPR pela oportunidade de participar do Programa Institucional de Bolsas em Iniciação Científica (PIBIC) e também pelo auxílio financeiro durante todo período de pesquisa, à Prof(ª). Dr(ª). Caroline Angulski da Luz pela orientação e à mestranda Erica Caroline Szydloski por todo o suporte durante a execução deste estudo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-1: Agregados – RAA – Guia para avaliação.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-4: Agregados – RAA – Ensaio acelerado de barras de argamassa.** Rio de Janeiro, 2008.

ASTM C1260/94. **Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method).** Philadelphia, 1997. Section 4 (Construction).

EN 15743, Supersulfated cement — **Composition, Specifications and Conformity Criteria,** 2010.

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.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-silicato.** 2007. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politecnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

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.