Comparativo dos métodos de avaliação de ataque por Na_2SO_4 em cimento álcali-ativado e cimento Portland

Beltrame, Neusa Aparecida Munhak¹; Perardt, Mariana²; Angulski da Luz, Caroline³; Medeiros-Junior, Ronaldo Alves⁴

¹Discente, Universidade Federal do Paraná, neusaaparecida@prof.unipar.br

²Discente, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, marianaperardt@alunos.utfpr.edu.br

³Professora, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, angulski@hotmail.com

⁴Professor, Universidade Federal do Paraná, medeirosjunior.ufpr@gmail.com

Resumo: O cimento Portland (CP) é um produto industrializado e seu processo de fabricação não é apenas consumidor de energia, mas também responsável por grandes emissões de CO_2 . Desta forma, os cimentos álcali-ativados (CAA) estão ganhando atenção pelo bom desempenho mecânico, durabilidade e baixo impacto ambiental, além de reduzir as emissões de CO_2 . O ataque por sulfatos é uma forma complexa de deterioração que reduz a vida útil desses materiais. A NBR 13583 é o método mais comum para avaliar a resistência aos sulfatos em argamassas de CP. A avaliação é feita medindo a expansão das barras imersas em solução de Na_2SO_4 . Como os sulfatos precisam se difundir na argamassa pelo lado externo, antes de reagir com a pasta de cimento endurecido, o processo de deterioração e expansão demanda tempo. O método NIST Test propõem uma forma para acelerar o processo de degradação por sulfatos com a utilização de pastas de cimento e redução das dimensões das amostras. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi verificar a equivalência entre os métodos de ensaio acelerado nos CP e CAA. A escória foi ativada com 5% de NaOH. Os corpos de prova foram submersos em solução de Na_2SO_4 e a variação dimensional foi monitorada por 120 dias. Os resultados indicaram que os ensaios realizados com as pastas foram mais acelerados quando comparados com as argamassas.

Palavras-chave: cimento, sulfato, expansão.

Abstract: Portland cement (PC) is an industrialized product and its manufacturing process is not only energy consuming but also responsible for large CO_2 emissions. Therefore, activated-alkali cement (AAC) is gaining attention for the good mechanical performance, decrease environmentally impact, and reduce CO_2 emissions. Sulfate attack is a complex form of deterioration that reduces the service life of the materials. NBR 13583 is the most common method of evaluating sulfate resistance in PC mortars. The evaluation is made with the expansion of the bars immersed in the solution of Na_2SO_4 . As the sulfates need to diffuse into the mortar from the outside, before reacting with the hardened cement paste, the deterioration and expansion process demand time. The method NIST Test proposes a way to accelerate and degrade by sulfates using cement pastes and reducing sample sizes. In this context, the objective of this study was to verify an equivalence between these accelerated test methods in the PC and AAC. The slags were activated with 5% NaOH. The specimens were submerged in Na_2SO_4 solution and the dimensional variation was monitored for 120 days. The results indicated that the tests performed with pastes were slightly faster when compared to the mortars.

Keywords: cement, sulfate, expansion.

1. Introdução

O cimento Portland (CP) é o principal aglomerante hidráulico usado nas misturas do concreto. A fabricação desse produto não apenas consome elevada quantidade de energia, mas também é responsável por grandes emissões de CO_2 [1]. Os aglomerantes ativados por álcali podem ser uma alternativa ao cimento Portland pelo bom desempenho mecânico, durabilidade e baixo impacto ambiental [2,3]. Esse material alternativo pode ser inteiramente sintetizado a partir de subprodutos [2-4-5]. Nos cimentos álcali ativados obtidos com escórias de alto forno granuladas (GBFS), o principal produto de hidratação é o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e também o C-A-S-H (sílico-aluminato de cálcio hidratado), devido à incorporação de Al_2O_3 em sua estrutura. Hidrotalcita, merwinita, estratlingita e hidrato de monossulfoaluminato de cálcio também podem estar presentes, como fases minoritárias [4-6]. As escórias são usadas para obtenção de cimentos resistentes aos sulfatos (CP tipo III) e estes aglomerantes podem conter até 75 % de GBFS [7]. No entanto, as escórias também podem ser ativadas para a produção de aglomerantes livres de clínquer [8].

O ataque por sulfatos é uma forma complexa de deterioração que reduz a vida útil de materiais cimentícios. Em componentes de cimento, o ataque por sulfatos pode se manifestar na forma de expansão e fissuração, implicando na redução progressiva da resistência mecânica e da massa física; ao fissurar o elemento cimentício torna-se mais suscetível à penetração de íons sulfatos no seu interior, acelerando a deterioração [9-11]. Os sulfatos mais comuns são os de sódio, potássio, magnésio e cálcio [1]. Os principais produtos formados durante o ataque por sulfatos nos cimentos Portland são a etringita e a gipsita, resultado das reações químicas entre os íons sulfato e os produtos de hidratação do cimento [11-13]. Em ambientes sulfatados, pesquisas indicaram que a resistência ao sulfato do cimento álcali-ativado parece ser superior ao cimento Portland convencional, inclusive aos cimentos resistentes a sulfatos quando expostos ao Na_2SO_4 [3-14]. Apesar do bom desempenho mecânico e aos agentes agressivos do CAA, a formação da gipsita é indicada como prejudicial ao material quando em contato com o MgSO_4 [15,16]. Essas reações são de natureza expansiva, exercendo, portanto, uma pressão interna do concreto endurecido que causa a deterioração [17,18].

Os testes de avaliação dos efeitos de determinado ambiente sobre um material requerem prazos longos de execução. No entanto, ensaios acelerados em laboratórios podem aumentar a velocidade de degradação e reproduzir o comportamento do material a longo prazo [19]. Dentre os métodos de ensaios acelerados de ataque por sulfatos tem-se a metodologia NIST Test, proposto no estudo de Aleksic [20], que prescreve ensaios para avaliação das pastas de cimento, e a norma brasileira 13583 [21], que propõem critérios para testes com prismas de argamassas. As principais diferenças entre os métodos estão apresentadas na Tabela 1.

Vários fenômenos que causam a degradação dos materiais estão relacionados com a variação dimensional [19]. O ensaio prescrito pela ASTM C1012 [22] é o método mais comum para avaliar a resistência aos sulfatos dos cimentos Portland e adições minerais [20]. Essa norma se assemelha com os procedimentos da NBR 13583 [21] em relação ao tipo de mistura, dimensões das amostras e solução contaminante.

Para ambos os métodos, a avaliação é feita medindo a expansão das barras de argamassas imersas em solução de sulfato. Como os sulfatos precisam se difundir na argamassa pelo lado externo antes de reagir com a pasta de cimento endurecida, o processo de deterioração e expansão demanda tempo que pode variar de 6 a 18 meses para a ASTM C1012 [22] e 42 dias para a NBR 13583 [21]. Assim, ensaios mais rápidos, isto é, acelerar o processo de decomposição do concreto em um ambiente laboratorial continua sendo um desafio para os pesquisadores.

Tabela 1: Principais diferenças entre o ensaio da NBR 13583 [21] e NIST Test [20]

Descrição	[21]	[20]
Proporção das misturas	Argamassa (1:3,20:0,6)	Pasta (1:0,45)
Quantidade de amostras	4 amostras para cada solução (sulfato e água saturada com cal)	Mínimo 6 corpos de prova na solução de sulfato
Cura inicial	14 dias (48h ao ar e 12 dias imersas em água saturada com cal)	7 dias em câmara úmida
Cura final (exposição ao sulfato)	42 dias	91 dias
Idade de leitura	14, 28 e 42 dias	5 vezes por semana nas duas primeiras semanas e semanalmente até 91 dias.
Tipo de solução agressiva	Sulfato de sódio	Sulfato de sódio
Concentração de sulfato	100g/litro	50g/litro
Forma de exposição	Estufa 40 ± 2 °C	Temperatura 23 ± 2 °C
Solução de sulfato	Reposição, se necessário	Troca da solução em todas as leituras
Forma de medição	Retirada das amostras da estufa por 10 minutos para estabilização da temperatura. Mensuração em no máximo 5 minutos, adotando o menor valor observado com o giro da amostra.	Imediatamente após a retirada da solução. Não especifica o tempo a ser adotado.
Resultado final	Resultante da diferença entre a expansão média das barras curadas em solução agressiva de sulfato e expansão média em solução saturada com cal nas mesmas condições, em %	Média da variação do comprimento das barras individuais curadas em solução de sulfato, em %
Limite de expansão	Não há indicação	Ver Tabela 02.

Fonte: autora.

De acordo com Aleksic [20] a redução da área das amostras de 25 x 25 mm para 10 x 10 mm, permite uma maior penetração de íons sulfatos nos componentes cimentícios, acelerando as reações de expansão. Segundo ainda o mesmo autor [20], os resultados podem ser considerados equivalentes à norma da ASTM.

Uma das pesquisas realizadas pela Universidade de Toronto indicou que o tempo para exceder 0,10 % de expansão pela ASTM C1012 [22] foi de 260 dias, enquanto que pelo NIST Test, foram necessários apenas 56 dias. Em outro ensaio realizado, uma determinada amostra necessitou de 540 dias para expandir 0,10 % pela ASTM C1012 [22] e, pelo NIST Test, apenas 270 dias [20]. A Figura 1 apresenta os resultados de expansões obtidos pelo ataque por sulfatos de sódio em argamassas e pastas de cimento pelo NIST Test, em comparação com a metodologia da ASTM C1012.

Figura 01: Comparação da expansão entre os métodos NIST e ASTM C1012.
Fonte: ALEKSIC (2010) [20]

Na Tabela 2 estão apresentados os limites de expansão máxima proposto pelo método NIST Test para prismas de pastas de cimentos de moderada resistência aos sulfatos - MS ($\text{C}_3\text{A} \leq 8\%$) e para os cimentos de alta resistência aos sulfatos - HS ($\text{C}_3\text{A} \leq 5\%$) [20].

Tabela 2: Máxima expansão proposto pelo método NIST Test.

Equivalência de desempenho	Máxima expansão quando usado o NIST test		
	Até 28 dias	Até 56 dias	Até 91 dias
Tipo II/MS equivalente	0,10 %	0,15 %	--
Tipo V/HS equivalente	0,05 %	0,10 %	--
Tipo V/HS equivalente (Exposição muito severa)	--	--	0,15 %

Fonte: Adaptado de Aleksic [20]

No estudo realizado por Aleksic [20], a expansão das pastas de cimento de 0,15 % aos 56 dias para o cimento Tipo II/MS (moderada resistência aos sulfatos) é equivalente a expansão de 0,10 % aos 6 meses pela ASTM C 1012 [22]. Para o cimento Tipo V/HS (alta resistência aos sulfatos), o método NIST Test [20] obteve uma expansão 0,10 % aos 56 dias e, pela metodologia da ASTM C1012 [22], essa expansão só foi possível aos 12 meses. Aos 91 dias é proposto uma expansão de 0,15 % para o cimento Tipo V/HS, que equivale a 0,10 % aos 18 meses pela ASTM

C1012 [22]. A NBR 13583 [21] não faz menção de expansão máxima para as argamassas de cimento. Porém, no estudo realizado por Marciano [23] é apontado que a variação dimensional considerada para cimentos resistentes a sulfatos deve ser inferior a 0,030 % aos 42 dias de idade.

Neste contexto, este estudo teve como objetivo investigar a equivalência da variação dimensional dos cimentos álcali ativados com escória de alto forno e cimentos Portland resistente a sulfatos, através dos métodos de ensaio acelerado pela NBR 13583 [21] e NIST Test [20].

2. Materiais e métodos

2.1 Materiais

Os materiais usados nesta pesquisa foi a escória proveniente do alto forno para a produção do cimento álcali-ativado (CAA) e cimento Portland tipo CPIV-32 RS como referência. Também foram utilizados o NaOH (hidróxido de sódio) para ativação alcalina do CAA, Na_2SO_4 (sulfato de sódio) granulado para solução contaminante e areia padronizada pela NBR 7214 [24] em 4 frações granulométricas (grossa (# 16), média grossa (# 30), média fina (# 50) e fina (# 100)). As misturas das pastas e argamassas foram realizadas com água deionizada. A escória foi seca em estufa por 24 horas (105 ± 2 °C) e moída em moinho de bolas por 2 horas. O CPIV-32 RS se caracteriza por apresentar em sua composição química teor de 15 % a 50 % de material pozolânico, considerado um aglomerante resistente ao ataque por sulfatos em função da reduzida quantidade de clínquer e teor de C_3A (≤ 8 %).

2.2 Métodos

A metodologia utilizada para avaliação dimensional das barras de pastas e argamassas expostas ao Na_2SO_4 foi baseada no método NIST Test [20] e na norma brasileira 13583 [21], respectivamente. Para as argamassas, foram moldados prismas com dimensões de 25 x 25 x 285 mm e traço 1: 3,20: 0,60 (Figura 2a). O procedimento de mistura seguiu as recomendações da NBR 7215 [25]. Para as pastas, foram moldados corpos de prova com dimensões de 10 x 10 x 60 mm, traço 1:0,45) e o adensamento efetuado com a aplicação de 10 golpes leves nas laterais da fôrma (Figura 2b). A mistura foi realizada manualmente por 4 minutos. Para confecção do CAA, a solução de NaOH foi preparada no momento da utilização com concentração de 5 %, em relação à massa da escória.

Logo após a moldagem, as amostras foram cobertas com papel filme e colocadas em câmara úmida com temperatura controlada de 23 ± 2 °C e umidade relativa superior a 95 %. Depois de 48 horas, os corpos de prova foram desmoldados e mantidos na câmara úmida até a data da exposição aos sulfatos. As pastas foram curadas por 7 dias e as argamassas por 14 dias.

Nas extremidades das amostras de pastas (região dos pinos), foram aplicadas uma camada de resina epóxi após três dias de cura (72 h), conforme Figura 2c. Esse procedimento tem a função de aumentar a resistência do local e estabilizar o pino de medição, devido a reduzida dimensão das amostras [20].

Figura 2: Amostras prismáticas, a) argamassas, b) pastas, c) detalhe da resina epóxi nas extremidades das pastas.

Após 14 dias de cura úmida, os corpos de prova de argamassas tiveram as suas dimensões determinadas e distribuídas em 4 recipientes hermeticamente fechados. Dois recipientes foram preenchidos com solução de Na_2SO_4 e as amostras de cimento álcali-ativado (CAANBR) e cimento Portland (CPNBR) foram submersas na solução; os outros dois recipientes foram preenchidos com água deionizada e as amostras de referência de ambos os cimentos também foram submersas. Em seguida, os espécimes foram colocados na estufa por 120 dias, com temperatura constante de $40 \pm 2^\circ\text{C}$, para acelerar o processo de deterioração.

Já os corpos de prova de pasta de cimento álcali-ativado (CAANIST) e cimento Portland (CPNIST) foram acomodados em recipientes fechados, preenchidos com Na_2SO_4 e mantidos em câmara úmida durante 120 dias (temperatura controlada de $23 \pm 2^\circ\text{C}$). A medição das pastas e argamassas foram realizadas semanalmente. A Tabela 3 apresenta a quantidade de materiais, número de amostras e condições de exposição das pastas e argamassas.

Tabela 3: Quantidade de materiais, amostras e exposição das pastas e argamassas.

	Escória (g)	Cimento (g)	Areia (g)	NaOH (g)	Água (g)	a/c	N.º de amostras	Exposição
CAANBR	1500	--	4800	75	900	0,60	10	05 Na_2SO_4 05 Ref.
CPNBR	--	1500	4800	--	900	0,60	09	05 Na_2SO_4 04 Ref.
CAANIST	160	--	--	8	72	0,45	07	Na_2SO_4
CPNIST	--	160	--	--	72	0,45	07	Na_2SO_4

Ref. e Na_2SO_4 (amostras submersas em água e sulfato, respectivamente). CAANIST e CPNIST (pastas ensaiadas pelo NIST Test [20]). CAANBR e CPNBR (argamassas ensaiadas pela NBR 13583 [21]).

A solução de Na_2SO_4 foi preparada utilizando 100 g / l de sulfato anidro para as argamassas (concentração de $9606 \text{ g de SO}_4^{2-} / \text{l}$) e de 50 g / l de sulfato anidro para as pastas (concentração de $4803 \text{ g de SO}_4^{2-} / \text{l}$) conforme propõem os métodos da NBR 13583 [21] e NIST Test [20], respectivamente. A mistura da solução foi realizada por pelo menos 24h antes da sua utilização. Em todas as medições, as soluções de sulfatos das pastas foram substituídas. Já a solução de sulfato e água das argamassas foram complementadas quando necessário. As amostras foram imersas na solução de Na_2SO_4 e água de modo que todas as faces tivessem

contato com a solução contaminante. Neste caso, utilizou-se espaçadores plásticos tipo “cadeirinha” para suspender os corpos de prova e permitir o contato da solução agressiva também na face inferior dos prismas.

Para o monitoramento dimensional dos corpos de prova de argamassa, utilizou-se um suporte metálico com relógio comparador e barra padrão. O mesmo equipamento foi utilizado para a medição das pastas. Contudo, foi necessário um suporte metálico e barra padrão ajustada para acomodar as amostras de pequenas dimensões. Tomou-se como leitura padrão o menor valor observado no relógio com uma volta completa de 360 graus. A expansão das barras de argamassa e pasta foram obtidas pela diferença entre o valor medido na idade correspondente e a leitura inicial da mesma barra, dividida pelo seu comprimento efetivo e multiplicado por 100, conforme a Equação 1.

$$\Delta L = \frac{L_x - L_i}{L_g} \cdot 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

ΔL = Expansão individual (%)

L_x = Leitura na idade correspondente (mm)

L_i = Leitura inicial (mm)

L_g = Comprimento efetivo (entre as extremidades dos pinos internos - mm).

Para verificação da variação dimensional das argamassas (retração ou expansão), ocasionada efetivamente pela solução de Na_2SO_4 , a NBR 13583 [21] prescreve os resultados através da variação dimensional resultante, obtida pela diferença entre os corpos de prova expostos em solução de Na_2SO_4 e as amostras não expostas ao Na_2SO_4 (referência). O resultado foi apresentado pelo aumento ou redução da expansão das argamassas devido ao ataque do Na_2SO_4 em relação à expansão da argamassa de referência, calculada através da Equação 2. Esse procedimento não foi realizado para nas pastas.

$$Ae = Es - Ea \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Ae = expansão resultante, em %.

Ea = expansão média das barras não expostas em solução de Na_2SO_4 (referência), em %.

Es = expansão média das barras expostas em solução de sulfato de sódio, em %.

A NBR 13583 [21] não estabelece limites de expansão para a classificação das argamassas de cimento quanto à resistência aos sulfatos. Dessa forma, adotou-se como limites a expansão indicada por Marciano [23], onde cimentos resistentes a sulfatos devem apresentar expansão inferior a 0,030 % aos 42 dias de idade. Para classificação das pastas, foram adotados os limites proposto por Aleksic [20] apresentados na Tabela 2. O método recomenda um limite de expansão para o prisma de pasta de cimento de 0,15 % aos 56 dias para os cimentos com moderada resistência aos sulfatos ($C_3A \leq 8\%$) e de 0,10 % aos 56 dias para o cimento com alta resistência aos sulfatos ($C_3A \leq 5\%$).

3. Resultados e discussões

A Figura 3 apresenta um comparativo entre os métodos de avaliação acelerado de ataque por Na_2SO_4 em argamassas, proposto pela NBR 13483 [21], e pastas pelo método NIST Test [20], utilizando o cimento álcali-ativado e o cimento Portland resistente a sulfatos por 120 dias.

De acordo com a Figura 3, as amostras de argamassas e pastas de CAA apresentaram retração, enquanto que os corpos de prova de argamassas e pastas de CP apresentaram expansão. Nota-se, também, que as expansões dos CP estão abaixo dos limites estabelecidos para as argamassas (CP_{NBR}) de 0,030 % aos 42 dias de exposição [22], e de 0,10 % aos 56 dias para as pastas (CP_{NIST}) [20]. No cimento Portland, a baixa expansão já era esperada, por se tratar de um cimento resistente à sulfatos. Esses cimentos apresentam menor quantidade de C_3A em sua composição química e menor quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ disponível para as reações químicas, devido à grande quantidade de adições minerais pozolânicas. Nos cimentos álcali-ativados, a ausência de expansão foi apresentada por outros estudos, já que o sulfato de sódio pode ser usado como ativador alcalino, contribuindo para a densificação da microestrutura dos CAA [3,14,15]. A incorporação do Na^+ e a formação de um C-S-H tardio rico em sódio (C-N-S-H), conforme relatado por Ben Haha [26], justifica a ausência de expansão. O sódio pode ter sido fornecido, provavelmente, pela solução ou pela lixiviação do ativador alcalino NaOH . As escórias álcali-ativadas apresentam maior retração que o cimento Portland, principalmente quando expostas a umidades elevadas, associada a reorganização microestrutural do C-A-S-H durante o processo de cura pela incorporação de cátions alcalinos [27], o que justificaria o comportamento observado.

Figura 3: Comparativo entre os métodos da NBR 13.583 [21] e NIST Test [20].

Na Tabela 4 e Figura 04 estão apresentados os resultados da variação dimensional (expansão e retração) média obtida nas idades propostas pelo método NIST Test, aos 28, 56 e 91 dias, e pela norma brasileira, aos 14, 28 e 42 dias de exposição aos sulfatos de sódio. Nota-se que a utilização das pastas acelerou ligeiramente o comportamento das amostras. Logo, a retração observada nas pastas de CAA_{NIST} foi maior que a retração nas argamassas de CAA_{NBR} , enquanto a expansão nas pastas de CP_{NIST} foi maior que a expansão observada para as argamassas de CP_{NBR} .

Tabela 4: Equivalência de expansões entre os métodos de ensaio acelerados.

Desempenho equivalente	CAA		CP	
	Pastas (NIST)	Argamassa (NBR)	Pastas (NIST)	Argamassa (NBR)
Até 14 dias	0,009	-0,021	0,056	0,003
Até 28 dias	-0,022	-0,019	0,054	0,004
Até 42 dias	-0,045	-0,019	0,028	0,002
Até 56 dias	-0,066	-0,021	0,028	0,009
Até 91 dias	-0,119	-0,022	0,028	0,017

Aos 42 dias de exposição aos Na_2SO_4 , tempo de ensaio indicado pela NBR 13583 [21], as amostras com pastas de CAA apresentaram uma retração de 2,36 vezes maior que os espécimes de argamassa, isto é, a retração de -0,019 % das argamassas equivale a retração de -0,045 % das pastas na mesma idade. Nota-se ainda que uma retração de -0,022 % foram necessários 91 dias de exposição das argamassas, enquanto que essa mesma retração foi obtida com apenas 28 dias de exposição das pastas.

Já nos CP, a expansão observada nas pastas foi 14 vezes maior que a expansão verificada nas amostras de argamassas. Destaca-se ainda que a maior expansão obtida aos 91 dias de exposição das argamassas (0,017 %), foi menor que todas as expansões das amostras de pastas. Isso denota que o tempo para a expansão máxima obtida com amostras de argamassas pode ser obtida em menor tempo utilizando amostras de pastas.

Figura 4: Equivalência das expansões entre os métodos da NBR 13.583 [21] e NIST [20].

É importante ressaltar que o comportamento dimensional das argamassas pode ter sido acelerado pela maior temperatura de ensaio ($40 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) em relação ao NIST ($23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$). Enquanto que nas pastas, a reduzida dimensão das amostras do método NIST ($10 \times 10 \times 60 \text{ mm}$), comparado com a NBR 13583 ($25 \times 25 \times 285 \text{ mm}$), pode ter acelerado o comportamento observado. Os aglomerantes utilizados (cimentos álcali ativados e os cimentos Portland resistente aos sulfatos) também contribuíram para esse resultado, uma vez que ambos os cimentos apresentaram boa resistência aos Na_2SO_4 , isto é, baixa variação dimensional nas condições ensaiadas. Contudo, há fortes indícios de que o comportamento dos materiais analisados (retração ou expansão) foram mais acelerados quando se utilizam as pastas, ao invés de argamassas.

As análises estatísticas comparativas (ANOVA e teste Range) entre os métodos de avaliação das amostras de CAA_{NBR} com CAA_{NIST} e CP_{NBR} com CP_{NIST} denotaram diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos grupos para o nível de significância de 5 %. Esse resultado confirma que o método NIST (pasta) apresentou expansões e/ou retrações mais aceleradas em menor tempo de ensaio, comparado com o método da NBR (argamassas). Com isso, o método NIST Test pode reproduzir resultados comportamentais mais rápidos em um ambiente laboratorial comparados com a NBR 13583. Contudo, é fundamental que testes experimentais de exposições reais aos sulfatos de sódio sejam realizados, para validar a eficiência dos métodos e qual deles melhor se aproxima com a condição natural de exposição.

4. Conclusão

Fundamentado nos resultados experimentais e nas condições ensaiadas no presente artigo, conclui-se que a avaliação comparativa dos métodos de ensaios acelerados por ataque de Na_2SO_4 , propostos pela NBR 13583 e teste NIST, indicaram que o comportamento das pastas de CAA e CP (NIST) foram ligeiramente mais acelerados quando comparados com as argamassas (NBR 13583). Essa tendência é ainda maior para o aglomerante de CAA, comparado ao cimento Portland. Finalmente, esses resultados mostram que o método NIST pode produzir resultados mais rápidos sobre o comportamento dos materiais cimentícios em um ambiente laboratorial, isto é, em menor tempo de exposição aos sulfatos de sódio. Mas, testes de exposição natural deve ser realizado para validar o método que reproduz a melhor condição real de exposição.

5. Agradecimentos

Agradecimento especial à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, campus Pato Branco, pelo apoio oferecido através dos laboratórios durante a realização dos experimentos.

6. Referências

- [1] NEVILLE, Adam M; BROOKS, J. J. (2013) *Tecnologia do concreto*. 2 ed. Porto Alegre, Brasil.
- [2] JUENGER, M.C.G.; WINNEFELD, F.; PROVIS, J.L.; IDEKER, J.H. (2011) Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 41:1232-1243.
- [3] SHI, Caijun. KRIVENKO, Pavel V. ROY, Della. (2006) *Alkali-Activated Cements and Concretes*. ed. USA: Taylor & Francis e-Library, New York, USA.
- [4] BEN HAHHA, M.; LOTHENBACH, B.; SAOUT, G. Le. WINNEFELD, F. (2012) Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag — Part II: Effect of Al₂O₃. *Cement and Concrete Research*, 42:74-83.
- [5] LANGARO, Eloise Aparecida. (2016) *Cimento álcali ativado a partir da valorização da escória de alto forno a carvão vegetal*. Dissertação (mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- [6] ROY, D. M. (1999) Alkali-activated cements Opportunities and challenges. *Cement and Concrete Research*, 29:249–254.
- [7] NBR 5737 (1992), substituída pela NBR 16697/2018). Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [8] GRUSKOVNJAK, A.; LOTHENBACH, B.; HOLZER, L.; FIGI, R.; WINNEFELD, F. (2006). Hydration of alkali-activated slag: comparison with ordinary Portland cement. *Advances in Cement Research*, 18:119-128.
- [9] METHA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. (2014) *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2. ed. IBRACON. São Paulo, Brasil.
- [10] PRISZKULNIK, S. (2011) *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1. ed. IBRACON. São Paulo, Brasil.
- [11] SHANAHAN, N.; ZAYED, A. (2007) Cement composition and sulfate attack - Part I. *Cement and Concrete Research*, 37:618-623.
- [12] NEVILLE, Adam M; BROOKS, J. J. (2013) *Tecnologia do concreto*. 2 ed. Porto Alegre, Brasil.
- [13] SANTHANAM M.; COHEN, M.D.; OLEK, J. (2001) Sulfate attack research – whither now? *Cement and Concrete Research*, 31:845-851.
- [14] RASHAD, A. M.; BAI, Y.; BASHEER, P. A. M.; MILESTONE, N. B.; COLLIER, N. C. (2012) Hydration and properties of sodium sulfate activated slag. *Cement and Concrete Composites*, 37:20-29.
- [15] ISMAIL, Idawati; BERNAL, Susan A.; PROVIS, John L.; HAMDAN, Sinin, DEVENTER, Jannie S.J. (2012) Microstructural changes in álcali activated fly ash/slag geopolymers with sulfate exposure. *Materials and Structures*, 46:361-373.
- [16] BAKHAREV, Tatiana; SANJAYAN, Jay Gnananandan; CHENG, Yi-Bing. (2002) Sulfate attack on alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 32:211-216.

- [17] BHATTY, Javed I. TAYLOR, Peter C.(2006) Sulfate resistance of concrete using blended cements or supplementary cementitious materials. R&D Serial N.º 2916a, *Portland Cement Association*. Skokie, Illinois, USA.
- [18] SOUZA, Rui B. de. (2006) *Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos – método de ensaio acelerado*. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil.
- [19] BERTOLINI, Luca. (2010). Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção. Trad. Leda Maria Marques Dias Beck. Oficina de textos, São Paulo, Brasil.
- [20] ALEKSIC, Mila. (2010) *Development and standardization of the NIST rapid sulfate resistance test*. Thesis (Masters of Applied Science). University of Toronto, Canada.
- [21] NBR 13583 (2014) Cimento Portland - Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [22] ASTM C1012 (2004) Standart Test Method for Length change of Hydraulic – Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. United States.
- [23] MARCIANO, Z. A. N. (1993) *Desenvolvimento de um método acelerado para avaliação da resistência de argamassas de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio*. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil.
- [24] NBR 7214 (2015) Areia normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro, Brasil.
- [25] NBR 7215 (1996) Cimento Portland - Determinação da resistência compressão. Rio de Janeiro, Brasil.
- [26] BEN HAHHA, M.; SAOUT, G. Le.; WINNEFELD, F.; LOTHENBACH, B. (2011) Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags, *Cement and Concrete Research*, 41:301-310.
- [27] HAILONG, Y.; RADLINSKA, A. (2016) Shrinkage mechanisms of alkali-activated slag. *Cement and Concrete Research*, 88:126–135.