

Reação álcali-agregado em cimentos álcali-ativados: avaliação por métodos tradicionais e alternativos

ANDREZA FRARE - DOUTORA - (andreza.frare@ifsc.edu.br) – IFSC; ELOISE APARECIDA LANGARO - DOUTORA – UEPG; CAROLINE ANGULSKI DA LUZ - DOUTORA – UTFPR; MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS - DOUTOR – UFPR

RESUMO

ESTE ESTUDO AVALIOU O COMPORTAMENTO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA) EM UM CIMENTO ÁLCALI-ATIVADO (CAA) À BASE DE ESCÓRIA, COMPARANDO-O COM UM CIMENTO PORTLAND (CPV) POR MEIO DE MÉTODOS TRADICIONAIS E ALTERNATIVOS DE ANÁLISE. FORAM UTILIZADOS ENSAIOS DE EXPANSÃO (AMBT, CPT, ACPT E ABCPT), ALÉM DE TÉCNICAS COMPLEMENTARES DE AVALIAÇÃO DE DANOS, COMO O DAMAGE RATING INDEX (DRI) E O STIFFNESS DAMAGE TEST (SDT). OS RESULTADOS INDICARAM QUE O CAA APRESENTOU MENOR EXPANSÃO E MENOR EVOLUÇÃO DE DANOS AO LONGO DO TEMPO, EM COMPARAÇÃO AO CPV. OBSERVOU-SE TAMBÉM AUSÊNCIA DE CORRELAÇÃO SIGNIFICATIVA ENTRE EXPANSÃO E PERDA DE RIGIDEZ NO CAA, SUGERINDO MECANISMOS DISTINTOS DE DETERIORAÇÃO. OS RESULTADOS EVIDENCIAM QUE MÉTODOS NORMALIZADOS PODEM NÃO SER SUFICIENTES PARA AVALIAR ADEQUADAMENTE ESSES MATERIAIS. CONCLUINDO, PORTANTO, QUE OS CAA APRESENTAM POTENCIAL PARA SISTEMAS SUSCETÍVEIS À RAA. CONTUDO, SEUS MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DIFEREM DOS CIMENTOS PORTLAND, REQUERENDO AVALIAÇÃO BASEADA NA CORRELAÇÃO ENTRE MÚLTIPLAS TÉCNICAS.

PALAVRAS-CHAVE: REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO, CIMENTOS ÁLCALI-ATIVADOS, ENSAIOS DE EXPANSÃO, DRI, SDT.

1. INTRODUÇÃO

O concreto produzido com cimento Portland (CP) permanece como o material mais utilizado na construção civil, devido à sua versatilidade, custo acessí-

vel e desempenho mecânico consolidado. Entretanto, a durabilidade das estruturas tem recebido crescente atenção, pois sua resistência às condições ambientais ao longo do tempo é essencial para garantir a vida útil das construções.

Além disso, a produção de cimento Portland está associada ao elevado consumo energético e à emissão de gases de efeito estufa, impulsionando a busca por materiais alternativos. Nesse contexto, os cimentos álcali-ativados (CAA) surgem como uma alternativa promissora, por possibilitarem o aproveitamento de resíduos industriais e apresentarem menor impacto ambiental.

Do ponto de vista do desempenho, os CAA podem apresentar elevada resistência química e boa estabilidade microestrutural, especialmente quando produzidos com escória como precursor (WONGSA *et al.*, 2018). Contudo, ainda possuem limitações, como retração elevada e eflorescência, o que reforça a necessidade de estudos mais aprofundados, principalmente quanto à durabilidade (AWOYERA; ADESINA, 2021).

Entre os mecanismos de deterioração mais preocupantes está a reação álcali-agregado (RAA), responsável por processos expansivos que levam à fissuração e à perda de desempenho das estruturas. Essa reação ocorre pela interação entre álcalis do sistema e sílica reativa dos agregados, na presença de umidade, formando produtos expansivos no interior do concreto

(HASPARYK; SANCHEZ, 2021). Embora a RAA seja amplamente estudada em concretos de cimento Portland, ainda há lacunas relevantes quanto ao seu entendimento em CAA, especialmente em relação à aplicabilidade dos métodos de avaliação existentes.

Os métodos normalizados para avaliação da RAA foram desenvolvidos para sistemas convencionais e podem não representar adequadamente o comportamento dos CAA, devido às suas particularidades químicas e microestruturais. Além disso, técnicas complementares, como o *Damage Rating Index* (DRI) e o *Stiffness Damage Test* (SDT), ainda são pouco exploradas nesses materiais.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo avaliar a suscetibilidade à reação álcali-agregado em cimentos álcali-ativados à base de escória, utilizando métodos tradicionais e complementares de análise. Busca-se contribuir para o entendimento dos mecanismos envolvidos e para a definição de estratégias mais adequadas de avaliação da durabilidade desses materiais, favorecendo sua aplicação segura na engenharia civil.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Neste estudo, comparou-se o desempenho de um cimento álcali-ativado (CAA) à base de escória granulada de alto-forno com um cimento Portland

CP V. O CAA foi desenvolvido em laboratório, a partir da ativação da escória com 5% de hidróxido de sódio (NaOH) de alta pureza, sendo selecionado devido ao seu desempenho mecânico e à sua representatividade como alternativa ao cimento Portland.

As propriedades físico-químicas dos ligantes foram determinadas por ensaios usuais de caracterização. O CAA apresentou massa específica de 2,9 g/cm³ e superfície específica de 431,1 m²/kg, enquanto o CP V apresentou massa específica de 3,1 g/cm³ e superfície específica de 440 m²/kg. A escória utilizada apresentou elevados teores de sílica e alumina, favorecendo a formação de produtos cimentantes do tipo C-(A)-S-H, enquanto o CP V apresentou maior teor de CaO e comportamento já documentado frente à reação álcali-agregado (RAA).

O agregado graúdo utilizado foi um gnaiss proveniente de São José dos Pinhais (PR), previamente classificado como potencialmente reativo por ensaios acelerados e de longo prazo, conforme apresentado na Figura 1a. A análise petrográfica indicou características típicas de agregados reativos, como recristalização do quartzo, presença de minerais alterados e fraturas preenchidas por produtos secundários (Figura 1b).

A composição granulométrica do agregado graúdo foi ajustada pela combinação de brita 1 e brita 0, nas proporções de 60% e 40%, respectivamente, atendendo aos requisitos da

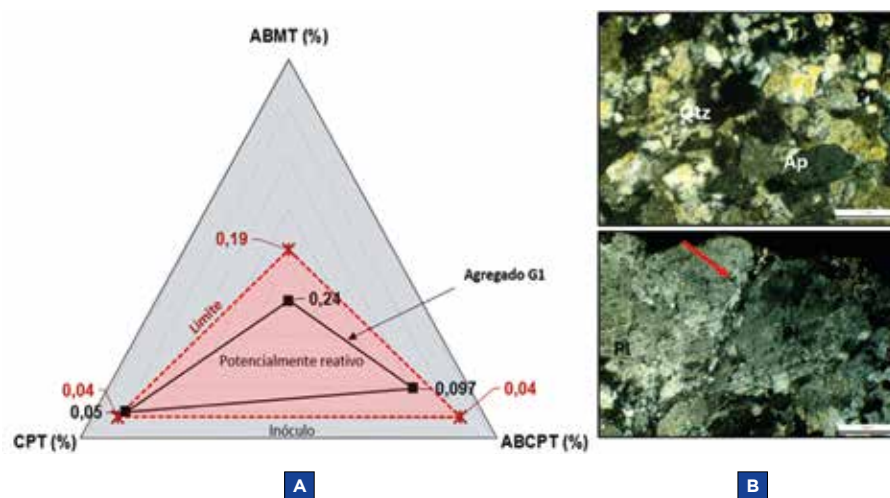


FIGURA 1

(A) CLASSIFICAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO QUANTO A REATIVIDADE A PARTIR DOS ENSAIOS DE ABMT, ABCPT E CPT. (B) AMOSTRA DE ROCHA EM LÂMINA APRESENTANDO CRISTAIS DE QUARTZO RECRISTALIZADOS INTENSA ALTERAÇÃO DO PLAGIOCLÁSIO. NA INDICAÇÃO EM VERMELHO, TEM-SE FRATURAS PREENCHIDAS

NBR 15577:2018 para ensaios de avaliação da reatividade. O agregado miúdo empregado foi uma areia natural classificada como inócua, utilizada em todas as misturas, com massa específica de 2,60 g/cm³ e módulo de finura de 2,27.

2.2 Métodos

A suscetibilidade à reação álcali-agregado (RAA) foi avaliada por ensaios de expansão (AMBT, CPT, ACPT e ABCPT) e de caracterização de danos (SDT e DRI), conforme a Tabela 1, permitindo comparar o comportamento

dos materiais sob diferentes condições de exposição e severidade.

Nos ensaios em concreto, o Na₂O_{eq} foi ajustado para 1,25% no cimento Portland, enquanto o CAA apresentou Na₂O_{eq} de 3,85%, sem adição externa de álcalis. A combinação dos ensaios de expansão e avaliação de danos permitiu uma análise mais abrangente da RAA nos materiais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaios de expansão

A comparação entre CPV e CAA

TABELA 1

RESUMO DOS MÉTODOS EMPREGADOS PARA AVALIAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO E DETERIORAÇÃO DOS CONCRETOS

Ensaio	Objetivo	Condições de exposição	Duração	Norma / Referência
AMBT	Reatividade em argamassa	Barras em NaOH 1N a 80 °C	28 dias	ABNT NBR 15577-4:2018
CPT	Expansão em longo prazo	Prismas a 38 °C e UR >95%	Até 24 meses	ABNT NBR 15577-5:2018
CPT - cilíndricos	Correlação entre expansão, DRI e SDT	Corpos cilíndricos a 38 °C e UR >95%	Até 24 meses	Adaptado da ABNT NBR 15577-5:2018
ACPT	Expansão acelerada em concreto	Prismas a 60 °C e UR >95%	Até 6 meses	ABNT NBR 15577-7:2018
ABCPT	Expansão acelerada com equilíbrio alcalino	Prismas em solução alcalina a 80 °C	30 dias	Sanchez (2008); Sanchez, Kuperman e Helene (2011)
SDT	Perda de rigidez	Ciclos de carregamento em corpos cilíndricos	Conforme idade	Sanchez et al., (2014)
DRI	Danos microestruturais	Análise microscópica em corpos cilíndricos	Conforme idade	Villeneuve (2011); Sanchez et al., (2015)

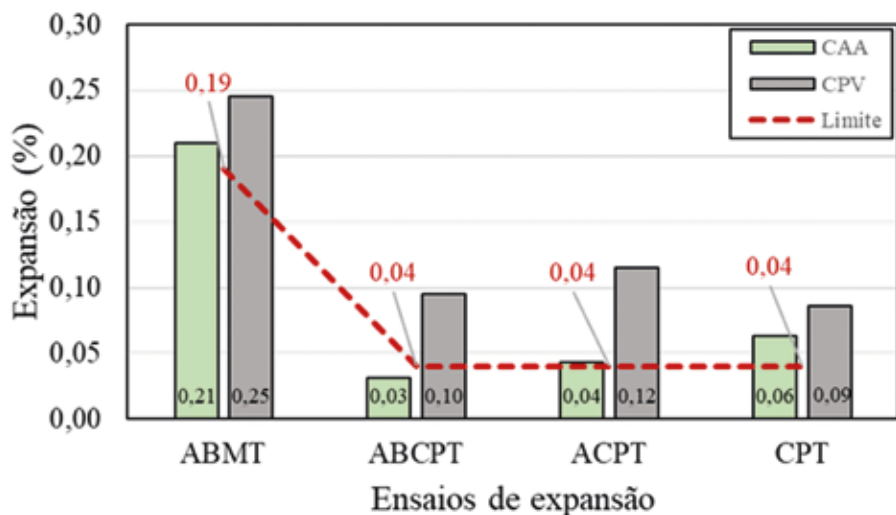


FIGURA 2

RESULTADO DOS ENSAIOS DE EXPANSÃO AO FINAL DO PERÍODO DE AVALIAÇÃO: ABMT, ACPT, ABCPT E CPT

nos ensaios de expansão evidenciou diferenças no comportamento frente à RAA, conforme apresentado na Figura 2.

No AMBT (Figura 2), ambos os ligantes apresentaram expansão superior ao limite normativo de 0,19%, com valores mais elevados para o CPV, indicando maior suscetibilidade à RAA. Esse comportamento está alinhado à literatura, que aponta expansões geralmente menores em sistemas à base de escória ativada, embora ainda acima dos limites (ANGULO-RAMÍREZ *et al.*, 2018). Ressalta-se que as condições severas do AMBT, com 80 °C e solução de NaOH 1N, podem superestimar a expansão e interferir nos mecanismos reacionais dos CAA (GOLMAKANI; HOOTON, 2019).

No ACPT (Figura 2), o CPV atingiu cerca de 0,10% de expansão, enquanto o CAA apresentou aproximadamente 0,03%, com comportamento mais estável e crescimento mais lento, ultrapassando marginalmente o limite normativo. Resultados semelhantes são relatados na literatura e variam conforme o agregado (MORAES *et al.*, 2021), sendo que o uso do gnaíse pode ter influenciado os resultados.

No ABCPT (Figura 2), o CPV novamente superou o limite, com aproximadamente 0,12%, enquanto o CAA permaneceu abaixo de 0,04%, sendo classificado como inócuo. Esse desempenho pode estar associado ao equilíbrio entre a alcalinidade interna e externa do sistema, reduzindo efeitos como lixiviação (SANCHEZ, 2008;

SANCHEZ; KUPERMAN; HELENE, 2011).

No CPT, ambos os materiais ultrapassaram o limite de 0,04%, porém o CPV apresentou expansão mais rápida e intensa, em torno de 0,09%, enquanto o CAA mostrou evolução mais lenta, atingindo cerca de 0,06% em idades avançadas. Esse comportamento pode estar relacionado à formação de géis menos expansivos e à maior estabilidade química da matriz nos sistemas ativados por escória (ANGULO-RAMÍREZ *et al.*, 2018).

A Tabela 2 resume o desempenho dos materiais nos diferentes métodos, permitindo uma comparação direta dos resultados obtidos.

De forma geral, o CAA apresentou expansão menor e mais tardia em relação ao CPV, sugerindo cinética mais lenta e possíveis diferenças nos mecanismos de deterioração associados à RAA. Embora este estudo tenha avaliado apenas uma formulação de cimento álcali-ativado, os resultados estão alinhados com a literatura, que aponta comportamento mais controlado desses sistemas frente à RAA, ainda que não completamente isentos do fenômeno (MORAES *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2025).

3.2 Análise da deterioração dos corpos de prova

A Figura 3 apresenta os resultados do índice de dano (DRI) ao longo de 365 dias (1, 6 e 12 meses), bem como exemplos das principais manifestações observadas.

Os resultados indicaram que o CPV apresentou valores de DRI mais elevados e crescentes ao longo do tempo, com fissuras no agregado (CCA e OCA) e na pasta (CCP), evidenciando maior evolução dos danos associados à RAA. Essa tendência é compatível com estudos que relatam níveis elevados de deterioração em concretos com cimento Portland e agregados reativos (HASPARYK; SANCHEZ, 2021).

No CAA, o aumento do DRI ocorreu de forma mais lenta, indicando deterioração menos intensa e influenciada pelas características microestruturais

TABELA 2

RESUMO DO DESEMPENHO DO CPV E CAA FRENTE AOS ENSAIOS DE EXPANSÃO ABMT, ACPT, ABCPT E CPT

Ensaio	CPV	CAA	Classificação CPV	Classificação CAA
AMBT	> 0,19%	> 0,19%	Expansão maior que o limite	Expansão maior que o limite
ABCPT	0,10%	< 0,04%	Expansão maior que o limite	Inócuo
ACPT	0,10%	0,04%	Expansão maior que o limite	Limítrofe
CPT	> 0,04%	> 0,04%	Expansão maior que o limite	Expansão maior que o limite, porém, mais tardio

desse sistema. Observou-se predominância de fissuras no agregado com presença de produtos de reação, sugerindo que, embora haja formação de produtos associados à RAA, estes podem apresentar menor caráter expansivo. Parte dos danos iniciais também pode estar relacionada à retração autôgena e à própria natureza do material (BAKHAREV; SANJAYAN; CHENG, 2001).

As análises por MEV-EDS complementaram a identificação dos produtos observados no CAA. As imagens indicaram produtos amorfos preenchendo fissuras no agregado e na interface pasta-agregado, com composição rica em Si, Ca e álcalis, especialmente Na e K, compatível com géis de RAA. Esses resultados, associados às expansões medidas e aos ensaios DRI e SDT, reforçam a ocorrência da RAA no CAA.

A presença de Al nos produtos formados em sistemas ativados pode modificar a estrutura do gel, tornando-o menos expansivo e contribuindo para a menor degradação observada no CAA (SHI *et al.*, 2019). Além disso, os produtos identificados não apresentaram teor significativo de S, diferenciando-se daqueles típicos de DEF e indicando maior compatibilidade com gel de RAA. Ressalta-se ainda que fissuras pré-existentes no agregado podem influenciar os valores iniciais de DRI.

De modo geral, as diferenças entre CPV e CAA indicam que a natureza do ligante influencia significativamente a deterioração associada à RAA, afetando a evolução das expansões e os mecanismos de fissuração. Assim, o CPV apresentou maior nível de deterioração, enquanto o CAA demonstrou evolução de danos mais lenta e menos intensa.

A Figura 4 apresenta os resultados do SDT para os corpos de prova de CPV e CAA ao longo de 1, 6 e 12 meses.

Os resultados do ensaio de Stiffness Damage Test (SDT) indicam respostas distintas entre os concretos com cimento Portland (CPV) e cimento álcali-ativado (CAA). O CPV apresentou aumento progressivo dos índices de dano ao longo do tempo (SDI e PDI), indicando

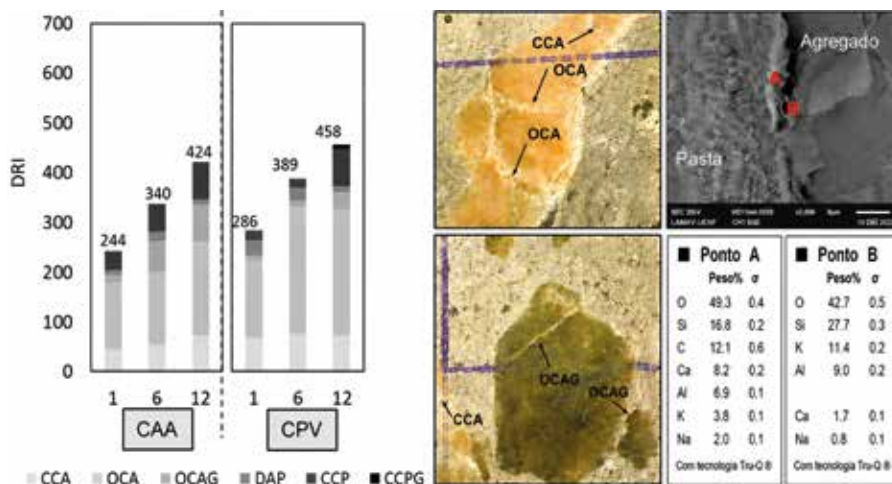


FIGURA 3

RESULTADO DA ANÁLISE DE DRI E CLASSIFICAÇÃO DAS FISSURAS NAS AMOSTRAS, MEV/EDS – CCA: FISSURAS FECHADAS NO AGREGADO; OCA: FISSURAS ABERTAS NO AGREGADO; OCAG: FISSURAS ABERTAS NO AGREGADO COM PRODUTO DE REAÇÃO; DAP: PARTÍCULA DE AGREGADO DESAGREGADA; CCP: FISSURAS NA PASTA DE CIMENTO; CCPG: FISSURAS NA PASTA DE CIMENTO COM PRODUTO DE REAÇÃO

perda da capacidade de recuperação elástica associada à evolução da reação álcali-agregado (RAA) e maior dissipação de energia sob carregamento cíclico, conforme já documentado na literatura (SANCHEZ *et al.*, 2014, 2015, 2017).

Por outro lado, o CAA apresentou resposta mais estável, com valores de PDI decrescentes, sugerindo estabilização das microfissuras e menor degradação estrutural. A menor área de

histerese observada para o CAA reforça esse desempenho, indicando maior capacidade de recuperação elástica, possivelmente associada à formação de géis menos expansivos (C-A-S-H e N-A-S-H) e à maior densificação da matriz (LEEMANN *et al.*, 2020), tornando o material menos suscetível à degradação irreversível.

Do ponto de vista estatístico, o CPV apresentou forte correlação entre

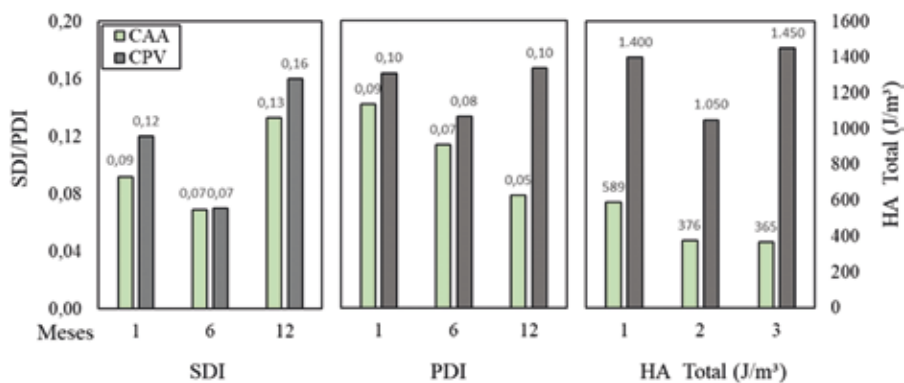


FIGURA 4

RESULTADOS DO ENSAIO DE SDT: SDI (ÍNDICE DE DANO DA RIGIDEZ), PDI (ÍNDICE DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA) E ÁREA DE HISTERESE

expansão e dano ($R^2 = 0,99$; $r_s = 1,00$; $p = 0,000$), enquanto o CAA não apresentou correlação significativa ($R^2 = 0,03$; $r_s = 0,31$; $p = 0,188$). O teste de Kruskal-Wallis não indicou diferenças estatísticas entre os materiais ($p = 0,121$), apesar das tendências distintas observadas. Esses dados sugerem que, nos CAA, a degradação estrutural não está diretamente associada apenas à expansão, sendo influenciada também por fatores relacionados à composição e à evolução da matriz cimentícia.

De forma geral, os resultados confirmam que os mecanismos de deterioração em sistemas álcali-ativados diferem daqueles observados em concretos convencionais, reforçando a necessidade de métodos complementares para avaliação da durabili-

dade desses materiais frente à reação álcali-agregado.

5. CONCLUSÕES

Os resultados evidenciam que o cimento álcali-ativado (CAA) à base de escória apresenta comportamento mais estável frente à reação álcali-agregado (RAA) em comparação ao cimento Portland (CPV), com menores expansões e menor intensidade de danos ao longo do tempo. Esse desempenho foi confirmado tanto pelos ensaios de expansão quanto pelas análises de deterioração (DRI e SDT).

Observou-se que o CPV apresentou maior evolução da fissuração e perda de rigidez associadas à RAA, enquanto o CAA mostrou comportamento mais controlado, com menor progressão

dos danos e ausência de correlação significativa entre expansão e degradação estrutural, indicando mecanismos distintos de deterioração.

Os resultados reforçam a importância do uso de métodos complementares aos normativos na avaliação da RAA em cimentos álcali-ativados, uma vez que os ensaios tradicionais para cimento Portland podem não representar adequadamente seu comportamento.

Do ponto de vista prático, os cimentos álcali-ativados apresentam potencial como alternativa ao cimento Portland, especialmente em aplicações que exigem maior durabilidade, desde que sejam adotados critérios específicos de avaliação considerando suas particularidades químicas e microestruturais. ●

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15577-4:2018. Reação álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- [2] _____. ABNT NBR 15577-7:2018. Reação álcali-agregado - Parte 7: Método acelerado brasileiro de prismas de concreto (ABCPT). Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- [3] ANGULO-RAMÍREZ, D. E.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R.; MEDEIROS, M. Alkali-activated Portland blast furnace slag cement mortars: Performance to alkali-aggregate reaction. *Construction and Building Materials*, 2018.
- [4] AWOYERA, P. O.; ADESINA, A. A critical review on application of alkali activated slag as a sustainable composite binder. *Case Studies in Construction Materials*, v. 11, 2019.
- [5] BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G.; CHENG, Y. B. Resistance of alkali-activated slag concrete to alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Research*, p. 331-334, 2001.
- [6] GOLMAKANI, F.; HOOTON, R. Comparison of laboratory performance tests used to assess alkali-silica reactivity. In: *Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering*, 2019.
- [7] HASPARYK, N. P.; SANCHEZ, L. Reação álcali-agregado no concreto. In: ISAlA, G. C. (coord.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: IBRACON, 2022.
- [8] LEEMANN, A.; SHI, Z.; LINDGÅRD, J. Characterization of amorphous and crystalline ASR products formed in concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*, v. 137, 2020.
- [9] MORAES, M. C. et al., Alkali-Activated Cement Subject to Alkali-Aggregate Reaction. *ACI Materials Journal*, v. 118, n. 5, 2021.
- [10] SANCHEZ, L. F. Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali-agregado em concretos. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- [11] SANCHEZ, L. F. M.; KUPERMAN, S. C.; HELENE, P. Uso do método acelerado brasileiro de prismas de concreto (ABCPT) para avaliação da reação álcali-agregado (RAA). *IBRACON Structures and Materials Journal*, p. 575-581, 2011.
- [12] SANCHEZ, L. F. M. et al., Evaluation of the stiffness damage test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to ASR. *Cement and Concrete Research*, 2014.
- [13] SANCHEZ, L. F. M. et al., Reliable quantification of AAR damage through assessment of the Damage Rating Index (DRI). *Cement and Concrete Research*, 2015.
- [14] SANCHEZ, L. F. M. et al., Tools for assessing damage in concrete affected by AAR. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 10, n. 1, p. 84-91, 2017.
- [15] SHI, Z. et al., Role of aluminum in ASR gel formation. *Cement and Concrete Research*, 2019.
- [16] VILLENEUVE, V. Veronique Villeneuve Determination De L' Endommagement Du Béton Par Méthode Pétrographique. 2011. Tese (Doutorado) - Département de Géologie et Génie Géologique, Faculté de Sciences et Génie, Université Laval, Québec.
- [17] WANG, W.; ZHANG, S.; ZHANG, Y.; NOGUCHI, T.; MARUYAMA, I. Understanding the influence of slag fineness and water-to-binder ratio on the alkali-silica reaction in alkali-activated slag mortars. *Cement and Concrete Composites*, v. 157, p. 105907, 2025.
- [18] WONGSA, A. et al., Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer mortar incorporating crumb rubber. *Journal of Cleaner Production*, v. 195, p. 1069-1080, 2018.