

O EFEITO DA TEMPERATURA DE CURA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA DURABILIDADE DE SUBSTÂNCIAS PRODUZIDAS COM ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

Lays Raianne Azevedo da Costa¹

RESUMO

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil por seu bom desempenho mecânico, aliado ao baixo custo de produção, mas é composto por cimento, que emite consideráveis proporções de CO₂ na atmosfera durante a sua produção. Diante disso, é necessário o estudo de alternativas para substituir parte do cimento do concreto. A escória de alto forno é um resíduo da indústria do aço e quando ativada, pode produzir hidratos, responsáveis pelo desempenho mecânico dos cimentos convencionais. Neste contexto, este trabalho teve por objetivo estudar o mecanismo de ativação e o efeito da temperatura de cura nas propriedades mecânicas e na durabilidade de ligantes produzidos através da ativação alcalina, por meio de Silicato de sódio e hidróxido de sódio, da Escória de alto forno. Os corpos-de-prova produzidos para o estudo foram caracterizados por ensaios de resistência à compressão, DRX e espectroscopia infravermelha. Nos estudos de durabilidade foram realizadas inspeções visuais e medidas de perda de massa. Os resultados mostraram que maiores temperaturas de cura conduzem a maiores resistências mecânicas, melhor comportamento diante da carbonatação, e também favorecem a estabilidade dos corpos-de-prova diante da formação de fissuras.

Palavras-chave: Escória de alto forno, concreto, sustentabilidade, álcali-ativação.

INTRODUÇÃO

O concreto é um material bastante utilizado na indústria da construção civil, podendo, segundo Pedroso (2009) ser encontrado em pontes, rodovias, casas de alvenaria, nos edifícios mais altos do mundo, em torres de resfriamento, em usinas hidrelétricas e nucleares, em obras de saneamento, até em plataformas de extração petrolífera móvel.

Estima-se que anualmente são consumidas 11 bilhões de toneladas de concreto, o que dá, segundo a Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado (FIHP), aproximadamente, um consumo médio de 1,9 toneladas de concreto por habitante por ano, valor inferior apenas ao consumo de água. No Brasil, o concreto que sai de centrais dosadoras gira em torno de 30 milhões de metros cúbicos. (PEDROSO, 2009, p.14).

¹ Mestranda em Engenharia civil da Universidade Federal da Paraíba - PB, laysraianne@ct.ufpb.br; (83) 3322.3222
contato@joinbr.com.br
www.joinbr.com.br

Segundo Almeida (2002), dentre os motivos para justificar a utilização do concreto de forma tão expressiva estão: a facilidade de adaptação às formas construtivas, o Monolitismo entre os elementos estruturais, a Economia de construção e de manutenção, a boa resistência aos esforços dinâmicos (choques e vibrações), a segurança contra o fogo, dentre outros.

Apesar de todas as vantagens relacionadas à utilização do concreto, deve-se considerar que a indústria da construção civil é responsável por uma emissão significativa de gás carbônico na atmosfera durante a produção do cimento, um dos componentes do concreto. Segundo Andrew (2018), em uma escala global, a produção do cimento pode contribuir com cerca de 8% das emissões de CO₂ pelo homem.

Diante isto, e considerando a preocupação ambiental para a redução da emissão dos gases do efeito estufa na atmosfera, é importante que se busque por alternativas para diminuir os impactos ambientais relacionados à utilização do cimento (COSTA, 2016), como o desenvolvimento de ligantes minerais alternativos sem clínquer e com baixas emissões de carbono (Ex: Geopolímeros), que pode representar “uma saída para o problema ambiental causado pela produção do Cimento Portland e para o consumo energético atrelado à sua produção” (AZEVEDO *et al.*, 2017, p.1).

Os geopolímeros são compostos obtidos a partir da ativação alcalina da escória de alto forno ou de aluminossilicatos a exemplo do metacaulim e, segundo VIAL (2015), durante a sua produção é emitida uma quantidade de CO₂ até 6 (seis) vezes inferior à dos cimentos tradicionais. Diante disto, os geopolímeros podem representar uma alternativa ambientalmente viável, pois possuem boas propriedades mecânicas para a substituição parcial do cimento Portland no concreto.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi estudar o desempenho mecânico, o mecanismo de ativação e a durabilidade de substâncias formadas a partir da ativação da escória de alto forno por silicato de sódio (SiNa) e hidróxido de sódio (NaOH), avaliando a influência da temperatura de cura em cada um dos aspectos analisados.

Foram moldados corpos-de-prova para o desenvolvimento dos estudos e, para a caracterização destes, foram realizados ensaios de compressão, espectroscopia infravermelha e Difração de Raio X (DRX), sendo estes dois últimos importantes para o estudo do mecanismo de ativação dos ligantes obtidos. Os estudos de durabilidade foram realizados por meio de inspeções visuais e medidas de perda de massa.

Os resultados obtidos mostraram que maiores temperaturas de cura favorecem a formação de hidratos, que estão diretamente relacionados à resistência dos ligantes obtidos,

além de contribuir para a estabilidade diante da formação de fissuração, reduzindo também a formação de eflorescências relacionadas à carbonatação.

DESENVOLVIMENTO

O capítulo em questão apresentará uma breve revisão bibliográfica, com algumas definições importantes no contexto deste trabalho.

Geopolímeros

Os geopolímeros são um novo tipo de cimento, produzidos a partir da ativação alcalina de um precursor, que pode ser argilas ou escórias e que fazem parte da família dos aluminossilicatos. Essas substâncias apresentam propriedades químicas, mecânicas e térmicas que dependem da escolha dos materiais constituintes, dos ativadores escolhidos e das condições de síntese da mistura (a exemplo de mudanças na temperatura de cura).

Escória de alto forno

A escória de alto forno é constituída de aluminossilicatos e as grandes proporções de silício, cálcio e alumínio favorecem as reações de hidratação do material e a formação de geopolímeros, em meio alcalino (PRUD'HOMME; AMBROISE, 2015).

A escória de alto forno é um resíduo da produção de ferro gusa em alto forno e pode ser utilizada tanto como agregado da construção civil, quanto como aglomerante, a depender do processo de resfriamento e ativação (MARTINS, 2016).

Segundo John (1995), quando resfriada lentamente, a escória se cristaliza, tomando uma forma mineralógica e química estável, sem atividade aglomerante. Entretanto, se a temperatura for reduzida de forma que não exista tempo hábil para a formação de cristais, a estrutura é vítrea, com poder aglomerante. As escórias resfriadas dessa maneira são chamadas de granuladas.

As escórias granuladas de alto forno (EGAF) possuem composição química semelhante à do cimento Portland, alto potencial hidráulico e produzem C-S-H (silicato de cálcio hidratado) como produto de hidratação (MARTINS, 2016). Porém, segundo Vial (2015) a reação da hidratação da escória na ocorre rapidamente, se esta estiver apenas em contato com água, em função do surgimento de uma camada pouco permeável na superfície

deste grão. Desta forma, as reações de hidratação da escória serão influenciadas tanto pelas condições de síntese (a exemplo das condições de temperatura), como pela participação de substâncias que funcionarão como catalisadores na dissolução da escória, os ativadores.

A influência do ativador

Vial (2015) e Prud'Homme e Ambroise (2015) apresentaram resultados promissores diante da associação do silicato de sódio (SiNa) e do hidróxido de sódio (NaOH) como ativadores. Se o NaOH é utilizado como ativador, é produzido C-S-H (Silicato de cálcio hidratado) de forma relativamente bem ordenada e, pela ação agressiva deste ativador, são obtidas altas resistências nas primeiras idades do material; porém, considerando ainda a utilização do NaOH, se verifica que a formação do C-S-H é heterogênea e que pode conduzir à manifestação do fenômeno de eflorescência, o que pode afetar o desempenho às primeiras idades dos materiais obtidos (PRUD'HOMME, AMBROISE, 2015; VIAL, 2015; MICHEL, 2009). Quando o silicato de sódio é o ativador, o C-S-H apresenta uma estrutura menos organizada, porém mais homogênea e menos porosa, o que resulta em resistências mais altas em idades mais avançadas.

Em seu trabalho Vial (2015) avaliou diversas substâncias formadas a partir da ativação da escória pelo NaOH e SiNa, que variavam entre si pelas proporções molares de cada um dos ativadores. Dentre as composições estudadas, Vial (2015) observou que a que apresentava cerca de 33% de SiNa e de 1,6 de NaOH em massa, em relação à quantidade de escória utilizada, se destacou entre as demais em termos de desempenho mecânico. Apesar do extenso trabalho realizado, não foram estudados de forma profunda nem o mecanismo de ativação, nem a durabilidade das substâncias formadas, fator importante, principalmente quando está sendo avaliada a possibilidade de utilização dos ligantes obtidos, enquanto substituto do cimento na produção do concreto. Neste trabalho serão realizadas discussões adicionais às propostas por Vial (2015).

METODOLOGIA

Esta seção se destinará a descrever os materiais utilizados para a síntese dos materiais e o programa experimental desenvolvido, a fim de atingir os objetivos deste trabalho.

Materiais utilizados e síntese dos ligantes

Os materiais utilizados foram: 1) Escória de alto-forno produzida pela empresa ECOCEM (França) e com densidade de 2,9 g/cm³; 2) Solução de silicato de sódio SiNa com fórmula de Na₂SiO₃.nH₂O, com densidade de 1,5 g.cm⁻³ e com uma proporção molar SiO₂/Na₂O = 2,2 e 3) Hidróxido de sódio em pastilhas, com fórmula NaOH e com 99% de pureza.

A substância analisada neste estudo foi baseada no trabalho de Vial (2015) e apresenta composição, conforme apresentada na Tabela 1:

Tabela 1 – Composições estudadas neste trabalho

Nome	Porcentagem em massa			H ₂ O total	Proporção molar SiO ₂ /Na ₂ O
	Escória (g)	SiNa (g)	NaOH (g)		
₀ E _{33,0} ^{1,6}	65,3	33,0	1,6	18,2%	1,7

Fonte: Adaptado de Vial, 2015.

Para a realização dos ensaios de resistência à compressão, de DRX e de espectroscopia infravermelha, além dos estudos de durabilidade, foram produzidos corpos-de-prova cilíndricos, com dimensões de 4cm de altura e 2cm de diâmetro. O processo de síntese foi desenvolvido nas seguintes etapas:

- 1) Dosagem das pastilhas de hidróxido de sódio e do silicato de sódio. Esta etapa foi seguida da mistura dos elementos e da dissolução das pastilhas de NaOH na solução de silicato de sódio; posteriormente, a escória foi adicionada à mistura e, com o auxílio de um misturador mecânico, foi realizada a homogeneização de todos os componentes;
- 2) Com o auxílio de uma espátula fina, a fim de evitar a formação de bolhas, a pasta formada foi distribuída em formas de silicone (moldagem).
- 3) A etapa final do processo do processo de síntese correspondeu a cura da mistura obtida, que foi realizada de duas formas diferentes: parte da pasta foi levada para uma sala com temperatura de 20°C e outra parte, foi levada para uma estufa, a uma temperatura de 38°C, onde permaneceu durante 24 horas. Após este período, foi levada para a mesma sala a 20°C, onde permaneceu com o outro conjunto anteriormente mencionado, até o momento da desforma.

Para fins deste estudo, a substância com cura a temperatura ambiente será chamada de S1 e a com cura a temperatura em estufa, será chamado de S2.

Técnicas de caracterização

Foram realizados ensaios de resistência mecânica, de espectroscopia infravermelha e de DRX nos corpos-de-prova após 7, 14, 21 e 28 dias do processo de moldagem.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados na máquina CONTROLS 65-LI2V2, de capacidade de 1000 kN, a uma velocidade constante de 0,1 mm/s.

As análises de espectroscopia infravermelha foram baseadas no fenômeno de absorção que ocorre sempre que uma radiação infravermelha atravessa a amostra e é absorvida em função das vibrações que foram excitadas. Cada molécula ou grupo que compõe o material tem um nível de vibração que corresponde a uma energia específica (Prud'homme; Ambrose, 2015). Estas análises foram realizadas em um espectrômetro Thermo Fisher IS.50 e as aquisições foram realizadas nos corpos de prova reduzidos em pó. Para tratamento dos dados foi utilizado o software OMNIC. Para cada aquisição realizada entre 400 e 4000 cm^{-1} , 32 espectros foram coletados, a fim de obter valores médios. A Tabela 2 apresenta as principais bandas de absorção que foram utilizadas para a análise dos resultados obtidos neste estudo.

Tabela 2 – Bandas de absorção identificadas em espectroscopia infravermelha

Número da onda (cm^{-1})	Ligação	Referência
875	CO_3^{2-}	SAYED & ZEEDAN (2012)
900-1200	Si-O-Si ou Al-O-Si	DIDAMONY et. Al (2012)
1400-1480	CO_3^{2-}	DIDAMONY et. Al (2012)
1635-1655	H-O-H (H_2O)	DIDAMONY et. Al (2012)

Fonte: Adaptado de (VIAL, 2015; COSTA, 2016)

As análises de DRX também foram realizadas nas amostras reduzidas a pó, que foram analisados sobre o aparelho D8 Advance Bruker. As fases anidras e hidratadas foram identificadas graças aos picos de difração que lhes são característicos (Tabela 3).

Tabela 3 – Picos característicos observados para o DRX da escória álcali-ativada

Número da onda (cm^{-1})	Ligação	Referência
C-S-H	29-29,5° e 49,5°	PRUD'HOMME (2012)

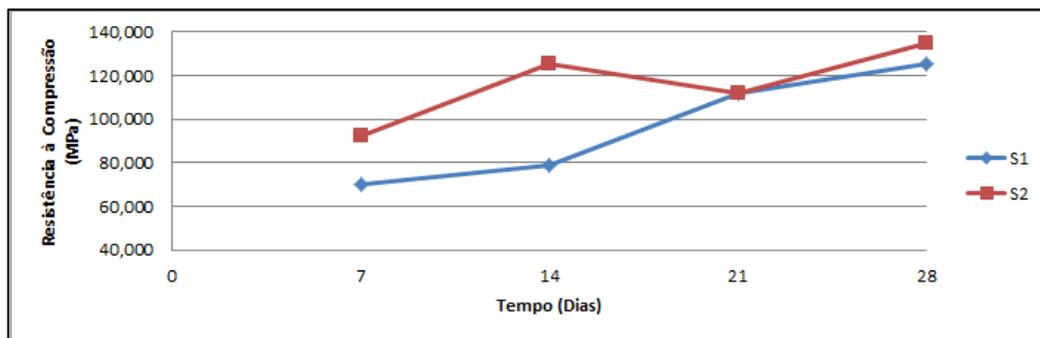
Fonte: Adaptado de (VIAL, 2015; COSTA, 2016)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresentará os resultados obtidos para os ensaios de caracterização, além das observações com relação às medidas de durabilidade e fissuração das amostras.

Ensaio de resistência à compressão

Figura 1 – Resultados dos ensaios de Resistência à compressão



Fonte: Do autor.

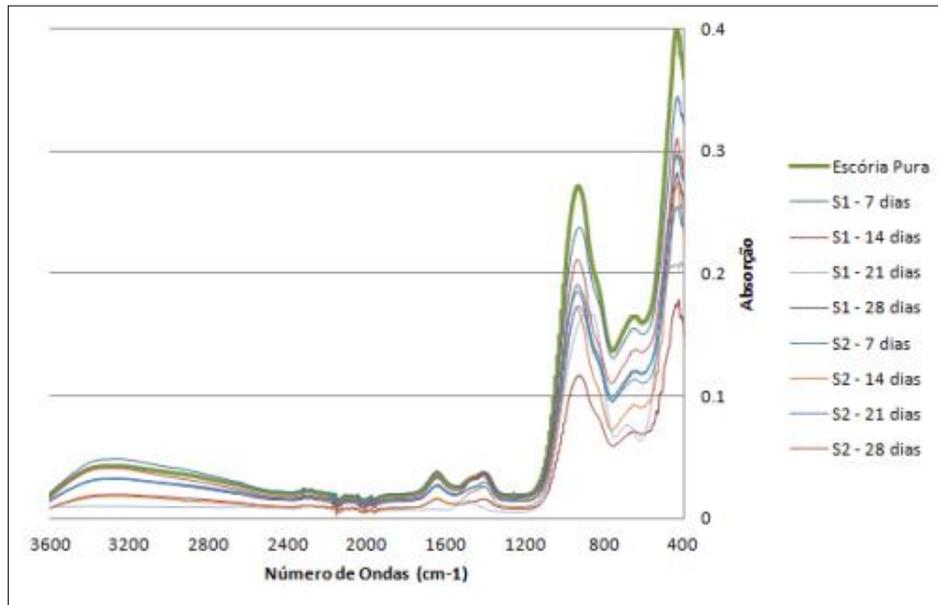
Após análise dos resultados apresentados na Figura 1, é possível observar que nas substâncias com cura em temperatura ambiente, as resistências nas primeiras idades são mais baixas e o aumento desta resistência é constante ao longo do tempo. Além disso, as resistências aos 28 dias para as substâncias com cura em temperatura ambiente foram quase as mesmas aos 7 dias para as que tiveram cura inicial em estufa, a 38°C. Entretanto, estas últimas composições mostraram uma diminuição da resistência ao longo do tempo e foi também observada uma diminuição da resistências aos 21 dias.

No que se refere a influência da temperatura, sabe-se que maiores temperaturas favorecem a dissolução da escória e então a formação de hidratos que são responsáveis pelas melhores resistências mecânicas observadas. Diante disto, foi verificado que aos 28 dias, as substâncias com cura em estufa apresentaram melhores resistências mecânicas, mesmo após a queda observada aos 21 dias, fenômeno que pode estar relacionado à formação de fissuras, em função da variação de temperatura durante o período de cura e também da propagação da carbonatação no material.

O aumento da resistência após a queda aos 21 dias pode estar relacionado à formação de produtos em função da hidratação da escória, o que poderá ser confirmado após as análises de DRX e de espectroscopia infravermelha.

Espectroscopia Infravermelha

Figura 2 – Resultados das análises de Espectroscopia Infravermelha



Fonte: Do autor.

Em análise da Figura 2, é possível observar a presença da banda em 1640 cm⁻¹, que corresponde à água, em todas as amostras. Com relação à banda 1000 cm⁻¹, relativa às ligações Si-O-Si e Si-O-Al e uma outra em 1450 cm⁻¹ e 875cm⁻¹, relativas à presença de carbonatos, se observou que o aumento da temperatura favorece o desaparecimento destas bandas, o que sugere uma dissolução dos carbonatos, seguido de uma reestruturação, sendo esta afirmação confirmada ao comparar o espectro da escória pura, com a de cada substância.

Foi possível concluir, então, que mudanças nas condições de cura podem favorecer as reações de dissolução e reestruturação da escória, o que conduz à formação de hidratos e à obtenção das boas propriedades mecânicas encontradas.

Difração de Raio X (DRX)

Os resultados anteriores permitiram a criação de hipóteses a nível de microestrutura dos materiais, e por isso, foram realizadas análises de DRX. Em função do caráter amorfo das amostras, os resultados foram difíceis de analisar e poucas diferenças foram encontradas em comparação com os espectros puros de escória. Apenas para as substâncias com cura em estufa aos 21 e 28 dias, foi observada a presença mais acentuada da banda referente ao C-S-H,

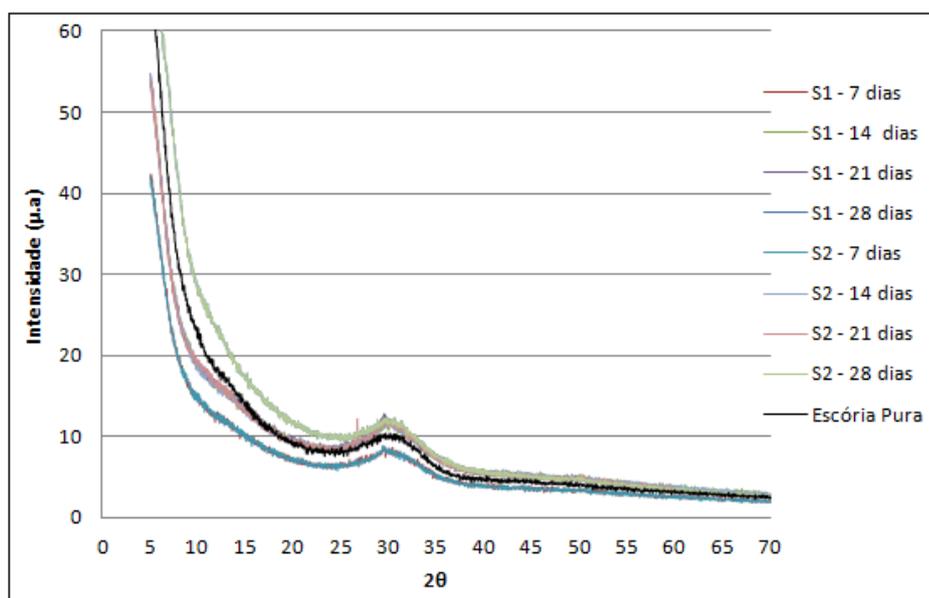
(83) 3322.3222

contato@joinbr.com.br

www.joinbr.com.br

o que pode explicar as resistências mecânicas obtidas para estas amostras. A Figura 3 apresenta os resultados obtidos após as análises de DRX das amostras.

Figura 3 – Resultados das análises de DRX nas amostras



Fonte: Do autor.

Estudo da Durabilidade dos materiais

Com relação à durabilidade, foi observado que a fissuração evoluiu após cada dia de observação (ver Figuras 4, 5, 6 e 7), sendo acompanhado de perda de massa em cada mini corpo-de-prova exposto ao ar (ver Tabela 4). Os corpos-de-prova que foram curados apenas em temperatura ambiente apresentaram mais fissuras, além de também terem apresentado maior perda de peso em cada medida. A cura à 38 °C pareceu prevenir a formação de fissuras.

Tabela 4 - Medida da perda de peso nos corpos-de-prova expostos ao ar

Composição	Peso de referência no momento da Desmoldagem (g)	Perda de massa 1 hora após desmoldagem (%)	Perda de massa 24 horas após desmoldagem (%)	Perda de massa 24 horas após desmoldagem (%)
S1	45.051	0.27	1.45	4.60
S2	43.181	0.058	0.167	0.24

Fonte: Do autor.

Figura 4 - S2 e S1 imediatamente após a desmoldagem



Fonte: Do autor

Figura 5 - S2 e S1 após 1 hora de exposição ao ar



Fonte: Do autor

Figura 6 - S2 e S1 após 24 horas de exposição ao ar



Fonte: Do autor

Figura 7 - S2 e S1 após 28 dias de exposição ao ar



Fonte: Do autor

O estudo do avanço da carbonatação dos materiais foi realizado por meio de inspeções visuais. A carbonatação se refere a uma reação entre o cálcio presente nos materiais e o CO_2 presente no ar, que se manifesta sob a forma de manchas brancas nas superfícies dos materiais e pode provocar perda de propriedades mecânicas.

Em todos os corpos-de-prova foi observado que a medida que os materiais eram quebrados, uma bi-coloração era observada: as superfícies eram “azuladas”, enquanto a parte interior era acinzentada. Com o aumento do período de exposição ao ar, as duas partes (superfície e interior) passaram a apresentar coloração mais clara, indicando carbonatação. A carbonatação poderá favorecer a formação de fissuras nos materiais, contribuindo para a instabilidade dos mesmos.

Foi observado que após os mesmos períodos de exposição ao ar (Ver Figura 8), a carbonatação foi mais evidente em condições de cura a temperatura ambiente, levando a concluir que a exposição a maiores temperaturas parece prevenir este fenômeno.

Figura 8 - Evolução da carbonatação nos corpos-de-prova com Exposição ao ar após 84, 77, 70 e 63 dias respectivamente, a) Substância S1 e b) Substância S2.



a)

b)

Fonte: Do autor.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados mostraram que materiais com cura em temperaturas mais elevadas apresentam altas resistências nas primeiras idades, cuja diminuição após algumas semanas de cura, podem estar relacionadas à perda de água devido à mudança de temperatura durante o processo de cura;

Com relação à Espectroscopia infravermelha, se observou que maiores temperaturas parecem favorecer a reestruturação da escória e, portanto, a formação de hidratos.

Em função do caráter amorfo das amostras, foi difícil observar mudanças nos espectros de DRX entre as substâncias alcali-ativadas e a escória pura;

Em nível de durabilidade, as amostras com cura em maiores temperaturas apresentaram melhores desempenhos em relação às com cura em temperatura ambiente; além disso, estas últimas se mostraram menos instáveis diante da formação de fissuras.

Considerando todos os resultados obtidos, e principalmente quando se considera as altas resistências mecânicas, se observa que a escória alcali-ativada é uma boa alternativa para a substituição parcial do cimento no concreto, representando uma saída, diante da problemática ambiental relacionada à produção do clínker e da emissão de CO₂ na atmosfera.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. C.; **Fundamentos do concreto armado**. Faculdade de Engenharia civil. Universidade estadual de campinas, 2002.

ANDREW, R. M.. **Global CO₂ emissions from cement production**. Earth System Science DATA. Oslo, Norway, 2018.

AZEVEDO, A. G. S. et al. **Produção de geopolímeros à base de cinza volante usando soluções ativadoras com diferentes composições de Na₂O e Na₂SiO₃**. Cerâmica, pag. 143-151, 2017.

COSTA, L. R. A.. **Étude de l'évolution microstructurale de liants au laitier alcali – activé**. INSA DE LYON, Lyon, 2016.

DIDAMONY, H. El et al. ; **Kinetics and physico-chemical properties of alkali activated blast furnace slag/basalt pastes**, Housing and Building National Research Center, vol. 8, pp. 170-176, 2012.

JOHN, V. M. **Cimentos de Escória Ativada com Silicatos de Sódio**. São Paulo: Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, 1995.

MARTINS, N. P.; **Microestrutura e propriedades mecânicas de argamassas contendo escória de alto forno in natura**. UFPB, João Pessoa, 2016.

MICHEL, M.. **Accélération de ciment au laitier par du ciment sulfo-alumineux**. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, 2009.

PEDROSO, F.L.; **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem**. Concreto & construções, Ano XXXVII, n° 53, pag 14 – 19, 2019.

PRUD'HOMME, E.. **Synthèse et caractérisation physico-chimiques de silicates de magnésium hydratés**, Rapport de post-doctorat, 2012

PRUD'HOMME, E. AMBROISE, J.. **Impact of alkaline solution and curing temperature on micro-structure and mechanical properties of alkali-activated blast furnace slag**, in press, 2015.

SAYED, M.; ZEEDAN, S. R.. **Green building material using alkali activated blast furnace slag with silica fume**, Housing and Building National Research Center, 2012, vol. 8, pp. 177-184.

VIAL, C.. **Étude de l'activation du laitier de haut-fourneau pour le développement d'éco-matériaux de construction**, INSA DE LYON, Lyon, 2015.