Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

DESENVOLVIMENTO DE AGLOMERANTES ALTERNATIVOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL, PROCESSO DE ÁLCALI-ATIVAÇÃO: IMPACTOS AMBIENTAIS E NECESSIDADE DE ESTUDOS DE DURABILIDADE

E. N. GUINDANI
Enhenheiro Civil
Universidade de Vale do Rio dos Sinos
RS, Brasil
eduardo.guindani@gmail.com

A. KOPPE
Mestranda do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil – PPGEC, UNISINOS
Universidade de Vale do Rio dos Sinos
RS, Brasil
angelicakoppe@gmail.com

M. MANCIO
Professor Dr. Do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil – PPGEC, UNISINOS
Universidade de Vale do Rio dos Sinos
RS, Brasil
mancio@gmail.com

RESUMO

A crescente preocupação com os impactos ambientais causados pela construção civil tem impulsionado o desenvolvimento de novos produtos e processos que possam oferecer ao mercado alternativas mais sustentáveis. A álcali-ativação de aluminosilicatos tem se apresentado promissora para o desenvolvimento de cimentos alternativos, obtendo-se materiais quimicamente mais estáveis e de baixa geração de CO_2. Neste contexto, surgem como matérias-primas, as cinzas volantes, metacaulins e mais recentemente, rochas basálticas ácidas e de origem vítrea, as quais não podem ser utilizadas em concretos convencionais devido ao alto potencial de reação álcali-agregado, mas que, no entanto, apresentam potencial significativo para álcali-ativação. Os geopolímeros, de maneira geral, apresentam desempenho superior ao cimento Portland em relação à durabilidade, associada ao ataque de sulfatos, cloretos, ácidos, e reações álcali-agregado, tornando estes materiais alternativas de maior vida útil e baixo impacto ambiental. Por outro lado, os estudos de corrosão de armaduras em geopolímeros não apresentam resultados conclusivos e são divergentes em muitos pontos, obtendo-se em alguns estudos, resultados satisfatórios, e em outros, resultados que apontam filmes de passivação de baixa qualidade e potenciais de corrosão que podem chegar até 90%. Visando a viabilização do uso destes cimentos alternativos como solução para estruturas mais duráveis, este trabalho aponta os aspectos positivos e negativos dos geopolimeros em relação ao cimento Portland, assim como as necessidades de estudos mais aprofundados em relação à durabilidade destes compostos, principalmente em relação à passivação das armaduras.
Palavras-chave: Álcali-ativação, geopolímeros, durabilidade de geopolímeros.

ABSTRACT

The growing concern over the environmental impacts caused by the construction has driven the development of new products and processes that can offer the most sustainable alternative market. The alkali-activated aluminosilicate has shown promising for the development of alternative cements, obtaining chemically stable materials and low generation of CO_2. This raises as raw materials, fly ash, metacaulins and more recently, acidic basalt and glass origin, which can not be used in conventional concrete because of the high potential alkali-aggregate reaction, but which nevertheless present significant potential for alkali-activation. The geopolymers, in general, have superior performance compared to Portland cement durability associated with the attack of sulfates, chlorides, acids, and alkali-aggregate reactions, making these alternative materials for longer life and low environmental impact. On the other hand, the reinforcement corrosion studies geopolymers have no conclusive results and are different in many points, obtaining in some studies, satisfactory results and other results which indicate low-quality passivation films and corrosion potentials which can reach 90%. Aimed at enabling the use of these alternative cements as a solution for more durable structures, this study

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

highlights the positive and negative aspects of geopolymers compared to Portland cement, as well as the needs for further studies in relation to the durability of these compounds, especially in relation to passivation of armor.
Keywords: Alkali-activation, geopolymers, durability of geopolymers.

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com os impactos ambientais causados pela construção civil tem impulsionado o desenvolvimento de novas tecnologias e processos que buscam a sustentabilidade das construções. Atualmente, o cimento Portland é o aglomerante mais comum utilizado para produção de concretos e argamassas, porém, apresenta uma grande desvantagem relacionada ao impacto ambiental gerado pela liberação de dióxido de carbono (CO_2) e pelo elevado consumo energético durante o processo de produção. Segundo [1], a fabricação de cimento Portland gera aproximadamente 844 kg de CO_2 para cada tonelada de clínquer produzido, tornando a indústria cimenteira responsável por 7% das emissões globais de CO_2. Cabe ressaltar que o crescimento exponencial das emissões globais de CO_2 verificadas desde a revolução industrial e o consequente aumento da concentração atmosférica deste gás – que acaba de alcançar 400 ppm, superando consideravelmente os níveis históricos registrados nos últimos 800.000 anos – têm levado a uma crescente preocupação com o impacto ambiental das atividades humanas sobre o planeta, em particular quanto à emissão de gases do efeito estufa [2;3;4].

O grande impacto ambiental da indústria cimenteira tem incentivado pesquisas de desenvolvimento de novos materiais e processos que possam ser utilizados como alternativas ao tradicional cimento Portland. Dentre as diversas linhas de pesquisa, se destacam os estudos de álcali-ativação de aluminosilicatos, a partir do qual são obtidos os cimentos geopolímeros. Estes são formados a parir da policondensação de materiais ricos em sílica e alumina em meio alcalino, onde ocorre a dissolução das partículas e a posterior reorganização em arranjos tridimensionais de alta resistência mecânica.

Sabe-se, no entanto, que estes materiais geopoliméricos ainda representam uma parcela muito pequena de utilização em substituição ao cimento Portland, principalmente por serem materiais inovadores, ainda não normatizados, e pouco conhecidos no setor da construção civil. Apesar de serem alternativas ainda pouco utilizadas para fins construtivos, muitos estudos comprovam que seu desempenho e durabilidade são superiores ao cimento Portland em muitos aspectos, como resistência ao ataque de ácidos, cloretos e sulfatos. No entanto, estudos de durabilidade relacionados à passivação de armaduras têm apresentado resultados divergentes, dificultando sua utilização para produção de concretos estruturais. Dentre diversas pesquisas, algumas apontam resultados satisfatórios para os filmes de passivação, enquanto outras apresentam resultados que apontam filmes de passivação de baixa qualidade e potenciais de corrosão que podem chegar até 90% [5].

A seguir são apresentados alguns estudos já consolidados a respeito da durabilidade destes materiais comparados ao cimento Portland tradicional e também, algumas pesquisas relacionadas à resistência a corrosão das armaduras em concretos produzidos com geopolimeros.

1.1 Processo de Álcali-ativação

A geopolimerização (álcali-ativação) baseia-se na química da ativação alcalina de aluminosilicatos, cuja alcalinidade elevada se faz necessária para dissolver a sílica e a alumina por hidrólise da superfície das partículas. O mecanismo de reação envolvida na álcali-ativação de uma fonte de matéria amorfa, é frequentemente descrito como a dissolução e posterior reorganização das partículas em arranjos tridimensionais sem forma definida e com grande resistência mecânica. Para que tal processo possa ser considerado satisfatório, são necessárias fontes de aluminosilicatos com alta reatividade, preferncialmente amorfos e com elevada finura de particulas, que facilmente podem ser dissolvidos por uma solução fortemente alcalina, dando origem a uma fase gel que rapidamente enrijece. Frequentemente são necessárias temperaturas acima de 50ºC para que essas reações ocorram de forma rápida e efetiva [6].

Dentre as matérias-primas mais estudadas para produção de geopolimeros destacam-se as cinzas volantes, a escória de alto-forno e o metacaulim, que apresentam características favoráveis ao processo de álcali-ativação e resultam em cimentos de qualidade satisfatória. São matérias-primas derivadas de processos industriais, sejam eles residuais, como é o caso da cinza volante e da escória, ou processados como o metacaulim. Além destas, também podem ser utilizadas pozolanas naturais que apresentem características semelhantes, como as cinzas vulcânicas e rochas vítreas. Neste contexto, surgem às rochas basálticas ácidas de matriz vítrea, encontradas em abundância nos conjuntos rochosos da formação Serra Geral, que abrange a região sul do Brasil e parte da região sudeste [7; 8].

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

A diversidade de materiais que podem ser utilizados para produção de geopolimeros traz como conseqüência uma grande variação de características físico-químicas dos produtos resultantes, além de que o proporcionamento entre estes materiais, e as condições de temperatura e pressão também interferem na variação das características do geopolímero resultante [9]. Além das diferentes matérias-primas já citadas, há também diversos ativadores alcalinos que podem ser utilizados, dentre eles destacam-se o hidróxido de sódio (NaOH), o hidróxido de potássio (KOH) e o silicato de sódio (Na_2SiO_3) por apresentarem os resultados mais satisfatórios [6].

1.2 Álcali-ativação de Rochas basálticas

As rochas basálticas são encontradas em abundância na crosta terrestre, dominam grande parte do mapa geológico do Sul do Brasil, e apresentam teores elevados de sílica (50 a 70%) e alumina (10 a 20%) [10], elementos essenciais para o processo da álcali-ativação, e que se estiverem presentes na rocha na forma vítrea, tornam o material ainda mais favorável ao processo. A partir destas características, jazidas de basaltos mais jovens, resultantes de um processo de resfriamento rápido do magma extravasado na superfície, geralmente encontrados nas formações mais superiores da Bacia do Paraná, são os mais propícios ao processo de álcali-ativação.

Além disso, muito material residual de basalto é encontrado nos pátios de empresas mineradoras, na forma pulverulenta, por ser classificado como um rejeito do processo de britagem ou rejeito de peneiramento na produção de areias artificiais, uma vez que é restringido seu teor máximo de material pulverulento em concretos em 12% para agregados miúdos [11]. Desta forma, além das características químicas favoráveis das rochas basálticas, sua utilização como matéria-prima se torna uma solução rentável e ambientalmente correta para o resíduo acumulado por estas empresas.

Apesar dos materiais pozolânicos tradicionais, como cinza volante e escórias de alto-forno, serem as matérias-primas mais utilizadas para a produção de geopolimeros, a geração total destes resíduos a nível mundial é estimada em 0,8 bilhões de toneladas/ano, ficando muito aquém das necessidades do setor da construção civil, quando comparado ao consumo anual de cimento Portland – 3,7 bilhões de toneladas [1]. Desta forma, o desenvolvimento de cimentos alternativos a partir de rochas basálticas torna-se vantajoso em função da abundância da matéria-prima disponível e do baixo impacto ambiental decorrente da sua extração e processo de produção.

2. DURABILIDADE

2.1 Estudos de Durabilidade em Geopolímeros

Diversos estudos vêm sendo realizados a respeito da durabilidade dos geopolímeros, sendo algumas conclusões já consolidadas, principalmente relacionadas à estabilidade química destes compostos, que se mostram muito mais elevadas que a do cimento Portland, resultando em um melhor desempenho quanto ao ataque de ácidos, cloretos e sulfatos. As matérias-pirmas utilizadas para a obtenção de geopolímeros apresentam baixa incidência de compostos derivados do cálcio, se comparados com o cimento Portland, conforme pode ser observado na Figura 1. Este fato é importante pois difere os mecanismos de deterioração que ocorrem em geopolímeros e em compostos de cimento Portland, o que pode explicar reações menos agressivas em alguns casos, como na presença de sulfatos, por exemplo, onde o hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$ resultante da hidratação do cimento Portland, reage com o sulfato do meio agressivo e acaba formando etringita que é expansiva na presença de umidade [12].

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

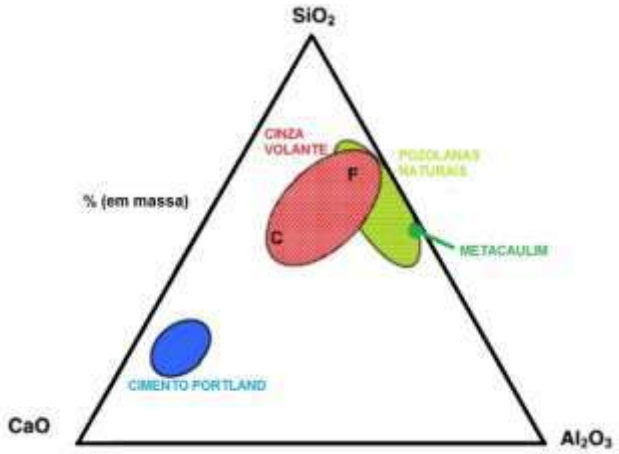


Figura 1: Diagrama ternário CaO – SiO_2 – Al_2O_3 das principais matérias-primas utilizadas em concretos de cimento Portland e concretos geopolímeros [12].

2.2 Resistência ao ataque de ácidos

Estudos realizados em argamassas a base de metaculim álcali-ativadas, apresentaram uma perda de massa de apenas 7% quando imersas em soluções de ácido sulfúrico a 5% durante quatro semanas [13]. Desempenho muito semelhante foi observado em argamassas a base de cinza volante álcali-ativadas com hidróxido de sódio e silicato de sódio, imersas em ácido clorídrico (HCl) a 0,1 Molar durante 90 dias, e comparadas com argamassa de cimento Portland [14]. Os resultados mostraram que a perda de massa das amostras ativadas com hidróxido de sódio foi de 2,5%, enquanto as ativadas com silicato de sódio foi de 4,2%, muito menores que as perdas apresentadas pelas amostras de cimento Portland, que chegaram a 9,8% [14]. Neste mesmo estudo, foram analisadas as resistências à compressão em diferentes idades das amostras imersas em ácido, obtendo-se uma perda de resistência em torno de 25% para as amostras de geopolímeros e 47% para as amostras de cimento Portland, conforme pode ser observado na Figura 2 adaptada [14].

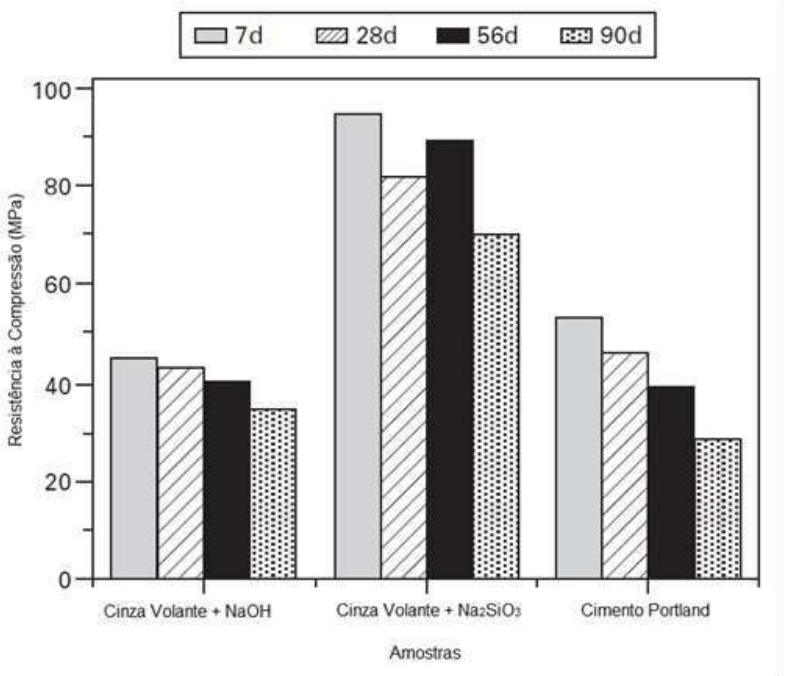


Figura 2: Avaliação da resistência à compressão de amostras imersas em solução de HCl (0,1 M) [14].

Recentemente, os estudos realizados por [15], demonstraram um desempenho ainda melhor dos geopolímeros em relação ao cimento Portland quanto ao ataque de ácidos. No estudo, foram utilizadas amostras de concreto geopolimérico a base de cinza volante álcali-ativadas com hidróxido de sódio e silicato de sódio e comparadas com

concreto de cimento Portland tradicional. Todas as amostras foram imersas em solução de ácido sulfúrico por 90 dias, apresentando uma redução de 32% na resistência à compressão para as amostras de cimento Portland, enquanto as amostras de concreto geopolimérico apresentaram apenas 7,5% de redução.

Estes diversos estudos comprovam que, independentemente da matéria-prima e do ativador alcalino utilizado para a produção dos geopolímeros, eles sempre apresentam desempenho superior ao cimento Portland tradicional. Além disso, de modo geral, as amostras de cinza volante álcali-ativadas com hidróxido de sódio são as que apresentam o melhor desempenho entre as amostras de geopolímeros [16].

2.3 Resistência ao ataque de sulfatos

Em relação ao ataque de sulfatos, sabe-se que este tipo de agressão em concretos de cimento Portland pode trazer como consequências a expansão das peças concretadas, a redução da resistência mecânica, desplacamentos na superfície e nos casos mais graves, a desintegração da peça. Isso ocorre em função das reações entre os sulfatos do meio agressivo, o hidróxido de cálcio e o aluminato tricálcico (C_3A), resultantes da hidratação do cimento, que acabam gerando compostos expansivos como a etringita, conforme ja foi citado em 2.1. Em estudos com geopolímeros, não são observadas reações com tamanha gravidade quanto às apresentadas com o cimento Portland, principalmente pelos baixos níveis de compostos derivados do cálcio nos materiais álcali-ativados.

Estudos apresentados mostram que pastas de geopolímeros a base de cinza volante, não apresentaram redução significativa da resistência à compressão quando imersas em soluções de sulfato de sódio (5%) e sulfato de magnésio (5%) durante 90 dias [17]. No entanto, foram observadas flutuações nas resistências mecânicas, principalmente entre os sete e 30 dias de imersão, mas que também foram observadas nas amostras de controle, curadas ao ar. Comportamento bastante semelhante foi observado por [14], onde as resistências mecânicas também apresentaram flutuações nas primeiras idades quando submersas em solução de sulfato de sódio (4,4%), mas que, ao final de 360 dias, acabaram apresentando elevação da resistência mecânica, comportamento inverso ao observado em amostras de cimento Portland.

Recentemente [15] comparou amostras de argamassas geopoliméricas a base de cinza volante com argamassas de cimento Portland em relação à resistência ao ataque de sulfatos. As amostras foram submersas em soluções de sulfato de sódio em diferentes concentrações molares, 1 M, 2 M, 3 M, durante 90 dias. Foram observadas pequenas reduções na resistência à compressão de todas as amostras, como pode ser observado na Figura 3, com destaque para as amostras de cimento Portland, cuja perda de resistência foi maior que as de geopolímero.

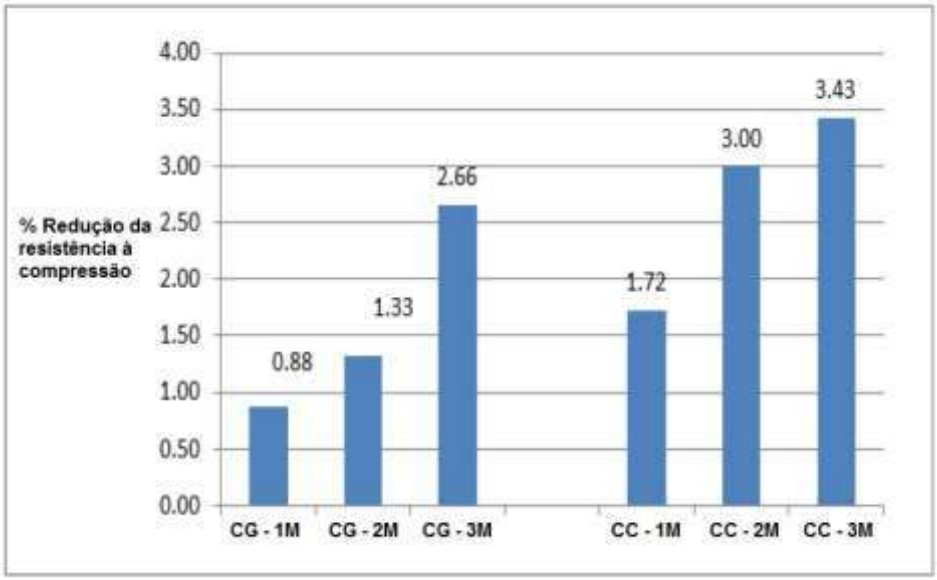


Figura 3: Redução da resistência à compressão em solução de sulfato de sódio (CG - Concreto Geopolímero CC - Concreto Convencional) [15].

Em todos os estudos [14;15;17], observou-se que as amostras álcali-ativadas com hidróxido de sódio se mostraram ligeiramente mais estáveis que as amostras ativadas com silicato de sódio. Para [17], este desempenho, ligeiramente

melhor apresentado pelo hidróxido de sódio, ocorre em função da formação de uma estrutura reticulada mais estável, se comparada as estruturas formadas pelo silicato de sódio.

2.4 Resistencia ao ataque de cloretos e corrosão de armaduras

Em relação à penetração de íons cloreto, os geopolímeros também apresentam desempenho superior ao cimento Portland, principalmente em função da menor porosidade dos compostos finais. Estudos de penetração de íons cloreto com célula de difusão em amostras de concreto geopolimérico a base de cinza volante foram realizados, comparando com amostras de concreto de cimento Portland com adição de sílica ativa [18]. Os resultados obtidos apresentaram um desempenho muito superior das amostras de concreto geopolímero, onde o coeficiente de difusão de íons foi de 1,4x10-15 cm²/s, muito menor que o apresentado pelas amostras de concreto de cimento Portland, 0,5x10-9 cm²/s.

As discussões a respeito da resistência a penetração de íons cloreto, leva aos estudos de resistência a corrosão de barras de aço em geopolímeros. Dentre diversos estudos realizados há diferentes conclusões apresentadas, que em alguns estudos são positivas e satisfatórias, e em outros, são negativas. A análise de corrosão acelerada realizada com barras de aço em peças de concreto geopolímero e concreto de cimento Portland, mostram que a deterioração das barras de aço nos blocos de concreto de cimento Portland ocorre muito mais rápida e com maior intensidade que as barras nos blocos de concreto geopolímero [19]. Além disso, as análises de corrente de corrosão mostraram que esta foi até 100 vezes superior nas amostras de cimento Portland quando comparadas com as amostras de geopolímero. Resultados semelhantes foram observados induzindo barras de aço contidas no interior de peças de concreto de cimento Portland e geopolímero, a corrosão acelerada e avaliação do potencial à corrosão [20]. Os resultados mostraram que as barras de aço contidas nos concretos geopolímeros (Figura 4) apresentaram potencial de corrosão incerto nas primeiras semanas, enquanto a amostra de concreto de cimento Portland apresenta potencial maior que 90% desde há primeira semana, conforme pode ser observado na Figura 5.

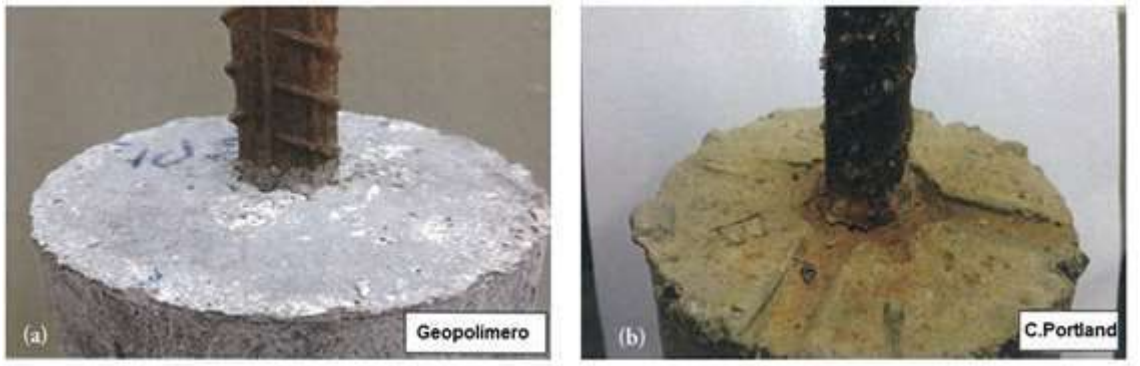


Figura 4: Comparativo visual de amostras submetidas à corrosão acelara. (a) Amostra de concreto geopolímero. (b) Amostra de concreto de cimento Portland [20].

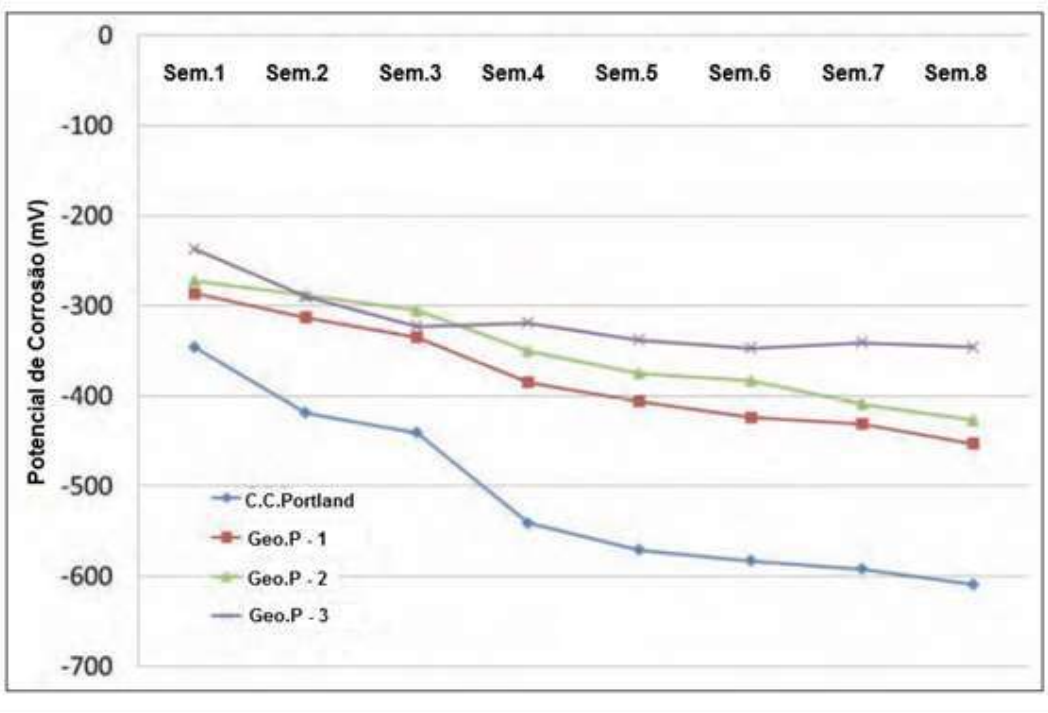


Figura 5: Variação do potencial de corrosão ao longo das semanas [20].

Em contrapartida, estudo recente realizado com amostras de concretos geopoliméricos a base de cinza volante e metacaulim [5], comparados com concretos de cimento Portland em análises de potencial de corrosão, apresentaram comportamentos controversos aos estudos de [19;20]. No estudo [5], os potenciais de corrosão dos concretos de cimento Portland foram ligeiramente menores do que os concretos geopoliméricos, conforme pode ser observado na Figura 6, onde pode-se observar um desempenho superior dos concretos de cimento portland em relação aos geopolímeros. Este fato pode ser explicado em função do elevado pH dos concretos geopolímeros, em torno de 14,6, que contribuiu para a diminuição da qualidade dos filmes de passivação das armaduras, que apresentam melhor qualidade em pH próximo a 13 [21].

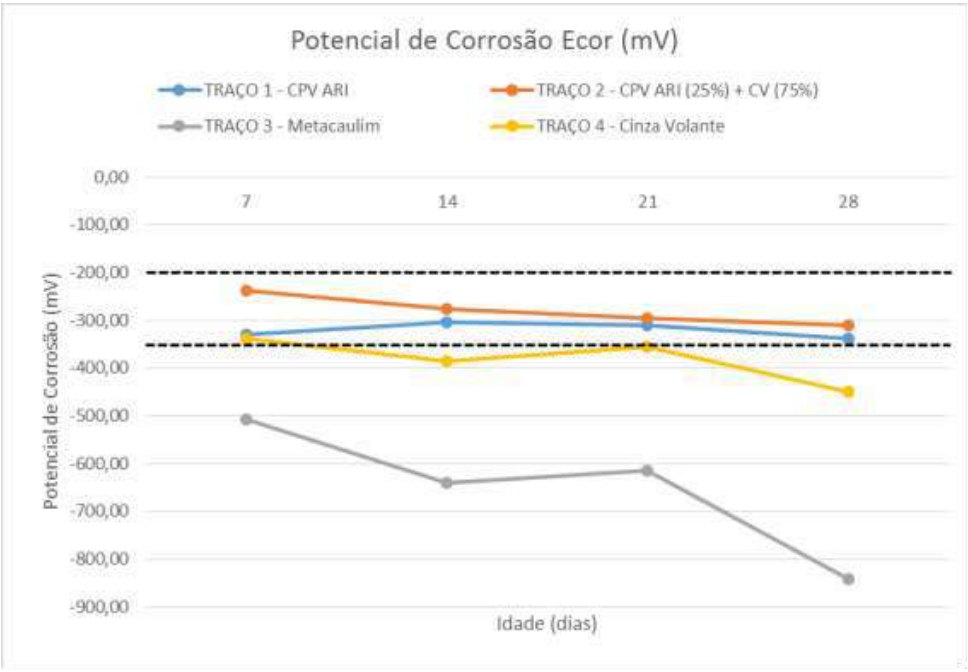


Figura 6: Comparativo do potencial de corrosão [5].

Apesar dos resultados satisfatórios apresentados [19;20], é importante também considerar os estudos realizados por [22], que conclui que os filmes de passivação em cimentos geopolímeros apresentam características diferentes dos filmes formados em concretos de cimento Portland e que o aumento excessivo da alcalinidade do meio causa uma diminuição na qualidade do filme de passivação. Logo, pode-se afirmar que a qualidade dos filmes de passivação em concretos geopoliméricos depende da matéria-prima e da concentração dos ativadores alcalinos utilizados, fatores que interferem diretamente no pH do composto final.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, os geopolímeros apresentam maior estabilidade química que o cimento Portland, o que consequentemente, confere a estes compostos melhor desempenho nos ensaios de durabilidade, tornando estes materiais, alternativas mais duráveis e sustentáveis. Na maioria dos aspectos, os geopolímeros são superiores ao cimento Portland, com exceção da passivação das armaduras, que ainda apresentam algumas divergências em estudos recentes em função da qualidade dos filmes de passivação que são comprometidos com o elevado pH da mistura.

Desta forma, fica evidente a necessidade de estudos mais aprofundados sobre os filmes de passivação em concretos geopolímeros, uma vez que seu comportamento é diferente dos filmes formados em concretos de cimento Portland. São necessários estudos para determinação do pH ideal para a sua formação, assim como a determinação do nível de desempenho das camadas protetoras em relação à prevenção da corrosão de armaduras através de ensaios eletroquímicos quantitativos.

Além de estudos de corrosão mais aprofundados, também se mostram necessários estudos de durabilidade relacionados à geopolímeros produzidos a partir de pozolanas naturais, como os vidros basálticos, citados anteriormente, uma vez que, grande parte dos estudos realizados são desenvolvidos a partir da análise de geopolímeros obtidos através da álcali-ativação de cinza volante e metacaulim. A realização de estudos que possam comprovar a durabilidade destes compostos produzidos a partir de rochas basálticas, que apresentem resultados semelhantes aos obtidos por compostos produzidos com matérias-primas já consolidadas, poderia viabilizar a utilização destes materiais como alternativa ao cimento Portland, com baixo impacto ambiental e com matéria-prima abundante para sua produção.

4. REFERÊNCIAS

[1] Mancio, M.; Masuero, A. B. – "Desenvolvimento e caracterização de novos materiais cimentantes com reduzido impacto ambiental". *Relatório técnico, Bolsa PDJ* – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS – Porto Alegre, 2012.
[2] IPCC. - "Climate Change 2007: The Physical Science Basis". Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Working Group I contribution to the IPCC Fourth Assessment Report. Paris: 2007, 996 p.
[3] Galli, A., *et al.* – "Assessing the global environmental consequences of economic growth through the Ecological Footprint: A focus on China and India". Ecological Indicators, v. 17, 2012, pp 99-107.
[4] Rohde R., *et al.* – "A New Estimate of the Average Earth Surface Land Temperature Spanning 1753 to 2011". *Geoinfor Geostat: An Overview*. V:1-1, 2013, 7 p.
[5] Sacardo. L. E. P. – "Avaliação da resistência à corrosão da armadura em concretos com cimentos geopoliméricos". Trabalho de conclusão de curso – Graduação em Engenharia civil - UNISINOS, 2015, 88p.
[6] Provis, J. L. – "Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what?". *Materials and Structures*. RILEM, v. 47. 2013, pp 11-25.
[7] Koppe, A. – "Desenvolvimento e avaliação da resistência mecânica de cimentos alternativos produzidos a partir de rochas basálticas". Trabalho de conclusão de curso – Graduação em Engenharia Civil - UNISINOS, 2013, 98 p.
[8] Guindani. E. N. – "Estudo de beneficiamento de resíduos de britagem de rochas basálticas para utilização como aglomerante na construção civil". Trabalho de conclusão de curso – Graduação em Engenharia Civil - UNISINOS, 2015, 128 p.
[9] Repette, W. L. – "Cimentos especiais de base mineral". In: ISAIA, G. C. (ed.) *Materiais de Construção Civil e princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto, v.1 2007, 1712 p.
[10] Schiavon, M. A. e*t al.* – "Caracterização térmica e morfológica de fibras contínuas de basalto". *Cerâmica*, vol. 53, 2007, pp 212-217.
[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – "NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação". Rio de Janeiro, 2009.
[12] Scrivener, Karen L. e Nonat, André. Hydration of cementitious materials, present and future. *Cement and Concrete Research.* V 41, 2011, pp 651-665.

[13] Davidovits J., *et al.* – "Geopolymeric Cement based on Low Cost Geopolymer Materials. Results from the European Research Project GEOCISTEM", *Geopolymer*. 1999, pp 83–96.
[14] Fernández-Jiménez A., *et al.* – "Durability of alkaliactivated fly ash cementitious materials", *Materials Science*, v. 42, 2006, pp 3055–3065.
[15] Luhar. S. – "Durability Studies of Fly Ash Based Geopolymer Concrete". *Journal of Engineering Research and Applications*. V. 5, 2015, pp.17-32.
[16] Provis. J. L., Deventer. J. S. J. V. – "Geopolymers. Structure, processing, properties and industrial applications". *Woodhead Publishing Limited*, Cambridge, 2009, 461p.
[17] Bakharev T. –"Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions". *Cement and Concrete Research*. V. 35, 2005, pp 1233–1246.
[18] Muntingh, Y. – "Durability and Diffusive behavior evaluation of Geopolymeric Material. *University of Stellenbosch*, South Africa, 2006, 186 p.
[19] Reddy. e*t al.* – "Experimental evaluation of the durability if fly ash-based Geopolymer concrete in the marine environment". Ninth LACCEI Latin American and Caribbean Conference. Medellín, Colombia, 2011, 131 p.
[20] Shaikh, F. U.A. – "Effects of alkali solutions on corrosion durability of geopolymer concrete". *Advances in Concrete Construction*, V. 2, 2014, pp 109-123.
[21] Mancio, M. – "Avaliação da Resistência e Durabilidade de Cimentos Especiais com Reduzido Impacto Ambiental". Projeto de Pesquisa, Edital Pesquisador Gaúcho – PPG – 2014.
[22] Mancio, M. – "Electrochemical and in-situ Surface-Enhanced Raman Spectroscopic (SERS) study of passive films formed on low-carbon steel in highly alkaline environments". Tese (Doutorado), Berkeley, University of California, 2008, 192 p.