

Ligantes obtidos por activação alcalina. Parte 1 - Durabilidade

Fernando Pacheco Torgal ^{1,†}, Said Jalali ²

*Universidade do Minho, Unidade de Investigação C-TAC
4800 Guimarães, Portugal*

RESUMO

A deterioração precoce de estruturas de betão armado à base de cimento Portland, é um fenómeno actual com consequências significativas quer ao nível dos custos das operações de reabilitação parcial ou integral, quer mesmo em termos dos impactos ambientais associados a essas operações.

No presente artigo procede-se a uma revisão da literatura sobre a durabilidade e o comportamento ambiental dos ligantes obtidos por activação alcalina, materiais alternativos ao cimento portland e cujos desempenhos se apresentam bastante promissores.

Na Parte 1 do presente artigo, analisa-se a resistência aos ácidos, a resistência a altas temperaturas, a resistência ao fogo, a resistência ao gelo-degelo, a resistência à abrasão, a possibilidade de ocorrência de reacções do tipo alcáli-agregado e a compatibilidade com as armaduras de aço.

1. INTRODUÇÃO

Um material de construção (da família dos ligantes), só pode considerar-se como sendo durável, quando consegue manter ao longo do tempo (vida útil projectada), a sua capacidade de resistência à acção de forças e a sua integridade estrutural mesmo após ser sujeito a fenómenos de degradação mecânicos, físicos e químico quando colocado em serviço, quer por acção ambiental ou decorrente da actividade humana.

Aquilo que se sabe em termos da durabilidade de materiais ligantes, resulta do conhecimento acumulado ao longo de dezenas de anos relativo à análise de estruturas de betões à base de cimento Portland Normal (CPN), o ligante mais utilizado durante o século XX, quando sujeitas às mais diversas condições ambientais. Sabe-se hoje contudo que bastantes estruturas executadas com betões à base de cimento portland, apresentam uma vida útil relativamente curta, facto que condiciona bastante o seu uso.

São aliás inúmeros os casos de deterioração precoce de estruturas de betão armado. Gjorv (1994) indica um estudo sobre pontes construídas na Noruega após 1970 em que 25% apresentavam deterioração por corrosão de armaduras.

¹ Doutor em Engenharia Civil

[†] Autor para quem a correspondência deverá ser enviada (torgal@civil.uminho.pt)

² Professor Catedrático

Bijen (2003) salienta que ascedem a largas dezenas de biliões de dolares, as obras necessárias para reabilitar as infra-estruturas viárias de betão armado existentes nos Estados Unidos e que se encontram em estado de elevada degradação.

A vulnerabilidade do cimento portland fica a dever muito ao facto de possuir uma elevada quantidade de cal, facilmente susceptível de ataque químico, situação agravada pela incapacidade do cimento portland em conseguir uma boa aderência aos agregados o que induz níveis de permeabilidade relativamente elevados, facilitando o ingresso de água, gases e substancias agressivas, que provocam fenómenos de carbonatação e de corrosão das armaduras (Glasser et al., 2008; Bentur & Mitchell, 2008).

As investigações visando a obtenção de materiais estruturais mais duráveis e mais “amigos do ambiente”, assumiram-se assim como desafios a que comunidade científica tem tentado dar resposta tentando desenvolver novos ligantes obtidos por activação alcalina.

Torgal et al (2008, 2008 a) procederam recentemente a uma revisão da literatura sobre estes materiais, contudo esta não aborda no entanto a questão da durabilidade, o que constitui por isso o objecto da Parte 1 do presente artigo.

2. RESISTÊNCIA AOS ÁCIDOS

Também por vezes designados por ligantes geopoliméricos ou por geopolimeros, os ligantes obtidos por activação alcalina, são sintetizados a partir de aluminosilicatos com soluções altamente alcalinas à base de hidróxidos e silicatos (Torgal & Said, 2009).

Vários investigadores referem a resistência ao ataque por ácidos como uma das maiores vantagens destes materiais sobre os ligantes à base de cimento portland. Davidovits et al. (1990) mencionam perdas de massa de 6 e 7% em ligantes activados alcalinamente imersos durante 4 semanas em soluções de 5% de ácido clorídrico e sulfúrico, sendo a perda para betões à base de cimento Portland de 78 e 95% (Figura 1)

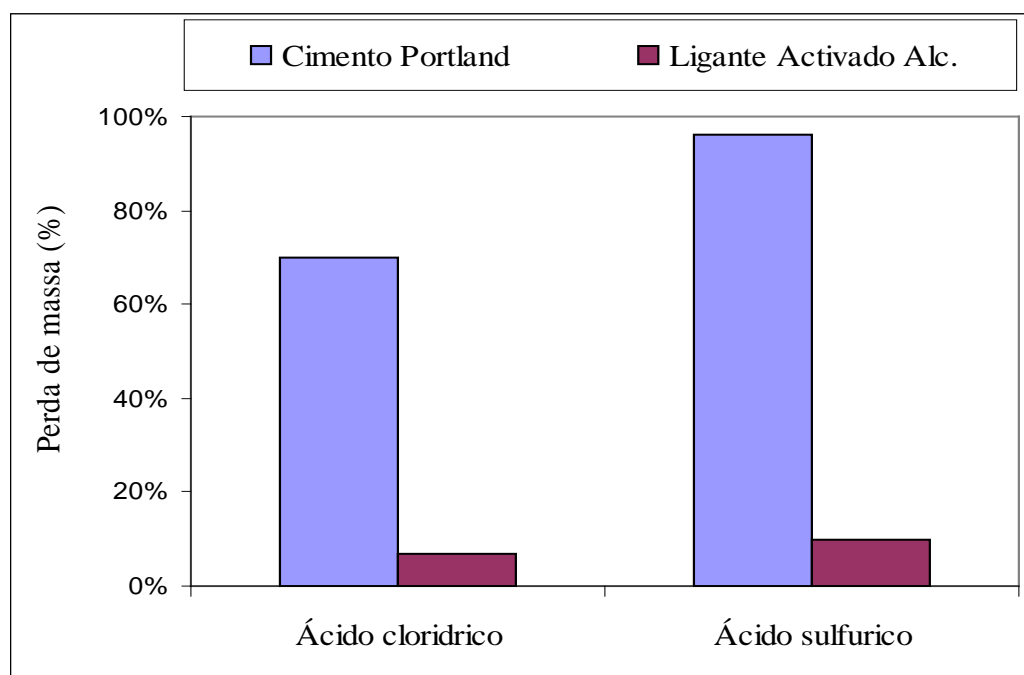


Figura 1 – Resistência aos ácidos: Cimento portland versus ligante activado alcalinamente (Davidovits et al., 1990)

Bakharev et al. (2002) analisaram a resistência de betões à base de escórias activadas alcalinamente e betões CPN ao ataque de sulfatos, tendo observado que os primeiros apresentavam menores reduções de resistência, sendo a diferença de resultados devida principalmente à diferença da constituição química dos dois ligantes.

Pinto (2004) utilizando uma solução de 5% de ácido sulfúrico e um tempo de imersão de 30 dias, refere que betões obtidos por activação alcalina de metacaulino com silicato de sódio e NaOH (15M) perdem 2,32% da sua massa enquanto que betões correntes à base de cimento Portland apresentam uma perda de massa de 20,7%. Já a perda de resistência foi respectivamente de 13% e 80%. O mesmo investigador utilizou soluções de ácido sulfúrico, nítrico e clorídrico a 10%, tendo referido as seguintes perdas de massa para os betões activado alcalinamente (7, 11 e 12%) e para os betões correntes do tipo CPN (56, 17 e 18%).

Song et. al. (2005) utilizaram betões à base de cinzas activadas alcalinamente imersos durante 8 semanas em solução de ácido sulfúrico a 10%, tendo observado perdas de massa e de resistência respectivamente de 3% e de 35%.

Gourley & Johnson (2005) destacam os resultados apresentados o desempenho dos dois betões num ensaio cíclico de imersão em ácido sulfúrico (pH=1), conhecido como ensaio de Mississipi e no qual um betão corrente de CPN com uma vida útil de 50 anos perdeu 25% da sua massa ao fim de 80 ciclos, enquanto que um betão obtido por activação alcalina de escórias e utilizado no fabrico de manilhas (Figura 2) necessitou de 1400 ciclos para perder a mesma massa, o que significa que terá em princípio uma vida útil de 900 anos.

Mais recentemente Fernandez-Jimenez et al. (2007), compararam o desempenho de ligantes activados alcalinamente e de betões correntes de CPN quando imersos em ácido clorídrico (pH=1), observando que enquanto os primeiros mantinham a sua integridade mesmo após 90 dias, os segundos se apresentavam já muito deteriorados após 56 dias de imersão.

Torgal et al. (2007), compararam a resistência à imersão em ácidos de ligantes activados alcalinamente com betões correntes da classe C30/37, tendo observado que os últimos perdem grande parte da sua massa logo após 24 horas de imersão (Figura 2).



Figura 2 – Provetes de ligantes activados alcalinamente (AALRM) e provetes de betão CPN C30/37 imersos em ácido nítrico. Aspecto ao fim de apenas 24 horas (Torgal et al., 2007)

3. RESISTÊNCIA A ALTAS TEMPERATURAS

Enquanto que os betões correntes à base de CPN apresentam um fraco desempenho quando sujeitos a uma fase térmica, iniciando a sua desintegração para temperaturas acima dos 300 °C, já os ligantes activados alcalinamente são termicamente mais estáveis.

Alguns autores confirmam a estabilidade térmica de ligantes obtidos pela cativação de cinzas volantes, mesmo para temperaturas próximas de 1000 °C (Pawlasova e tal., 2007).

Bortnovsky et al. (2007) investigaram o desenvolvimento de ligantes à base de metacaulinos e resíduos de xisto, tendo observado um bom desempenho mecânico dos novos ligantes quando sujeitos a uma fase térmica (Tabela 1).

Tabela 1 – Percentagem de resistência residual de amostras submetidas a um aumento de temperatura (Bortnovsky et al., 2007)

Amostra	Resistência residual à flexão (%)			Resistência residual à compressão (%)		
	T=600 °C	T=900 °C	T=1200 °C	T=600 °C	T=900 °C	T=1200 °C
H160	90	90	157	81	82	110
H110	93	93	145	88	76	122
K80	-	91	155	-	76	85

Os provetes sofreram ligeiras perdas de resistência no intervalo de temperaturas 600-1000 °C, apresentando no entanto e nalguns casos ganhos de resistência para 1200 °C.

Outros autores (Kong et al., 2008), estudaram o desempenho térmico de provetes obtidos pela activação alcalina de metaculino, concluindo que a resistência residual após a fase térmica até aos 800 °C, é influenciada pela razão Si/Al do ligante. Os provetes em que a razão Si/Al se situava no intervalo 1,5-1,7 apresentavam uma maior resistência residual.

Fernandez-Jimenez et al. (2008) referem que os ligantes obtidos pela activação alcalina de cinzas volantes da classe F, embora estáveis ao aumento da temperatura não são no entanto indicados para serem utilizados como materiais refractários, devido a elevados níveis de retracção e variações na resistência à compressão quando sujeitos a uma fase térmica. O referido comportamento que tem que ver com a elevada quantidade de impurezas de ferro existentes neste material.

Riessen et al. (2009) fazem referência a uma outra vantagem dos ligantes activados alcalinamente face aos betões de CPN, quando sujeitos a uma temperatura muito elevada e que tem que ver com o facto dos segundos poderem em algumas circunstâncias apresentar um comportamento explosivo “spalling”, algo que não sucede nos primeiros.

4. RESISTÊNCIA AO FOGO

Krivenko & Guziy (2007), analisaram o comportamento ao fogo de ligantes activados alcalinamente, concluindo pelo seu bom desempenho neste ensaio. De tal forma que sugerem que este material é indicado para utilização em obras para as quais o incêndio seja especialmente gravoso, como túneis e edifícios altos.

Também Perná et al. (2007), analisaram a possibilidade da utilização de ligantes activados alcalinamente como materiais anti-fogo. De acordo com as normas da República Checa, um material apresenta comportamento anti-fogo se na face oposta à acção do fogo a temperatura não exceder 120 °C. Nos ensaios realizados essa temperatura só foi atingida ao

fim de aproximadamente 120 minutos, o que confirma o bom desempenho deste material (Figura 3).



Figura 3 – Placas obtidas por activação alcalina sujeitas a fase térmica. São visíveis dois termopares aplicados na face posterior da placa (Perná et al., 2007)

5. RESISTÊNCIA AO GELO-DEGELO

Dolezal et al. (2007), observaram a perda de 30% da resistência de ligantes obtidos pela activação de cinzas volantes, após 150 ciclos de gelo-degelo. Outros autores (Bortnovsky et al., 2007), analisaram a resistência de ligantes obtidos pela activação de escórias e resíduos de xisto, quando submetidos a ciclos de gelo-degelo, apresentando aqueles um bom desempenho mecânico mesmo após 100 ciclos (Tabela 2).

Tabela 5.2 – Resistência à compressão após ciclos de gelo-degelo (Bortnovsky et al., 2007)

Amostra	Resistência aos 180 dias de cura (MPa)	Resistência após 50 Ciclos (MPa)	Resistência após 100 ciclos (MPa)
K80	91	82	75
H110	105	84	90
K125	88	79	89
H160	110	85	79

Contudo, Fernandez-Jimenez & Palomo (2009), salientam que este desempenho não é linear, referindo que há casos na literatura de ligantes activados alcalinamente que apresentam um baixo desempenho quando submetidos a ciclos de gelo/degelo. A explicação para isso tem que ver com a porosidade e a microestrutura do ligante testado, a qual condiciona a resistência aos ciclos de gelo/degelo.

6. RESISTÊNCIA À ABRASÃO

Torgal et al. (2007) confirmam o bom desempenho de ligantes activados alcalinamente no ensaio de Los Angeles face a provetes de betão CPN da classe de resistência C20/25 e C30/37 (Figura 4). Sendo que ao fim de 1000 rotações os provetes de material activado alcalinamente não tinham no caso mais desfavorável (CL – agregados de calcário) sequer perdido 30% da sua massa.

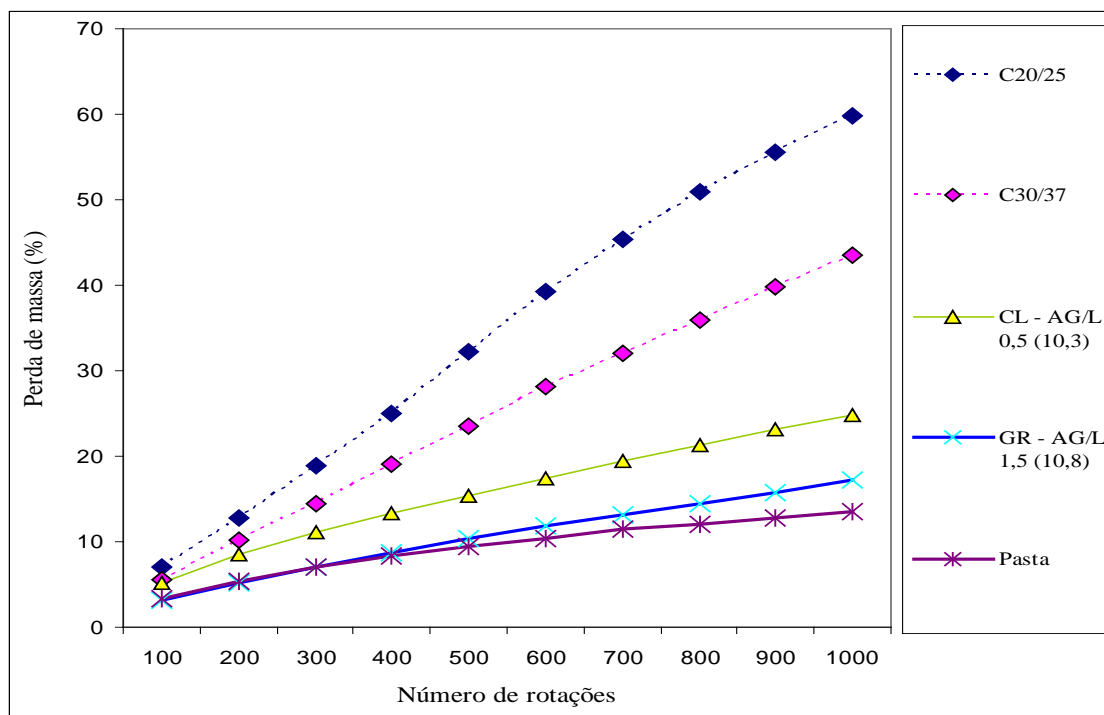


Figura 4 – Resistência ao desgaste por impacto no ensaio de Los Angeles de betões CPN e ligantes activados alcalinamente (Torgal et al., 2007)

Goretta et al. (2007), estudaram a resistência ao impacto dos ligantes activados alcalinamente a partir de escórias de alto forno, concluindo que a resistência destes materiais é proporcional à velocidade de impacto e que a presença de cinzas volantes na composição daqueles aumenta a sua resistência. Também Hu et al., (2008) confirmam a elevada resistência à abrasão dos ligantes activados alcalinamente.

7. POSSIBILIDADE DE OCORRÊNCIA DA REACÇÃO ALCÁLI-AGREGADO

A reacção álcali-agregado é um processo químico que ocorre entre alguns minerais dos agregados, os iões alcalinos (Na^+ e K^+) e hidroxilos (OH^-) que estão dissolvidos na solução dos poros do betão. Os iões e hidroxilos podem ser provenientes do cimento, da água de amassadura, dos próprios agregados e materiais pozolânicos entre outros.

Alguns autores são, da opinião que a reacção em causa, não é apenas uma reacção entre os alcalis e os agregados mas necessita também da presença de iões de Ca^{2+} , os quais são fornecidos pela Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) da pasta de cimento (Davies & Oberholster, 1988; Chatterji, 1988).5

Davidovits (1991) refere análises comparativas entre o comportamento de ligantes geopoliméricos e de ligantes à base de cimento Portland, quando sujeitos ao ensaio preconizado na ASTM C227 (ensaio de variação dimensional de barra de argamassa, contendo agregados cuja reactividade se pretende avaliar), tendo observado retracções no primeiro caso e expansões muito significativas no segundo, este autor não refere contudo se a composição do ligante geopolimérico contém cálcio (Figura 5).

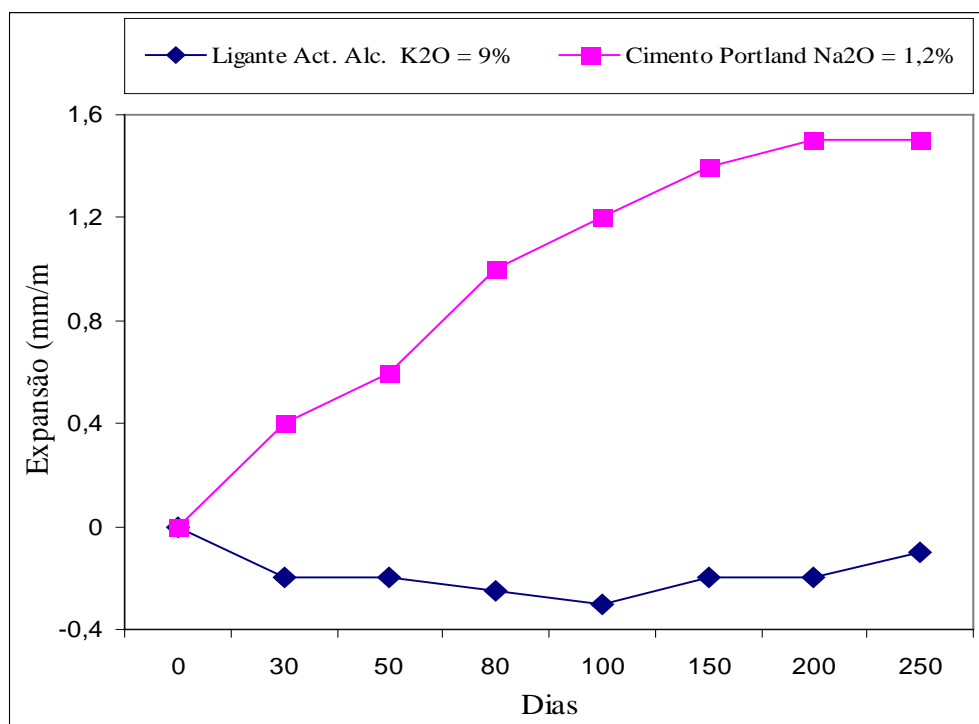


Figura 5 – Análise da reactividade (ASTM C227). Ligantes activados alcalinamente versus cimento portland (Davidovits, 1991)

Fernandez-Jimenez & Puertas (2002) observaram expansões em ligantes activados alcalinamente mas indicam serem inferiores às obtidas com ligantes à base de cimento Portland.

Para Li et al (2006), como os alcális são fixados na estrutura durante o processo de endurecimento dos ligantes activados alcalinamente e não sobram em quantidade suficiente para gerar reacções de expansão.

Mais recentemente outros autores analisaram a expansão de provetes de ligantes activados alcalinamente de acordo com um ensaio de expansão acelerado previsto na ASTM C1260-94, obtendo valores de expansão admissíveis inferiores a 0,1% (Garcia-Lodeiro et al., 2007; Fernandez-Jimenez et al., 2007).

Segundo Fernandez-Jimenez & Palomo (2009), a ausência de expansões nos ligantes activados alcalinamente pode ficar a dever-se ao facto destes materiais não terem cálcio na sua composição.

8. COMPATIBILIDADE COM ARMADURAS DE AÇO

A possibilidade de ocorrência de corrosão em armaduras presentes em elementos estruturais é um dos factores que mais contribui para a inviabilização da capacidade estrutural desses elementos portantes, de facto enquanto um ataque à capacidade resistente do betão,

será sempre gradual e muito em função do seu elevado volume, o ataque às armaduras encontra-se facilitado pelo facto destas se encontrarem muito perto da superfície e serem sensíveis à corrosão.

Nos ligantes correntes à base de CPN as armaduras encontram-se protegidas por uma camada de passivação devida à elevada alcalinidade proporcionada pelo hidróxido de cálcio e também mas em menor escala pelos hidróxidos de sódio e potássio.

A corrosão das armaduras pode ocorrer pela destruição desta camada, quando baixa o valor do pH através de fenómenos de carbonatação por ingresso de CO₂, quer através do ingresso de cloretos. Podendo ocorrer uma corrosão generalizada quando existe uma destruição geral da camada passiva ou uma corrosão por picadas, devida a dissolução localizada daquela camada, típica dos iões cloretos.

Para os ligantes activados alcalinamente existe pouca informação disponível sobre a sua capacidade para conseguirem impedir a corrosão de armaduras. É sabido no entanto que a presença do silicato de sódio inibe a corrosão do aço, pela formação de compostos insolúveis de silicato de ferro que actuam como barreira ao desenvolvimento da corrosão (Lahodny-Sarc & Kastelan, 1981).

Sarawasthy et al. (2003) estudaram cinzas volantes activadas alcalinamente tendo obtido desempenhos semelhantes ao dos ligantes correntes à base de CPN em termos da manutenção da alcalinidade suficiente para impedir a corrosão das armaduras.

Miranda et al. (2005) demonstraram que o pH é superior mesmo ao dos ligantes com CPN, baixando este valor com o desenvolvimento das reacções de hidratação mantendo-se no entanto com um nível de alcalinidade elevado mesmo após 5 anos, desde que não ocorressem fenómenos de carbonatação.

Também outros autores comprovaram a estabilidade da passivação das armaduras em ligantes activados alcalinamente (Bastidas et al., 2008).

9. CONCLUSÕES

A comunidade científica tem vindo ao longo dos últimos anos a investigar ligantes que sejam mais duráveis e mais “amigos do ambiente” que o cimento portland.

No presente artigo, procede-se a uma revisão da literatura dos ligantes obtidos por activação alcalina em termos da resistência aos ácidos, da resistência a altas temperaturas, da resistência ao fogo, da resistência ao gelo-degelo, da resistência à abrasão, da possibilidade de ocorrência de reacções do tipo alcáli-agregado e da compatibilidade com as armaduras de aço.

Os resultados obtidos por diversos investigadores comprovam que estes novos ligantes apresentam uma durabilidade superior ao cimento portland.

REFERENCIAS

Bastidas, D., Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A.; Gonzalez, J.; Palomo, A., A study on the passive stability of steel embedded in activated fly ash mortars. *Corrosion Science* Vol.50, 1058-1065 (2008).

Bakharev, T., Sanjayan, J., Cheng, Y., Sulfate attack on alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research* Vol.31, 211-216 (2002).

Bijen, J., The durability of engineering structures. Design, repair and maintenance. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, London (2003).

Bentur, A., Mitchell, D., Material performance lessons. *Cement and Concrete Research* Vol. 38, 259-272, (2008).

Bortnovsky, O., Dvorakova, K., Roubicek, P., Bousek, J., Prudkova, Z., Baxa, P. Development, properties and production of geopolymers based on secondary raw materials. Alkali Activated Materials - Research, Production and Utilization 3rd Conference, 83-96, ISBN 978-80-867-42-19-9. Edited by Agentura Action, Praga, República Checa (2007).

Chatterji, S., Thaulow, N., Jensen, A., Studies of alkali-silica reactions: Part. 6. Practical implications of a proposed reaction mechanism. Cement and Concrete Research Vol.18, 363 – 366 (1988).

Davies, D., Oberholster, R., Alkali-silica reaction products and their development. Cement and Concrete Research Vol.18, 621 – 635 (1988).

Davidovits, J., Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. Journal of Thermal Analysis Vol.37, 1633-1656 (1991).

Davidovits, J., Comrie, D.; Paterson, J., Ritcey, D., Geopolymeric concretes for environmental protection. ACI Concrete International Vol.12, pp. 30-40 (1990).

Dolezal, J., Skvara, F., Svoboda, P., Sulc, R., Kopecky, L., Pavlasova, S., Myskova, L., Lucuk, M., Dvoracek, K., Concrete based on fly ash geopolymers". Alkali Activated Materials - Research, Production and Utilization 3rd Conference, 185-197, ISBN 978-80-867-42-19-9. Edited by Agentura Action, Praga, República Checa (2007).

Fernandez-Jimenez, A., Puertas, F., The alkali-silica reaction in alkali-activated slag mortars with reactive aggregate. Cement and Concrete Research Vol.32, 1019-1024 (2002).

Fernandez-Jimenez, A., Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials. Journal of Materials Science Vol.42, 3055-3065 (2007).

Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., Pastor, J., Martin, A., New binder material based in alkali-activated fly ashes. Mechanical behaviour at high temperature. Journal of American Ceramic Society Vol.91, 3308-3314 (2008).

Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., Chemical durability of geopolymers. In Geopolymers, Structure, Processing, Properties and Applications, ISBN -13: 978 1 84569 449 4, Ed. J. Provis & J. Van Deventer, Woodhead Publishing Limited Abington Hall, Cambridge, UK, 165-193 (2009).

Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernandez-Jimenez, A., The alkali aggregate reactions in alkali activated fly ash mortars. Cement and Concrete Research Vol. 37, 175-183, (2007).

Glasser, F., Marchand, J., Samson, E., Durability of concrete. Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions. Cement and Concrete Research Vol. 38, 226-246, (2008).

Miranda, J. M., Fernandez- Jimenez, A., Gonzalez , A., Palomo, A. Corrosion resistance in activated fly ash mortars. Cement and Concrete Research Vol. 35, 1210-1217 (2005).

Gjorv, O.E., Steel corrosion in concrete structures exposed to Norwegian marine environment". ACI Concrete International, 35-39 (1994).

Goretta, K., Gutierrez-Mora, F., Singh, D., Routbort, J., Lukey, G., Deventer, J., Erosion of geopolymers made from industrial waste. Journal of Materials Science Vol. 42, 3066-3072 (2007).

Gourley, J., Johnson, G. Developments in geopolymer precast concrete. In proceedings of Geopolymer 2005 World Congress, Geopolymer Green Chemistry and Sustainable Development Solutions, 139-143. S. Quentin, France (2005).

Hu, S., Wang, H., Zhang, G., Ding, Q., Bonding and abrasion resistance of geopolymeric repair material made with steel slag. Cement and Concrete Composites Vol. 30, 239-244 (2008).

Krivenko, P., Guziy, S., Fire resistant alkaline portland cements. Alkali Activated Materials - Research, Production and Utilization 3rd Conference, 333-347, ISBN 978-80-867-42-19-9. Edited by Agentura Action, Praga, República Checa (2007).

Kong, D., Sanjayan, J., Sagoe-Cretensil, K., Factors affecting the performance of metakaolin geopolymers exposed to elevated temperatures. *Journal of Materials Science* Vol. 43, 824-831 (2008).

Lahodny-Sarc, O., Kastelan, L., The influence of pH on the inhibition of corrosion of iron and mild steel by sodium silicate. *Corrosion Science* Vol.21, 265-271(1981).

Li, K., Huang, G., Jiang, L., Cai, Y., Chen, J., Ding, J., Study on abilities of mineral mixtures and geopolymer to restrain ASR. *Key Engineering Materials* Vol.302, 248-254 (2006).

Perná, I., Hanzlicek, T., Straka, P., Steinerova, M., Utilization of fluidized bed ashes in thermal resistance applications. *Alkali Activated Materials - Research, Production and Utilization 3rd Conference*, 527-537, ISBN 978-80-867-42-19-9. Edited by Agentura Action, Praga, República Checa (2007).

Pinto, A., Sistemas ligantes obtidos por activação alcalina de metacaulino. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho (2004).

Pawlasova, S., Skavara, F., High-temperature properties of geopolymer materials. *Alkali Activated Materials - Research, Production and Utilization 3rd Conference*, 523-524, ISBN 978-80-867-42-19-9. Edited by Agentura Action, Praga, República Checa (2007).

Riessen, A., Rickard, W., Sanjayan, J., Thermal properties of geopolymers. In *Geopolymers, Structure, Processing, Properties and Applications*, ISBN -13: 978 1 84569 449 4, Ed. J. Provis & J. Van Deventer, Woodhead Publishing Limited Abington Hall, Cambridge, UK, 315-342 (2009).

Saraswathy, V., Muralidharan, S., Thangavel, K., Srinivasan, S., Influence of activated fly ash on corrosion resistance and strength of concrete. *Cement and Concrete Research* Vol.25, 673-680 (2003).

Song, X., Marosszeky, M., Brungs, M., Munn, R., Durability of fly ash based geopolymer concrete against sulphuric acid attack. 10th International conference on the durability of building materials and components, Lyon, France (2005).

Torgal, F. P., Castro Gomes, J. P., Jalali, S., Alkali-activated tungsten mine waste mud binder versus opc concrete. Acid and abrasion resistance. *Alkali activated materials- research, production and utilization 3rd Conference*, 693-700, ISBN 978-80-867-42-19-9. Edited by Agentura Action, Praga, República Checa (2007).

Torgal, F. P., Castro Gomes, J. P., Jalali, Said, Alkali – activated binders: a review Part 1 Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials* Vol.22, 1305-1314 (2008).

Torgal, F. P., Castro Gomes, J. P., Jalali, Said, Alkali – activated binders: a review Part 2 About materials and binders manufacture. *Construction and Building Materials* Vol.22, 1315-1322 (2008a).

Torgal, F. P., Castro Gomes, J. P., Jalali, Said, Utilization of mining wastes to produce geopolymers. In *Geopolymers, Structure, Processing, Properties and Applications*, ISBN -13: 978 1 84569 449 4, Ed. J. Provis & J. Van Deventer, Woodhead Publishing Limited Abington Hall, Cambridge, UK, 267-293 (2009).