

Durabilité d'un béton de laitier activé au carbonate de sodium

Patrick Azar¹

¹ LMDC, Université de Toulouse, INSA-UPS Génie Civil

RESUME Ce travail se focalise sur la durabilité d'un liant alcali activé à base de laitier activé au carbonate de sodium (AAS). Les propriétés étudiées sont dans un premier temps les propriétés mécaniques et de transfert (porosité et coefficient d'absorption d'eau) puis, dans un deuxième temps, les propriétés de durabilité. Des performances équivalentes à un CEM III/C ont été mesurées vis-à-vis de la résistance à la compression, la porosité, l'attaque à l'acide nitrique et aux sulfates externes. L'AAS a présenté de meilleures performances vis-à-vis de l'attaque aux chlorures et de plus faible résistance à la carbonatation. Une étude plus précise de l'effet de la carbonatation sur des pâtes AAS a montré que le pH de stabilisation relativement élevé est probablement dû à l'effet tampon des alcalins provenant de l'activateur.

Mots-clefs laitiers de haut fourneau, carbonate de sodium, liant alcali-activé, durabilité, carbonatation

I. INTRODUCTION

Les matériaux alcali activés sont une catégorie de liants caractérisés par l'activation d'un précurseur (laitier de haut fourneau, cendres volantes, métakaolin) par un activateur alcalin (hydroxyde, silicate, carbonate, sulfate de sodium/potassium), ce qui conduit au durcissement du mélange selon des cinétiques plus ou moins rapides. Ces liants peuvent réduire les émissions de CO₂ jusqu'à 80 % par rapport au ciment Portland (OPC) conventionnel (McLellan et al., 2011). L'activation par le carbonate de sodium (Na₂CO₃) présente l'avantage d'être moins nocive pour la santé car l'activateur est une poudre ajoutée au liant et non une solution hautement alcaline comme les hydroxydes et les silicates. Cependant, le laitier (GGBS) activé par le carbonate de sodium (AAS-Na₂CO₃) attire moins l'attention en raison de sa prise prolongée et de sa faible résistance mécanique à jeune âge (Bakharev et al., 1999). L'AAS-Na₂CO₃ a été principalement étudié en termes de formulation, d'état frais et de résistance à la compression (principalement sur du mortier et de la pâte). Cependant, seules quelques études portent sur leur durabilité et des données supplémentaires sont nécessaires pour étudier le comportement à long terme de ce matériau avant toute application industrielle et standardisation.

Selon la littérature, le béton fabriqué avec du laitier activé par le silicate de sodium (AAS-Na₂SiO₃) présente une forte résistance à la pénétration des ions chlorure en raison de la capacité élevée des produits de réaction à lier les ions chlorure (Ke et al., 2017; Ma et al., 2016). De plus, l'AAS-Na₂SiO₃ a montré une meilleure résistance aux attaques chimiques, telles que les acides (y compris nitrique, acétique, chlorhydrique, sulfurique et propionique), que le OPC (Bernal et al.,

2012; Koenig et al., 2017). L'AAS- Na_2SiO_3 exposé à des attaques au sulfate de sodium a également surpassé les matériaux OPC (Bakharev et al., 2002; Komljenović et al., 2013) et les OPC substitués par du laitier (CEM II, CEM III) (Diaz Caselles et al., 2021; Komljenović et al., 2013). En revanche, dans les matériaux mélangés avec du GGBS, une augmentation du remplacement du OPC a entraîné une diminution de la résistance à la carbonatation (Cyr, 2013; Divsholi et al., 2014; Lye et al., 2016). Les études limitées sur la durabilité de l'AAS- Na_2CO_3 semblent aller dans la même direction, mais les données sont encore insuffisantes pour caractériser correctement le comportement à long terme de tels liants. Ainsi, cette étude vise à étudier la durabilité d'un béton AAS- Na_2CO_3 évalué par une approche performancielle. L'AAS a été comparé à un béton CEM III/C (à teneur en GGBS comparable au AAS). Tout d'abord, la résistance à la compression et la porosité des matériaux ont été étudiés. Ensuite, la durabilité a été examinée en termes d'attaques chimiques (acides et sulfates), de résistance aux chlorures et à la carbonatation. Une étude plus détaillée a été menée pour comprendre l'effet de la carbonatation sur le pH du AAS- Na_2CO_3 .

II. MATERIAUX ET METHODES

L'AAS a été fourni par Ecocem (composition chimique du laitier donnée dans le tableau 1). Ce liant est principalement composé de laitier et d'un système d'activation dont le composant principal est le carbonate de sodium (99,5% Na_2CO_3) de Solvay. Les ciments de référence sont un CEM III/C 32,5 N-LH/SR CE PM NF (Eqiom) contenant 82% de laitier et un CEM III/B 42,5 N - LH/SR CE PM NF (La Malle) contenant 71% de laitier. Leur composition chimique est indiquée dans le tableau 1. Les granulats utilisés proviennent du nord-ouest de la France, Sablières Palvadeau - Les Douêmes. Ils sont concassés (silice et quartz) et ont une taille comprise entre 0 et 20 mm. Les proportions des mélanges de béton sont présentées dans le tableau 2, le nom de chaque mélange de béton étant le type de ciment utilisé suivi du rapport eau/liant.

Les essais réalisés, les procédures associées et la durée de cure sont indiqués dans le tableau 3.

TABLEAU 1. Composition chimique des matériaux

Mass (%)	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	TiO_2	SO_3
GGBS	37,3	10,7	43,0	6,5	0,20	0,35	0,23	0,70	0,10
CEM III/C	31,2	10,2	47,0	6,0	0,90	0,63	0,51	0,54	2,6
CEM III/B	30,0	9,48	48,8	2,7	2,8	-	0,50	0,48	2,9

TABLEAU 2. Formulation des bétons pour les essais mécaniques et de durabilité (kg/m^3)

	Liant	Granulats	Eau	Adjuvant	E/L*
AAS	425	1725	170	1,1	0,4
CEM III/C 0.4	425	1808	170	0,9	0,4
CEM III/B 0.55	425	1640	234	-	0,55
CEM III/C 0.5	375	1807	187,5	-	0,5
CEM III/B 0.5	375	1807	187,5	-	0,5

* le Eau/Liant (E/L) a été calculé en utilisant l'eau effective (eau disponible pour participer à l'hydratation du liant) et le liant correspondait à la totalité de la poudre sèche ajoutée.

TABLEAU 3. Procédures des tests sur béton

Class d'exposition	Indicateurs généraux		XC	XS, XD	XA	XA
Test effectué	Résistivité	Porosité accessible à l'eau et coefficient d'absorption d'eau	Carbonatation naturelle	Migration accélérée et diffusion naturelle des chlorures	Attaque à l'acide nitrique (HNO ₃)	Attaque au sulfate de sodium (Na ₂ SO ₄)
Norme	XP P 18-481	NF P 18-459 NF EN 13369	NF EN 12390-10	NF EN 12390-11 NT Build 492	XP P18-482	SIA 262/1
Durée de cure en conditions scellés (jours)	90 et 180	90	4, 5 (AAS)	90	90	90
Propriétés mesurées	ρ	ε et WAC	Vitesse de carbonatation	Dnss et Dnssm	Profondeur de dégradation	Expansion longitudinale
Unité	$\Omega.m$	%	mm/année ^{0.5}	m ² /s	mm	%
Echéances de mesure	90 et 180 jours	90 jours	1, 3, 6, 12 et 24 mois	90 jours	60 jours après cure	7, 14, 28, 35, 42, 56, 70, 84 jours

Des échantillons de pâte AAS et CEM III/C ont été préparés avec un rapport E/L de 0,4 pour étudier l'effet de la carbonatation sur le pH. Les échantillons de référence ont été conservés dans des conditions de cure endogène et les autres échantillons ont été durcis pendant 5 jours avant d'être concassés ($D_{max} = 5$ mm) et soumis à une carbonatation naturelle et accélérée à 1% de CO₂. Les échantillons ont été broyés afin d'assurer leur carbonatation complète, des tests préliminaires ayant montré que le front de carbonatation dépassait 5 mm dans les pâtes AAS et CEM III/C après 1 mois de carbonatation. A différentes échéances (1, 4,5 et 12 mois), des échantillons ont été prélevés et broyés à 80 μm . 10 g de pâte broyée ont ensuite été immédiatement mélangés à 10 mL d'eau ultra-pure. La solution obtenue a été agitée à 300 rpm pendant 5 min avant de mesurer le pH à l'aide d'un pH-mètre. Cette méthode a été inspirée de l'étude de Wang et al. (Wang et al., 2021) La méthode a été validée avant d'être utilisée. La solution interstitielle a été extraite d'un échantillon de pâte scellé à l'aide d'un dispositif à haute pression après 45 jours. Le pH a été mesuré et comparé au pH obtenu par suspension de poudre, ce qui a donné des résultats similaires. Des analyses SEM/EDX ont été réalisées sur des échantillons de pâte broyée AAS après 4,5 mois.

III. RESULTATS

A. Propriétés d'usage des bétons

Les bétons AAS, CEM III/C 0.4, CEM III/C 0.5 et CEM III/B 0.5 avaient des affaissements de 20, 16, 17 et 15 cm, respectivement. Pour le CEM III/B 0.55, le mélange de béton était très fluide et avait un affaissement supérieur à 20 cm. Le tableau 4 montre la résistance à la compression des différents bétons, mesurée sur des cubes de 10 cm, durcis dans des conditions scellées ou conservés dans des conditions naturelles de séchage à l'extérieur.

Les résultats ont montré que :

- A un rapport E/L équivalent de 0,4, le béton AAS a une résistance inférieure à celle du CEM III/C. Elle a tout de même atteint plus de 40 MPa à 28 jours et a continué à augmenter avec le temps, atteignant plus de 60 MPa à 1 an.
- A un jeune âge (4-5 jours), l'AAS a présenté une résistance assez élevée en comparaison avec d'autres liants, ce qui est peut-être attribuable au faible rapport entre la quantité d'eau et de liant dans le mélange.
- A des âges plus avancés (comme après 1 an de stockage en conditions extérieures sous abri), l'AAS peut être considéré comme "équivalent" au CEM III/B avec un rapport eau/liant de 0,525 ou au CEM III/C avec un rapport eau/liant de 0,43

TABLEAU 4. Résistance en compression jusqu'à 2 ans des bétons conservés en conditions scellées ou en cure endogène pendant 4 ou 5 jours (selon la formule), suivie d'une conservation en condition extérieure sous abri.

age (jours)	Résistance à la compression (MPa)									
	Conditions scellées					Conditions extérieures sous abri				
	AAS	CEM III/C 0.4	CEM III/C 0.5	CEM III/B 0.5	CEM III/B 0.55	AAS	CEM III/C 0.4	CEM III/C 0.5	CEM III/B 0.5	CEM III/B 0.55
4/5 (AAS)	29.7	29.8	22.7	20.9	14.6	-	-	-	-	-
28	45.0	52.6	41.0	52.7	46.2	-	-	-	-	-
36	46.0	54.7	41.2	53.4	47.4	44.2	49.7	41.3	48.1	37.5
97	55.1	57.5	48.4	60.3	52.9	53.7	57.3	43.4	51.8	41.3
188	60.7	63.2	50.6	65.1	57.1	57.3	61.5	43.6	56.0	42.7
371	63.9	69.1	51.7	67.1	60.2	58.6	64.2	43.5	59.2	45.9
737	66.9	72.2	54.9	71.8	-	60.8	66.2	46.0	58.8	-

B. Durabilité des bétons

L'étude de durabilité a été réalisée sur la base d'une approche performancielle, en se basant sur le béton CEM III/C 0.4 comme référence. Toutefois, pour la carbonatation, plusieurs références ont été utilisées. Le tableau 5 présente un aperçu de tous les tests de durabilité effectués sur l'AAS et le CEM III/C 0.4.

TABLEAU 5. Résumé des résultats des essais effectués sur AAS et CEM III/C 0.4.

		Cure (jours)	AAS	CEM III/C 0.4
f_{c28}	MPa	28	45.0	52.6
f_{c90}	MPa	90	55.1	57.5
Porosité	%	90	14.1	14.6
Resistivité	$\Omega \cdot m$	90	645	396
Diffusion naturelle Cl	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	90	0.25	0.48
Migration accélérée Cl	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	90	1.01	1.16
Carbonatation naturelle	mm/année ⁵	5 (AAS). 4	8.3	5.9
Acide nitrique pH=4	mm	90	0.28	0.26
Sulfates (Na ₂ SO ₄)	%	90	0.03-0.07	0.05

Certaines caractéristiques des deux bétons sont quasiment identiques : la porosité accessible à l'eau, la résistance à l'attaque par l'acide nitrique et la résistance à l'attaque externe par le sulfate de sodium. Bien que la résistance du béton AAS soit légèrement inférieure à celle du CEM III/C 0.4 à 90 jours, il peut toujours être considéré comme un béton C35/45 (sur la base de la résistance à la compression à 28 jours), tout comme le CEM III/C 0.4. En revanche, les propriétés liées à la diffusion et à la migration des chlorures sont améliorées pour le béton AAS. Par rapport au CEM III/C 0.4, la résistivité du béton AAS est supérieure de 63 %, et les coefficients de diffusion naturelle et de migration accélérée des chlorures sont plus faibles. Par contre, des cinétiques de carbonatation supérieures ont été mesurées dans le AAS.

C. Carbonatation du béton

La figure 1 montre les cinétiques de carbonatation de tous les bétons conservés en extérieur sous abri pendant 1 et 12 mois, en fonction des résistances à la compression. Cette méthode de conservation correspond à celle utilisée dans la mesure du test de carbonatation naturelle. Il convient de noter que la cinétique de carbonatation est identique pour les deux échéances, car elle a été déduite de toutes les mesures de profondeur de carbonatation effectuées entre 1 et 12 mois (la pente de la régression linéaire de la profondeur moyenne de carbonatation a été tracée en fonction de la racine carrée du temps).

Il existe une relation linéaire assez claire entre les taux de carbonatation et la résistance à 1 mois, qui est moins nette à 12 mois. Cette relation montre qu'une augmentation de la résistance est accompagnée d'une diminution significative de la cinétique de carbonatation. Cependant, la seule résistance ne peut pas expliquer cette diminution, d'autres facteurs doivent être pris en compte, tels que la réserve de chaux du système.

Le béton AAS a montré des cinétiques de carbonatation comprises entre les bétons CEM III/B et CEM III/C, avec un effet important du rapport eau/liant. Ainsi, du point de vue de la carbonatation : un béton AAS avec un rapport eau/liant de 0,40 serait similaire à un béton CEM III/B avec un rapport eau/ciment compris entre 0,50 et 0,55 ; ou similaire à un béton CEM III/C avec un rapport eau/liant compris entre 0,40 et 0,50.

Dans l'AAS, la portlandite n'est pas l'un des produits de réaction et les C-(N)-A-S-H sont caractérisés par un rapport Ca/Si (=1,0) plus faible par rapport au béton OPC (entre 1,7 et 2,0) (Lothenbach and Gruskovnjak, 2007; Puertas et al., 2006). Cela signifie qu'il y a moins de Ca disponible dans ces matériaux pour capturer le CO₂ et aucun effet tampon de pH associé ne pouvait être fourni, ce qui a conduit à une résistance inférieure à la carbonatation. En fait, dans une structure en béton armé sans ajouts d'OPC, la carbonatation n'a pas d'effet néfaste direct sur les propriétés du matériau. L'effet négatif de la carbonatation est plutôt la diminution du pH dans le matériau provoquant la corrosion. Dans l'AAS, malgré le taux de carbonatation élevé, leur teneur élevée en alcalins (provenant de l'activateur) pourrait avoir un effet tampon de pH et provoquer une stabilisation plus élevée du pH après la carbonatation. Ainsi, la carbonatation peut ne pas entraîner une forte diminution du pH tout en assurant la passivation de l'armature.

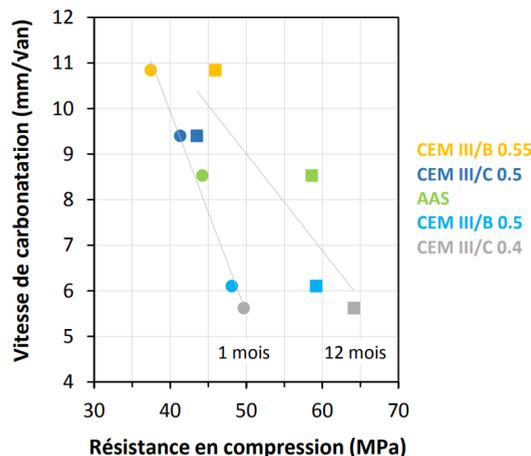


FIGURE 1. Vitesse de carbonatation des bétons en fonction des résistances à la compression à 1 et 12 mois. Bétons conservés à l'extérieur sous abri après 4 ou 5 jours de cure (selon la formule).

D. Effet de la carbonatation sur le pH du AAS

Les mesures de pH obtenues par suspension de poudre de pâte sont présentées dans le tableau 6.

TABLEAU 6. pH des échantillons de pâte AAS et CEM III/C après cure en conditions scellées et carbonatation (naturelle, carbonatation accélérée à 1 % de CO₂) obtenue par suspension de poudre en solution.

Age	AAS			CEM III/C		
	1 mois	4.5 mois	12 mois	1 mois	4.5 mois	12 mois
Conditions scellées	13.3	-	12.9	13.1	-	12.8
Carbonatation naturelle	12.1	11.5	11.5	11.7	10.3	9.9
Carbonatation à 1% CO ₂	10.8	10.8	10.7	8.9	8.9	8.1

Les échantillons AAS et CEM III/C conservés dans des conditions scellées ont maintenu un pH élevé d'environ 13. La carbonatation naturelle a entraîné une stabilisation du pH de la pâte AAS à 11,5 après 4,5 et 12 mois. Cependant, dans la pâte CEM III/C, la carbonatation naturelle a fait chuter le pH à une valeur inférieure de 9,9 après 12 mois. De même, lors de la carbonatation accélérée à 1 % de CO₂, la diminution du pH était plus faible dans la pâte AAS (10,7) que dans la pâte CEM III/C (8,1) après 12 mois. Le pH de stabilisation élevé dans la pâte AAS est probablement dû au tamponnage du pH de la phase hydrocalcite et à la teneur élevée en alcalins de l'activateur. Les résultats des analyses EDX réalisées pour étudier l'effet de la carbonatation sur le C-(N)-A-S-H (filtrage par élimination des points ayant un rapport Ca/Si > 2) sont présentées dans la figure 2. Après 4,5 mois, le rapport Na/Si a évolué vers des valeurs plus faibles (0,45) après carbonatation naturelle des échantillons et carbonatation à 1% de CO₂ (0,36) par rapport à ceux conservés en condition scellée (0,62). La carbonatation n'a pas provoqué de diminution remarquable du Ca/Si (figure 2).

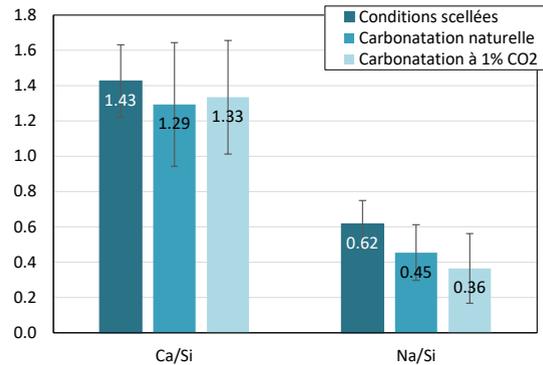


FIGURE 2. Moyenne Ca/Si et Na/Si de l'analyse ponctuelle EDS de la pâte AAS après 4,5 mois conservée en condition scellée et carbonatation naturelle et accélérée à 1% de CO₂. Les barres d'erreur correspondent à l'écart-type.

Les caractérisations de la microstructure sont en accord avec la modélisation thermodynamique de la carbonatation des C-(N)-A-S-H dans l'AAS-Na₂CO₃ (Ke et al., 2020), où trois étapes ont été distinguées. Une première étape correspond à la perte des charges Na⁺ en inter-couche, un pH élevé supérieur à 13,2 a été prédit. La deuxième étape correspond à la perte de la charge Ca²⁺ inter-couche. Le rapport Ca/Si commence à diminuer et le pH a chuté à des valeurs autour de 12,0. Les valeurs de pH se sont stabilisées à une valeur de 12,0 pendant la décomposition de l'hydrotalcite carbonatée, puis diminuer jusqu'à des valeurs supérieures à 10,3 jusqu'à l'épuisement complet du gel de type C-(N)-A-S-H. Après l'épuisement complet du gel de type C-(N)-A-S-H, le pH diminue pour atteindre des valeurs plus basses autour de 7,9.

Dans le matériau AAS, même après la carbonatation, le pH de stabilisation élevé pourrait assurer une protection de l'armature et ne pas provoquer sa corrosion, induisant ainsi un risque limité de corrosion de l'armature.

IV. CONCLUSION

L'AAS-Na₂CO₃ a montré des performances comparables à celles du CEM III/C avec le même rapport E/L en termes de porosité accessible à l'eau, d'attaque par l'acide nitrique et d'attaque externe par les sulfates. L'AAS a présenté une meilleure résistance aux chlorures mais a eu des cinétiques de carbonatation relativement élevées. Bien que la vitesse de carbonatation de l'AAS soit élevée, son impact sur le pH du matériau est moins important que celui du CEM III/C, qui présente des baisses de pH plus faibles. Cela suggère que les baisses de pH induites par la carbonatation dans l'AAS peuvent être insuffisantes pour provoquer la dépassivation et la corrosion des armatures. Pour déterminer les effets de la carbonatation sur les armatures dans les AAS, des échantillons de mortier armé ont été testés dans différentes conditions (cure endogène, carbonatation naturelle et carbonatation au CO₂ à 1 %) à l'aide d'essais électrochimiques non destructifs afin d'évaluer l'état de corrosion des armatures.

REFERENCES

- Bakharev, T., Sanjayan, J.G., Cheng, Y.-B., 2002. Sulfate attack on alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research* 32, 211–216. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00659-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00659-7)
- Bakharev, T., Sanjayan, J.G., Cheng, Y.-B., 1999. Alkali activation of Australian slag cements. *Cement and Concrete Research* 29, 113–120. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00170-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00170-7)
- Bernal, S.A., Rodríguez, E.D., Mejía de Gutiérrez, R., Provis, J.L., 2012. Performance of alkali-activated slag mortars exposed to acids. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials* 1, 138–151. <https://doi.org/10.1080/21650373.2012.747235>
- Cyr, M., 2013. 8 - Influence of supplementary cementitious materials (SCMs) on concrete durability, in: Pacheco-Torgal, F., Jalali, S., Labrincha, J., John, V.M. (Eds.), *Eco-Efficient Concrete*, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Woodhead Publishing, pp. 153–197. <https://doi.org/10.1533/9780857098993.2.153>
- Diaz Caselles, L., Hot, J., Cassagnabère, F., Cyr, M., 2021. External sulfate attack: comparison of several alternative binders. *Mater Struct* 54, 216. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01813-8>
- Divsholi, B.S., Lim, T.Y.D., Teng, S., 2014. Durability Properties and Microstructure of Ground Granulated Blast Furnace Slag Cement Concrete. *Int J Concr Struct Mater* 8, 157–164. <https://doi.org/10.1007/s40069-013-0063-y>
- Ke, X., Bernal, S.A., Hussein, O.H., Provis, J.L., 2017. Chloride binding and mobility in sodium carbonate-activated slag pastes and mortars. *Mater Struct* 50, 252. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1121-8>
- Ke, X., Bernal, S.A., Provis, J.L., Lothenbach, B., 2020. Thermodynamic modelling of phase evolution in alkali-activated slag cements exposed to carbon dioxide. *Cem. Concr. Res* 136, 106158. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106158>
- Koenig, A., Herrmann, A., Overmann, S., Dehn, F., 2017. Resistance of alkali-activated binders to organic acid attack: Assessment of evaluation criteria and damage mechanisms. *Construction and Building Materials* 151, 405–413. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.117>
- Komljenović, M., Baščarević, Z., Marjanović, N., Nikolić, V., 2013. External sulfate attack on alkali-activated slag. *Construction and Building Materials* 49, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.013>
- Lothenbach, B., Gruskovnjak, A., 2007. Hydration of alkali-activated slag: thermodynamic modelling. *Advances in Cement Research* 19, 81–92. <https://doi.org/10.1680/adcr.2007.19.2.81>
- Lye, C.-Q., Dhir, R.K., Ghataora, G.S., 2016. Carbonation resistance of GGBS concrete. *Magazine of Concrete Research* 68, 936–969. <https://doi.org/10.1680/jmacr.15.00449>
- Ma, Q., Nanukuttan, S.V., Basheer, P.A.M., Bai, Y., Yang, C., 2016. Chloride transport and the resulting corrosion of steel bars in alkali activated slag concretes. *Mater Struct* 49, 3663–3677. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0747-7>
- McLellan, B.C., Williams, R.P., Lay, J., van Riessen, A., Corder, G.D., 2011. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of Cleaner Production* 19, 1080–1090. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>
- Puertas, F., Palacios, M., Vázquez, T., 2006. Carbonation process of alkali-activated slag mortars. *J Mater Sci* 41, 3071–3082. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-1821-2>
- Wang, W.-C., Huang, W.-H., Lee, M.-Y., Duong, H.T.H., Chang, Y.-H., 2021. Standardized Procedure of Measuring the pH Value of Cement Matrix Material by Ex-Situ Leaching Method (ESL). *Crystals* 11, 436. <https://doi.org/10.3390/cryst11040436>