

# INFLUENCE DU LAITIER SUR LES PROPRIETES DES CEMENTS A BASE DE CALCAIRE

**Toufik Boubekour<sup>1</sup>, Bensaid Boulekbache<sup>1</sup>, Ali Makhelouf<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Département de Génie Civil, Université de Chlef, [toufik\\_boubekour@yahoo.fr](mailto:toufik_boubekour@yahoo.fr), [bboulekbache@yahoo.fr](mailto:bboulekbache@yahoo.fr), [mkachlef@yahoo.fr](mailto:mkachlef@yahoo.fr)*

## **RESUME :**

L'industrie des matériaux de construction connaît un essor considérable en Algérie. La recherche actuelle sur les matériaux travaille sur le développement de nouveaux composites cimentaires, dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques, physiques et la durabilité des matériaux cimentaires. Le présent travail porte sur l'effet de l'incorporation de différentes quantités de laitier sur les résistances mécaniques des ciments à base du calcaire et son influence sur la durabilité vis à vis des milieux agressifs, comme les sulfates et les acides.

Les résultats montrent que l'ajout d'une quantité de 20 à 30 % de laitier améliore considérablement les propriétés mécaniques et la résistance aux agents chimiques.

**MOTS-CLES :** ciment, calcaire, laitier, résistance mécanique, durabilité.

## 1. INTRODUCTION

L'environnement des ouvrages en béton armé, en particulier dans les milieux agressifs, ainsi que la nature des composantes du ciment jouent un rôle prépondérant sur les propriétés mécaniques des ciments. Pour cela, les laboratoires de recherche sur les matériaux travaillent sur le développement de nouveaux composites cimentaires, dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques et physiques des matériaux.

Le présent travail porte sur l'effet de l'incorporation du laitier sur les résistances mécaniques des ciments à base de calcaire et les performances de durabilité vis à vis des milieux agressives telle que les sulfates et les acides. des résultats montrent que l'ajout de 20 à 30 % de laitier améliore considérablement la résistance des ciments au laitier est se rapproche à celle du CEM I à 90 jours [Hadj Sadok et al. 2008, Bougara et al. 2001].

## 2. MATERIAUX ET ESSAIS

Le ciment utilisé dans tous les essais est constitué de clinker provenant de la cimenterie de Oued Sly - Chlef- et mélangé avec de gypse pour régulariser la prise qui varie avec la composition chimique du ciment et dont une moindre mesure de la finesse [Neville 1982]. Le ciment a une finesse de 2950  $\text{cm}^2/\text{g}$  et une masse volumique absolue de 3160  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Les compositions chimiques du clinker et du gypse est donnée dans le tableau 1.

Tableau 1. Compositions chimiques du clinker et du gypse

Composante chimique	Chaux (CaO)	Silice ( $\text{SiO}_2$ )	Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	Oxyde ferrique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	Magnésié MgO	CaO libre
Clinker	66,76	22,34	5,13	3,78	0,47	0,75
Gypse	35	0,49	1,03	0,32	1,19	/

Le calcaire utilisé dans les essais est celui employé comme matière première dans la fabrication du ciment de Chlef; il est broyé à une finesse d'environ 3400  $\text{cm}^2/\text{g}$ . L'analyse chimique du calcaire est donnée dans le tableau 2. Le laitier utilisé, extrait des déchets de l'usine d'El Hadjar (Annaba), est broyé jusqu'à une finesse d'environ 3900  $\text{cm}^2/\text{g}$ . La composition chimique du laitier de El-Hadjar est donnée dans le tableau 2.

Tableau 2. Analyse chimique du calcaire.

Elément	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	PAF
calcaire	0,55	0,40	0,17	53,47	1,02	1,50	0,03	43,13
laitier	42,20	5,85	1,90	42,20	4,72	1,54	0,43	0,80

Le sable utilisé dans cette étude est un sable normalisé (CEN EN 196-1), conformément à la norme NF EN 196-1. Quinze combinaisons ont été préparées à partir de différents pourcentages d'ajouts calcaire et du laitier comme le montre le tableau 3.

L'effet du laitier sur la résistance à la compression a été étudié à court et à long terme sur des éprouvettes de mortier normal de dimension 40x40x160 mm. Les essais de la durabilité ont été réalisés sur des mortiers normalisés. On se basant sur des résultats des essais mécaniques. Sept combinaisons sont sélectionnées. La résistance aux sulfates et aux acides est mesurée sur des éprouvettes et des sections de mortier contenant des ciments à base de calcaire avec différents taux de laitier (0, 20, 30 et 40 %).

Tableau 3 : Les différentes combinaisons "CEM I + Calcaire (C) + Laitier (L)"

Notation	CEM I	Calcaire (C)	Laitier (L)
C0L0	100	0	0
C0L10	90	0	10
C0L20	80	0	20
C0L30	70	0	30
C0L40	60	0	40
C10L0	90	10	0
C10L10	80	10	10
C10L20	70	10	20
C10L30	60	10	30
C10L40	50	10	40
C20L0	80	20	0
C20L10	70	20	10
C20L20	60	20	20
C20L30	50	20	30
C20L40	40	20	40
C30L0	70	30	0

Après démoulage, les éprouvettes sont conservées dans l'eau à 20 °C pendant 28 jours avant d'être soumises à l'immersion dans deux types de solutions de sulfates (5% de sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ou 5% de sulfate de magnésium ( $\text{MgSO}_4$ )) et dans les deux types des acides, 1% d'acide hydrochlorique (HCL) ou 3% d'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). L'expansion des éprouvettes a été évalué chaque deux semaines, et la résistance chimique aux attaques par les acides est évaluée par la mesure de la perte de masse de l'éprouvette chaque deux semaines.

### 3. Résultats et Discussion

#### 3.1 Résistance mécanique

##### 3.1.1 Effet du calcaire

La figure 1, montrent le développement de la résistance à la compression des mortiers contenant du calcaire à l'âge de 2, 7, 28, 60 et 90 jours pour un rapport de E/C égal à 0,5.

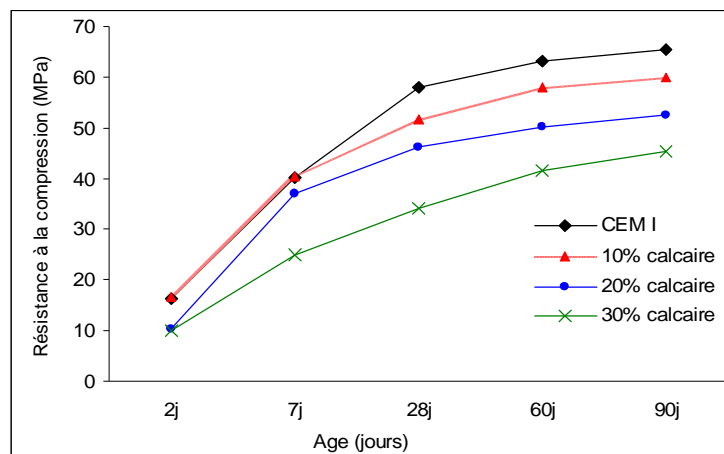


Figure.1 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant le calcaire.

D'après cette figure, on remarque que la résistance à la compression est similaire à celle du mortier contrôle de 15.96 % pour une substitution de 10 % de calcaire à 2 jours, ensuite elle diminue de 37 % pour une substitution de 20 % de calcaire. A l'âge de 28 jours, la résistance à la compression diminue de 11 % et de 20% avec l'augmentation du pourcentage du calcaire de 10 % à 20 % respectivement.

### 3.1.2 Effet du laitier

La présence du laitier dans la composition du ciment modifie considérablement ces propriétés mécaniques. Les résultats de la résistance à la compression des mortiers contenant du laitier sont présentés dans la figure 2. La substitution du ciment par du laitier a donné des résistances à la compression faibles à jeune âge (2 à 7 jours). Ceci est dû à la faible activité hydraulique du laitier granulé d'El Hadjar [Hadj Sadok et al. 2008].

Cependant, la résistance à la compression des ciments au laitier est similaire à celle du CEM I à 90 jours. Plus particulièrement, pour les résistances à la compression des ciments avec 20 % et 30 % de laitier dépassent celle du CEM I de 3 % et 4 % respectivement. Des résultats similaires ont été observés sur des pâtes contenant du laitier. La substitution du ciment par du laitier a donné des résistances à la compression faibles à jeune âge (2 à 7 jours). Cependant, la résistance des ciments au laitier se rapproche à celle du CEM I à 90 jours, particulièrement pour les ciments avec 20 % et 30 % de laitier (6 % à 8 % de différence) [Hadj Sadok et al. 2008].

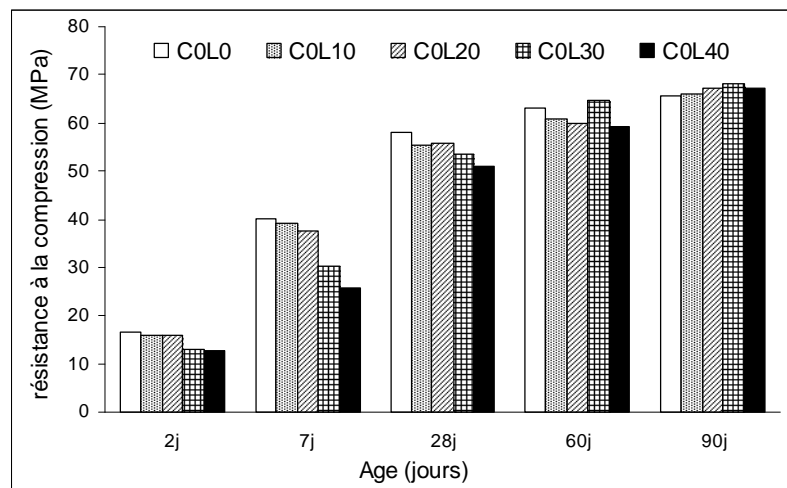


Figure 2 : Effet du pourcentage de laitier sur la résistance à la compression.

### 3.1.3 Effet des couples calcaire/laitier

La figure 3 montre l'influence des différentes combinaisons calcaire-laitier sur la résistance à la compression. On remarque qu'au jeune âge (2 et 7 jours), une diminution de la résistance avec l'augmentation du pourcentage du laitier sur les mortiers contenant du calcaire. Ce phénomène peut être attribué à la contribution du calcaire à l'accélération de l'hydratation aux jeunes âges.

Cependant, à long terme (90 jours), l'incorporation de 20 % jusqu'au 30 % du laitier dans le ciment contenant 10 % de calcaire contribue à l'amélioration de résistances de 5 % et 3 % respectivement comparant par rapport au ciment de contrôle.

Pour l'addition de 10 % calcaire et de très petites quantités de laitier (0-12 %) donne des résistances à la compression maximales au jeune âge (1, 3 et 7 jours). Dans ce cas, une augmentation de 16 % de la résistance à la compression a été obtenue par rapport au mortier de contrôle. Cependant, à partir de 28 jours, la résistance à la compression change significativement en fonction des Combinaisons, elle est maximale pour une combinaison de 7,5 % de calcaire et 35 % de laitier. L'amélioration est de 7 % par rapport à celle du mortier de contrôle à 90 jours.

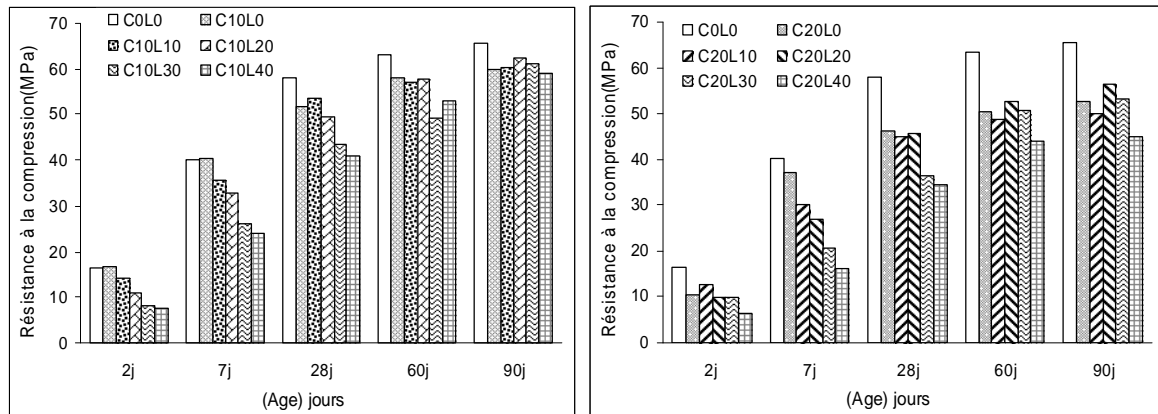


Figure 3. variation de la résistance à la compression pour les différentes combinaisons.

### 3.2 Durabilité

#### 3.2.1 Attaques des mortiers par les sulfates

Les résultats relatifs à l'expansion des mortiers immergés dans les solutions contenant 5 % de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (A) et 5 %  $\text{MgSO}_4$  (B) sont présentés dans la figure 4.

Les résultats trouvés montrent une expansion plus élevée dans les éprouvettes immergées dans la solution de sulfate de sodium comparé à ceux immergées dans la solution de sulfate de magnésium, Des résultats similaires ont été observés sur des pâtes contenant du laitier [Hadj Sadok et al. 2008]. Ainsi pour les ciments contenant des différents pourcentage d'ajout calcaire [Seung Tae Lee et al. 2008]. Pour un ciment sans ajout (mortier de contrôle) l'expansion après 180 jours d'immersion dans la solution (A) est 2.38 %. Par contre, l'expansion est 1.4 % pour les éprouvettes placés dans la solution (B).

Les mortiers de ciment contenant, 30 et 40 % de laitier présentent une expansion respectivement de 1.87 % et 1.72 % placés dans la solution (A) comparé à celle placés dans la solution (B) qui présentent 0.98 % et 0.81 %, d'où une réduction de l'expansion par rapport au mortier de contrôle de 21 % et 28% pour les éprouvettes placés dans la solution (A), et l'expansion des mortiers immergées dans la solution (B) égale 30 et 42 % respectivement.

Des mêmes constatations, pour un ciment avec 10 % du laitier, l'expansion après 120 jours d'immersion est de 0,795 % pour les éprouvettes placées dans la solution de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  comparée à 0,159 % pour le mortier conservé dans la solution de  $\text{MgSO}_4$  [Hadj Sadok et al. 2008].

L'expansion dans les mortiers contenant 10 % de calcaire après 180 jours d'immersion était 1.64 % dans la solution (A) et 1.26 % dans la solution (B), donc l'addition de 10 % de calcaire a réduit l'expansion par rapport au ciment de contrôle de 31 % et 10 % dans les solutions sulfatiques (A) et (B) respectivement. Les mêmes remarques ont été constatées par [Torres et al. 2003].

La combinaison de 30 et 40 % de laitier avec 10 % de calcaire a réduit l'expansion des mortiers placés dans les solutions (A), de % 31.09 et 49.39 %, et pour mortiers placés dans la solution (B) donne des expansions de 42 % et 44 % respectivement.

En outre, la résistance aux attaques sulfatiques pour les ciments contenant du laitier dépend du pourcentage de l'oxyde d'aluminium  $\text{Al}_2\text{O}_3$  contenu dans le laitier. Moins de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dans le laitier donne une bonne résistance au sulfate [Doug et Emery 1990].

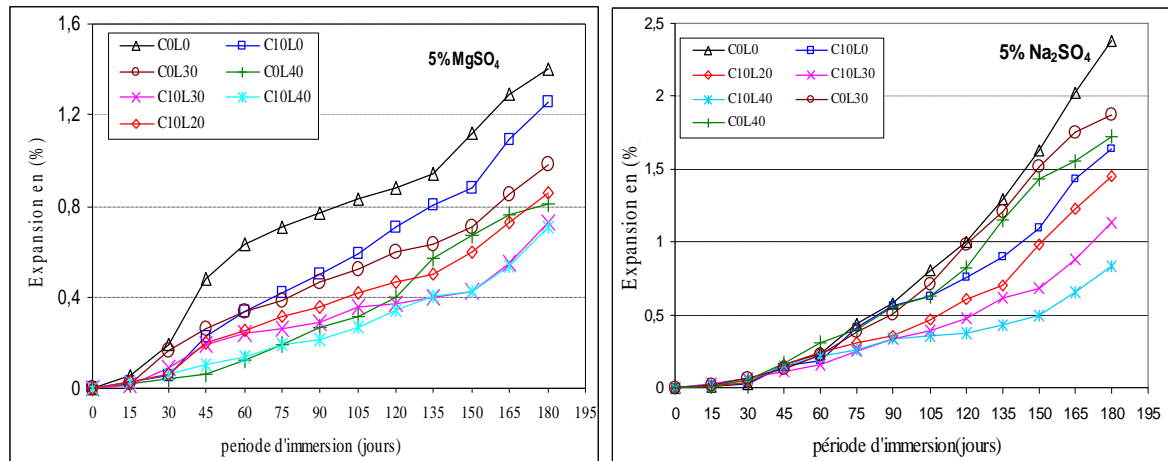


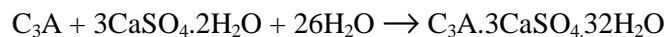
Figure 4. Expansion des mortiers en fonction des périodes d'immersion.

L'incorporation des additions minérales dans les ciments conduit à une diminution de l'expansion des mortiers immergés dans les solutions sulfatiques, en raison de la diminution de la quantité des aluminates tricalciques  $C_3A$  dans le ciment. Ces aluminates sont très sensibles à l'attaque par les sulfates [Pipilikaki et Katsioti 2009] et conduit à la formation du gypse secondaire (substitution ionique entre la portlandite et les sulfates). Dans le cas du sulfate de sodium :



$CaSO_4 \cdot 2H_2O$  : Produit expansif, qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté.

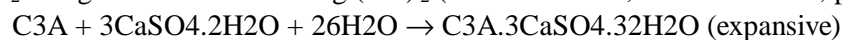
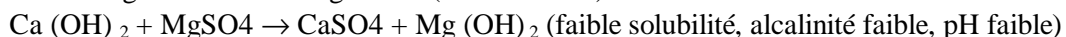
L'expansion est le résultat de la formation d'ettringite secondaire ( $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ) :  
 à partir du  $C_3A$  anhydre résiduel :



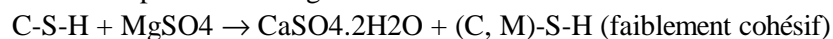
Elle peut aussi être obtenue à partir des aluminates hydratés :



Le sulfate de magnésium est très agressive (double action)

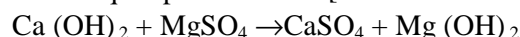


Substitution des ions  $Ca^{++}$  par les ions  $Mg^{++}$  dans les C-S-H :



L'attaque par le sulfate de calcium ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  ou  $CaSO_4$  dans les sols) est plus lente en raison de sa faible solubilité. Elle conduit à la formation d'ettringite expansive.

L'incorporation des laitiers de haute fourneaux dans le ciment contribue d'une façon positive à l'amélioration des résistances aux attaques par les acides [Brown et al. 2003].



### 3.2.2 Attaques des mortiers par les acides

Les résultats relatifs aux attaques des mortiers des ciments contenant des différents pourcentages des ajouts de calcaire et de laitier, dans les solutions de 1 % HCL et 3 %  $H_2SO_4$  sont présentés dans la figure 5. La perte de la masse après 180 jours d'immersion pour le mortier sans ajout est de 9.05 % et 60.04 % pour 1 % HCL et 3 %  $H_2SO_4$  respectivement.

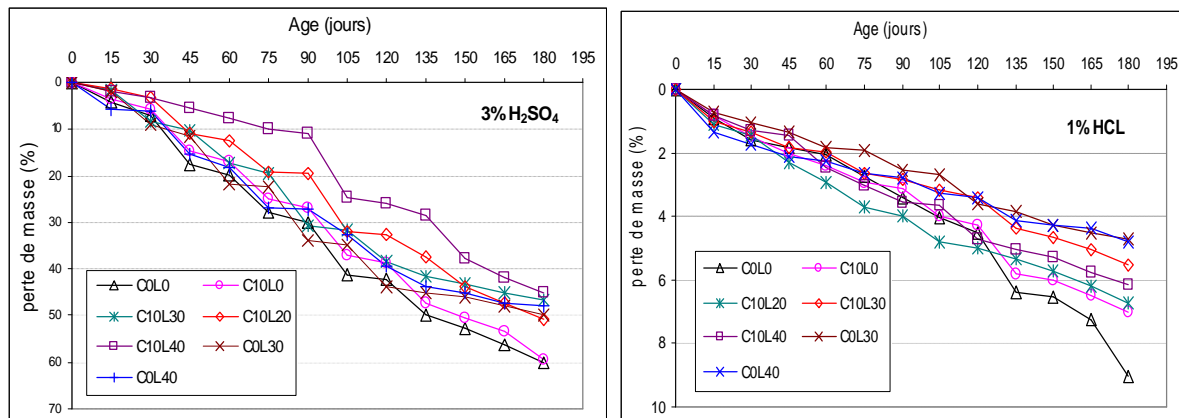


Figure 5. variation de la masse des mortiers en fonction de la période d'immersion dans 1% d'HCl et 3% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

A 180 jours, l'incorporation de 30 % et 40 % de laitier dans le ciment réduit la perte de masse par rapport au mortier contrôle de 17 % et 20 % et dans la solution de 3% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> respectivement comparé à celle conservés dans la solution et de 1 % HCL qui présente 48 % et 47 % respectivement. Des résultats similaires sur des coulis de bétons contenant du laitier ont été observés [Bakharev et al. 2003].

La perte de masse pour le ciment contenant 10 % de calcaire est presque similaire à ceux du mortier de contrôle dans la solution de 3% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et la perte de masse augmente de 22% dans la solution de. 1% HCL. L'incorporation de 30% et 40% de laitier dans le ciment contenant 10% de calcaire, réduit la perte de masse par rapport au mortier de contrôle de 22 % et 24 % dans la solution 3 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et de 21 % et 12.5 % dans la solution 1% HCL.

#### 4. Conclusions

Les résultats obtenus à travers cette étude nous ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

Le calcaire a un effet accélérateur sur l'hydratation du ciment, néanmoins un pourcentage de 10 % est optimal pour aboutir à des performances maximales (résistances et durabilité) du ciment composé. Au-delà de ce pourcentage, son effet est néfaste.

la substitution de 20 % à 30 % du laitier dans un ciment portland contenant 10 % de calcaire améliore la résistance à la compression à long terme.

Les variations des masses des mortiers, montrent que l'incorporation de 20 % à 40 % du laitier améliore le comportement des mortiers soumis aux attaques des acides HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

L'expansion des mortiers dans une solution contenant 5 % de MgSO<sub>4</sub> indique que la substitution de 30 % de laitier dans les ciments à base de calcaire donne une meilleure résistance aux sulfates. Par contre dans celle de 5 % de N<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, la meilleure résistance est obtenue avec l'incorporation de 40 % de laitier.

#### REFERENCES

Hadj Sadok Ahmed - Kenai Said - Menadi Belkacem , "Résistances aux sulfates des mortiers à base de ciment au laitier", Colloque International - Caractérisation et Modélisation des Matériaux et Structures Les 16, 17 et 18 novembre 2008 - Université M. Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.

A. Bougara., K. Ezziane., A. Kadri., "Prédiction des résistances du ciment au laitier durcissant sous une température", Can.J.Civ.Eng.Vol.28, 2001.

A.M. Neville; "Properties of concrete", Third Edition, Pitman, London, 1982, 568 p.

S. Tae Lee, R.D. Hooton, Ho-S. Jung, D-H. Park, C.S. Choi, "Effect of limestone filler on the deterioration of mortars and pastes exposed to sulphate solutions at ambient temperatures". *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, n° 1, 2008, pp. 68-76.

S.M. Torres, J.H. Sharp, R.N. Swamy, C.J. Lynsdale, S.A. Huntley, "Long term durability of portland-limestone cement mortars exposed to magnesium sulfate attack", *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, n° 8, 2003, pp. 947-954.

R. Doug Hooton and John J. Emery. "Sulfate Resistance of a Canadian slag cement", *ACI Materials Journal*, vol. 87, n° 6, 1990, pp. 547-555.

P. Pipilikaki, M. Katsioti, "Study of the hydration process of quaternary blended cements and durability of the produced mortars and concretes", *Construction and Building Materials*, vol. 23, n° 6, 2009, pp. 2246-2250.

P.W. Brown, R.D. Hooton, B.A. Clark , "The co-existence of thaumasite and ettringite in concrete exposed to magnesium sulfate at room temperature and the influence of blast-furnace slag substitution on sulfate resistance", *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, n° 8, 2003, pp. 939-945.

T. Bakharev, J.G. Sanjayan, Y.-B. Cheng, "Resistance of alkali-activated slag concrete to acide attack". *Cement and Concrete Research*, vol. 33, n° 10, 2003, pp.1607-1611.