

Effet de la carbonatation accélérée sur les bétons de sables à base de granulats plastiques

Aissa BOUCEDRA^{#1}, Madani BEDERINA^{*2}, Zoubir MAKHLOUFI^{#3}, Michèle QUENEUDEC⁴

[#]First-Third Department, First-Third University

Address Including Country Name

^{1,2,3}Structures Rehabilitation and Materials Laboratory (SREML), University Amar Téliqji, Laghouat, Algeria.

⁴Research Unit EPROAD, University of Picardie Jules Verne, Amiens, France

aissardm@gmail.com

m.bederina@lagh-univ.dz

z.makhloufi@lagh-univ.dz

mqtkr@sfr.fr

Résumé— Des travaux précédents ont porté sur le développement de nouveaux bétons de sables, constitués principalement de sable alluvionnaire (SA) ou dunaire (DS) (les deux sont localement disponibles en abondance) et de granulats plastiques provenant du recyclage de déchets. Un remplacement volumique du sable par des granulats plastiques a été fait avec des pourcentages allant de 0 à 100 %. Les résultats ainsi obtenus ont montré que ces bétons pourraient être considérés comme une bonne alternative aux matériaux de construction usuels et pourraient résoudre certains problèmes économiques, techniques et écologiques dans la construction locale. En effet, le présent travail s'intéresse essentiellement sur l'étude de l'effet des granulats plastiques sur la résistance à la carbonatation accélérée du béton de sable alluvionnaire (BSA) et du béton de sable dunaire (BSD).

Les résultats obtenus indiquent que les granulats plastiques améliorent nettement certaines propriétés du béton de sable ; ils améliorent considérablement sa résistance à la carbonatation. Plus la proportion des granulats plastiques dans le béton augmente, plus la profondeur du béton carbonaté diminue.

Enfin, il faut noter que ce nouveau béton contribue à la protection de l'environnement (par le recyclage des déchets), et à l'économie de construction (par l'utilisation de matériaux beaucoup moins chers).

Mots clés— Sable de dune, Sable alluvionnaire, Béton de sable, Granulats plastiques, carbonatation accélérée, Propriétés thermo-mécaniques.

I. INTRODUCTION

Chaque année, la production de plastique augmente considérablement, ce qui augmente, par conséquent, les quantités de déchets ainsi générés. Or, ce genre de déchet est non biodégradables et constituent un vrai problème pour

l'environnement [1,2]. Par ailleurs, les déchets minéraux issus des carrières de concassage d'agrégats constituent aussi un problème pour l'environnement. En termes de recyclage, notons qu'en bâtiment, différents chercheurs ont tenté de réutiliser ces déchets, en bâtiment, comme matériaux de construction, mais, malgré ça, le recyclage de ces déchets est toujours considéré comme timide [3].

De plus, l'épuisement des gisements des gros granulats, dans certaines régions, a poussé les chercheurs à valoriser d'autres matériaux locaux pour la confection des bétons. Parmi les idées envisagées, le remplacement des gros granulats par des sables pour formuler des bétons de sable [4]. Dans ce sens, la valorisation des sables de dunes, pour remplacer les sables de rivière, dont l'extraction pose actuellement un véritable problème écologique, est devenue très intéressante [4,5,6].

C'est dans ce contexte que le présent travail a été envisagé. Des déchets plastiques et des déchets de concassage sont pris comme nouveaux matériaux de construction pour la confection des bétons de sables étudiés. Il convient de noter que ces deux déchets possèdent des propriétés intéressantes et peuvent contribuer à l'obtention de nouveaux bétons ayant de bonnes propriétés physico-mécaniques [7-16,3]. En effet, la littérature montre que les granulats plastiques (en particules ou en fibres) ont été introduits dans de nombreux types de composites cimentaires : béton ordinaire, mortier, béton autoplaçant, etc. [11,17,18]. Les résultats ainsi obtenus, montrent qu'en général, les granulats plastiques réduisent la densité du béton et, par conséquent, ses propriétés mécaniques et réduisent également son retrait et ses propriétés thermiques [3,7,12,13,15,16]. En termes de durabilité, la présence de granulats plastiques dans le béton améliore sa résistance à la carbonatation [18].

D'autre part, la substitution partielle du ciment par des additions minérales a largement été envisagée et étudiée par différents chercheurs [7,9,10]. Ceci contribue aussi à la

Caractéristiques	SA	SD
Masse Vol. app. [kg/m^3]	1493	1439
Masse vol. abs. [kg/m^3]	2580	2600
Module de finesse	3.04	1.28
Compacité / Porosité [%]	58 / 42	55/45
Equivalent de Sable Vis. [%]	86	79
Equivalent de Sable au piston [%]	89	87

protection de l'environnement en réduisant la production du ciment

TABLEAU II
PROPRIETES PHYSIQUES DES SABLES UTILISES

et, par conséquent, les émissions de CO_2 [7,8,19,10].

Enfin, l'objectif principal de cette étude est d'étudier l'effet de l'ajout de granulats plastiques sur la résistance à la carbonatation accélérée des bétons de sables, dunaire et alluvionnaire [20-22].

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Matériaux

Un ciment Portland de type CPA-CEM I 42.5 a été utilisé. Sa masse volumique apparente est de $3220 \text{ kg}/\text{m}^3$ et sa surface spécifique de Blaine est de $3275 \text{ cm}^2/\text{g}$. Sa composition chimique est montrée dans le tableau I.

TABLEAU I
COMPOSITION CHIMIQUE DU CIMENT (%)

SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Cl	Na_2O	LOI
20.16	5.54	4.54	62.97	0.62	2.66	0.001	0.18	0.87

Deux sables locaux (Laghouat, Algérie) ont été séparément utilisés : un sable alluvionnaire (SA) et un sable de dune (SD). Les deux sables sont propres (Tableau II) et majoritairement composés de silice. Le sable de dunes est plus fin et sa répartition granulométrique est serrée (Figure 1) [4,26,24].

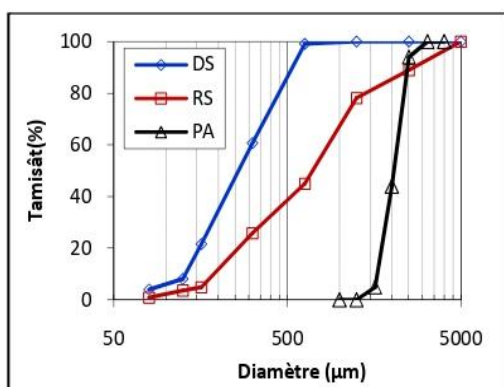


Figure 1 Analyse granulométrique de SA, SD et GP.

Les granulats plastiques (GP) utilisés sont issus du recyclage des déchets plastiques. Pour obtenir ces particules, les étapes suivantes sont suivies [18]:

- i. Collecter les déchets plastiques et les laver ;
 - ii. Fondre à une température d'environ 250°C ;
 - iii. Le plastique fondu est ensuite moulé sous forme de longues barres ;
 - iv. Refroidissement ;
 - v. Enfin, les barres obtenues sont découpées en petites particules cylindriques de diamètres allant de 1,5 mm à 3,5 mm et d'épaisseurs allant de 2 à 3 mm (Figure 2) ; leurs masses volumiques, apparente et absolue, sont respectivement de $531 \text{ kg}/\text{m}^3$ et $916 \text{ kg}/\text{m}^3$. En raison de sa densité plus faible, par rapport à celle du sable, on a opté pour un mode de « substitution volumique » [8,9,19]. Pour le filler, constituant essentiel pour les bétons de sable [4], on a utilisé des fillers de nature calcaire [25]. Ils sont obtenus par tamisage ($<80\mu\text{m}$) des déchets locaux de concassage de granulats. Leurs masses volumiques, apparente et absolue, sont $1140 \text{ kg}/\text{m}^3$ et $2700 \text{ kg}/\text{m}^3$ respectivement.
- Un superplastifiant haut réducteur d'eau de type « MEDAFLOW 30 », de densité égale à 1,07, de $\text{pH} = 6,5$ et d'extrait sec égal à 30 % a été utilisé.



Figure 2 Aspect général des granulats plastiques.

B. Méthodes

Les compositions de base des bétons de sable étudiés (sans granulats plastiques) sont montrées dans le tableau

TABLEAU III
COMPOSITION DES BETONS DE SABLE DE BASE (SANS GRANULATS PLASTIQUES) [4]

Béton de	Sable [kg/m ³]	Ciment [kg/m ³]	Fillers [kg/m ³]	Eau [l/m ³]	Adjuvant [%]
SA	1460	350	150	210	1.5
SD	1305	350	200	245	1.5

Le mélange sec (ciment, sable, fillers et granulats plastiques) est mis dans un malaxeur. Un pré-mélange est effectué pendant 30 secondes, ensuite, on ajoute progressivement de l'eau et le tout est mélangé pendant 90 secondes à petite vitesse, puis 90 secondes à grande vitesse. Le béton est coulé dans des moules en deux couches de béton d'égale épaisseur. Chaque couche est vibrée, à l'aide d'une

table vibrante, quelques secondes jusqu'à l'obtention d'une bonne homogénéisation. Une fois terminé, on enlève l'excès de béton. Après 24 heures, les échantillons sont prêts au démoulage.

Le principal essai étudié est la carbonatation accélérée. Cet essai est une technique qui accélère l'effet de la carbonatation sur le béton. En effet, la carbonatation du béton est causée par la pénétration de dioxyde de carbone (CO₂) dans le béton. Lors de cet essai, on doit suivre l'évolution de la profondeur de carbonatation d'un échantillon de béton placé dans une chambre de carbonatation (Figure 3a) munie d'un système de contrôle de l'humidité relative (50% CO₂ + 50% air avec HR= 40% - 80%) [26].

Le test de carbonatation a été réalisé en laboratoire selon la norme XP P18-458, 1997. Quatre éprouvettes ont été élaborées pour chaque composition : trois éprouvettes pour la mesure de la profondeur de carbonatation et une pour suivre l'évolution de la masse au cours de l'essai de carbonatation.

Afin d'assurer une diffusion unidirectionnelle du CO₂, les éprouvettes ont été recouvertes latéralement d'une feuille d'aluminium. Les échantillons sont pesés après 02 jours de conservation dans une étuve réglée à une température de 40 ± 2 °C [26].

Pour bien apprécier le béton carbonaté, une solution de phénolphtaléine à 1 % d'alcool est utilisée comme indicateur (Figure 3b) : la partie colorée en rose désigne le béton non carbonaté, tandis que la partie non colorée désigne le béton carbonaté. En effet, dans les sections carbonatées des matériaux cimentaires, le pH de la solution interstitielle est réduit à environ 8,5, alors que, dans les sections non carbonatées, le pH devrait être d'environ 13.

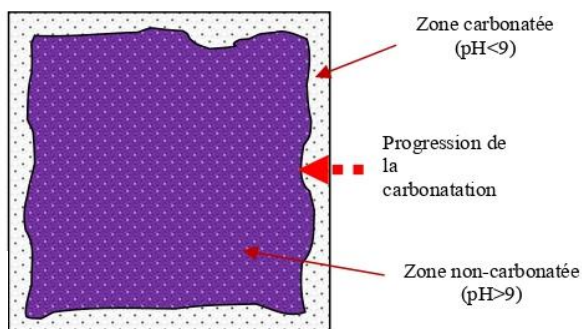
• Pour mesurer la profondeur de carbonatation dans les échantillons d'essai, une règle est utilisée ; pour chaque face d'échantillon, on a calculé la moyenne de cinq lectures.

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS



(a) Chambre

« carbonatation accélérée



(b) Profondeur de carbonatation

Figure 3 Essai de carbonatation.

• Il est bien connu que la substitution des granulats minéraux par des granulats plastiques diminue la densité du béton et diminue, par conséquent, sa résistance mécanique [27]. La même chose a été notée pour les bétons de sables

étudiés (Tableau IV). Des réductions allant de 0 à 40% ont été observées en substituant le sable de 0 à 100% par des granulats plastiques. On peut également noter, qu'au-delà de 50% d'ajout de plastique, on passe des bétons ordinaires aux bétons légers.

En revanche, et grâce à la conductivité thermique du plastique plus faible (entre 0,15 et 0,30 W/mK), l'ajout de granulats plastiques au béton de sable réduit sa conductivité thermique (Tableau IV), et par conséquent, améliore son pouvoir isolant. Il convient de noter que les différences observées entre le béton de sable alluvionnaire et le béton de sable dunaire sont dues essentiellement aux différentes granulométries des deux sables utilisés [21].

Concernant la structure du composite étudié, on constate que son aspect général apparaît relativement homogène et compact. Les granulats plastiques sont bien répartis dans le composite et bien adhérents à la matrice cimentaire (Figure 4) [21].

Enfin, l'ajout de granulats plastiques au béton de sable conduit à l'élaboration d'un bon béton léger utilisable en construction, comme béton porteur-isolant (EN 196-1, 1995).

- En effet, le CO_2 de l'air pénètre dans les pores du béton, se dissout en présence d'humidité et réagit avec le dioxyde de carbone $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour former du carbonate de calcium CaCO_3 , d'où une diminution du pH de la solution interstitielle, et conduit par conséquent à la corrosion des armatures. Il était donc utile de prévoir les effets de ce phénomène sur ce nouveau béton. Les résultats, ainsi enregistrés (Tableau V), ont montré que les profondeurs de carbonatation à 28 jours, pour des teneurs en GP de 50%, atteignaient 3 mm et 10 mm, respectivement pour le béton de sable alluvionnaire et le béton de sable de dune. Il est clair que la profondeur de carbonatation est plus faible dans le cas du béton de sable alluvionnaire ; le sable alluvionnaire est moins poreux, grâce sa granulométrie étalée et son diamètre maximal plus élevé. De même, l'augmentation de la teneur en plastiques dans le béton de sable réduit nettement l'effet de carbonatation

TABLEAU IV

PROPRETES PHYSICOMECHANIQUE DES BETONS DE SABLES ETUDIES [25]

	Béton de SA			Béton de SD		
	0	50	100	0	50	100
% de granulats plastiques	0	50	100	0	50	100
Masse volumique (kg/m^3)	2100	1790	1280	2050	1700	1280
Résistance à la compression (MPa)	27	14	5	17	12	5
Conductivité thermique (W/m.K)	1.2	1.0	0.7	1.3	0.8	0.7

TABLEAU V PROFONDEUR DE LA CARBONATATION DES BETONS DE SABLES ETUDIES[25]

	Béton de sable alluvionnaire			Béton de sable dunaire		
	25	50	75 - 100	25	50	75 - 100
Proportion des granulats plastiques (%)	25	50	75 - 100	25	50	75 - 100
Profondeur de carbonatation (mm)	5.50	3.00	0	12	10	0

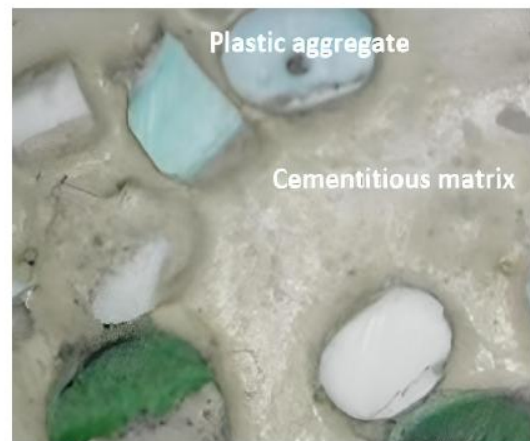


Figure 4 Visualisation au microscope optique du béton de sable à base de granulats plastiques.

	Béton de sable alluvionnaire	Béton de sable dunaire
25 %		

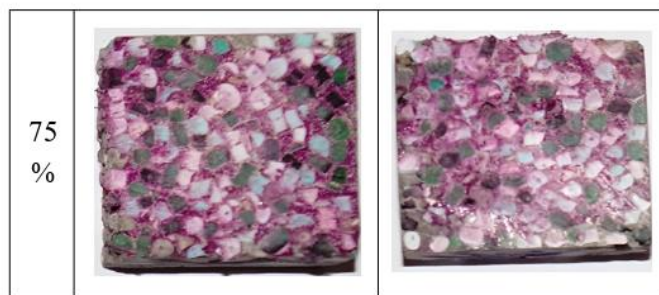


Figure 5 Effet du Phénolphthaleïne sur les bétons de sables étudiés [25]

En effet, ceci est dû à l'imperméabilité du plastique et aux diamètres élevés des grains plastiques utilisés qui réduisent la porosité du mélange, et rend les pores moins interconnectés. De plus, le matériau plastique forme une barrière contre la pénétration du gaz carbonique dans le béton de sable et empêche la carbonatation du composite [30]. La même observation a été soulevée par Ammari et al. avec l'utilisation de fibres d'acier dans le béton de sable.

Par ailleurs, on peut noter que l'effet des granulats plastiques est plus important dans le cas du sable de dunes ; en effet, toutes les particules de plastique ajoutées ont un diamètre maximal supérieur à celui du sable des dunes, réduisant ainsi la porosité du composite.

De plus, il convient de noter qu'il existe une grande relation entre la durabilité du béton et sa résistance mécanique. La diminution de la profondeur de carbonatation avec la diminution de la résistance mécanique a été rapportée par de nombreux chercheurs [31,32].

Enfin, il faut noter que l'utilisation des déchets plastiques comme granulats dans les bétons de sable contribue non seulement à la protection de l'environnement contre des déchets nocifs, mais pourrait aussi nous offrir un nouveau matériau de construction isolant, économique, et ayant une bonne durabilité contre la carbonatation. Ainsi, il est possible de fabriquer un béton de sable à base de granulats plastiques utilisable dans la construction des murs extérieurs, notamment dans le cas où une résistance mécanique modérée, une bonne isolation thermique et de meilleures résistances à la carbonatation sont généralement requises. De plus, l'utilisation de ces déchets plastiques dans des composites cimentaires préserve l'environnement et réduit l'utilisation d'agrégats minéraux, indisponibles ou très coûteux dans certaines régions.

IV. CONCLUSION

Le problème de carbonatation est plus ou moins connu pour les bétons ordinaires, mais pour les bétons de sable auxquels ont été ajoutés des granulats plastiques, cela n'a pas encore été étudié. Pour cela, une étude expérimentale a été réalisée et a donné les principaux résultats suivants :

- L'ajout de granulats plastiques au béton de sable réduit sa densité et par conséquent sa résistance mécanique, mais sa conductivité thermique est nettement améliorée.

- L'ajout d'agrégats plastiques au béton de sable a un effet bénéfique sur la résistance à carbonatation accélérée. Lorsque la teneur en granulats plastiques augmente dans la matrice, l'épaisseur de la carbonatation diminue dans les deux bétons de sables étudiés.
- Les légères différences observées entre les résultats obtenus pour le béton de sable alluvionnaire et ceux obtenus pour le béton de sable de dune, sont principalement dues à la différence existante entre leurs granulométries.
- Les particules de plastique sont bien réparties dans la matrice de ciment et bien adhérentes à la matrice.
- Enfin, l'utilisation de déchets plastiques, dans les bétons de sable, nous donne un nouveau matériau de construction écologique, isolant et économique.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the General Directorate of Scientific Research and Technological Development of Algeria (DGRSDT) for its support.

REFERENCES

- [1] Mainier F.B., Salvini B.P., Monteiro L.P.C., Mainier R.J. Recycling of tires in Brazil: a lucrative business or an imported problem, *Int. J. Eng. Appl. Sci.* 2 (3) (2013) 19–28.
- [2] Akçaözoglu S., Atis C.D., Akçaözoglu K. An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete, *Waste Manage.* 30 (2) (2010) 285–290.
- [3] Fraj A.B., Kismi M., Mounanga P. Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in light weight aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 1069–1077.
- [4] Bederina M., Khenfer M.M., Dheilly R.M., Queneudec M. Reuse of local sand: effect of lime stone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different concrete sand, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 1170–1179.
- [5] Wenlong Yan, Wu Gang, Zhiqiang Dong. Optimization of the mix proportion for desert sand concrete based on a statistical model, *Constr. Build. Mater.* 226 (30) (2019) 469–482.
- [6] Sangjun Park, Euibae Lee, JeongwonKo, JaekangYoo, Yongjic Kim, Rheological properties of concrete using dune sand, *Constr. Build. Mater.* 172 (30) (2018) 685–695.
- [7] Akcaozoglu S., Atis C.D., Akcaozoglu K. An investigation on the use of shredded PET waste bottles as aggregate in lightweight concrete, *Waste Manage.* 32 (2010) 285–290.
- [8] Albano C., Camacho N., Hernandez M., Matheus A., Gutierrez A. Influence of content and particle size of PET waste bottles on concrete behavior at different w/c ratios, *Waste Manage (Oxford)* 29 (2009) 2707–2716.
- [9] Choi Y.W., Moon D.J., Chung J.S., Cho S.K., Effects of pet waste bottles aggregate on the properties of concrete, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 776–781.
- [10] Kim S.B., Yi N.H., Kim H.Y., Kim J.H.J., Song Y.C. Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete, *Cem. Concr. Compos.* 32 (2010) 232–240.
- [11] Yesilata B., Isiker Y., Turgut P. Thermal insulation enhancement in concretes by adding pet waste and rubber pieces, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 1878–1882.

- [12] Kou S.C., Lee G., Poon C.S. W.L. Lai, Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scrapped PVC pipes, *Waste Manage.* 29 (2009) 621–628.
- [13] Kan A., Demirbog A.R. A novel material for lightweight concrete production, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 489–495.
- [14] Asokan P., Osmani M. A.D.F. Price, Improvement of the mechanical properties of glass fiber reinforced plastic waste powder filled concrete, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 448–460.
- [15] Hannawi K., Kamali-Bernard S., Prince W. Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates, *Waste Manage.* 30 (2010) 2312–2320.
- [16] Mounanga P., Gbongbon W., Poullain P., Turcry P. Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes, *Cem. Concr. Compos.* 30 (2008) 806–814.
- [17] Ismail Z.Z., Al-Hashmi E.A. Use of plastic waste in concrete mixture as aggregate replacement, *Waste Manage.* 28 (2008) 2041–2047.
- [18] Ghernouti Y., Rabehi B., Bouziani T., Ghezraoui H. A. Makhloufi, Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC), *Constr. Build. Mater.* 82 (2015) 89–100.
- [19] Choi Y.W., Moon D.J., Kim Y.J., Lachemi M. Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 2829–2835.
- [20] NF P18-500 (juin 1995) : Béton de sable (Indice de classement : P18-500).
- [21] Bederina M., Marmoret L., Mezreb K., Khenfer M.M., Bali A., Queneudec M. Effect of the addition of wood shavings on the thermal conductivity of the sand concretes – experimental study and modelling, *Constr. Build. Mater.* 2007 (21) (1970) 662–668.
- [22] Belhadj B., Bederina M., Makhloufi Z., Goullieux A., Queneudec M. Study of the thermal performances of an exterior wall of barley straw sand concrete in an arid environment, *Energy Build.* 87 (2015) 166–175.
- [23] Belhadj B., Bederina M., Benguettache K., Queneudec M. Effect of the type of sand on the fracture and mechanical properties of sand concrete, *Adv. Concr. Constr.* 2 (1) (2014) 13–27.
- [24] Bederina M., Hadjoudja M., Dheilly R.M., Makhloufi Z., Queneudec M. Combined effect of sand grain size and contents of wood and filler on the physicomechanical properties and the microstructure of lightweight sand concrete, *J. Adhes. Sci. Technol.* 30 (13) (2016) 1391–1412
- [25] Boucedra Aissa & Bederina Madani. Boucedra, A. and Bederina, M. (2022), "Effect of plastic aggregates addition on accelerated carbonation of sand concrete", *World Journal of Engineering*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. (Article publication date: 14 March 2022)
- [26] Ollivier J.P., Vichot A. La durabilité des bétons : bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement. Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, 2008.
- [27] Marzouk O.Y., Dheilly R.M., Queneudec M. Valorization of post-consumer plastic waste in cementitious concrete composites, *Waste Manage.* 27 (2007) 310–318.
- [28] Orr J. J. & Savarkar P. Carbonation performances of concrete with recycled plastic. *Advances in Concrete Technology, Materials & Construction Practices (CTMC)*, 24-26 June 2016, Farmagudi, India.
- [29] Leemann Andreas & Roman Loser. Carbonation resistance of recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater.* 204 (2019) 335–341.
- [30] Ammari M.S., Bederina M., Belhadj B., Merrah A. Effect of steel fibers on the durability properties of sand concrete with barley straws. *Construction and Building Materials* 264 (2020) 120689.
- [31] Nischer P. The quality of the concrete texture, *Betonwerk+ Fertigteil-Technik* 52 (1986) 683–696.
- [32] Parrott L.J. A review of carbonation in reinforced concrete, 1987.