

# Evaluation de l'adhérence entre un béton de sable auto-plaçant comme nouveau matériau de réparation cimentaire et les substrats en béton, par un test d'arrachement direct

Karim Belmokretar<sup>1\*</sup>, Kada Ayed<sup>2</sup>, Nordine Leklou<sup>3</sup>, Djamel-Eddine Kerdal<sup>5</sup>, Mohamed Mouli<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Département de Génie Civil, Université des Sciences et Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, Oran, 31000, Algérie.

<sup>2</sup>LabMat, Département de Génie Civil, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran (Maurice AUDIN), Oran, 31000, Algérie.

<sup>3</sup>LM2SC (Laboratoire de Mécanique des Structures et de Stabilité), Département de Génie Civil, Université des Sciences et Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, Oran, 31000, Algérie.

<sup>4</sup>Nantes Université, Ecole Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44600 Saint-Nazaire, France

**RESUME** Cette étude expérimentale a un objectif d'étudier l'utilisation d'un nouveau béton de sable auto-plaçant (BSAP) pour réparations des substrats en béton ordinaire (BO). Plusieurs compositions de BSAP ont été confectionnées et testées à : L'étalement au cône d'Abrams, l'écoulement à la boîte en L, la résistance à la ségrégation et la résistance à la compression, pour sélectionner le meilleur mélange apte à utiliser comme matériau de réparation. Deux types de préparation de surfaces ont été choisis: traitée avec un agent adhésif (AA) et rugueuse par application de sablage (SB). La force d'adhérence entre BSAP et BO a été évaluée par le test non destructif (UPV) et le test semis destructif (PULL OFF) indiqué dans la norme ASTM C1583.

Les résultats obtenus ont prouvé une excellente force d'adhérence pour les substrats avec des surfaces sablées, cependant l'adhérence a échoué pour les substrats traités par l'agent adhésif.

**Mots-clefs** Matériau de réparation cimentaire, Béton de sable, Béton auto-plaçant, rugosité, force d'adhérence.

## INTRODUCTION

L'utilisation de matériaux cimentaires pour réparer les ouvrages de génie civil augmente de jour en jour partout dans le monde. En plus, l'exploitation des matériaux de construction disponibles,

---

\*L'adresse e-mail de l'auteur correspondant: [karim.belmokretar@univ-usto.dz](mailto:karim.belmokretar@univ-usto.dz).

fabriqués d'une manière écologique ou valorisés à partir des déchets des carrières est devenue une obligation aujourd'hui.

Le béton de sable est un parmi les bétons formulés pour contribuer dans la réalisation de ce défi. Il a été utilisé pour la première fois par François Coignet dans la construction du phare de « Port Saïd-Egypte » (Benaïssa et al., 1993). En France un programme qui s'appelle « SABLOCRETE » a été lancé en 1988, Son but était de montrer les intérêts économique et écologique que pourrait présenter la valorisation des sables naturels ou de concassage, dans les réalisations en béton dont ils seraient les constituants principaux (Sablocrete, 1994).

Plusieurs chercheurs ont tenté de formuler des bétons de sable à base des différents types de sable. Li, et al. (2020) ont étudié la résistance au cisaillement de poutres en béton fabriquées avec du sable de dunes (DS) du désert de Gurbantunggut dans la province chinoise. Les résultats obtenus ont prouvé la possibilité d'utiliser le béton de sable des dunes dans les constructions, et que les résistances au cisaillement mesurées étaient conformes aux valeurs exigées par les actuels codes de conception en Chine. (Bédérina, et al. 2005) a étudié la substitution des granulats grossiers par des sables locaux disponibles en grande quantité dans la nature (dunes et rivières). Pour formuler des bétons de sable, ils ont utilisé un sable de dunes (DS), un sable de rivière (RS) et un mélange de sable de dunes et de rivières, avec des proportions prédéterminées et des fillers des déchets calcaire comme addition. Le résultat était l'obtention d'un béton de sable maniable, compact et plus résistant. (Jaradat, et al. 2021) ont proposé la substitution des proportions du sable de rivière par 40 %, 50 % et 60 % des sables concassés issus de déchets de carrière. Ils ont trouvé que ces substitutions influencent positivement les caractéristiques mécaniques et physiques du béton de sable. Le taux idéal de substitution était de 60%.

Parmi les matériaux à matrice cimentaire utilisés dans les réparations on trouve les mortiers, les bétons ordinaires, les bétons haut performance (BHP) et les bétons ultras haut performance (BUHP). Gadri et al. ont développé un béton de sable destiné aux réparations des structures endommagées (Gadri and Guettala, 2017). Autres chercheurs font d'efforts pour développer des matériaux cimentaires destinés aux réparations (Courard and Bissonnette, 2016), (Valipour and Khayat, 2020), (Magbool and Tayeh, 2021). Des techniques et méthodes de diagnostic pour détecter les parties détériorées ont également été développées, sachant que le succès des réparations est étroitement lié à un diagnostic approfondi et ponctuel. cela va permettre une bonne définition des causes de ces détériorations et les zones de propagations (Courard et al., 2013), (Moradi-Marani et al., 2010).

Avec le peu d'études existantes visant à développer des matériaux destinés aux réparation des zones étroites, de géométries complexes ou situées au dessous des surfaces horizontale, il apparaît important d'étudier des bétons de réparation fluides et de les évaluer aux mêmes conditions. L'étude expérimentale détaillée dans le présent papier est une continuation d'une étude antérieure réalisée par (Abidelah et al., 2009), où ils ont composé un béton de sable auto-plaçant, incorporant par des fillers issus de déchets calcaires de carrières. Notre objectif était de développer le mélange formulé, en visant la formulation d'un béton de sable autoplaçant (BSAP) de catégorie « 3a » selon les recommandations de l'association française du génie civil (AFGC, 2008). Les caractéristiques de cette catégorie sont: une maniabilité dans un milieu non confiné (étalement au cône d'ABRAMS) entre 760 et 850 mm (c'est-à-dire classe SF3), une valeur minimale à la boîte en L confinée par 3 bars,

supérieure ou égale à 0.8 et une valeur d'essai de tamis qui ne dépasse pas 15 % (France and european standards, 2010).

### 1. Matériaux et proportions des mélanges

Le béton ordinaire destiné aux confections des substrats a été formulé à partir d'un ciment CEM I 52.5 R, de gravillons concassés d'origine calcaire 3/8 mm et 8/15 mm, de sable 0/4 mm issu des déchets calcaires des carrières et de sable fin 0/1mm. Les bétons de sable autoplaçant (BSAP) utilisés comme matériau de réparation ont été formulés conformément à une composition préparée dans une étude antérieure où nous avons utilisés le ciment CEM I 52.5 R, les gravillons concassés d'origine calcaire 3/5 mm, le sable 0/4 mm issu des déchets calcaires des carrières, le sable fin 0/1mm, un super plastifiant, haut réducteur d'eau « MEDAFLOW 30 » de la société Algérienne GRANITEX et les fillers calcaires (FC) comme addition minérale. Les FC, extraits de la zone d'El Khroub, Constantine à l'est d'Algérie, ont été fournis par l'entreprise Algérienne des granulats (ENG). Les tableaux (TABLEAU 1.) et (TABLEAU 2.) présentent les compositions chimique et les caractéristiques physiques et minéralogiques des ingrédients respectivement.

**TABLEAU 1. Compositions chimique du ciment et fillers calcaire [%].**

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Cl	PAF [%]
CEMI52.5R	21,98	3,42	0,26	64,88	1,93	0,46	2,49	0,02	< 0,1	4,14
FC	0.23	0.06	0.05	55.12	0.13	0.01	0.02	0,13	0,10	43,9

**TABLEAU2. caractéristiques physiques et minéralogiques des agrégats**

	Sable0/1	Sable0/4	GR3/8	GR8/15	CEM I 52.5 R	FC
Coefficient d'absorption[%]	3,0	4,0	0,5	0,5	/	/
Masse spécifique[cm <sup>3</sup> /g]	/	/	/	/	4000	3790
Masse Volumique Absolue [g/cm <sup>3</sup> ]	2.63	2.62	2.62	2,62	3,2	2.63
Masse Volumique Apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	1,37	1,51	1,35	1,32	/	1,05
Composent solide	/	/	/	/	/	/
Teneur en fines [%]	2.4	8.1	0.9	/	/	/
Equivalent de sable [%]	87	63	/	/	/	/
Module de finesse	1.4	3.31	/	/	/	/
C3S	/	/	/	/	73,78	/
C2S	/	/	/	/	7,35	/
C3A	/	/	/	/	8,61	/
C4AF	/	/	/	/	0,79	/

### 2. Préparation des échantillons

Des dalles en béton ordinaire (BO), de dimensions (210x280x70) mm<sup>3</sup> ont été fabriquées pour être utilisées comme des substrats. Le malaxage a été réalisé conformément à la norme BS EN 12390.2 – 2019, le béton a été versé dans les moules, protégé par un film en plastique, les éprouvettes

ont été démoulées après 24 heures et conservées dans l'eau à une température de  $(20 \pm 2)$  °C jusqu'à le jour de confection des composites de réparation.

Le BSAP, de catégorie « 3a » selon l'AFGC, a été développé pour être utilisé comme matériau de réparation. En conséquence, neuf mélanges ont été préparés, en changeant le dosage en super plastifiant (2%, 2,5% et 3%) et le rapport  $\frac{E}{C}$  (0,45, 0,50 et 0,55). Les proportions des fines (ciment + fillers calcaire) ont été fixées aux alentours de 500 kg/m<sup>3</sup>. Des gravillons d'origine calcaire, de fractions  $\leq 5$  mm ont été utilisés, pour maintenir la spécification sableuse du BSAP et minimiser le frottement induit par les gros granulats afin d'augmenter la maniabilité et l'écoulement. La meilleure entre les neuf compositions vis-à-vis l'étalement au cône d'Abrams, l'écoulement en boîte en L et la résistance à la ségrégation a été sélectionnée pour utiliser comme matériau de réparation.

Avant d'application du béton de réparation, les surfaces des substrats ont été traitées. Trois méthodes ont été adoptées : 1) traitement par sablage (SB). 2) sans traitement (SS) et sans traitement renforcé par un agent de liaison (AA) (Figure 1). L'évaluation de la rugosité a été déterminée par la méthode de tache de sable (ASTM E1845-15, 2015). La profondeur moyenne de rugosité était 0,87 mm avec un coefficient de variation (C.O.V) = 0,53 % Après le traitement des surfaces, les substrats ont été posés dans les fonds des moules, le matériau de réparation a été versé sur les façades supérieures d'une épaisseur fixée à 70 mm.



**FIGURE 1.** traitement des surfaces des substrats: 1: sans traitement et renforcée par un agent adhésif, 2: traitée par sablage, 3 : non traitée.

### 3. Tests, résultats et discussions.

Le BO destiné à la confection des substrats a été testé à la résistance à la compression, le BSAP a été caractérisé à l'état frais et durci. Les tests : Flow test, écoulement en boîte en L, stabilité au tamis et la résistance à la compression à 7, 28 et 90 jours ont été effectués pour sélectionner le meilleur mélange. Le tableau [TABLEAU3] présente la composition du BSAP adopté pour l'utiliser comme matériau de réparation.

**TABLEAU 3.** Composition du BSAP et ces caractéristiques à l'état frais et durci.

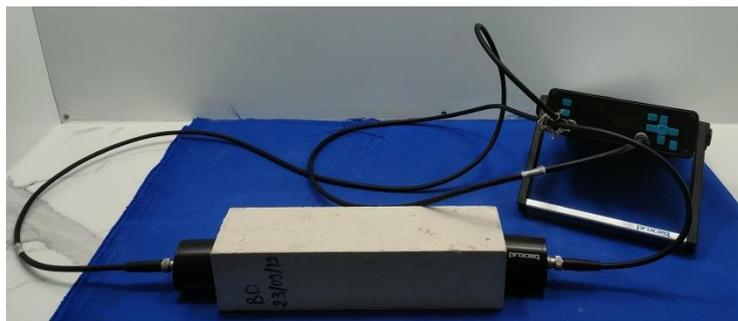
CEMI	FC	Sable Fin	Sable de carrière	G	SP	SP	Eau	E/C	G/S
52,5				3/5	[L]	[%]	[L]		
420	180	619	480	380	12,6	3	231	0,55	0,35

Le tableau (TABLEAU 4.) présente les résultats des tests de l'état frais et durci des bétons. La meilleure composition sélectionnée a enregistré un étalement au cône d'Abrams qui atteint 823 mm sans aucun signe de ressuage. Le rapport entre la première hauteur (h1) et la deuxième hauteur (h2) de la boîte en L était 1. La boîte en L a été confinée par 03 bars de diamètre 12 mm. La résistance à la ségrégation était 4 %. Cette valeur est acceptable vis-à-vis les recommandations de l'AFGC. La résistance à la compression du BSAP a été supérieure 1,6 fois la résistance à la compression du BO. L'explication de cette supériorité c'est que la composition du BSAP qui a contribué à la diminution des vides et l'amélioration de la compacité.

**TABLEAU 4. Résultats des tests de l'état frais et durci.**

	Flow test [mm]	Boite en L	Tamis [%]	RC 7J (MPa)	RC 28J (MPa)	RC 90J (MPa)
BO	Non concerné	Non concerné	Non concerné	39	44	45
BSAP	823	1	4,00	44,7	63	72

Les composites ( substrat-matériau de réparation ) ont été évaluée par un test non destructif, basé sur la mesure de la vitesse de propagation des ondes ultra soniques (UPV) (Czarnecki et al., 2006), (Szymanowski and Sadowski, 2017). Ce test a été appliqué sur des spécimens réparés et d'autres sains (composée de BO ou BSAP totalement) de forme prismatique (7x7x28) cm<sup>3</sup>. Le banc d'essai était composé d'un PROCEQ PUNDITLAB doté de transducteurs (émetteur et récepteur). Le test a été mené par la méthode directe à l'aide d'une pâte comme agent de couple (Figure 2).



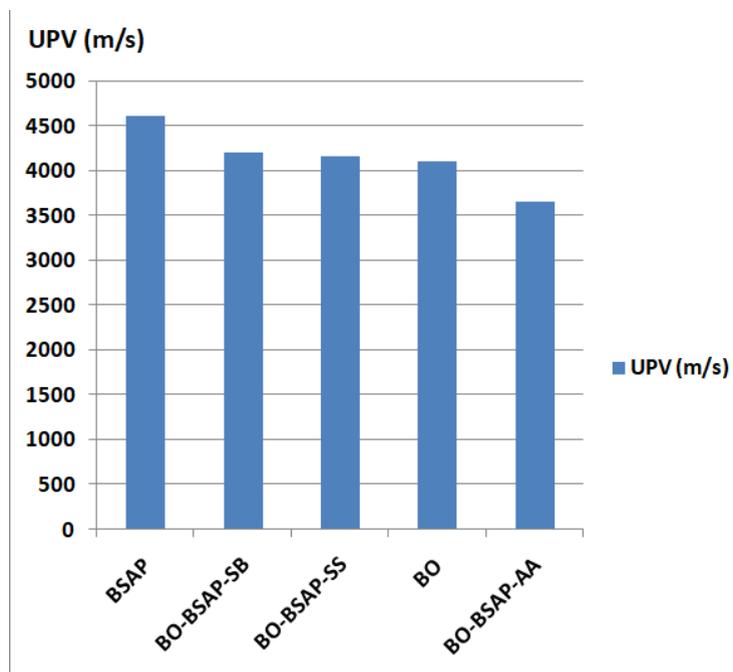
**FIGURE 1: test de vitesse de propagation d'onde ultra sonique (UPV)**

Le tableau (TABLEAU 5.) présente les résultats obtenus par le test UPV. Le test a été appliqué sur : des éprouvettes traitées par « SB » (BO-BSAP-SB), des éprouvettes traitées par « AA » (BO-BSAP-AA), des éprouvettes d'interfaces non traitées « SS » (BO-BSAP-SS), des éprouvettes en BO et des éprouvettes en BSAP.

**TABLEAU 5. Résultats du test UPV à 28 jours**

	BO	BSAP	BO-BSAP-SB	BO-BSAP-SS	BO-BSAP-AA
UPV (m/s)	4105	4601	4203	4160	3650

L'objectif du test était de comparer la vitesse de propagation d'UPV dans un béton sain (BO) et (BSAP) d'une part, et dans un béton réparé (BO-BSAP) d'une autre part, en fonction de la rugosité d'interface. Chaque type a été testé trois fois. Les mesures étaient très proches car les bétons étaient en état sain. Les vitesses constatées, classées de la plus grande à la plus petite s'ordonnent comme suit : BSAP, BO-BSAP-SB, BO-BSAP-SS, BO et BO-BSAP-AA (voir figure 04). Les éprouvettes réparées d'interface « AA » ont donné les plus petites vitesses avec un écart significatif entre les résultats. L'explication de cela est que la couche d'agent adhésif a ralenti la propagation d'onde ultra-sonique. L'UPV du BSAP est le plus grand parmi les éprouvettes due aux excellentes caractéristiques du BSAP (plus compact et moins de vide, en raison de la quantité élevée des fines qui jouent un rôle de remplisseur et contribuent à la diminution des vides).



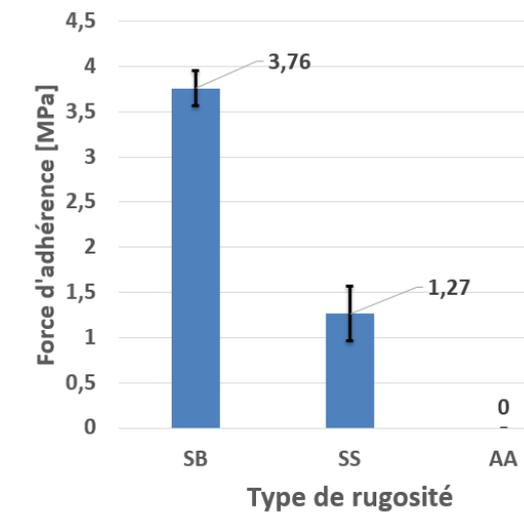
**FIGURE 3.** Vitesse de propagation d'onde ultra-sonique en fonction de type de béton et rugosité d'interface

Les composites ont été évalués également par un test semi destructif qui est le test PULL-OFF selon la norme ASTM C1583 ((ASTM), 2010). Des carottes de diamètres 50 cm espacés de 50 cm ont été extraites jusqu'à une profondeur supérieure à 1 cm dans les substrats. Des disques métalliques ont ensuite été collés sur les carottes à l'aide d'une colle époxydique pour pouvoir appliquer une force de traction progressivement par l'appareil « PROCEQ dy-216 » jusqu'à la rupture (Figure 3). La force induisant la rupture et le mode de rupture ont été enregistrés pour toutes les éprouvettes.



**FIGURE 2:** test d'arrachement PULL OFF

Les forces d'adhérence étaient : 3,76 MPa, 1,27 MPa et 0.00MPa pour les rugosités « SB », « SS » et « AA » respectivement (Figure 5). Les modes de défaillances étaient : 100 % de type A (au substrat) pour rugosité « SB », 100 % de type B (à l'interface) pour rugosité « AA » et mixte entre A et B pour la rugosité « SS ». Tous les composites de la rugosité « AA » ont échoué et se sont décollés totalement lors de l'opération du carottage par la carotteuse. L'adhérence était nulle entre les trois corps (substrat, couche d'agent de liaison et le matériau de réparation). Les composites dont les surfaces n'ont reçu aucun traitement « SS » ont donné des faibles forces d'adhérence (1,27 MPa). La couche de la pâte liante qui recouvre les agrégats aux surfaces « SS » a minimisé l'adhérence entre la matrice du matériau de réparation et les substrats, contrairement aux surfaces « SB » qui ont fourni les meilleurs résultats (3,76MPa), où ces couches de pâte liante ont été enlevées. Ainsi, le traitement des surfaces des substrats par sablage a causé l'exposition des agrégats directement au matrice cimentaire du matériau de réparation, ce qui crée deux types de zones de transition interfaciales « ITZ » : nouvelle matrice à ancienne matrice et nouvelle matrice à agrégats. Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés par d'autres auteurs : (Gillani, et al. (2020), ont observés que les forces d'adhérence s'améliorent avec l'augmentation de la rugosité. Ils ont trouvé que l'adhérence était augmentée de 12 fois entre les surfaces sans traitement et les surfaces traitées par sablage (Gillani et al., 2020).



**FIGURE 5.** Force d'adhérence du test PULL OFF en fonction de la rugosité d'interface

#### 4. Conclusions :

A la lumière des résultats obtenus, les conclusions suivantes ont été retenues:

- a) Le BSAP a prouvé des capacités acceptables en tant que matériau de réparation à base cimentaire.
- b) Les résultats du test de vitesse de propagation d'onde ultra sonique (UPV) ont été en accord avec les forces d'adhérence obtenues en fonction de la rugosité des substrats. Autrement dit le test UPV est très utile pour l'évaluation d'adhérence entre les matériaux de réparation et les substrats, ainsi que pour le suivi de la performance des réparations. Puisque la vitesse a été grande pour les éprouvettes SB, où l'interface est très forte et très consolidée, et faible pour les autres éprouvettes. la vitesse de propagation d'onde ultra sonique sera diminuée si l'interface nouveau/ancien béton subie des fissurations ou des délaminations.
- c) Les meilleurs résultats ont été obtenus par les éprouvettes d'interfaces traitées par sablage (rugosité SB), suivi par les éprouvettes d'interfaces non traitées (rugosité SS), et en dernier les éprouvettes d'interface traitées par un agent adhésif (rugosité AA). Ces résultats nous amènent à conclure que la réussite des mécanismes de réparations constitués par des matériaux cimentaires est fortement liée à une rugosité suffisante des interfaces entre le substrat et le matériau de réparation, telle que celle créée par le sablage.

#### REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique (MESRS) et la direction générale de la recherche scientifique et de développement technologique (DGRSDT) pour leur soutien financier tout au long de la durée de la recherche.

#### REFERENCES

- ASTM, 2010. C1583 - 13, Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension ( Pull-off Method ). Annu. B. ASTM Stand. 93, 1–5.
- Abidelah, A., Bouchair, A., Kerdal, D., Ayed, K., 2009. Characterization of a self-compacting sand concrete using the quarry waste. *Can. J. Civ. Eng.* 36, 1773–1782.
- AFGC, 2008. Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants.
- ASTM E1845-15, 2015. Standard Practice For Calculating Pavement Macrotecture Mean Profile Depth. *Astm 01*, 5–8.
- Benaissa, A., Morlier, P., Viguier, C., 1993. Microstructure du béton de sable. *Cem. Concr. Res.* 23, 663–674. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90017-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90017-4)
- Courard, L., Bissonnette, B., 2016. Réparation des ouvrages en béton armé-Partie 1: Pathologies et diagnostic. *Tech. l'Ingénieur. Anal. Chim. Caractérisation.*
- Courard, L., Bissonnette, B., Beushausen, H., Fowler, D., Trevino, M., Alex, V., Johan, S., 2013. Recommendations for the repair, the lining or the strengthening of concrete slabs or pavements with bonded cement-based material overlays. *Mater. Struct.* 46.
- Czarnecki, L., Garbacz, A., Krystosiak, M., 2006. On the ultrasonic assessment of adhesion

between polymer coating and concrete substrate. *Cem. Concr. Compos.* 28, 360–369. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2006.02.017>

france and european standards, 2010. 12350-11. Essai pour béton frais–Partie 11: béton auto-plaçant–Essai de stabilité au tamis [Test for fresh concrete-Part 11: self-compacting concrete-sieve stability test].

Gadri, K., Guettala, A., 2017. Evaluation of bond strength between sand concrete as new repair material and ordinary concrete substrate (The surface roughness effect). *Constr. Build. Mater.* 157, 1133–1144. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.183>

Gillani, S., Toumi, A., Turatsinze, A., 2020. Effect of surface preparation of substrate on bond tensile strength of thin bonded cement-based overlays. *Int. J. Pavement Res. Technol.* 13, 197–204.

Magbool, H.M., Tayeh, B.A., 2021. Influence of substrate roughness and bonding agents on the bond strength between old and new concrete. *Adv. Concr. Constr.* 12, 33–45. <https://doi.org/10.12989/acc.2021.12.1.033>

Moradi-Marani, F., Shekarchi, M., Dousti, A., Mobasher, B., 2010. Investigation of corrosion damage and repair system in a concrete jetty structure. *J. Perform. Constr. Facil.* 24, 294–301.

Sablocrete, 1994. Sand concrete: characteristics and Use Practices.

Szymanowski, J., Sadowski, Ł., 2017. Ultrasonic pulse velocity evaluation of the pull-off adhesion between epoxy resin and concrete substrate, in: *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publ, pp. 390–395.

Valipour, M., Khayat, K.H., 2020. Debonding test method to evaluate bond strength between UHPC and concrete substrate. *Mater. Struct. Constr.* 53, 1–10. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-1446-6>