

Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing finely ground sand

W. Mechti¹, M.J. Rouis¹ and T. Mnif¹

¹Unit éde Recherche de Géotechnique Environnementale et Matériaux Civil, Ecole Nationale d'Ingénieur de Sfax, BP W 3038, Sfax, Tunisie

Abstract. The aim of this work is to study the possibility of using finely ground sand as a part mass addition to Portland cement. Searching the effect of addition ground sand on development of compressive strength and hydration with age of cement pastes as a function of the percentage of ground sand (physico-chemical and chemical effect) and the fineness (physical effect). In order to understand better the pozzolanic effect of finely ground sand (quartz), we followed the mixtures hydration (90% OPC + 10% ground sand) by X-ray diffraction. The results proved the pozzolanic reactivity of ground sand: the main reaction is the fixation of the lime coming from the cement hydration in the presence of finely ground sand, to form calcium silicate hydrate C-S-H. Moreover, finely ground sand has an optimum effect on compressive strengths when the percentage is about 10% and a 20 μm fineness. Finely ground sand, despite its crystalline structure, presents a pozzolanic reactivity.

Key words: Portland cement, finely ground sand, pozzolanic effect, hydration.

Résumé. Cette étude s'inscrit dans le cadre de valorisation des matériaux locaux. On sait que le sable siliceux (quartz) est réputé pour un filler inerte chimiquement du fait de sa structure cristallisée. Afin de répondre à la question : la réaction pouzzolanique est elle possible en utilisant le sable siliceux finement broyé comme ajout au ciment Portland ? On a choisi le sable de la région de Gabès (Sud-est de la Tunisie) broyé à différentes finesses : 20, 40 et 80 μm avec lequel on a réalisé des pâtes de ciment conformément à la norme française EN 196-1 tout en variant le pourcentage d'incorporation du sable dans le ciment : 10, 15 et 20 %. Nos résultats ont permis de mettre en évidence à partir des essais de résistance mécanique à la compression couplés aux analyses par diffraction des rayons X que le sable finement broyé a un effet pouzzolanique. D'une part, il y a eu amélioration des performances mécaniques : augmentation des résistances par rapport au ciment témoin. D'autre part, il y a eu fixation par le sable de la chaux produite par le ciment (réaction pouzzolanique), diminution des pics relatifs aux constituants du ciment (ettringite, C3S et C2S) et formation des produits d'hydratation (CSH).

Nous pouvons conclure que le sable finement broyé malgré sa structure cristalline, possède une réactivité pouzzolanique. En effet, la perspective d'utilisation du sable finement broyé dans l'industrie cimentaire est promettant tout en garantissant un gain économique et une protection de la couche d'ozone (réduction du dégagement du CO₂) sur le plan environnemental.

Mots clés : ciment Portland, sable finement broyé, effet pouzzolanique, hydratation.

1. Introduction

La production du ciment Portland, a un coût énergétique élevé, calciné à des hautes températures, sa production coûte chère. Les ciments avec additifs permettent non seulement de réduire les coûts de production mais aussi de régler certains problèmes environnementaux en plus d'offrir au béton de meilleures performances [1].

Depuis 1970, un grand effort de recherches a été fourni sur l'utilisation des additifs cimentaires en tant que substitution partielle au ciment Portland. Ces additifs

proviennent de sources naturelles ou de sous-produits d'autres industries [2].

La compacité de la pâte de ciment peut être améliorée par la formation des silicates de calcium hydratés. Ces derniers s'obtiennent par introduction de fines particules siliceuses dotées d'un rôle pouzzolanique certain et contribuent à l'augmentation de la résistance et de la durabilité des bétons auxquels elles sont incorporées [3,4].

Dans ce contexte, nous proposons dans cette étude d'aborder cet aspect en étudiant principalement l'effet de l'ajout du sable finement broyé sur les propriétés physicochimiques et mécaniques du ciment.

2. Matériaux utilisés

✓ Le ciment: le ciment utilisé est un ciment portland de type CPA I de résistance mécanique à la compression: 42.5 MPa à 28 jours. Le ciment est produit par la

cimenterie de Gabès, composé de 95% clinker et 5% du gypse pour la régularisation de la prise. La composition chimique et minéralogique du clinker est indiquée dans le tableau 1.

Tableau 1. Composition chimique et minéralogique du clinker (%).

Composition chimique								Composition de Bogue			
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	CaO libre	PF 500°C	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
65.3	21.1	4.7	2.8	2.3	0.5	0.8	0.9	59.3	15.8	7.76	8.59

Le sable: le sable utilisé est de provenance de la région de Gabès (wethref). Ce sable a été broyé au laboratoire de géotechnique dans un broyeur à boulets

jusqu'à des finesses de 20µm, 40µm et 80µm. Les résultats de l'analyse chimique sont portés dans le tableau 2.

Tableau 2. Analyse chimique du sable finement broyé (%).

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Cl (ppm)	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	ZnO	CaCO ₃
96.94	0.63	0.68	1.55	0.04	0.2	99	0.22	0.02	0.03	0.03	1.1

Du point de vue chimique la constatation importante à signaler est la présence d'un fort pourcentage en silice (minuscules grains de quartz) qui est supérieur à 95%, par conséquent le sable étudié est un sable siliceux.

Les ciments étudiés sont obtenus en mélangeant le ciment avec le sable broyé à différentes finesses et à différents pourcentages massiques (10%, 15% et 20%).

indiqué par la norme EN-196-3 [6] relative à la consistance normale des pâtes pures.

Les essais mécaniques sont réalisés sur des micro-éprouvettes cylindriques (diamètre 20 mm, hauteur 40 mm) conformément à la norme européenne EN-196-1 [5]. Les micro-éprouvettes coulées sont démoulées après 24 heures et mises dans l'eau à 20°C jusqu'au jour de l'essai.

Le tableau 3 présente le dosage des différents constituants des pâtes de ciment (rapport massique (Eau/ Liant = 0,35).

3. Protocole expérimentale

Les différentes pâtes sont préparées dans un malaxeur normalisé EN-196-1 [5] en suivant le mode opératoire

Tableau 3. Dosage des différents constituants des pâtes de ciment.

Mélange	E/L	Finesse Sable(µm)	Type de ciment	Dosage de masse (%)		
				Clinker	Gypse	Sable
M1	0.35	20		85	5	10
M2	0.35	40	90%CPA+10%Sable	85	5	10
M3	0.35	80		85	5	10
M4	0.35	20		80	5	15
M5	0.35	40	85%CPA+15%Sable	80	5	15
M6	0.35	80		80	5	15
M7	0.35	20		75	5	20
M8	0.35	40	80%CPA+20%Sable	75	5	20
M9	0.35	80		75	5	20
M10	0.35	-	100%CPA	95	5	0

4. Résultats et discussions

4.1 Résistance mécanique à la compression

Afin d'étudier en parallèle l'effet des différents pourcentages de sable finement broyé et l'influence de la finesse de mouture sur la résistance mécanique en compression des pâtes du ciment, on a choisi trois pourcentages (10%, 15% et 20%) pour les substituer au ciment (CPA) et obtenir une nouvelle variété de ciment

composé (optimisation de la teneur du ciment en Sable), et tirer le pourcentage du sable qui donne les meilleures résistances en compression.

Les résultats sont illustrés sur la figure 1:

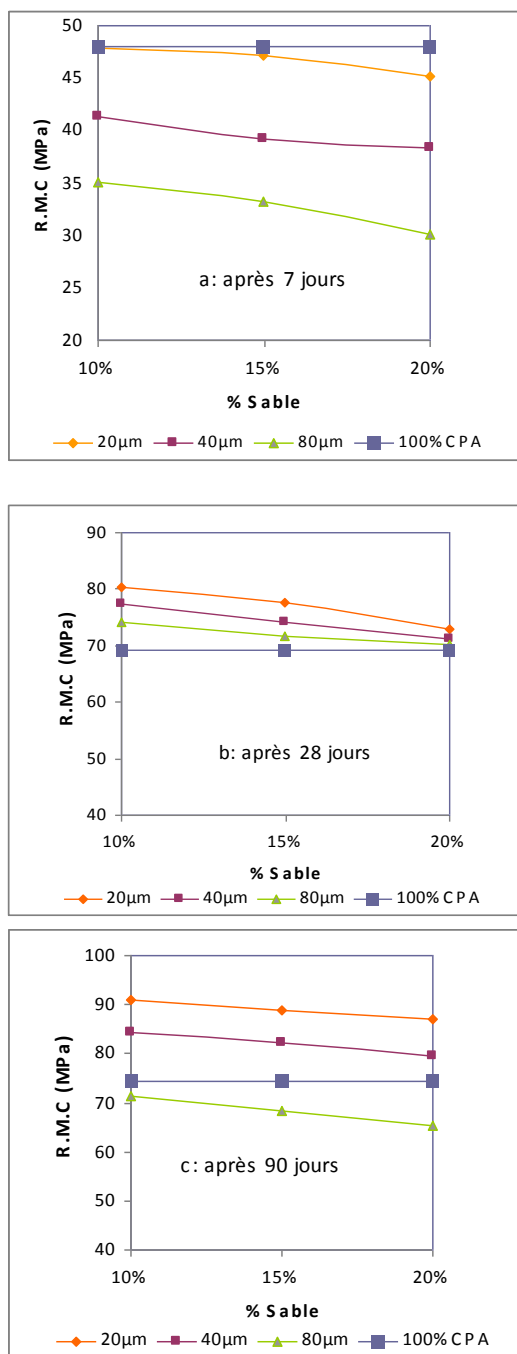


Fig. 1. Evolution de la résistance mécanique à la compression des pâtes de ciment en fonction de la finesse et du pourcentage du sable.

La figure 1 présente l'évolution de la résistance mécanique à la compression des pâtes de ciment en fonction des taux de substitution (10%, 15% et 20%) du sable et en fonction des différentes finesses (20µm, 40µm et 80µm) à 7, 28 et 90 jours d'hydratation.

A partir de ces figures, on peut noter que :

La résistance mécanique à la compression des pâtes de ciment dépend des différents paramètres mesurables : temps du test, pourcentage et finesse du sable broyé.

4.1.1 Influence du temps

- l'évolution des résistances en fonction du temps montre que pendant les sept premiers jours, les résistances des pâtes de ciment ne dépassent pas celles du ciment témoin, tandis que pour celles de 28 jours les résistances augmentent sensiblement. Cela est dû à la cinétique de la réaction d'hydratation des constituants du ciment mélangé qui devient de plus en plus active. En effet, l'augmentation de la résistance du CPA seul à 28 et 90 jours, par rapport à celle à 7 jours, est de l'ordre de 44% et 55% respectivement; l'augmentation des résistances des ciments à 10%, 15% et 20% de sable est d'environ 64% à 28 jours et 90% à 90 jours, ceci traduit outre le rôle du remplissage, le rôle chimique joué par le sable à long terme, donc confirme son activité pouzzolanique.

Ces résultats sont en accord avec les études antérieures [7, 8] : l'incorporation des fines particules siliceuses contribue à l'augmentation des résistances et de la durabilité des bétons suite à leur effet pouzzolanique.

4.1.2 Influence de la teneur du ciment en sable finement broyé

- A 7 jours d'hydratation, la substitution du ciment par 10% du sable broyé à 20µm donne des résistances comparables à celles du ciment témoin.

- A 28 jours d'hydratation, les résistances atteintes avec (10%, 15% et 20%) du sable broyé à différentes finesses dépassent celles du ciment témoin (69 MPa). Ceci traduit l'amélioration de la compacité par trois effets qui agissent simultanément et de manière complémentaire Guettala et al. [9,10].

✓ Effet filler : consiste au remplissage physique des vides inter granulaire par les grains de sable ⇒ renforcement de la matrice cimentaire.

Effet physico-chimique: un processus physique qui dépend de la quantité et de la finesse du sable qui engendre une activation chimique de l'hydratation du ciment et agit sur l'évolution des résistances en compression aux jeunes âges. Donc le sable agit en tant qu'activateur chimique. Ce qui est en accord avec [11,12,13,14].

✓ Effet chimique : capacité du sable par la réaction pouzzolanique à fixer la chaux produite par le ciment et formation de nouveaux hydrates qui rendent la pâte de ciment plus dense et plus compacte. Ceci est confirmé par les études précédentes de [10,15,16].

D'après les résultats obtenus, on remarque que les résistances maximales sont atteintes avec une substitution du ciment par 10% du sable siliceux.

Au bout de 28 jours, les résistances en compression à 10%, 15% et 20% du sable sont supérieures à celles du ciment de référence. Le sable siliceux joue un rôle bénéfique jusqu'à des teneurs de 20% environ, avec un effet optimum pour un pourcentage de l'ordre de 10%.

4.1.3 Influence de la variation de la finesse du sable finement broyé

Concernant l'influence de la finesse, on peut noter que les résistances maximales sont atteintes avec la fraction du sable de taille granulométrique inférieure à 20µm quelque soit l'âge de la pâte. En effet, plus les particules du sable sont fines, plus les performances

4.2 Analyse minéralogique du sable

mécaniques des pâtes de ciment sont élevées. Ce résultat est approuvé par les suggestions de [17,18,19, 20] qui ont révélé qu'il y a une granularité optimale des grains de quartz qui donne les résistances mécaniques les plus élevées.

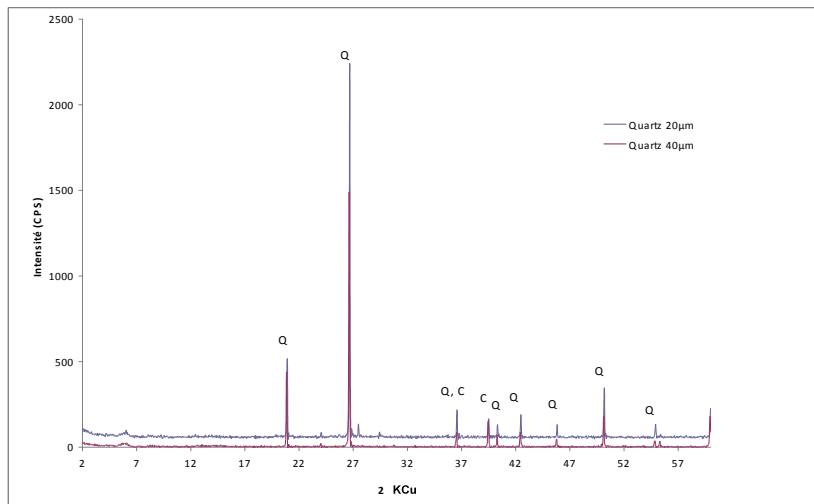


Fig. 2. Diffractogrammes X des sables broyés à 20µm et 40µm.

La figure 2 présente les diffractogrammes des rayons X des sables finement broyés à 40 µm et 20µm respectivement. La superposition des deux courbes montre qu'elles sont similaires ; elles présentent les différents pics du quartz cristallin du type low-quartz (quartz α). Ce qui est en accord avec [21,22,23]. La seule différence réside dans l'apparition d'un pic à 3.24 Å sur la courbe du sable de finesse 20µm attribué au quartz amorphe (quartz β). Ceci ne peut être due qu'à l'effet du broyage. Selon Tkacova et al.[24], le broyage est considéré comme un réacteur qui modifie la structure des surfaces des particules. De même, De Larrard [25] a

montré qu'aucune ultrafine n'est inerte. Ainsi, le quartz réputé cristallin, est amorphisé en surface.

4.3 Réactivité pouzzolanique du sable finement broyé

Afin de mieux cerner l'effet pouzzolanique du sable finement broyé dans les pâtes de ciment Portland, nous avons suivi l'évolution de l'hydratation des mélanges à 28 jours des pâtes contenant (100% CPA) et (90% CPA + 10% sable de finesse 20µm). Ces résultats sont présentés sur la figure3.

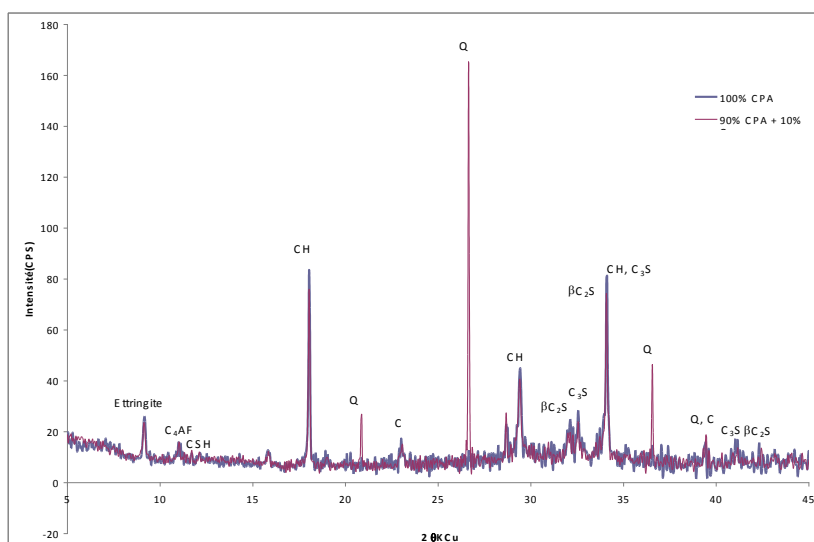


Fig. 3. Diffractogrammes des pâtes (100% CPA) et (90% CPA + 10% sable) à 28jours d'hydratation.

La superposition des spectres de diffraction des rayons X des produits d'hydratation des deux pâtes à 28 jours d'hydratation montre la présence :

- Des pics relatifs à l'ettringite dont l'intensité diminue en présence du sable, ceci est probablement dû à sa conversion en monosulfate d'alumine (AFm).

- Des pics relatifs aux silicates de calcium (C3S/C2S) dont l'intensité est plus élevée dans les pâtes contenant 100% CPA.

- Des pics relatifs à la portlandite (4.9 Å, 3.03 Å, 2.62 Å) dont l'intensité diminue en présence du sable. Cette diminution est due à la consommation de la portlandite produite lors de l'hydratation de C2S et C3S par le sable finement broyé. Ce résultat est intéressant puisqu'il prouve la réactivité pouzzolanique du sable de finesse 20µm. En effet, ces résultats sont en parfait accord avec ceux de l'étude faite par Guettala et al.[26].

5. Conclusion

A la lumière des essais réalisés, cette étude nous a permis d'extraire certains nombres de points majeurs méritant d'être soulignés :

- ✓ Les résistances en compression augmentent lors de la substitution du ciment par le sable traduisant ainsi l'amélioration de la compacité par trois effets qui agissent simultanément et de manière complémentaire : effet physique, physico-chimique et chimique (pouzzolanique).

- ✓ Malgré sa structure cristalline, le sable présente une réactivité pouzzolanique : en présence du sable mélangé au ciment, il y a fixation de chaux par les grains de silice pour former du silicate de calcium hydraté (C-S-H).

- ✓ Le sable joue un rôle bénéfique sur les propriétés mécaniques du ciment jusqu'à des teneurs de 20% avec un effet optimum pour un pourcentage de 10% et une finesse de 20µm.

- ✓ Possibilité de valorisation du sable finement broyé dans l'industrie cimentaire et obtention des bétons hautes performances (BHP).

- ✓ L'utilisation du ciment prémélangé au sable finement broyé est un excellent moyen pour diminuer les émissions de dioxyde de carbone CO₂, améliorer les propriétés physico-mécaniques, la déformabilité et la durabilité du béton sans augmentation notable des coûts.

6. Références bibliographiques

1. S. Guettala, *Contribution à l'étude de l'influence de l'ajout du sable de dune finement broyé au ciment, sur les performances physico-mécaniques, la déformabilité et la durabilité du béton*, Thèse de Doctorat de l'Université Mohamed Khider – Biskra, p7 (2012)
2. G. Menéndez, V. Bonavetti, E.F. Irassar, «*Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag*». Cement and Concrete Composites, **25**, 1, p.61-67 (2003)

3. P.C. Aitcin, «*Bétons, Hautes Performances*». Édition EYROLLS, Paris, 683 (2001)

4. M. Buil, «*Comportement physico-chimique du système ciment-fumées de silice*». Annales de l'ITBTP, Paris, 483, 19-29 (1990)

5. NF EN 196-1., «*Méthodes d'essais des ciments, Partie 1: Détermination des résistances mécaniques*». Indice de classement, Statut: Norme homologuée. Août, p.15-471 (1995)

6. NE EN 196-3., «*Méthodes d'essais des ciments, partie 3: Détermination du temps de prise et de la stabilité*», Août (1995)

7. A. Bascoul, «*State of the art report - Part 2: Mechanical microcracking of concrete*». Materials and Structures, **29**, 2, p.67-78 (1996)

8. A. Boudchicha, «*Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons*». Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, (2007)

9. M. Cyr, «*Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologiques des matrices*». Thèse de Doctorat de l'INSA de Toulouse, (1999)

10. M. Cyr, P. Lawrence, E. Ringot, «*Efficiency of mineral admixtures in mortars, quantification of physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength*». Cement and Concrete Research, **36**, 2, p.264-277 (2006)

11. M. Cheikh-Zouaoui, «*Contribution à l'étude de la cinétique d'hydratation au jeune âge des bétons à hautes résistances*». Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, (2008)

12. G. Cheng-Yihuan, R.F. Feldman, «*Hydration reactions in Portland cement silica fume blends*». Cement and Concrete Research, **15**, 4, p.585-592 (1985)

13. A. Goldman, A. Bentur, «*Bond effects in high silica-fume*». ACI Journal of Materials, **86**, 440 (1989)

14. Y. Wang, G. YE, «*Influence on microstructure of micronized sand as cement replacement in cementitious materials*». Journal of Wuhan University of Technology, **32**, 17, p.152-157 (Sept.2010)

15. J.C. Benezet, A. Benhassine, «*The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powder*». Powder Technology, **103**, 1, p.26-29 (1999)

16. A.M. Neville, «*Propriétés des bétons*». Traduction CRIB, Editions Eyrolles, Paris, 806 (2000)

17. M. Cyr, P. Lawrence, E. Ringot, «*Mineral admixtures in mortars, quantification of the physical effects of inert materials in relation on short term hydration*». Cement and Concrete Research, **35**, 4, p.719-730 (2005)

18. M. Cyr, P. Lawrence, E. Ringot, Carles-Gibergues, «*Variation des facteurs d'efficacité caractérisant les additions minérales*». Materials and Structures, **33**, 7, p.466-472, (2000)

19. U. Costa, M. Facoetti, F. Massaza, Dans Proc. Of the Int. RLEM Symp., «*Admixtures*

for concrete improvement properties», Édité par ; E. Vazquer, Chapman et Hall, Barcelona, Spain, 392-401 (1990)

20. U. Costa, F. Massaza, «*From materials science to construction materials engineering*»,

Proc. 1st Int. Rilem congress, **1**, 159, Versailles (1987)

21. K. Arroudj, M.N. Oudjit, «*Influence du sable de dune finement broyé sur l'hydratation des ciments*», 2^{ème} Colloque Maghrébin en génie civil, Biskra, Algérie les 10 et 11 Décembre, 119-127 (2002)

22. K. Arroudj, M.N. Oudjit, M. Lanez, M.T. Carayon, «*Influence des ajouts siliceux sur la compacité des mortiers et bétons*». Séminaire CETEDUB I. 24, 25, 26 Mai à L'USTHB, 291-298 (2004)

23. K. Arroudj, M.N. Oudjit, M. Lanez, M.T. Carayon, «*Mise en évidence par diffractométrie aux rayons X des C-S-H de seconde génération*». 1^{ère} séminaire sur les technologies du béton, le béton, perfection et incertitudes, 18-19 Septembre - Hôtel Hilton Alger, 1-8 (2004)

24. K. Tkacova, N. Stevulova, Powder Technol. **52**, 161-166 (1987)

25. F. De Larrard, *Formulation and properties of concrete with high performance*, Rapport de Recherche L.P.C n°_149, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées:

Paris, France Mars; (1988)

26. S. Guettala, B. Mezghiche, *Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing dune sand powder*, Construction and Building Materials **25**, 1263-1269 (2011)