

Samozagęszczające się zaprawy, zawierające granulowaną piankę szklaną: wpływ otwartej porowatości na właściwości reologiczne i fizykomechaniczne

Foamed glass granulated-based self-compacting mortars: open-porosity effect on rheological and mechanical properties

S. Lecheb¹, A. Chellil¹, K. Chahour², B. Safi^{3,*},

¹Mechanical Engineering Department, Faculty of Technology, M'hamed Bougara University of Boumerdes, Algeria

²Civil Engineering Department, Faculty of Construction Engineering, Mouloud Mammerie University of Tizi Ouzou, Algeria

³Research Unit: Materials, Process and Environment, Faculty of Technology, M'hamed Bougara University of Boumerdes, Algeria

*Corresponding author: B. Safi, e-mail: safi_b73@univ-boumerdes.dz

Streszczenie

Piankę szklaną stosuje się ostatnio, jako kruszywo do produkcji lekkich betonów. Lekkość betonu jest spowodowana znaczną porowatością granulowanej pianki szklanej, która ma zamknięte pory i gładkie powierzchnie. W związku z tym w tej pracy zastosowano granulowaną piankę szklaną (GPS) z otwartą porowatością, do uzyskania lekkich, samozagęszczających się zapraw. GPS otrzymano z proszku szklanego – stłuczki szklanej i „pieniącego się” dodatku, którym był wapień. W związku z tym zastosowano prażenie w 850°C, w ciągu 20 minut. Następnie otrzymano piasek, stosując kruszenie i przesiewanie przez sito 5 mm. Z kolei przygotowano samozagęszczające się zaprawy, z drobnym kruszywem w formie piasku i inne zaprawy z granulowaną pianką szklaną, zastępując nią piasek, w stosunku objętościowym 30%, 50% i 100%. Następnie zbadano właściwości reologiczne – płynność i fizyko-mechaniczne zapraw, a mianowicie gęstość i porowatość, w oparciu o absorpcję wody. Badanie strefy przejściowej – matryca cementowa / granule GPS wykazało, że otwarta porowatość GPS – piasek, sprzyjała adhezji z matrycą cementową, bez segregacji faz cementowych. Natomiast stwierdzono zmniejszenie wytrzymałości na ścislenie zapraw, o szczególnej lekkości. Należy podkreślić, że ta ostatnia właściwość ma w budownictwie duże znaczenie.

Słowa kluczowe: granulowana pianka szklana, kruszywo z pianki, lekka zaprawa, płynność, gęstość, wytrzymałość mechaniczna, strefa przejściowa zaczyn/pianka szklana

Summary

The foamed glass is currently used in the manufacture of concretes as aggregate to produce lightweight concrete. The lightness of the concrete is assured by the important porosity of foamed glass granulates [GFG], however, they have a closed porosity with a smooth surface. In this respect, this study aims to use foam glass granulates with open-porosity, to produce lightweight self-compacting mortars. GFG were prepared from the glass powder - glass cullet and foaming agent – limestone, according to the current applied process for GFG – heat treatment at 850°C for 20 min. Then from GFG the sand fine aggregate – 0/5 mm was prepared by crushing and sieving. The self-compacting mortars were obtained using natural sand as fine aggregate and other mortars with granulated foam glass substituting sand at volume ratios: 30, 50 and 100 %. Rheological tests of fluidity and physical properties, i.e. density and porosity, by measuring absorption of water and mechanical tests were carried out on studied mortars. The interface of cementitious matrix/GFG granules study shows that open-porosity of GFG sand has favored adhesion to cement matrix, without causing the segregation of the mortar phases. Also, the decrease of the compressive strength for mortars exhibiting a specific lightness, was found. It should be noted that the latter property is very important in construction.

Keywords: GFG-aggregates, lightweight mortar, fluidity, bulk density, mechanical strength, cement matrix – aggregates interface

1. Wprowadzenie

Odpady ze szkła są powszechnie wykorzystywane do jego produkcji, jednak mogą być także stosowane do otrzymywania lekkiego granulatu. W tym celu odpadowe szkło w formie proszku jest mieszane, nadaje mu się kształt i otrzymuje spienione granule szklane (4, 6, 8-10, 21). W niektórych przypadkach, przy zastosowaniu specjalnych metod, wytwarza się spienione granule szklane o gładkiej powierzchni i bardzo małej gęstości nasypowej – 300-800 kg/m³. Szczególne właściwości tego kruszywa pozwalają otrzymywać niezwykle lekkie materiały lub betony o małej gęstości, małym przewodnictwie ciepła, dobrych właściwościach mechanicznych, które są równocześnie przyjazne dla środowiska (7, 22 - 24). Już dawno badania wykazały, że granulowane, spienione szkło można stosować do produkcji niezwykle lekkiego betonu, który jest bardzo przydatny w praktyce, jako nowy materiał budowlany do przenoszenia obciążeń i do izolacji cieplnej (7, 22 - 24).

Badania kontynuowano w celu rozwoju technologii tego betonu, jednak przy zmniejszeniu kosztów jego produkcji. Rzeczywiście, zbudowanie konstrukcji z mniej kosztownego betonu, o wymaganej jakości, podlega dwóm kryteriom, a mianowicie: zmniejszenie zużycia energii i czasu. Samozagęszczający się beton lub „ciekły” beton może być tu rozwiązaniem. W tym celu przeprowadzono badania z lekkimi betonami, z kruszyw lekkich. Wyniki wykazały, że zastosowanie kruszywa ze spienionego szkła, zapewnia otrzymanie niezwykle lekkich betonów (4, 11, 12, 20). Jednakże, te prace zostały wykonane na tradycyjnych betonach, natomiast badania z zastosowaniem lekkich, samozagęszczających się betonów ze spienionym szkłem, są raczej ograniczone. Ponieważ ten beton ma szczególne właściwości, w związku ze specjalną mieszanką, a mianowicie o dużej ciekłości, zdolności do zagęszczania pod wpływem siły ciężkości i trwałości składników matrycy cementowej – zaczynu i kruszywa. Biorąc pod uwagę szczególność samozagęszczających się betonów, lekkość kruszywa może zakłócać właściwości świeżych betonów, z powodu niezwyklej lekkości spienionego kruszywa ze szkła. Dodatkowo, niektóre kruszywa mają bardzo gładką powierzchnię, co może także powodować problemy stałości kształtu betonu, a mianowicie segregacja, lub zdolność do wypełniania form przez beton. Wcześniej opublikowane badania wykazały wspólny problem związany z zastosowaniem przeciętnego i lekkiego kruszywa, w celu zapewnienia ciekłości w świeżym stanie, stwardniałego betonu o małej gęstości, bez segregacji (1, 12, 17). Inni autorzy także stwierdzili, że kształt kruszywa sprzyja ciekłości betonu i cięższe kruszywo znacznie ułatwia urabialność, w porównaniu z lekkim kruszywem (12). Trzeba podkreślić, że porowatość, która jest inną właściwością lekkiego kruszywa, zwiększa absorpcję wody, co utrudnia oznaczenie jej potrzebnej objętości (1, 3, 14, 17).

Ostatnie badania prowadzą do wniosku, o celowości stosowania granulowanego, spienionego szkła w betonie, do zastępowania naturalnego kruszywa (16, 17). Autorzy próbowali rozwinąć stosowanie lekkiego betonu ze spienionym kruszywem, stosowanym w formie drobnego i grubego kruszywa, wytwarzanego z odpadowego szkła, flaszek o różnych kolorach. Oceniono wpływ różnych

1. Introduction

Glass cullet is commonly reused and recycled for the manufacture of float glass or foamed glass. However, it can be also used for manufacturing of the lightweight aggregate. Indeed, the glass waste powder is mixed, shaped and processed to give the expanded glass granules (4, 6, 8, 9, 10, 21). In some cases, it also can be produced by using special production methods to obtain foam glass granulates with a smooth surface and very low bulk density – 300-800 kg/m³. The very special properties of these aggregates made them possible to obtain ultra-light materials or concretes used with low density, low thermal conductivity, good mechanical properties and eco friendliness (7, 22, 23, 24). Previous studies have shown that granulated foam glass can be used to produce an ultra-lightweight concrete, which is very suitable to be used in practice as a new building material, as load bearing element and thermal insulator (7, 22, 23, 24).

The research continues to develop concrete, while reducing its production costs as well as the price. Indeed, construction of the structures with less costly concrete and of a required quality is essentially governed by two criteria, namely energy reduction and turnaround time. However, self-compacting concrete or fluid concrete may be a solution, to gain less energy and time. In this respect, some studies have been carried out on lightweight concretes, based on lightweight aggregates. Results showed that the use of foamed glass aggregates gives rise to the ultra-lightweight, concretes (4, 11, 12, 20). However, these works were performed on traditional concretes and the studies dealing with light-weight, self-compacting concretes, with foam glass aggregate are rather limited. Since this concrete is particular due to its special properties at fresh state, namely fluidity, compactness of filling and the stability of both the matrix concrete components and the aggregates. Taking into account the peculiarity of self-compacting concretes, light aggregates can disturb the fresh state properties of concrete, due to the lightness of foam glass aggregates. In addition, some aggregates have a very smooth surface which can also cause problems of concrete stability, such as segregation or the filling capacity of concrete in molds. Previously published studies have shown a common problem in relation to the use of conventional and lightweight aggregates to ensure flowability of the mix fresh state with low density of hardened concrete, without segregation (1, 12, 17). Other authors have also reported that the shape of aggregates favored the flowability of concrete and the heavier aggregates tend to facilitate considerably the workability, compared to the light aggregates (12). It should be noted that the porosity which is another property of lightweight aggregates increases the water demand which makes it difficult to estimate the required water volume (1, 3, 14, 17).

Recent studies have been conducted using granulated foamed glass in concrete, as volume replacement of natural aggregates (16, 17). The authors tried to develop the lightweight concrete with expanded aggregate, used as fine and coarse aggregates, produced from glass wastes of bottles, with different bottles colors. The effect of different proportions of coarse foam granules - 30%,

dodatków grubego, spienionego kruszywa – 30%, 40%, 50%, 60% i 100% oraz drobnego kruszywa – 5%, 10% i 15%, na właściwości świeżego i stwardniałego betonu (20). W obu przypadkach autorzy doszli do wniosku, że dodatek spienionego szkła nie ma znaczącego wpływu na urabialność mieszanek zapraw i betonów. W rzeczywistości niewielkie zmniejszenie ciekłości zaprawy lub urabialności betonu stwierdzili Limbachiyy i in. (16). W innych przypadkach stwierdzono znaczne zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie betonu lub zaprawy, gdy spienionym kruszywem szklanym zastąpiono kruszywo naturalne. Także badania wytrzymałości wykazały, że do 30% kruszywa grubego lub do 5% piasku, zastąpienie przez spienione szkło, ma na ogół nieistotny wpływ na mechaniczną wytrzymałość betonu.

Zgodnie z tym przeglądem literatury można stwierdzić, że jest mało badań, w których stosowano pokruszone, spienione szkło jako kruszywo drobne, to jest zastępujące piasek do wytwarzania betonu o dobrej urabialności, takiego jak samozagęszczający się beton. Uwzględniając kształt geometryczny i porowatość granул ze spienionego szkła, które różnią się od naturalnego piasku, podjęto badania zastosowania granulowanego szkła o otwartej porowatości, do wytwarzania lekkich, samozagęszczających się zapraw.

2. Materiały i metody

2.1. Surowce

W tych badaniach stosowano cement portlandzki – CEM II/A 42.5N, składnik drugorzędny jako wapień, naturalny piasek o uziarnieniu 0–5 mm, o gęstości 2510 kg/m³, granulowane szkło spienione [GSS] i superplastyfikator, z grupy polikarboksylanów. Właściwości składników cementu – to jest cement i wypełniacz, podano w tablicy 1. Granulowane, spienione szkło otrzymano stosując obróbkę cieplną, prażąc w temperaturze 850°C mieszaninę proszku szklanego i wapienia, jako czynnika spieniającego (2, 5, 6), co pokazano na rysunku 1. Po otrzymaniu spienionego szkła z gęstością nasypową wynoszącą 220 kg/m³, pokruszono go w kruszarce szczękowej i przesiano przez sito 5 mm – rysunek 1. Rozkład ziarnowy granulowanego, spienionego szkła i naturalnego piasku pokazano na rysunku 2.

2.2. Składy zapraw i metody zastosowane w badaniach

W tej pracy wybrano do badań samozagęszczającą się zaprawę [SZ], o składzie dobranym z samozagęszczającego się betonu, stosując metodę projektowania zaprawy równoważnej do betonu, podaną przez Schwartzentrubera i Catherine, oraz przez Safi i in. (18,19). Zgodnie z tą metodą grube kruszywo zastąpiono drobnym kruszywem, którym był piasek, o tej samej powierzchni właściwej. Pokruszonym, spienionym szkłem zastępowano piasek, w ilościach 30, 50 i 100% objętościowych. W tablicy 2 podano szczegóły mieszanek zapraw (18). Stosunek w/c = 0,45 i mialkość cementu były stałe.

40%, 50%, 60% and 100% and fine aggregates - 5%, 10% and 15% on the fresh and hardened concrete properties, have been evaluated by Vieli (20). In both cases, the author concluded that the incorporation of foamed glass did not have a great influence on the workability of the mortar/concrete mixtures. Indeed, a slight decrease in the mortar fluidity or the concrete workability was found by Limbachiyy et al. (16). Otherwise, a significant reduction of the compressive strength of concrete and mortar was found when foam glass aggregates were used, replacing natural aggregate. Also, the compression test results showed that up to 30% of coarse aggregates or 5% of foam glass fine aggregate, replacing sand, generally had a negligible effect on the strength of concrete.

According to this literature review, it was found that there are few studies dealing with the use of crushed foamed glass as a fine aggregate, substituting sand, to produce self-compacting concrete. Given the geometric form and the porosity of foam glass granules, which differs from that of natural sand, the present study aims to use foamed glass granulates, with open-porosity, to produce lightweight, self-compacting mortars.

2. Experimental

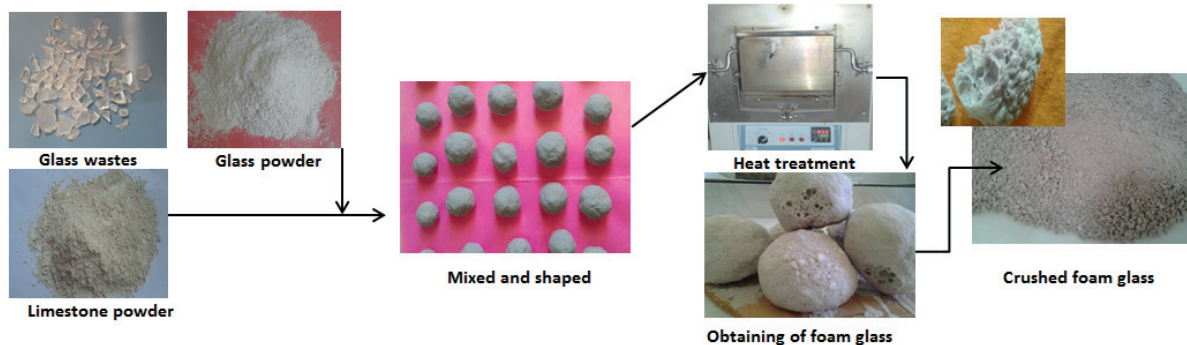
2.1. Materials

In this work, the Portland cement CEM II/A-L, 42.5N, limestone filler, natural sand 0-5 mm, 2510 kg/m³, granulated foamed glass and a superplasticizer of polycarboxylate type were used. Properties of the cement and limestone additive are given in Table 1. The granulated foamed glass was obtained by heat treatment at 850°C during 20 min of glass powder and limestone mixture, as a foaming agent (2, 5, 6) - Fig. 1. After obtaining foamed glass with a bulk density of 220 kg/m³, it has been crushed in a jaw crusher and sieved on the sieve 5 mm - Fig. 1. The particle size distribution of granulated foamed glass (GFG) and natural sand is presented in Fig. 2.

Tablica 1 / Table 1

CHEMICZNA I FAZOWA ANALIZA SKŁADNIKÓW CEMENTU I WAPIENIA
CHEMICAL ANALYSES AND SOME PROPERTIES OF CEMENT AND LIMESTONE

Skład chemiczny / Composition, %	Cement	Wapień / Limestone
SiO ₂ , %	23.71	3,95
Al ₂ O ₃ , %	46.34	0,20
Fe ₂ O ₃ , %	04.26	0,35
CaO, %	58.00	51.85
MgO, %	02.58	0.26
SO ₃ , %	01.61	0.02
K ₂ O + Na ₂ O, %	01.16	1.23
C ₃ S, %	54	-
C ₂ S, %	23	-
C ₃ A, %	6	-
C ₄ AF, %	12	-
Density / Gęstość, g/cm ³	3.14	2.72
Specific surface/ Powierzchnia ,m ² /kg	350	600



Rys. 1. Przygotowanie granulatu z pianki szklanej

Fig. 1. Preparation steps of GFG-granules, used as sand

2.3. Przygotowanie próbek

Do przygotowania zapraw używano mieszarki o pojemności 5 L. Najpierw wlewano do niego wodę i 2/3 superplastyfikatora, do których dodawano cement z wypełniaczem. Tę mieszankę mieszano powoli 1,5 minuty, następnie zbierano warstwę powierzchniową, a resztę mieszano znowu 1,5 minuty. Z kolei dodawano do miksera resztę superplastyfikatora i połowę piasku, lub granulowane, spienione szkło [GSS] i piasek. Tę zawartość mieszano powoli 1 minutę. Z kolei dodawano resztę superplastyfikatora i drugą część 1/3 piasku, lub GSS plus piasek i mieszano z małą prędkością 1 minutę. Na koniec dodawano pozostały piasek lub GSS plus piasek w ilości 1/3 szkła i mieszano powoli 30 sek.

2.4. Metody badań

Po zakończeniu mieszania zaprawy oznaczano jej ciekłość, za pomocą mini-stożka. Miał on górną średnicę wynoszącą 70 mm, dolną 100 mm i wysokość 60 mm. Próbki do badań w formie beleczek miały wymiary 40x40x160 mm³; przygotowywano je dla każdego składu zaprawy. Próbki dojrzewały jeden dzień w formach w wodzie, w temperaturze 21±1°C.

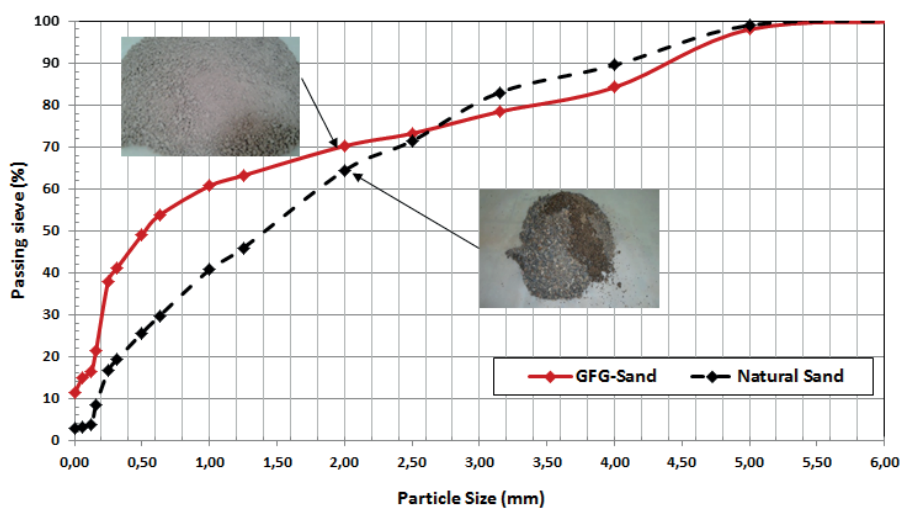
Tablica 2 / Table 2

SKŁAD ZAGĘSZCZAJĄCEJ SIĘ ZAPRAWY

COMPOSITION OF SELF-COMPACTING MORTAR

Components / Składniki	kg/m ³
Cement	664
Limestone filler / Wypełniacz wapienny	66.4
Sand / Piasek	1372
Water / Woda	276
Superplasticizer / Superplastyfikator	10.6
Water/binder ratio / współczynnik wodno/spoiwowy	0.38

The sand is substituted by the GFG-sand at volumes ratios 30, 50 and 100%. / Piasek może być zastąpiony przez granulowane, spienione szkło



Rys. 2. Rozkład wielkości ziaren piasku naturalnego oraz piasku z pianki szklanej

Fig. 2. Particle size distribution of sand and GFG-sand

2.2. Mortar composition and test methods

In this study, the chosen mortar is a self-compacting mortar (SCM), established from the composition of self-compacting concrete by using the design method of concrete equivalent mortar (18,19). According to this method, the coarse aggregate was replaced by fine aggregate which was sand of the similar specific surface. In the series of three specimens, the crushed foam glass was used as a sand replacement at volume ratios 30, 50 and 100%. In Table 2 the composition of the reference mortar is given (18). The water to binder ratio was constant, equal to 0.45, as well as the fine aggregate to cement ratio was also constant.

2.3. Samples preparation

For the preparation of the mortar, the cement mortar mixer of 5L capacity was used. Firstly the water and 2/3 superplasticizer were poured into the mixer container and then the binder mixture i.e. cement + limestone filler was added. This mixture was mixed at slow speed for 1 min and 30 sec, then the edge was scraped and the content was mixed for 1 min 30 sec. Then the 1/3 of superplasticizer and 1/3 of sand, or GFG plus sand, were poured into the mixer. This content was mixed at low speed for 1 minute. After this

Przeprowadzono szereg pomiarów próbek w celu oceny zmiany fizycznych właściwości, a mianowicie gęstość nasypową, porowatość oraz absorpcję wody, a także właściwości mechaniczne, obejmujące wytrzymałość na zginanie i na ściskanie.

Porowatość oznaczono na podstawie pomiaru nasyconych wodą i masy wysuszonych próbek. Dwie połówki próbek 40x40x80 mm³, po oznaczeniu wytrzymałości na zginanie, służyły do pomiaru wytrzymałości na ściskanie po 14 i 28 dniach.

Pomiary suchej masy próbek uzyskano susząc je w temperaturze 60°C do stałej masy. Natomiast pozorną objętość próbek oznaczano za pomocą piknometru.

Pomiar absorpcji wody oznaczono stosując te same próbki, które służyły do badania porowatości, zgodnie z normą ASTM C642 (ASTM C642, 1993). Dwie połówki pryzmatycznych próbek [40x40x80 mm³] badano po 28 dniach dojrzewania.

Po wysuszeniu próbek w piecu do stałej masy, pomiar ten zapisywano. Następnie zanurzano je w wodzie w 20°C, aż do osiągnięcia stałej masy. Tę stałą masę traktowano jako nasylenie wodą po 48 h. Absorpcję wody uzyskano jako stosunek ilości wody zaabsorbowanej przez próbkę do jej wysuszonej w piecu masy.

Trzy-punktowy pomiar wytrzymałości na zginanie i jedno osiowy na ściskanie, przeprowadzono po 2 i 28 dniach, na próbkach dojrzewających w wodzie. Do pomiaru wytrzymałości na zginanie stosowano klasyczną maszynę o wielkości obciążenia 150 kN, na beleczkach 40x40x160 mm³, zgodnie z normą ASTM C348 (ASTM C642, 2008). Po oznaczeniu tej wytrzymałości na trzech próbkach, uzyskane ich połówki wykorzystano do pomiaru wytrzymałości na ściskanie, za pomocą prasy hydraulicznej 3000 kN, stosując dwie płytki stalowe o szerokości 40 mm, zgodnie z normą ASTM C349 (ASTM C642, 2008).

Do pomiarów za pomocą ultradźwięków wykorzystano fale impulsów ultradźwiękowych [The UPV testing-ASTM C597-97], przy czym stosowano próbki po 28 dniach dojrzewania [ASTM C597, 1993].

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Urabialność samozagęszczających się zapraw, normowe badanie płynięcia

Samozagęszczające się zaprawy powinny być płynne, bez dodatkowych czynności – to znaczy bez wstrząsania lub wibracji. Na rysunku 3 pokazano rozwój płynności zapraw, w funkcji zastępowania piasku granulowanym, spienionym szkłem [GSS], w stosunku 30, 50 i 100%. Zgodnie z tym rysunkiem płynność maleje w funkcji zastępowania piasku przez piankę szklaną. Jest to prawdopodobnie spowodowane porowatością GSS – piasku, co powoduje absorpcję pewnej ilości wody zarobowej – rysunek 4. Stwierdzono, że te same zjawiska obserwowali inni autorzy (12, 15). Na obrazie 5, otrzymanym pod mikroskopem skaningowym, są dobrze

mixing, the remaining 1/3 superplasticizer and the 2nd part of 1/3 sand, or GFG plus sand, were added and mixed at slow speed for 1 minute. At the end, the remaining sand or the GFG plus sand, equal 1/3 of glass and mixed for 30 secs, at slow speed.

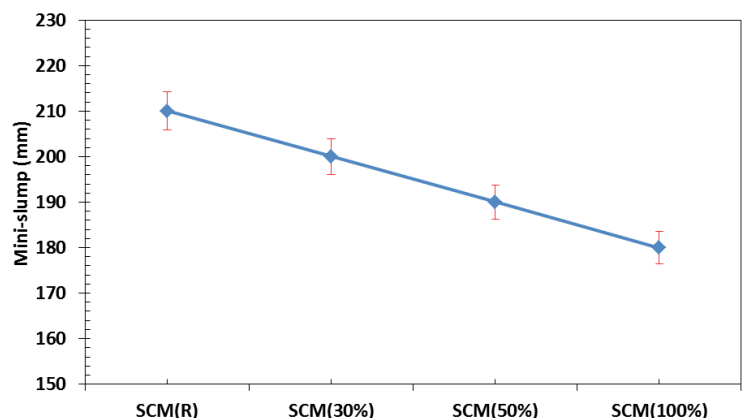
After preparation of the mortar mix, fluidity was evaluated by using the mini-cone. It has a top diameter of 70 mm, a bottom diameter of 100 and the height of 60 mm. Then, prismatic 40x40x160 mm³ samples were prepared for each mortar composition. After one day of curing in the moist atmosphere in moulds, the samples were demoulded and stored in water at 21±1°C. Various tests and measurements were carried out in order to study the evolution of physical properties, namely bulk density, porosity and water absorption, as well as mechanical properties: the compressive and bending strengths.

2.4. Methods

Porosity was determined by the knowledge of the saturated and oven-dried mass of samples. Two -prismatic 40x40x80 mm³ samples were tested after 14 and 28 days of curing. The dried sample mass was obtained after drying the sample in the oven at 60°C, until constant mass. The apparent volume of each sample was determined, using a pycnometer.

Water absorption test was carried out on the same samples used for the porosity test, according to ASTM C642 (ASTM C642, 1993). Two half-prismatic samples - 40x40x80 mm³ were tested, at the age of 28 days. The dried mass was obtained after drying the saturated sample in an oven at 60°C, until constant mass. The apparent volume of each sample was determined using the pycnometer. Then the oven-dried dry mass of each sample was recorded. Then, they were fully immersed in water at 20°C, until they achieved a constant mass. The constant mass was taken as the saturated mass of the sample, after 48 h. The absorption percentage was then obtained by the ratio of the amount of water absorbed by oven-dried mass.

Three-point bending test and uniaxial compression were carried out at 2 and 28 days, using water stored samples. The bending test was carried out using a classical machine with a capacity of 150 kN, on prismatic samples 40x40x160 mm³ according to ASTM



Rys. 3. Płynność samozagęszczających się zapraw z granulowanej pianki szklanej [GPS]

Fig. 3. Fluidity of self-compacting mortars with GFG-granulates

widoczne otwarte pory i ziarna z GPS jako piasku, co różni się od naturalnego piasku.

3.2. Gęstość nasypowa

Gęstość nasypową SZ oznaczoną po 28 dniach dojrzewania, pokazano na rysunku 6. Można stwierdzić, że gęstość nasypowa znacznie zmalała przy zastosowaniu piasku z GPS i zaprawy z GPS, która była lżejsza w przypadku zastąpienia 100% piasku [SZ 100%]. Osiągnęła ona minimalną wartość [1750 kg/m^3], gdy piasek został całkowicie zastąpiony. Jest to spowodowane większą gęstością piasku, w porównaniu do drobnego kruszywa z GPS. Takie wyniki uzyskało już szereg autorów (4, 12, 15). Ten spadek gęstości nasypowej jest prawdopodobnie spowodowany zastąpieniem cięższego materiału – piasku, lżejszym materiałem. W przypadku zastąpienia piasku przez GPS gęstość nasypowa zmalała o 33,6%. Rzeczywiście, jako przykład można podać pracę Khatib i in. (15), którzy stwierdzili, że gęstość betonu zmalała o 39%, w przypadku betonu zawierającego 100% spienionego szkła, w miejsce kruszywa grubego. Tak więc jeżeli kruszywo w naszych badaniach także zostało zastąpione w samozagęszczającej się zaprawie, to spadek gęstości można porównywać z wynikami tych autorów.

3.3. Absorpcja wody

Na rysunku 7 pokazano wpływ zawartości piasku z GPS na absorpcję wody przez zaprawy po 28 dniach. Wyniki te wykazują, że absorpcja wody wzrasta z zawartością GPS, zastępującej piasek. Jednak, w przypadku zastąpienia 100%, występuje znaczny wzrost absorpcji wody przez SZ – około 75%. Można to wyjaśnić dwoma czynnikami: całkowitą porowatością i otwartą porowatością GPS – piasku (4, 15). Rzeczywiście, otwarta porowatość jest rozważana jako całkowita porowatość, co znacznie zwiększa absorpcję wody przez zaprawę – rysunek 8.

3.4. Ultradźwiękowe badanie zapraw

Jest oczywiste, że cały materiał jest lżejszy, jeżeli jego porowatość wzrasta i równocześnie staje się lepszym izolatorem dźwiękowym. W tym przypadku rysunek 9 jasno pokazuje, że szybkość fali

C348 (ASTM C642, 2008). After the determination of bending strength of the three samples, the two parts of each prism were subjected to compressive strength measurement, by using the hydraulic press, with the capacity of 3000 kN, using the device consisting of two steel plates of 40 mm width, according to ASTM C349 (ASTM C642, 2008).

For the ultrasonic measurements, the ultrasonic pulse wave testing has been used – the UPV testing-ASTM C597-97 at the age of 28 days according to ASTM C597, 1993.

3. Results and discussion

3.1. Workability of SCMs – flow testing standard

Self-compacting mortars should be fluid, with a good implementation i.e. without shaking or vibration. Fig. 3 shows the evolution of mortars fluidity as a function of the sand substitution rate by GFG-sand at the ratios of 30, 50 and 100%. According to this Fig., the fluidity was decreasing, in the function of the substitution rate of sand by foam glass. This is probably due to the porosity of GFG-sand which causes the absorption of an amount of mixing water – Fig. 4. It is noted that the same results were obtained by the other authors (12, 15). Fig. 5 obtained using the SEM shows clearly the open-porosity and grains form of GFG-sand, which is different from natural sand.

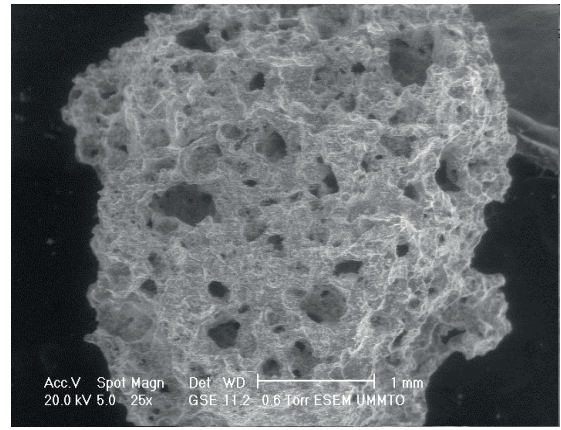
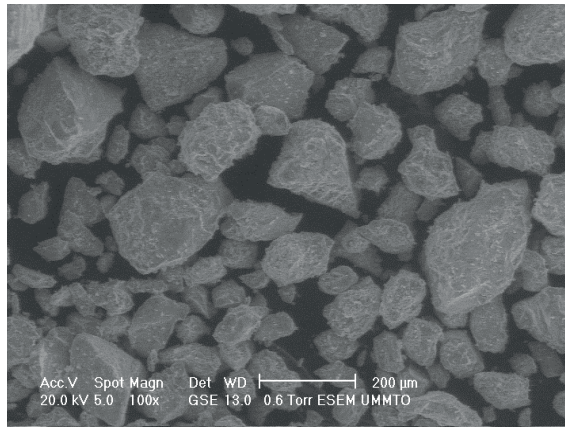
3.2. Bulk density

The bulk density of SCMs studied, measured after 28 days of curing, is given in Fig. 6. It can be noted that the bulk density has decreased considerably by using the GFG-sand and GFG-based mortar, which becomes lighter at 100% of sand substitution – SCM 100%. It reaches a minimum value which was 1750 kg/m^3 , when the sand was completely replaced. This is explained by the higher density of sand, compared to that of GFG fine aggregate. These findings were already obtained by several authors (4, 12, 15). This decrease in bulk density of mortars is probably due to the substitution of the heavier material, namely natural sand by the lighter material. In the case of total sand substitution by GFG-sand, the



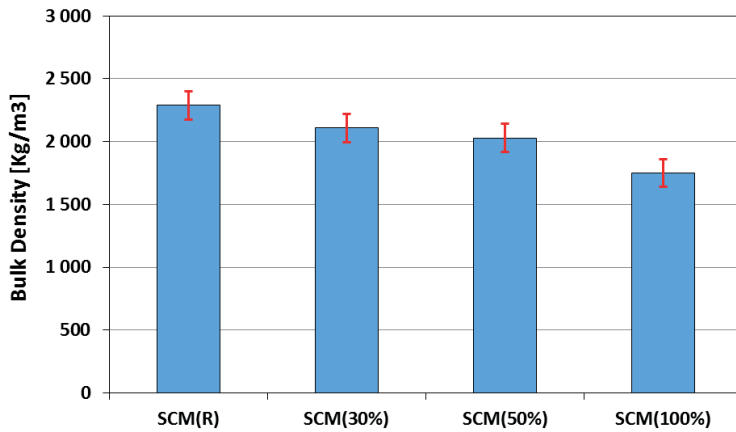
Rys. 4. Płynność badana za pomocą mini-stożka; [a] SZZ – 50%, [b] SZZ – 100%

Fig. 4. Fluidity test by mini-cone; (a) SCM(50%) (b) SCM(100%)



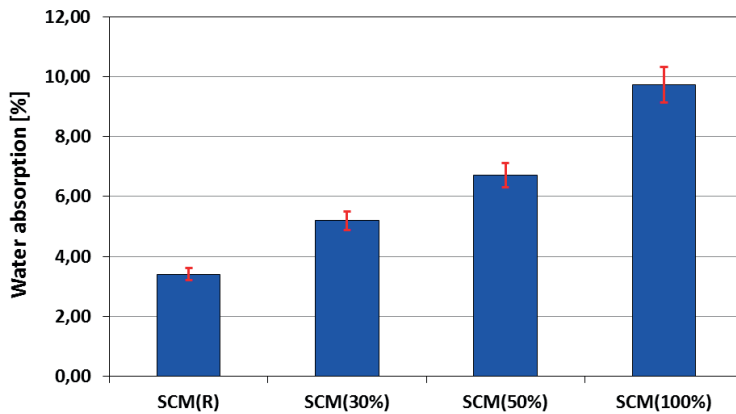
Rys. 5. Obrazy pod mikroskopem skaningowym: naturalny piasek NP [a] i piasek z GPS [b]

Fig. 5. SEM of the natural sand NS (a) and foam glass GFG sand (b)



Rys. 6. Gęstość nasypowa badanej SZZ

Fig. 6. Bulk density of SCMs studied



Rys. 7. Wpływ zawartości piasku jako GPS na absorpcję wody przez zaprawy

Fig. 7. Effect of GFG-Sand content on water absorption of mortars

przemieszczającej się w zaprawie maleje ze wzrostem poziomu zastępowania piasku przez GPS. Wynika to z porowatości zaprawy, która ma wpływ opóźniający na szybkość propagacji fali, co powoduje wzrost izolacyjności i zmniejszenie rozprzestrzeniania się hałasu, przez materiał. Jak to pokazano na rysunku 9 zmniejszenie dźwięku wynosi około 20% gdy stosuje się piankę szklaną jako kruszywo drobne, w samozagęszczającej się zaprawie. Różnice

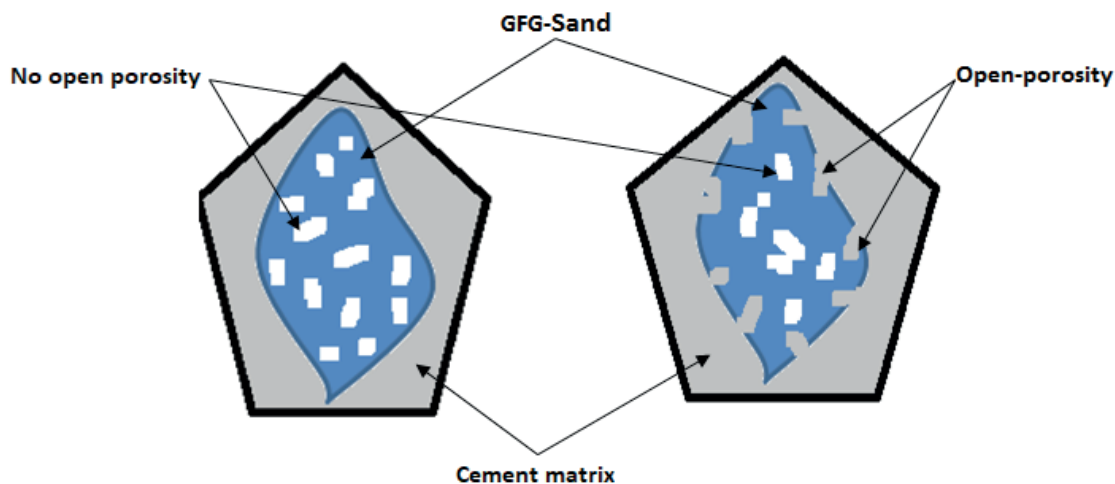
bulk density was reduced to 33.6%. Indeed, as an example, results obtained by Khatib et al.(15) showed that the density of concrete was diminished by 39% for concrete containing 100% of foamed glass, as coarse aggregates. Thus, if the aggregates of our study are used in self-compacting concrete, it can be obtained lighter concrete, able to be compared to those obtained by the cited authors.

3.3. Water absorption

Figure 7 shows the content effect of GFG-sand on water absorption of mortars, obtained at 28 days. The results illustrate that water absorption increases with the content of sand replacement by GFG-sand. However, at 100% of replacement, a considerable increase of water absorption of SCMs – about 75%. This is can be explained by two factors: the total porosity and the open-porosity of GFG-sand (4, 15). Indeed, the open-porosity is considered as connected porosity which greatly promotes the water absorption of mortar – Fig. 8.

3.4. Ultrasonic test of mortars

It is evident that the total material is lighter as its porosity increases and thus becomes more phonic insulating. For this purpose, the figure 9 clearly shows that the wave speed propagating inside the mortar decreases with increasing in replacement level of sand by the GFG-sand. This is showed by the mortars porosity which has a retarding effect on the wave speed propagation which makes the mortar more insulating and thus reduces the propagation of noise through the material. As it can be seen in Figure 9, the sound reduction is about 20% by using the foam glass as fine aggregates in a self-compacting mortar. The difference in sound velocity is mainly due to the sand nature used. However, it was reported that this improvement of phonic insulation is also due to the open-porosity of GFG-granules, used in mortar.



Rys. 8. Wpływ otwartej porowatości piasku GPS z zaczynem cementowym

Fig. 8: Effect of open-porosity of GFG-sand with cement paste

w zmniejszeniu dźwięku są głównie spowodowane rodzajem stosowanego piasku. Jednak, są także doniesienia, że do tego zwiększenia izolacyjności przyczynia się także otwarta porowatość granul GPS, zastosowanej w zaprawie.

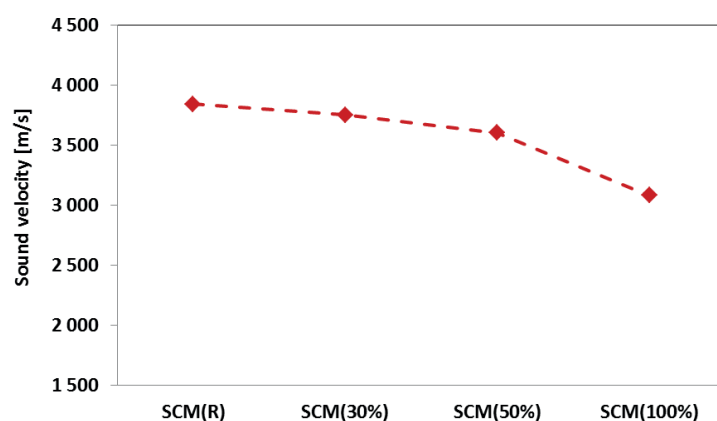
3.5. Wytrzymałość na ściskanie

Wyniki pomiarów wytrzymałości na ściskanie pokazano na rysunku 10. Wytrzymałość na ściskanie samozagęszczających się zapraw uległa znacznemu zmniejszeniu ze wzrostem zawartości piasku z GPS, po wszystkich okresach dojrzewania – po 2 i 28 dniach. Dla 30 i 50% zastąpienia piasku przez GPS, zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie wyniosło odpowiednio 4% i 30%. Ten wynik wydaje się lepszy od cytowanego w literaturze (15). Rzeczywiście, porównując do zaprawy kontrolnej, aż 47% zmniejszenia wytrzymałości na ściskanie, stwierdzono dla zaprawy przygotowanej z zastąpionego, naturalnego piasku (4).

Zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie SZ może być spowodowane przez otwartą porowatość GPS, zastępującej piasek. Ten wynik nie został otrzymany przez szereg autorów: (4, 12), ponieważ granulat, z punktu widzenia GPS, ma szczególne właściwości i pochodzenie tej ostatniej. Rzeczywiście, ta forma GPS, którą pokazano na rys. 8, wprowadza porowatość otwartą, która wiąże się z adhezją i interakcją z zaczynem cementowym.

3.6. Strefa przejściowa matrycy cementowej z GPS

Na rysunku 11 pokazano strefę przejściową GPS – spoiwo wybranych próbek, zawierających 100% piasku z GPS. Zgodnie z tym rysunkiem kształt i porowatość ziaren GPS sprzyjały adhezji z matrycą cementową. Stwierdzono, że właściwości GPS – piasek wykazują dobrą adhezję do matrycy ze spoiwa w strefie przejściowej i są bardzo dobrze „zakotwiczone” w zaczynie cementowym. Rysunek ten pokazuje jasno także znaczenie otwartej porowatości spienionego szkła w spoiwie cementowym, a w szczególności w samozagęszczającej się zaprawie.

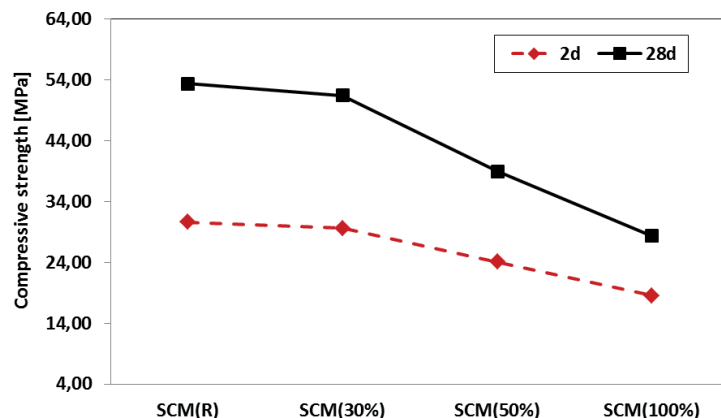


Rys. 9. Zmiany szybkości fali ultradźwiękowej w samozagęszczającej się zaprawie po 28 dniach

Fig. 9. Evolution of the ultrasonic wave speed in self-compacting mortar at 28 days

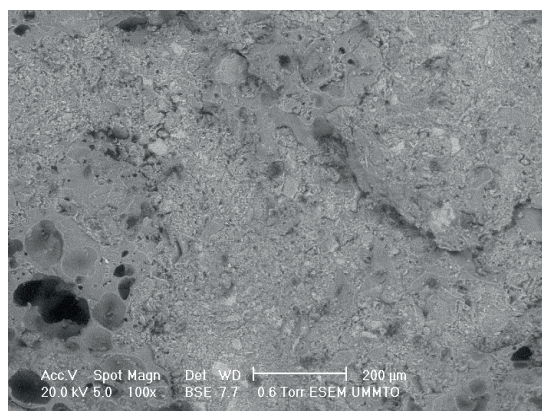
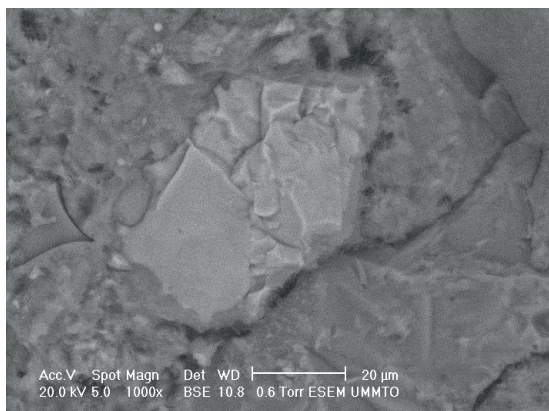
3.5. Compressive strength

Results of the compressive strength test are shown in Fig. 10. The compressive strength of self-compacting mortars considerably decreased with increasing in GFG-sand content, at all curing times - 2 and 28 days. For 30 and 50% of sand substitution by



Rys. 10. Zmiany wytrzymałości na ściskanie badanych zapraw

Fig. 10. Compressive strength evolutions of studied mortars



Rys. 11 Obrazy pod skaningowym mikroskopem elektronowym strefy przejściowej: GPS piasek; [1] Zaczyn cementowy, [2] naturalny piasek, [3] GPS-piasek, [4] otwarta porowatość, [5] strefa przejściowa GPS piasek z zaczynem cementowym

Fig. 11. SEM of GFG sand-cement interface; [1] Cement paste [2] natural sand [3] GFG-sand [4] un-open-porosity [5] Interface GFG sand with cement paste

4. Podsumowanie

Ta praca wykazała wpływ otwartej porowatości pianki szklanej, zastosowanej jako drobne kruszywo, w samozagęszczających się zaprawach. Uzyskane wyniki pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- Otwarta porowatość piasku GPS znacznie zmniejszyła płynność badanych zapraw, jako funkcja zastępowania piasku przez piankę szklaną. Zakładając, że samozagęszczająca się zaprawa, lub beton powinny mieć dużą płynność – zdolność do płynięcia przy stosowaniu, która może być poprawiona przez dodatek superplastyfikatora.
- Lekkość zapraw uległa znacznej poprawie przy zastosowaniu GPS – piasek. Zaprawy oparte na GPS są lżejsze, a przy 100% zastępowaniu piasku osiągają 1750 kg/m^3 .
- Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach samozagęszczających się zapraw zawierających 100% GPS, w miejsce piasku, osiąga 28 MPa.
- Dla lekkiej zaprawy, o gęstości nasypowej $1,75 \text{ kg/m}^3$, ta wytrzymałość może być przyjęta, do szczególnych zastosowań. 50% dodatku GPS pozwala także uzyskać zaprawę o lepszej wytrzymałości.
- Otwarta porowatość i forma tego rodzaju pianki szklanej, faworyzuje fizyczną adhezję i interakcję z matrycą cementową. W tej pracy analiza mikroskopowa strefy przejściowej GPS – cement, wykazała występowanie fizycznej adhezji pianki szklanej z granulkami spienionego szkła z zaczynem cementowym. Natomiast, otwarta porowatość GPS – piasek, także faworyzowała wnikanie wody.

Podziękowania

Autorzy pragną wyrazić podziękowania do pracowników Laboratorium Fizyki i Chemii Uniwersytetu Mouloud Mammeri w Tizi-Ouzou za ich współpracę i towarzyszenie w wykonywaniu analiz pod skaningowym mikroskopem elektronowym.

GFG-sand, the rate reduction of compressive strength was 4% and 30% respectively. This result is considered better compared to those obtained in a review of Khatib et al. (15). Indeed, compared to control mortar, up to 47% reductions in compressive strength were found for the mortar prepared by replacement of the natural sand (4).

Reduction of the compressive strength of SCMs might be due to the open-porosity of GFG-sand. This result is not the case that those obtained by several authors (4,12), because, this form of GFG which is shown in Fig. 8, have an open porosity which promotes the adhesion and the interaction with cement paste.

3.6. Interface of cement matrix/GFG-granules

In Fig. 11 the microstructure of GFG – binder matrix interface of chosen samples containing 100% GFG-sand, is shown. According to the microstructure shown, the shape and connected porosity of GFG grains, have favoured the adhesion with cement matrix - Fig. 11. It was reported that GFG-sand, taking into account shape and open-porosity, is promoting adhesion with the cement matrix. GFG-sand exhibits good adhesion to the binder matrix at the interface and has a very good bond with the cement paste. Also, Fig. 11 presents clearly the role of the open-porosity of the foamed glass in the cement matrix and particularly in self-compacting mortar.

4. Conclusions

This work has presented the open-porosity effect of foam glass used as fine aggregate in self-compacting mortars. Results could be summarized and concluded as follows:

- Open-porosity of GFG-sand has considerably decreased the fluidity of studied mortars as a function of the substitution rate of sand by foamed glass. Being given that self-compacting mortar or concrete, must have a great flowability at the application, it can be improved by low addition of superplasticizer.
- The lightness of mortars has been greatly improved by using the GFG-sand. GFG-based mortar becomes lighter at 100%

Literatura / References

1. Ö. Andiç-Çakır, S. Hizal, Influence of elevated temperatures on the mechanical properties and microstructure of self-consolidating lightweight aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* **34**, 575–583 (2012).
2. A. Ayadi, N. Stiti, K. Boumchedda, H. Rennai, Y. Lerari, Elaboration and characterization of porous granules based on waste glass. *Powder Techn.* **208**, 423–426 (2011).
3. F.A. Barrios Illidge, Acoustic emission techniques and cyclic load testing for integrity evaluation of self-compacting normal and self- Compacting. Ph.D thesis, DAI-B71/05, 2010.
4. B. Vakhshouri, S. Nejadi, Mix design of light-weight self-compacting concrete. *Case Stud. Constr. Mater.* **4**,:1–14 (2016).
5. F. Benhaoua, Study and Influence of the alkali silicate glass addition on the porosity of the foam glass prepared based on cullet. thesis of magister, M'hamed Bougara University of Boumerdes, 2012.
6. E. Bernardo, R. Cedro, M. Florean, S. Hreglich, Reutilization and stabilization of wastes by the production of glass foams. *Ceram. Int.* **33**, 963-968 (2007).
7. M. Bravo, J. Brito, J. Pontes, L. Evangelista, Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *J. Clean. Prod.* **99**, 59-74 (2015).
8. B. L. Anh Tuan, C.-L. Hwang, K.-L. Lin, Y.-Y. Chen, M.-P. Young, Development of lightweight aggregate from sewage sludge and waste glass powder for concrete. *Constr. Build. Mater.* **47**, 334-339 (2013).
9. G. Bumanis, D. Bajare, A. Korjakins., Mechanical and Thermal Properties of Lightweight Concrete Made from Expanded Glass. *J. Sustain. Arch. Civil Eng.* **2**, 26-32 (2013).
10. G. Bumanis, D. Bajare, J. Locs, A. Korjakins, Alkali-silica reactivity of foam glass granules in structure of lightweight concrete. *Constr. Build. Mater.* **47**, 274-281 (2013).
11. R.K. Dhir, M.D. Newlands, A. McCarthy, Use of Foamed concrete in construction. Thomas Telford Publishing, Thomas Telford Ltd, London, 2005.
12. H. Gödeke, H. Fucks, REAPOR -Sintered open-pore glass foam as a high strength sound absorber. *Glasstech, Ber. Glass Sci. Technol.* **71**(9): 282-284 (1998).
13. J. König, R.R. Petersen, Y. Yue, Fabrication of highly insulating foam glass made from CRT panel glass. *Ceram. Int.* **41**(8), 9793-9800 (2015).
14. S. Juradin, G. Baloević, A. Harapin, Experimental testing of the effects of fine particles on the properties of the self-compacting lightweight concrete. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **8**, 398567 (2012).
15. J.M. Khatib, S. Shariff, E.M. Negim, Effect of Incorporating Foamed Glass on the Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams. *World Appl. Sci. J.* **19**, 47-51 (2012).
16. M. Limbachi, A.S. Meddah, S. Fotiadou, Performance of granulated foam glass concrete. *Constr. Build. Mater.* **28**, 759–768 (2012).
17. M.I. Norlia, S. Shamshinar, C.A. Roshazita, L.R. Nur, N.T. Tengku, Performance of Lightweight Foamed Concrete with Waste Clay Brick as Coarse Aggregate. *APCBEE Proc.* **5**, 497 – 501 (2013).
18. B. Safi, M. Saidi, D. Aboutaleb, M. Maallem, The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties. *Const. Build. Mater.* **43**, 436–442 (2013).
19. A. Schwartzentruber, C. Catherine, Method of the concrete equivalent mortar (CEM) - A new tool to design concrete containing admixture. *Mater. Struct.* **33**, 475-482 (2000).
20. O. Vieli, Foam glass granules for lightweight concrete. European Patent 10,069 A, June 1982.

of sand substitution in SCM100%, with a minimum value of 1750 kg/m³, when the natural sand is totally replaced.

- The test has shown that the compressive strength at 28 days of self-compacting mortar containing 100% of GFG-sand than without natural sand, was about 28 MPa. For a lightweight mortar with a bulk density of 1.75 kg/m³, this strength is acceptable to a particular application. 50% of GFG-sand of addition can also produce the mortar having a much higher strength.
- The open-porosity and form of this foamed glass type have favoured the physical adhesion and interaction with cement matrix. In this study, microscopic analysis of the interfacial transition zone of GFG-cement paste has shown an adhesion between the foamed glass granules and cement paste. However, open-porosity of GFG-sand has also promoted water penetration.

Acknowledgement

The authors wish to thank enormously technicians of Physics and Materials Chemistry Laboratory (LPCM) of Mouloud Mammeri University of Tizi-Ouzou for their collaboration and assistances during the SEM analysis.

21. K.H. Yang, K.H. Lee, J.K. Song, M.H. Gong, Properties and sustainability of alkali-activated slag foamed concrete. *J. Clean. Prod.* **68**, 226-233 (2014).
22. R. Yu, D.V. Van Onna, P. Spiesz, Q.L. Yu, H.J.H. Brouwers, Development of Ultra-Lightweight Fibre Reinforced Concrete applying expanded waste glass. *J. Clean. Prod.* **112**, 690-701 (2016).
23. Q.L. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers, Design of ultra-lightweight concrete: towards monolithic concrete structure. *Vestn. MGSU* **4**, 98-106 (2014).
24. Q.L. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers, Ultra-lightweight concrete: conceptual design and performance evaluation. *Cem. Concr. Comp.* **61**, 18-28 (2015).

Standards

1. ASTM C348 – 08, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, which appears in the Annual Book of ASTM Standards Vol 04.01
2. ASTM C349 – 08, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure), which appears in the Annual Book of ASTM Standards Vol 04.01
3. ASTM C597-97; Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 04.02 Concrete and Concrete Aggregate; 1993
4. ASTM C642; Standard test method for specific gravity, absorption, and voids in hardened concrete, Annual Book of ASTM Standards, 04.02 Concrete and Concrete Aggregate; 1993.