

Beton samozagęszczalny zawierający piasek pustynny i mączkę granitową

On the use of self-compacting concrete based on desert sand and granite powder

Farida Rahmani¹, Salah Kaci², Mohand Ould Ouali^{3*}

¹ Département de Génie Civil, Université Mouloud MAMMERY de Tizi Ouzou BP 17RP, Algeria

² Département d'architecture, Faculté des Sciences, Université d'Alger 1, Benyoucef Benkhedda, Algeria

³ Laboratoire LEC2M, Université Mouloud MAMMERY de Tizi Ouzou BP 17RP, Algeria

*Corresponding author: M. Ould Ouali e-mail: mohand.ouldouali@umt.dz (ORCID ID: 0000-0001-7958-4974)

Streszczenie

Niniejszy artykuł poświęcony jest waloryzacji lokalnych materiałów jako substytutów w betonie samozagęszczalnym. Zbadano wpływ mączki granitowej jako zamiany cementu w betonie samozagęszczalnym wykonanym w 100% z piasku pustynnego, a także jako substytutu piasków rzecznych i/lub kopalnych. Wykonano optymalizację udziału superplastyfikatora w zaczynie cementowym, a następnie zastosowano taki sam udział w betonie. Opracowano kilka receptur betonów. Następnie wykonano badania reologiczne, właściwości mechanicznych i trwałości betonów samozagęszczalnych z różnym udziałem mączki granitowej i superplastyfikatora. Badania obejmowały charakterystykę mieszanek betonowych [rozpliw, L-pojemnik, odporności na segregację, gęstość] i stwardniałego betonu [wytrzymałość na ścislenie, weryfikacja segregacji itd.]. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że skład betonu zawierającego 1,7% superplastyfikatora i 10% granitu został uznany za optymalny, zgodnie z zaleceniami normy AFGC 2008. Wyniki badań trwałości tego betonu i analiza jego właściwości w wysokich temperaturach potwierdziły, że opracowany beton może być stosowany w trudnych warunkach pracy.

Słowa kluczowe: beton samozagęszczalny, piasek pustynny, pył granitowy, właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu, środowisko kwasowe, korozja siarczanowa

Summary

This article is dedicated to the valorization of local materials as substitutes in self-compacting concrete. We were interested in studying the effect of adding granite powder as a substitute for cement in a self-compacting concrete made of 100% desert sand, and also as a substitute for river and/or quarry sands. First, the dosage of the superplasticizer on the cementitious paste is optimized and then confirmed this percentage in the case of concrete. Subsequently, several concrete formulations were produced. Then, the rheological, mechanical, and durability behavior of these self-compacting concretes with different percentages of granite powder and superplasticizer were studied by carrying out characterization tests in the fresh state [slump-flow, L box, sieve stability test, density] and the hardened state [Compressive strength, verification of static segregation, etc.]. From the results obtained, the concrete composition with 1.7% superplasticizer and 10% granite was found optimal, following the recommendations of the AFGC 2008 standard. The durability tests results of this concrete and the analysis of its behavior at high temperatures have confirmed that the formulation adopted can be used in severe working conditions

Keywords: self-compacting concrete, desert sand, granite powder, fresh and hardened properties, acid and sulfate aggressive environment

1. Wprowadzenie

Beton jest materiałem, który nadal zajmuje ważne miejsce w budownictwie. Przeprowadzono szereg badań w celu zrozumienia zmian zachodzących w betonie (1-3), a także dotyczących uszkodzeń betonu w konstrukcji (4,5). Aby spełnić określone wymagania

1. Introduction

Concrete is a material that still holds a prominent place in the civil construction industry. Several studies have been carried out to understand the behavior and failure of concrete at the scale of the specimen, for instance (1-3), or at the scale of the structures

techniczne, wykonuje się betony samozagęszczalne, betony zbrojone włóknami, betony lekkie, betony zawierające opóźniacze itp., opracowując je poprzez dodanie typowych produktów (6-9). Beton samozagęszczalny jest szeroko stosowany w nowoczesnych konstrukcjach. Po raz pierwszy został opracowany w Japonii pod koniec lat 80. przez H. Okamura i był stosowany w konstrukcjach w Japonii (10). Przeprowadzono wiele prac badawczych nad betonem samozagęszczalnym. S. Mahesh zbadał niektóre właściwości betonów samozagęszczalnych (11). J. Shen zbadał różne metody mieszania betonu (12). M. Reddy i N. Bouhamou zbadali wpływ stosunku wodno-cementowego na urabialność i trwałość samozagęszczalnego betonu (13,14). Salah i in. zbadali świeże i stwardniałe właściwości reologiczne samozagęszczalnego betonu (15). R. Dubey i S. M. Dume przeanalizowali wpływ superplastyfikatorów na beton samozagęszczalny (16,17), z kolei K. S. Johnsirani zbadali jego trwałość (18). Cheraghalizadeh i Akçaoğlu zbadali wpływ popiołu z odpadów oliwnych na wytrzymałość na rozciąganie i energię pęknięcia (19). Skutki stosowania dodatków mineralnych są szeroko opisywane w literaturze. Dodatki te to głównie pył krzemionkowy (20), popiół lotny (21), pył marmurowy (22), pozostałości po polerowaniu porcelany (23), odpady szklane (24) i beton pochodzący z recyklingu (25).

Piasek jest niezbędnym składnikiem betonu, szczególnie samozagęszczalnego. Rosnące zapotrzebowanie na ten surowiec powoduje szybkie wyczerpywanie się złóż i eksploatację wód gruntowych, co powoduje poważne szkody dla równowagi środowiskowej, a także zanieczyszczenie źródeł wody. Ponadto działania człowieka mają bezpośrednie negatywne skutki dla zasobów naturalnych, erozji brzegów rzek i zmiany poziomu mórz. Negatywne skutki wydobycia piasku aluwialnego zostały udokumentowane w literaturze (26). Pomimo licznych ostrzeżeń ze strony społeczności naukowej problem nadal występuje. Ostatnio wielu badaczy skupiało się nad wykorzystaniem piasku pustynnego w budownictwie, w szczególności ze względu na jego dostępność w bardzo dużych ilościach i na otwartej przestrzeni (27-32). Najnowsze badania wydają się potwierdzać możliwość jego wykorzystania: Ashwini badał wytrzymałość na ściskanie kompozytów cementowych i wykazał, że piasek pustynny może zastąpić piasek rzeczny w przypadku zapraw (27). Haifeng Liu był zainteresowany właściwościami mechanicznymi betonu z piasku pustynnego (28). Kaufmann pracował nad oceną wykorzystania piasku pustynnego i cementu wapniowo siarczano-glinianowego do produkcji betonu (29). He Cai zastosował piasek pustynny do torkretu użytego do budowy tunelu (30). Jialing Che zajmował się wytrzymałością betonu z włóknami i piasku pustynnego (31). Khelil i in. wykazali pozytywny wpływ zastąpienia piasku rzecznygo piaskiem wydymowym na wytrzymałość na ściskanie mieszanek betonowych z proszkami reaktywnymi zawierającymi włókna i bez włókien. Wyniki wskazały, że jeśli chodzi o wytrzymałość na rozciąganie, lepiej jest stosować beton z włóknami (32). Wyniki badań wskazują również na zagęszczenie mikrostruktury kompozytów cementowych wraz ze wzrostem udziału piasku wydymowego (32). Mając na celu ochronę środowiska, naukowcy zainteresowali się także wykorzystaniem proszku granitowego jako częściowego

(4,5). To meet specific requirements, fiber-reinforced, lightened, retarded, self-compacting concretes, etc., have been formulated by adding typical products (6-9). Self-consolidating concrete is widely used in modern constructions. It was first developed in Japan in the late 1980s by H. Okamura. This type of concrete has been used in real structures in Japan (10). Several research works have been carried out on self-compacting concrete. S. Mahesh explored some properties of self-compacting concretes (11). J. Shen studied the different methods of concrete mixing (12). M. Reddy and N. Bouhamou were interested in the effect of the water/cement ratio on the workability and the resistances of self-compacting concrete (13,14). Salah et al. explored the fresh and hardened rheological properties of self-compacting concrete (15). R. Dubey and S. M. Dume analyzed the effect of superplasticizers on self-consolidating concrete (16,17). K. S. Johnsirani studied the durability of self-compacting concrete (18). Cheraghalizadeh and Akçaoğlu studied the effect of reinforcing self-compacting concrete with olive waste ash and found that the tensile strength and fracture energy were affected (19). The main effects of the use of mineral additives are widely reported in the literature. The additives used are mainly silica fume (20), fly ash (21), marble powder (22), porcelain polishing residues (23), glass waste (24), and recycled concrete (25).

Since sand is an essential element in concrete in general and self-compacting concrete in particular. The growing demand for sand is causing a rapid depletion of hourglasses and anarchic exploitation of groundwater tables causing serious damage to the environmental balance, as well as the pollution of water sources. In addition, these human activities have direct negative repercussions on natural resources, the erosion of river banks, and the advance of the sea. The negative effects of alluvial sand extraction have been documented in (26). Despite numerous warnings from the scientific community, the problem persists. Recently, many researchers have experimented with using desert sand in construction due in particular to its availability in very large quantities and the open air (27-32). The most recent studies seem to confirm this possibility: Ashwini compared the compressive strength and deduced that desert sand can replace river sand in the case of mortars (27). Haifeng Liu was interested in the mechanical properties of concrete based on desert sand (28). Kaufmann worked on the evaluation of the combination of desert sand and calcium sulpho-aluminate cement for the production of concrete (29). He Cai applied desert sand for the shotcrete of tunnels in construction engineering (30). Jialing Che dealt with the strength of fiber concrete and desert sand (31). Khelil et al. showed the positive effect of replacing river sand with dune sand on the compressive strength of fiberless and fibered Reactive Powder concrete mixes. The results show also as far as the tensile strength is concerned, it is preferable to keep fibers (32). The results revealed also the densification of the cement matrix with the increase of the dune sand proportions (32). Always intending to protect the environment, researchers have taken an interest in the use of granite powder as a partial substitute for cement (33-35) or crushed granite as sand in concrete (36-38).

substytutu cementu (33-35) lub kruszonego granitu stosowanego jako substytut piasku w betonie (36-38). Mączka granitowa jest odpadem powstającym w wyniku wydobywania granitu z kamieniołomów oraz w trakcie operacji jego kształtowania i polerowania. Duża objętość skał, stanowiąca około 20–30% objętości pierwotnie użytych, staje się odpadem zanieczyszczającym powietrze i środowisko naturalne.

Zastosowanie piasku pustynnego i mączki granitowej jako częściowego substytutu cementu do projektowania betonu samozagęszczalnego wydaje się zatem interesującą alternatywą z punktu widzenia ekonomicznego i środowiskowego, ze względu na ograniczenie ilości pyłu obecnego w powietrzu i zmniejszenie emisji CO₂ związanej z produkcją cementu. Cel badania jest zatem dwojaki: odzyskanie odpadów granitowych, pokruszonych do 80 µm, w celu uzyskania proszku, który może zastąpić cement zgodnie z założoną ilością oraz wykorzystanie piasku pustynnego jako całkowitego zamiennika piasku kopalnianego/rzecznego w materiałach budowlanych uwzględniając korzyści ekonomiczne [redukcja kosztów budowy, energii produkcyjnej itp.] i ekologiczne [oszczędność surowców i wód gruntowych, redukcja ilości CO₂ powstającego w wyniku produkcji tradycyjnego cementu itp.]. Celem było znalezienie optymalnego składu betonu samozagęszczalnego poprzez odpowiedni dobór zawartości superplastyfikatorów i mączki granitowej. Opracowano kilka składów betonu samozagęszczalnego, a następnie zbadano ich właściwości reologiczne, mechaniczne i trwałość. Badania mieszanki betonowej i stwardniałego betonu pozwoliły na wybór optymalnego składu. Wyniki analizy trwałości tego betonu i jego zachowania w wysokich temperaturach potwierdziły korzystny wpływ optymalnej receptury betonu.

2. Materiały

Cement: cement portlandzki wapienny CEM II/A-LL 42,5R certyfikowany zgodnie z wymaganiami normy SN EN 206-2014 (39). Jego właściwości podano w tablicy 1.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD I WŁAŚCIWOŚCI CEMENTU

CHEMICAL AND PHYSICAL CHARACTERISTICS OF CEMENT

Skład / Composition		
Klinkier / Clinker	Kamień wapienny / Limestone addition	Składnik drugorzędny / Secondary constituent
(80 to 94)%	Category A (06 to 20)%	(From 0 to 5)%
Właściwości fizyczne/ physical characteristics		
Czas wiązania/ Setting time S		Stabilność / Stability
≥ 60minutes		≤ 10minutes
Właściwości mechaniczne/ mechanical characteristics		
Wytrzymałość na ściskanie / RCompressive strength at 2 days		Wytrzymałość na ściskanie / Compressive strength at 28 days
≥ 20.0 N/mm ²		m ≤ 42.5 N/mm ²
Właściwości chemiczne / Chemical characteristics		
Zawartość siarczanów / Sulfate content (SO ₃)		Zawartość chlorków / Chloride content (Cl)
≤ 4.0%		≤ 0.10%

Indeed, granite powder is waste resulting from the extraction of granite stones from quarries and the operations of shaping and polishing granite stones. A large volume of around 20% to 30% of the volume of stones initially used becomes waste polluting the air because rejected in nature.

The use of desert sand with granite powder as a partial substitute for cement for the design of self-compacting concrete seems, therefore, to be an interesting alternative from an economic and environmental point of view, namely, by reducing the dust present in the air and the emission of CO₂ related to cement production. The objective of the study is therefore twofold: recover the granite waste, crushed to 80 µm, to obtain a powder that can replace cement according to a percentage to be determined and use desert sand as a total replacement for quarry/river sand as construction materials according to economic [reduction of construction costs, production energy, etc.] and ecological [conservation of raw materials and groundwater, reduction in the quantities of CO₂ resulting from the production of traditional cement, etc.]. The goal is to find an optimal composition of self-compacting concrete by varying the percentages of superplasticizers and granite powder. Several formulations of self-compacting concrete were produced, and then their rheological, mechanical, and durability behaviors were studied. Characterization tests in the fresh and hardened state made it possible to select an optimal formulation. Subsequently, the results of the analysis of the durability of this concrete and its behavior at high temperatures confirmed our choice.

2. Materials

Cement: The Portland Limestone Cement CEM II/A-LL 42.5R certified according to the requirements of standard SN EN 206-2014 (39) is used in this work. Its characteristics are given in Table 1.

Superplasticizer: The new generation high water reduction superplasticizer TEMPO-12 was used in this study. This superplasticizer,

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI SUPERPLASTYFIKATORA

TEMPO-12 SUPERPLASTICIZER CHARACTERISTICS

Właściwości / Characteristics	
Kolor / Appearance / Color	Brązowa ciecz / Light brown liquid
Gęstość / Density	1,060 ± 0,020 kg/m ³
Zawartość składników po wysuszeniu / Dry extract	29.5 ± 1.4 % [halogen method according to NF 085]
	29.5 ± 1.4 % [NF EN 480-8]
PH value	5,5 ± 1,0
Zawartość chlorków / Total Chloride Ion Content	≤ 0,1 %

Superplastyfikator: zastosowano superplastyfikator nowej generacji znacząco redukujący zawartość wody TEMPO-12 oparty na polikarboksylanach [Sika]. Właściwości domieszki pokazano w tablicy 2.

Woda zarobowa: stosowana do produkcji betonów to woda wodociągowa o temperaturze 20±2°C; jej jakość spełnia wymagania normy NF EN 1008 (40).

Dodatek mineralny: mączka granitowa o wielkości ziaren poniżej 80 µm [tablica 3].

Grys wapienny: użyto dwóch frakcji kruszonego kamienia wapiennego: 3/8 mm i 5/8 mm, których właściwości przedstawiono w tablicy 4; rozkład wielkości ziaren obu żwirów przedstawiono na rys. 1.

Piasek: wybór piasku został dokonany po przeprowadzeniu badań porównawczych piasków pustynnych, rzecznych i kamieniołomowych. Piasek pustynny pochodzi z regionu Oued-Souf [miasto w prowincji El Oued na północnym wschodzie Sahary Algierskiej]. Tablica 5 przedstawia właściwości badanych piasków oraz normy, z którymi weryfikowano zgodność (41,42). Trzy badane piaski mają właściwości, spełniające wymagania rozpatrywanych norm.

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI CHEMICZNE I FIZYCZNE PROSZKU GRANITOWEGO
CHEMICAL AND PHYSICAL CHARACTERISTICS OF GRANITE POWDER

Skład chemiczny / Chemical composition	
SiO ₂ (%)	68.00
Al ₂ O ₃ (%)	16.97
K ₂ O (%)	3.81
CaO (%)	2.93
MgO ₂ (%)	1.90
Na ₂ O (%)	1.79
Fe ₂ O ₃ (%)	0.49
SO ₃	0.05
Właściwości fizyczne/ Physical characteristics	
Gęstość / Density, g/cm ³	2.62
Absorpcja wody Water absorption, %	1.36

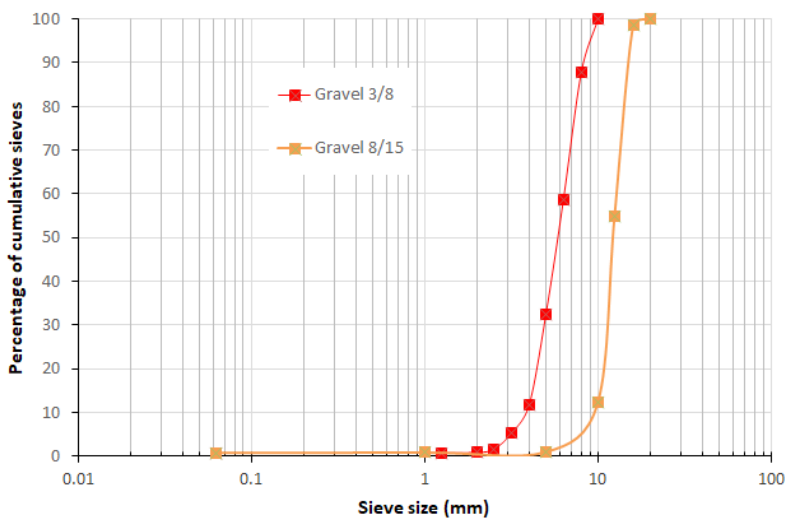
manufactured by the Sika company, is versatile and based on polycarboxylates. Properties of admixture are given in Table 2.

Mixing water: The mixing water used for the production of the various concretes is potable tap water with a temperature of around 20 ± 2°C. Its quality meets the requirements of the NF EN 1008 standard (40).

Mineral additive: Granite powder has a particle size fraction below 80 µm [Table 3].

Coarse aggregate: Two classes of crushed limestone 3/8 mm and 5/8 mm were used. The characteristics obtained after the analysis of these aggregates are presented in Table 4. The grain size distribution of aggregates is shown in Fig. 1.

Sand: The choice of sand to be used for conducting this study is made after a comparative study of desert, river, and quarry sands. The desert sand is from the Oued-Souf region [a city in the province of El Oued in the northeast of the Algerian Sahara]. Table 5 gives the physical characteristics obtained from desert, river, and quarry sands as well as the recommendations of



Rys. 1. Kumulacyjna krzywa granulometryczna będąca wynikiem analizy sitowej grysów wapiennych.

Fig. 1. Granulometric cumulative curve resulting from sieve analysis of crushed limestone.

Tablica 4 / Table 4

WŁAŚCIWOŚCI GRYSÓW WAPIENNYCH

CRUSHED LIMESTONE AGGREGATE CHARACTERISTICS

	Czystość / Equivalent cleanliness, %	Gęstość nasypowa / Bulk density, kg/m ³	Gęstość właściwa / Density, kg/m ³	Los Angeles
Żwir/ Gravel 3/8	1.06	1360	2610	-
Żwir/ Gravel 8/15	0.99	1370	2630	30.7
Norma/ Standard	NF EN 1097	NF EN 1097	NF EN 1097	EN 1097-2

Na podstawie poprzednich wyników i ze względu na aspekt środowiskowy wybrano piasek pustynny [rys. 3]. Piasek pustynny ma żółty kolor i owalny kształt ziaren.

Tablica 6 przedstawia charakterystykę składu chemicznego piasku pustynnego „Oued-Souf”, który spełnia wymagania normy EN 933-9+A1 (42) dotyczące maksymalnych wskaźników zawartości siarczanów $SO_3 \leq 0,2\%$ i chlorków $\leq 0,06\%$.

Przeprowadzono serię badań piasku pustynnego zgodnie z zaleceniami norm europejskich. Ich celem była klasyfikacja tego piasku w celu możliwości jego wykorzystania jako piasku budowlanego, składnika zapraw i betonów.

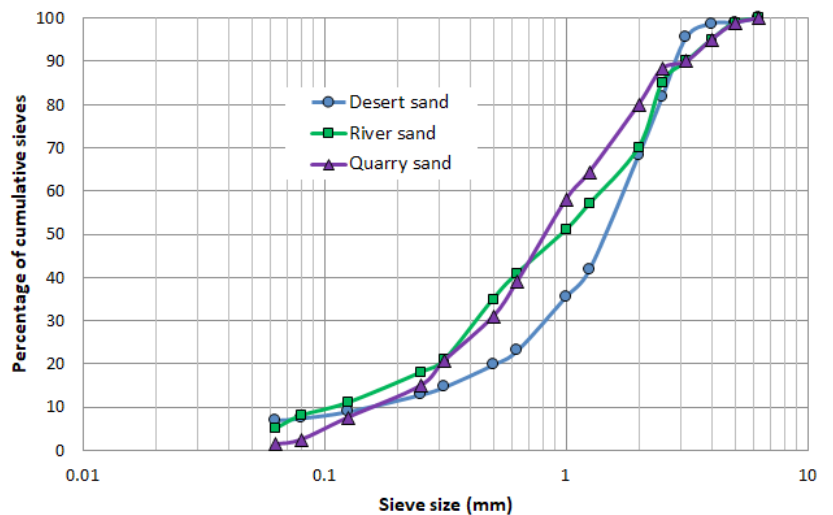
Analiza wyników w tablicy 5 pokazuje, że użyty piasek Oued-Souf jest wysokiej czystości. Analiza wyników w tablicach 4 i 5 pokazuje, że właściwości chemiczne i fizyczne piasku Oued-Souf są zgodne z zaleceniami norm europejskich. Wyniki te wskazują na możliwość wykorzystania go jako piasku w konstrukcjach betonowych stosowanego zamiast piasku rzecznoego lub łamanego. Dlatego też zastosowano ten piasek pustynny jako składnik betonu samozagęszczalnego.

Tablica 5 / Table 5

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE PIASKÓW: PUSTYNNEGO, RZECZNEGO I KOPALNIANEGO

PHYSICAL CHARACTERISTICS OF DESERT, RIVER, AND QUARRY SANDS

Właściwości / Characteristics	Piasek rzeczny River sand	Piasek łamany Quarry sand	Piasek pustynny Desert sand	Normy / Standards	Zalecenia Recommendation
Gęstość / Density, g /cm ³	2.54	2.66	2.58	EN 1097-6 (41)	
Gęstość nasypowa / Bulk density - Loose state g/cm ³	1.53	1.52	1.41	EN 1097-7 (41)	
Wskaźnik piaskowy Sand equivalent Piston, %	90.00	89.26	82.83	EN 933-8 (42)	ESP ≥ 70 %
Nasiąkliwość / Absor, %	0.95	0.81	1.34	EN 1097-6 (41)	ABS ≤ 5.0 %
Zawartość drobnych cząstek Methylene Blue Test	0.38	0.6	0.4	EN 933-9+A1 (42)	MBT ≤ 1.0
Analiza granulometryczna Granulometry analysis	Fig. 2	Fig. 2	Fig. 2	EN 933-1 (42)	
Moduł uziarnienia Fineness modulus	2.85	2.63	2.06	NFP 18-540:	2 < Mf < 2.5



Rys. 2. Kumulacyjna krzywa granulometryczna piasków pustynnych, rzecznych i kamiennolomowych.

Fig. 2. Granulometric cumulative curve of desert, river, and quarry sands.

the standards (41,42). The three sands have characteristics that meet the recommendations of the standards considered.

Based on the previous results and for environmental considerations, the desert sand is chosen. Figure 3 shows the visual appearance of sand. This desert sand is yellow in color and round in shape.

	Piasek rzeczny River sand	Piasek kopalniany Quarry sand	Piasek pustylny Desert sand	Norma europejska / European standards
SO ₃ (%)	0.05	0.00	0.00	EN 1744-1 2009+A1:2012 (43): ≤ 0.2 %
Cl ⁻ , %	0.02	0.00	0.00	EN 1744-1 2009+A1:2012 (43): ≤ 0.06 %
NaCl, %	0.01	0.41	0.23	
SiO ₂ , %	89.67	2.06	87.46	
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , %	0.90	0.13	1.25	
CaO, %	5.96	54.58	4.81	
CO ₃ , %	0.01	1.52	1.86	

3. Optymalizacja zawartości superplastyfikatora i skład mieszanek

3.1. Określenie punktu nasycenia

Jest to próg, powyżej którego zwiększenie dawki superplastyfikatora „SP” nie wpływa na konsystencję. Jego określenie jest niezwykle ważne dla uzyskania bardziej stabilnej reologii zaczynu. Rys. 4 przedstawia zmienność płynności zaczynu uzyskanego z cementu portlandzkiego CEM II/A-LL 42,5R w funkcji udziału superplastyfikatora TEMPO-12. Punkt nasycenia określono jako równy 1,7% SP w stosunku do masy cementu.

Do oceny właściwości mieszanki betonu samozagęszczalnego, przyjęto metody badań sugerowane przez Francuskie Stowarzyszenie Inżynierii Lądowej [franc. Association Française de Génie Civil, AFGC]. Dla superplastyfikatorów o przedziale punktu nasycenia rzędu 1,6 do 1,8 przeprowadzono następujące badania.

- Konsystencja: zastosowano metodę rozplywu stożka i pomiar czasu rozplywu T₅₀₀ zgodnie z normą NF EN 12350-8 (44).
- Przepływalność: przyjęto test L-pojemnika zgodnie z NF EN 12350-10 (45).
- Stabilność: odporność na segregację obserwowano wizualnie podczas badania przepływalności.
- Odporności na segregację metodą przesiewu: przeprowadzono je zgodnie z zaleceniami normy NF EN 12350-11 (46).
- Właściwości betonu: wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przez zginanie, weryfikacja segregacji statycznej, prędkości propagacji fal ultradźwiękowych, absorpcji wody i przepuszczalności wody.
- Trwałości: Przeprowadzane przez 365 dni w agresywnym środowisku składającym się z roztworu HCl o pH = 4 i roztworu Na₂SO₄ o stężeniu 5% NF EN 206-2014 (39).
- Wpływu wysokich temperatur: poddanie działaniu wysokich temperatur w zakresie 20°C–600°C.

Tablica 7 przedstawia wartości zalecane przez normę AFGC z 2008 r. (47) do klasyfikacji składu betonów.



Rys. 3. Piasek pustylny.

Fig. 3. Desert sand.

Table 6 gives the chemical characteristics of the desert sand of “Oued-Souf”. This desert sand is siliceous and of an insoluble nature. One can observe from the same table that this sand satisfies the recommendations of the standard EN 933-9+A1 (42) concerning the maximum rates of Sulphates SO₃ [≤ 0.2%] and Chloride [≤ 0.06%].

A series of tests were carried out on desert sand following the recommendations of European standards. The purpose of these tests is to classify this stable to study the possibility of using it as construction sand in the formulations of mortars and concretes.

Analysis of the results in Table 5 shows that the Oued-Souf sand used is very clean. The analysis of the results of Tables 4 and 5 shows that the chemical and physical characteristics of the Oued-Souf sand comply with the recommendations of European standards. These findings allow us to use it as construction sand for concrete structures instead of the river or quarry sand. The desert sand was, therefore, used in the present study for the formulation of self-compacting concrete instead of the river or quarry sand to preserve the environment.

3.3. Przygotowanie mieszanek

Przygotowano dwanaście (12) betonów. Dla każdej ilości superplastyfikatora przygotowano kontrolne próbki bez mączki granitowej [oznaczone 0%]. Wykonano betony, w których cement został zastąpiony proszkiem granitowym w ilościach 5%, 10% i 15% masowych. Tablica 8 przedstawia udział składników każdego z betonów przypadający na jeden metr sześcienny, a także oznaczenia odpowiadające każdej recepturze betonu. W celu przygotowania tych betonów składniki mieszano w następującej kolejności: kruszywa, cement i mączkę granitową mieszano przez jedną minutę, następnie dodano wodę i superplastyfikator. Mieszanie kontynuowano przez kolejne dwie minuty. Otrzymane w ten sposób mieszanki formowano w próbki prostopadłościowe o wymiarach 15x15x15 cm i 7x7x28 cm. Zgodnie z normą, po 24 godzinach, próbki rozformowano. Następnie próbki umieszczano w celu utwardzenia w pojemniku z wodą w temperaturze otoczenia 20°C przez 28 dni.

4. Optymalizacja składu

W tym punkcie przedstawiono wyniki badania mieszanek betonowych i stwardniałych betonów. Celem tych badań jest potwierdzenie, że punkt nasycenia w przypadku betonu jest taki sam jak w przypadku zaczynu cementowego. Kolejnym celem było określenie optymalnej zawartości mączki granitowej.

4.1. Właściwości mieszanki betonowej

Tablica 9 przedstawia wyniki właściwości reologicznych różnych betonów. Na podstawie tych wyników i zgodnie z AFGC 2008 można wnioskować, że w praktyce wszystkie mieszanki można stosować jako beton samozagęszczalny. Zauważono, że:

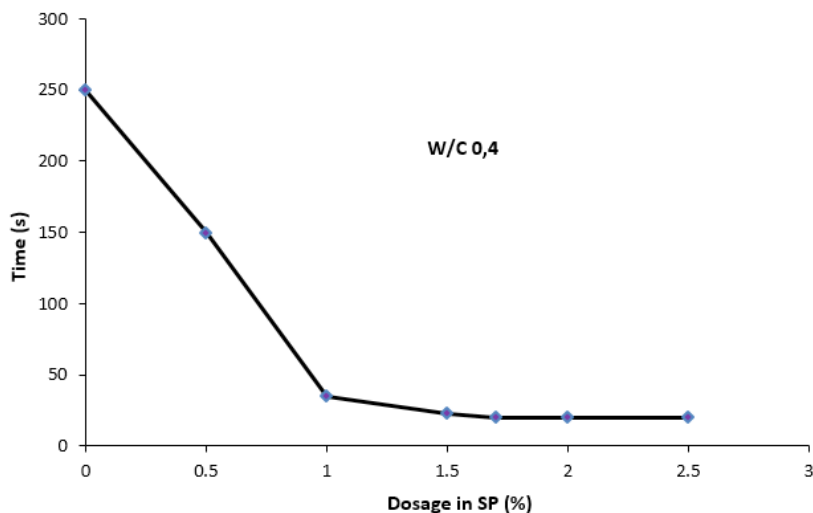
- rozrzut wyników dla rozplwy wynosi od 555 mm do 785 mm,
- segregacja dynamiczna [H1 / H2] waha się od 0,77 do 0,85,
- stabilność statyczna betonu dla wszystkich wzorów wynosi mniej niż 13,5%,
- gęstość w stanie świeżym wynosi od 2380 kg/m³ do 2424 kg/m³.

Tablica 7 / Table 7

TYPOWE WARTOŚCI ZALECANE PRZEZ NORMĘ AFGC DLA SCC

TYPICAL VALUES RECOMMENDED BY AFGC STANDARD FOR SCC

No.	Metody/ Method	Jednostki Units	Typowe wartości Typical values	
			Min.	Max.
1	Rozplwy / Slump-Flow test	mm	550	800
2	Czas rozplwy T ₅₀₀ / Slump time T ₅₀₀	sec	02.0	05.0
3	L-pojemnik / L-box	-	00.8	01.0
4	Odporność na segregację Sieve stability test NF EN 12350-11	%	00.0	15.0



Rys. 4. Zmiana płynności zaczynu cementowego w zależności od udziału SP.

Fig. 4. Variation in the fluidity of a cement paste as a function of the SP dosage.

3. The saturation point of the cementitious paste and formulations used

3.1. Determination of paste saturation point of cement

It is a threshold beyond which an increase in the dosage of SP superplasticizers does not affect fluidity, its determination is extremely important to obtain a more stable fluidity of the paste. Figure 4 shows the variation in the fluidity of a paste obtained from Portland CEM II 42.5R cement as a function of the TEMPO-12 superplasticizer dosage. The saturation point of the cement paste is observed for a 1.7% SP of the mass of cement.

In order to characterize fresh mixes for self-compacting concrete, the test methods suggested by the French Civil Engineering Association [AFGC] were adopted. For a variation of superplasticizers of an interval relative to the saturation point of order 1.6 to 1.8, the following tests were carried out.

- Fluidity tests: the Slump-Flow test tests for flowability and T₅₀₀ slump time according to standard NF EN 12350-8 (44) for viscosity were used.
- Deformability tests: the L-box test according to NF EN 12350-10 (45) for the ability to pass were adopted.
 - Stability: resistance to segregation was observed visually during this test.
 - Stability tests: were carried out according to the recommendations of standard NF EN 12350-11 (46).
 - Hardened concrete properties: compressive and flexural strength, verification of static segregation, speed of propagation of ultrasonic waves, water absorption, and water permeability.
 - Durability tests: were carried out for 365 days in an aggressive mediums consist of hydrochloric acid solution at pH = 4 and sodium sulfate at 5% NF EN 206-2014 (39).

N° of mix Nr mieszanki	% SP	Pył granitowy Granite powder, % m.c/	Woda Water, kg/m ³	Cement, kg/m ³	Pył granitowy Granite powder, kg/m ³	Piasek Sand, kg/m ³	Żwir 3/8 Gravel 3/8, kg/m ³	Żwir 8/15 Gravel 8/15, kg/m ³	SP, kg/m ³
C1.6-00	1.6	0	184.93	400.00	00.00	866.00	433.00	433.00	6
C1.6-05	1.6	5	183.21	397.91	17.22	846.40	423.20	423.20	6
C1.6-10	1.6	10	182.10	359.91	34.44	846.40	423.20	423.20	6
C1.6-15	1.6	15	180.99	339.92	51.66	846.40	423.20	423.20	6
C1.7-00	1.7	0	184.93	400.00	0.00	866.00	433.00	433.00	7
C1.7-05	1.7	5	183.21	379.91	17.22	846.40	423.20	423.20	7
C1.7-10	1.7	10	182.10	359.91	34.44	846.40	423.20	423.20	7
C1.7-15	1.7	15	180.99	339.92	51.22	846.40	423.20	423.20	7
C1.8-00	1.8	0	184.93	400.00	0.00	866.00	433.00	433.00	8
C1.8-05	1.8	5	183.21	379.91	17.22	846.40	423.20	423.20	8
C1.8-10	1.8	10	182.10	359.91	34.44	846.40	423.20	423.20	8
C1.8-15	1.8	15	180.99	339.92	51.22	846.40	423.20	423.20	8

4.2. Wpływ superplastyfikatora na konsystencję betonu samozagęszczalnego

Krzywe na rys. 5 przedstawiają rozplływ betonu samozagęszczalnego i odpowiadający mu czas rozplwywu T_{500} dla różnych udziałów superplastyfikatora i mączki granitowej. Postać tych krzywych jest nieliniowa dla trzech udziałów superplastyfikatora. Krzywe odpowiadające 1,7% i 1,8% superplastyfikatora są zbliżone, a płynność betonu samozagęszczalnego stabilizuje się. Do dalszych badań przyjęto dodatek 1,7% superplastyfikatora. Ten punkt reprezentuje punkt nasycenia betonu samozagęszczalnego dla różnych udziałów mączki granitowej.

4.3. Właściwości betonu

a) Wytrzymałość mechaniczna

Rysunek 6 przedstawia wyniki badań wytrzymałości na ściskanie dla wszystkich betonów. Badanie przeprowadzono na próbkach o wymiarach 15x15x15 cm³ po utwardzaniu przez 28 dni [NF EN 12390-1 i NF EN 12390-1 (48,49)]. Można zauważyć, że wszystkie rozpatrywane mieszanki betonowe mają wytrzymałość na ściskanie większą niż 35 MPa [NF EN 12390-3 (50)], spełniając tym samym zalecenia normy AFGC. Dodatek granitu do 5% ma niewielki wpływ na wytrzymałość na ściskanie, szczególnie w przypadku betonów C1.7 i C1.8. Wyniki te pokazują również, że gdy procentowy udział proszku granitowego wzrasta do 15%, wytrzymałość na ściskanie maleje.

Rysunek 7 pokazuje zmiany wytrzymałości na zginanie betonu w funkcji procentowej zawartości mączki granitowej dla trzech różnych udziałów superplastyfikatora. Badania przeprowadzono na próbkach 7x7x28 cm³ po 28 dniach dojrzewania [NF EN 12390-5]. Wydaje się, że wytrzymałość na zginanie jest w niewielkim stopniu zależna od procentowej zawartości mączki granitowej w porównaniu z wytrzymałością na ściskanie.

- Durability towards high temperature: concrete samples were subjected to the influence of the temperature between 20 °C and 600 °C.

Table 7 shows the values recommended by the AFGC 2008 standard (47) to classify the formulations of concretes.

3.3. Preparation of mix

Twelve concretes were prepared. For each dosage of superplasticizer, control test specimens without granite powder [noticed 0%] were produced. Concretes whose cement was replaced by granite powder are in proportions of 5 %, 10 %, and 15 % by mass. Table 8 gives the compositions of each of these formulations for one cubic meter as well as the designations corresponding to each formulation of concrete.

For the preparation of these concretes, the constituents were mixed in the following order: the aggregates, the cement, and the granite powder were mixed for one minute, then we added water and the superplasticizer. Mixing continued for two more minutes. The mixtures thus obtained were poured into molds to produce specimens in the cuboid shape of 15x15x15 cm and 7x7x28 cm, according to the standard, for 24 hours and then unmolded. Thereafter, the specimens are placed for hardening in a basin of water at an ambient temperature of 20° for 28 days.

4. Characterization and optimal formulation

In this section, the characterization results in the fresh and hardened state of the different concrete formulations are presented. The purpose of these tests is to first confirm that the saturation point of the concrete is the same as that of the cement paste; then, to select the optimal formulation in the percentage of granite.

WŁAŚCIWOŚCI ŚWIEŻEJ MIESZANKI BETONOWEJ

FRESH MIX PROPERTIES

Mieszanka Mix No	Pył granitowy Granite powder, %	SP, %	Rozptyw Spread, mm	Czas rozptywu T_{500} Flow time T_{500} , s	Przeptywalność L Box, H1/H2, -	Przesiew Sieve stability, %	Gęstość Density, kg/m ³
C1.6-00	0	1.6	724	3.2	0.83	12.60	2391
C1.6-05	5	1.6	730	3.2	0.81	13.10	2380
C1.6-10	10	1.6	675	3.4	0.79	13.00	2395
C1.6-15	15	1.6	555	3.6	0.78	13.50	2380
C1.7-00	0	1.7	785	3.0	0.85	12.83	2387
C1.7-05	5	1.7	675	3.2	0.83	13.00	2410
C1.7-10	10	1.7	665	3.2	0.81	13.07	2424
C1.7-15	15	1.7	600	3.4	0.77	13.34	2404
C1.8-00	0	1.8	785	3.0	0.85	12.83	2412
C1.8-05	5	1.8	675	3.2	0.83	13.00	2382
C1.8-10	10	1.8	665	3.2	0.81	13.07	2424
C1.8-15	15	1.8	600	3.4	0.77	13.34	2424

b) Segregacja

Aby zbadać segregację statyczną mieszanki, zaformowano cylindryczne próbki o średnicy 11 cm i wysokości 40 cm, które dojrzewały przez 28 dni. Z tych próbek wycięto trzy krążki: górny, środkowy i dolny, o równej wysokości [rysunek 7]. Obserwacja rozkładu kruszyw na tych próbkach wykazała jednorodność rozkładu dla każdej z zastosowanych składów betonów. Tak więc można uznać, że zaprojektowane receptury betonu nie podlegają segregacji statycznej. Rys. 8 przedstawia jednorodność rozkładu ziarnowego kruszyw w przypadku betonów C1.6-10. Tę jednorodność obserwuje się dla wszystkich zaprojektowanych betonów.

c) prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych

Rysunek 9 przedstawia prędkość rozprzestrzeniania się fal ultradźwiękowych dla każdego z badanych betonów. Wszystkie badane betony wykazują prędkość rozprzestrzeniania się fal ultradźwiękowych wyższą niż 4200 m/s. Zgodnie z normą NF EN 1250-4 (51) pomiary te pokazują, że wszystkie betony mają mikrostrukturę podobnej gęstości.

d) Nasiąkliwość i głębokość penetracji wody pod ciśnieniem

Nasiąkliwość wody waha się dla badanych betonów od 2,23 do 3,25%. W celu oceny przepuszczalności betonu przeprowadzono badanie, którego zasada opiera się na pomiarze penetracji wody pod ciśnieniem [rys. 10]. Penetracja wody odbywa się pod ciśnieniem 5 barów przez 72 godziny, zgodnie z normą EN 12390-8 (52). Pod koniec badań próbki przecięto na pół, jak pokazano na rys. 11, aby zmierzyć głębokość penetracji wody, która dostała się do próbki. Zgodnie z normą EN 12390-8 (52) głębokość ta nie może przekraczać 4 cm. Głębokości zmierzone podczas tych badań podano w tablicy 10. Wyniki pokazują, że maksymalna głębokość wnikania wody nie przekracza 1,9 cm dla wszystkich badanych betonów. Świadczy to o ich dobrej szczelności.

4.1. Fresh mix properties

Table 9 shows the results of the rheological test of the different formulations. From these results and according to AFGC 2008, one can conclude that in practice all mixtures can be used as self-compacting concrete. Indeed:

- the spread is between 555 mm-785 mm,
- the dynamic segregation (H1 / H2) varies from 0.77-0.85,
- the static stability of concrete for all the formulas is less than 13.50 %,
- the density at the fresh state is of the order of 2380 kg/m³ to 2424 kg/m³.

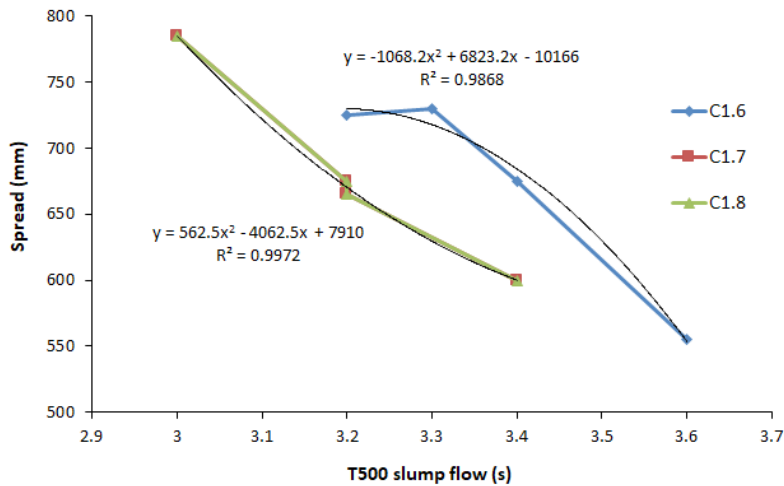
4.2. Effect of superplasticizer on the flow of self-compacting concrete

The curves in Fig. 5 give the spread of self-compacting concrete and the corresponding flow time of self-compacting concrete for the different percentages of superplasticizer and granite powder. The evolution of these curves is non-linear for the three percentages of superplasticizers. The curves corresponding to 1.7 % and 1.8 % of superplasticizer merge, and the fluidity of the self-compacting concrete stabilizes. So, a percentage of 1.7 % of superplasticizer is adopted. This point represents the saturation point of self-compacting concrete for the different percentages of granite.

4.3. Properties of hardened concrete

a) Mechanical resistance

Figure 6 shows the strength test results for all concretes. The tests were carried out on 15x15x15 cm³ specimens after curing for 28 days [NF EN 12390-1 and NF EN 12390-1 (48,49)]. It can be noted that all the concrete blends considered have a compressive strength greater than 35 MPa [NF EN 12390-3 (50)], thus



Rys. 5. Zależność rozplywu i czasu rozplywu T_{500} .

Fig. 5. Relationship between the spread and the T_{500} slump time.

4.4. Optymalny skład betonu

Stwierdzono, że beton zawierający 1,7% superplastyfikatora i 10% mączki granitowej jest optymalny, zgodnie z zaleceniami normy AFGC 2008. Punkt nasycenia w betonie jest taki sam jak w przypadku zaczynu cementowego i wynosi SP = 1,7%. Właściwości reologiczne są zbliżone dla wszystkich składów betonu z tą zawartością superplastyfikatora, niezależnie od wprowadzonej ilości mączki granitowej. Dla udziału mączki granitowej wynoszącego 15% zanotowano spadek wytrzymałości betonu na ściskanie i pogorszenie właściwości reologicznych, w szczególności rozplywu. Dlatego przyjęto optymalny udział mączki granitowej wynoszący 10% [beton C1.7-10].

5. Zachowanie w agresywnych środowiskach i w wysokiej temperaturze

Beton o optymalnym składzie [C1.7-10] i beton referencyjny [C1.7-00] zostały poddane testom trwałości w agresywnych środowiskach. Następnie zbadano wpływ temperatury na wytrzymałość na ściskanie.

5.1. Odporność na działanie chlorków i siarczanów

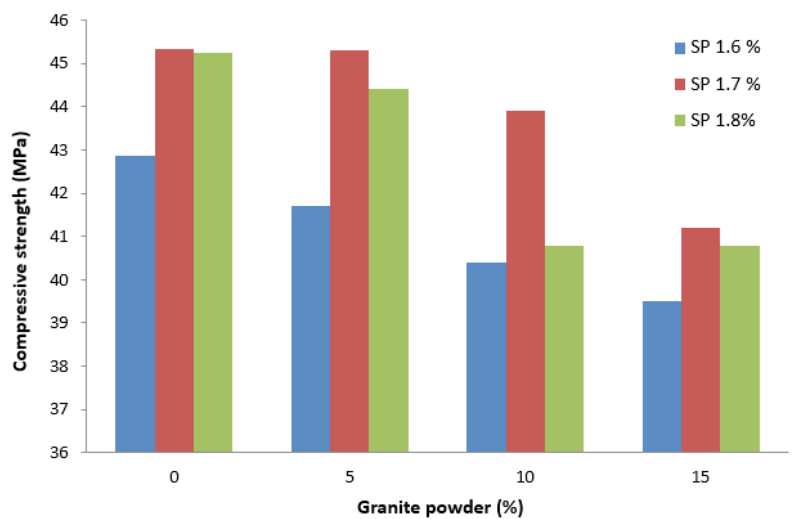
Aby zbadać trwałość betonów C1.7-00 i C1.7-10, próbki tych betonów o wymiarach 15x15x15 cm³ zanurzone w dwóch agresywnych środowiskach: roztworze kwasu solnego o stałym pH = 4 i siarczanie sodu o stężeniu 5% przez 12 miesięcy. Próbki o tych samych wymiarach i wykonane z tych samych betonów zanurzone w wodzie, aby służyły jako punkt odniesienia podczas analizy wyników. Rys. 11 i 12 przedstawiają wyniki uzyskane po zanurzeniu próbek w dwóch agresywnych środowiskach, a także tych zanurzonych w wodzie. Rys. 12

satisfying the recommendations of the AFGC standard. The addition of granite up to 5 % has little influence on the compressive strength, especially for C1.7 and C1.8 concretes. These results also reveal that when the percentages of granite powder increase to 15 %, the compressive strength decreases.

Figure 7 shows the evolution of the flexural strength as a function of the percentage of granite powder for three different percentages of the superplasticizer. The tests were carried out on 7x7x28 cm³ specimens after curing for 28 days [NF EN 12390-5]. It appears that the flexural strength is little affected by the percentage of granite powder, in comparison with the compressive strength.

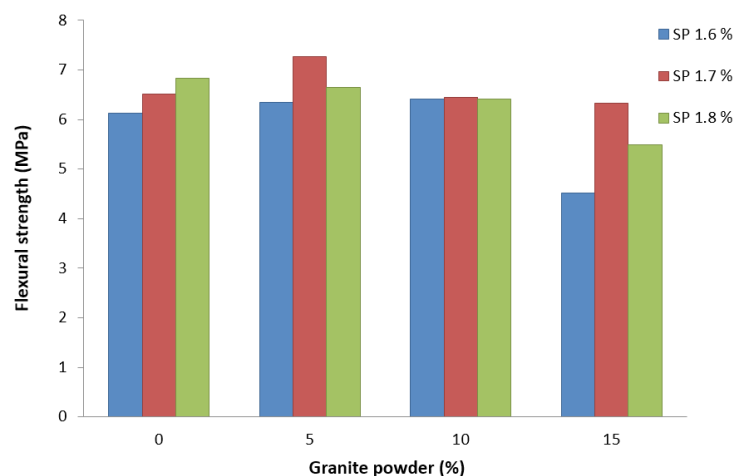
b) Static Segregation

In order to determine the static segregation of materials, cylindrical specimens [11 cm in diameter and 40 cm



Rys. 6. Wytrzymałość na ściskanie w funkcji udziału mączki granitowej.

Fig. 6. Compressive strength as a function of % GP for all formulations.



Rys. 7. Wytrzymałość na zginanie jako funkcja udziału mączki granitowej.

Fig. 7. Flexural strength as a function of the % of GP for all the blends.



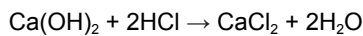
Rys. 8. Ocena wizualna dystrybucji kruszyw w próbce C1.6-10.

Fig. 8. Distribution of aggregates over the height of the sample C1.6-10.

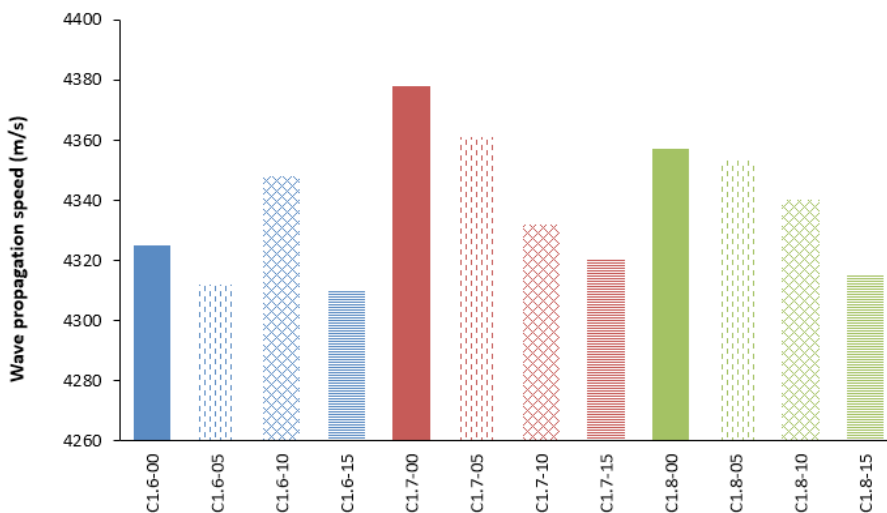
przedstawia wygląd tych próbek. Próbki zanurzone w kwasie solnym o pH = 4 pozostały niezmienione: nie uległy uszkodzeniu pomimo obecności jonów chlorkowych. Ponadto nie zanotowano straty masy. Analogiczne obserwacje wykonano w przypadku próbek zanurzonych w siarczanie sodu o stężeniu 5%, które nie wykazały żadnej zmiany kształtu ani koloru.

Rys. 13 przedstawia porównanie wytrzymałości na ściskanie betonów C1.7-00 i C1.7-10 w funkcji czasu zanurzenia w roztworze kwasu solnego o pH = 4, w siarczanie sodu o stężeniu 5% i w wodzie.

Zanotowano spadek wytrzymałości na ściskanie po zanurzeniu próbek betonów w roztworze kwasu solnego o pH = 4 trwającym sześć miesięcy. Spadek ten można wyjaśnić faktem, że kwas solny reaguje z $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zgodnie z reakcją (53):



Po przereagowaniu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i obniżeniu pH w układzie, faza C-S-H i ettringit zaczynają się rozkładać z uwolnieniem Ca^{2+} . Dlatego beton zaczyna się rozpuszczać, co powoduje zmniejszenie jego wytrzymałości. W przypadku próbek zanurzonych w 5% siarczanie sodu stwierdzono, że wytrzymałość na ściskanie spada znacząco po ok. 9 miesiącach zanurzenia. Wytrzymałość na ściskanie gwałtownie spadła w ciągu ostatnich trzech miesięcy badań [rys. 14]. Korozja materiału



Rys. 9: Zmiana prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych dla wszystkich mieszanek.

Fig. 9. Variation of the propagation speed of the ultrasonic waves for all the mixes.

in height] were poured vertically for each concrete formulation and left for curing for 28 days. From these samples, three discs were cut: upper, middle, and lower, of approximately equal heights [Fig. 7]. The observation of the distribution of the aggregates on these samples showed a homogeneity of distribution for each of the formulations used. So, the formulations adopted in this study are not subject to static segregation. By way of example, the photographs in Fig. 8 illustrate the homogeneity of distribution of the aggregates in the case of formulation C1.6-10. This homogeneity is observed for all the formulations.

c) Propagation of ultrasonic waves

Fig. 9 gives the speed of propagation of the ultrasonic waves for each of the formulations used. All the concretes studied present a speed of propagation higher than 4200 m/s. According to NF EN 1250-4 (51), these measurements show that all the concretes are of good quality.

d) Water absorption and water permeability

The water absorption rate varies between 2.23 and 3.25% for all the formulations. For the study of water permeability, a test whose principle is based on the measurement of the water projected on the concrete [Fig. 10] was carried out. The projection of water is carried out at a pressure of 5 bars for 72 hours, according to standard EN 12390-8 (52). At the end of the test, the samples were cut in half, as shown in Figure 11, to measure the height of the water that entered the sample. According to standard EN 12390-8 (52), this height must not exceed 4 cm. The heights measured during these tests are given in Table 10. These results show that the maximum water insertion height does not exceed 1.9 cm for all the formulations used. This indicates the good quality of the concretes adopted.

4.4. Optimal formulation

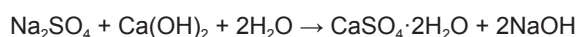
The formulation with 1.7 % superplasticizer and 10 % granite powder is optimal, following the recommendations of the AFGC 2008 standard. Indeed, the saturation point of the concrete is found the same as that of the cement paste, that is SP = 1.7 % because the rheological parameters remain the same for all concrete formulations with this percentage of superplasticizer, whatever the percentage of granite powder added. For a percentage of granite powder of 15 %, a decrease in concrete compressive strength and a degradation of rheological parameters, in particular spreading, are observed. Therefore, the optimal granite powder threshold of 10 % [C1.7-10] is adopted.



Rys. 10. Badanie przepuszczalności wody.

Fig. 10. Water permeability test.

wynika z reakcji jonów siarczanowych w kontakcie z glinianami wapnia zawartymi w betonie oraz w wyniku reakcji z $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zgodnie z (54):



Reakcja ta prowadzi do powstania gipsu, który jest ekspansywny, co powoduje powstawanie pęknięć i w efekcie znaczny spadek wytrzymałości.

5.2. Wpływ temperatury na wytrzymałość

Badano wpływ temperatury na betony C1.7-00 i C1.7-10 próbek $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ po 28 dniach dojrzewania, a następnie umieszczono je w komorze w temperaturze $105 \pm 5^\circ\text{C}$ przez 24 godziny. Następnie próbki umieszczano w piecu nagrzanym do różnych temperatur. Weryfikowano wpływ trzech temperatur prażenia: $T = 200^\circ\text{C}$, $T = 400^\circ\text{C}$ i $T = 600^\circ\text{C}$. Rys. 14 przedstawia wpływ temperatury na wytrzymałość na ściskanie betonu samozagęszczalnego. Obserwuje się monotony spadek wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem temperatury. Ten spadek jest umiarkowany dla temperatur pomiędzy 200°C a 400°C . Następnie wzrasta dla wyższych temperatur. Spadek wytrzymałości pomiędzy 20 a 200°C można przypisać rozkładowi fazy C-S-H pod wpływem temperatury. Różnica w wytrzymałościach między 200 a 300°C były niewielkie. Powyżej 400°C wszystkie badane betony wykazują znaczny spadek wytrzymałości z powodu rozkładu produktów hydratacji i dużej ilości zaobserwowanych mikropęknięć. W temperaturze 600°C spadek wytrzymałości jest spowodowany degradacją matrycy cementowej i rozkładem termicznym kruszyw powodujących znaczne pęknięcie (55).

Rys. 15 przedstawia zmiany porowatości w funkcji temperatury. Porowatość wzrasta monotonicznie wraz ze wzrostem temperatury. W temperaturach do 200°C można to wyjaśnić odparowaniem zaadsorbowanej wody z porów i rozkładowi fazy C-S-H, w wyższych

Tablica 10 / Table 10

NASIĄKLIWOŚĆ I PENETRACJA WODY POD CIŚNIENIEM

WATER ABSORPTION AND THE PERMEABILITY OF CONCRETE

Mieszanka Mix No	Nasiąkliwość Absorbed water, %	Głębokość penetracji Permeability maximum water, cm
C1.6-00	2.39	1.40
C1.6-05	2.24	1.60
C1.6-10	2.87	1.50
C1.6-15	2.69	1.50
C1.7-00	2.32	1.70
C1.7-05	3.09	1.60
C1.7-10	2.49	1.50
C1.7-15	3.26	1.60
C1.8-00	3.10	1.70
C1.8-05	2.87	1.60
C1.8-10	2.95	1.90
C1.8-15	3.02	1.80



Rys. 11. Schematyczne przedstawienie wysokości penetracji wody w próbce przeciętej na dwie części - czerwona linia.

Fig. 11: Schematization by a red line of the height of water infiltration on a sample cut in two.

5. Behavior in aggressive environments and at high temperature

In this section, the optimal concrete formulation C1.7-10 and the control formulation C1.7-00 are first subjected to durability tests under aggressive environments. Then, the effect of temperature on the compressive strength and the mass loss of these two concretes will be presented.

5.1. Durability to acid and sulfate attack

To study the durability of C1.7-00 and C1.7-10 concretes, two concretes specimens of $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ are immersed into two aggressive environments: hydrochloric acid solution at constant $\text{pH} = 4$ and sodium sulfate at 5%, for 12 months. Samples of the same dimensions and made of the same concretes are immersed in water to serve as a reference during the analysis of the results. Figs. 11 and 12 show the results obtained after immersion of the

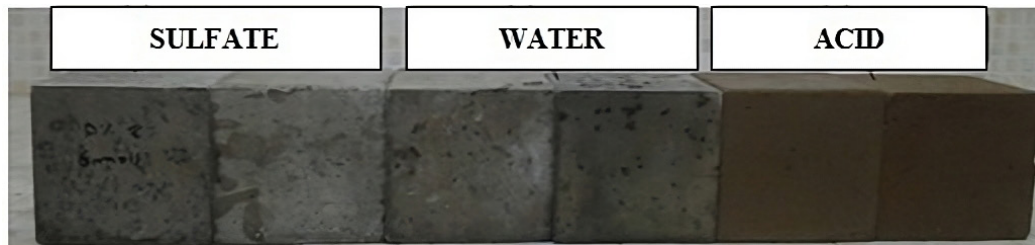
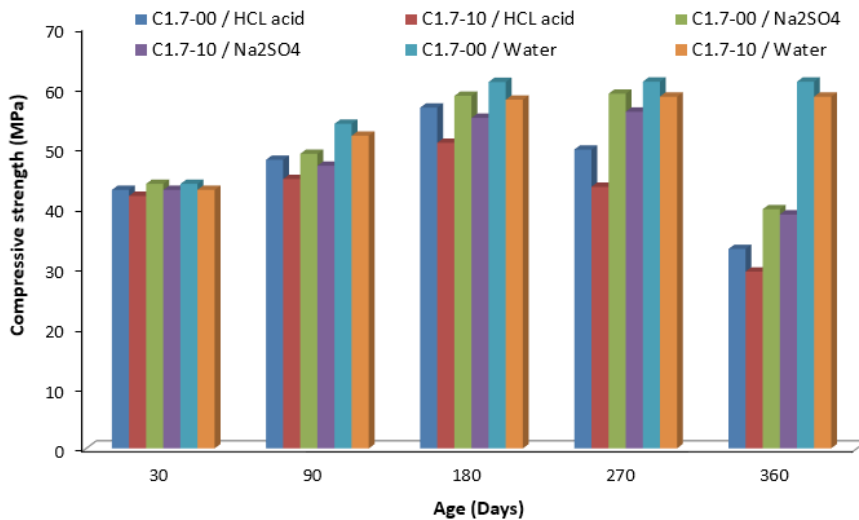


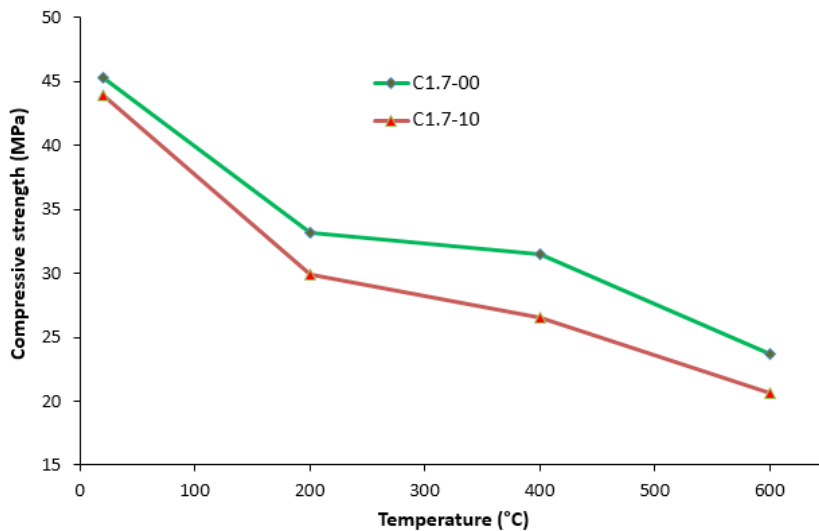
Fig. 12. Wygląd próbek po przetrzymywaniu w środowiskach korozyjnych.

Fig. 12. Visual aspect acid and sulfate attacks after 12 month.



Rys. 13. Wpływ czynników korozyjnych na wytrzymałość na ściskanie.

Fig. 13. Influence of acid and sulfate attack content on the compressive strength.



Rys. 14. Wpływ temperatury na wytrzymałość na ściskanie betonów SCC.

Fig. 14. Influence of temperature on the compressive strength of self-compacting concrete.

temperaturach szybszy wzrost porowatości jest spowodowany tworzeniem się coraz większej liczby pęknięć z powodu pęknięcia betonu (56).

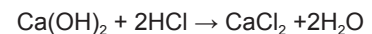
Rysunek 16 pokazuje straty masy w funkcji temperatury. Wszystkie betony wykazały straty masy w funkcji temperatur niezależnie od

compression specimens and samples in the two aggressive media as well as those immersed in water.

Fig. 12 shows the visual appearance of these samples. The samples immersed in hydrochloric acid solution at pH = 4 remained unchanged: they suffered no damage despite the presence of chloride ions. Also, no weight loss was observed. The same is observed for the samples immersed in sodium sulfate at 5 % which did not undergo any change in shape or color.

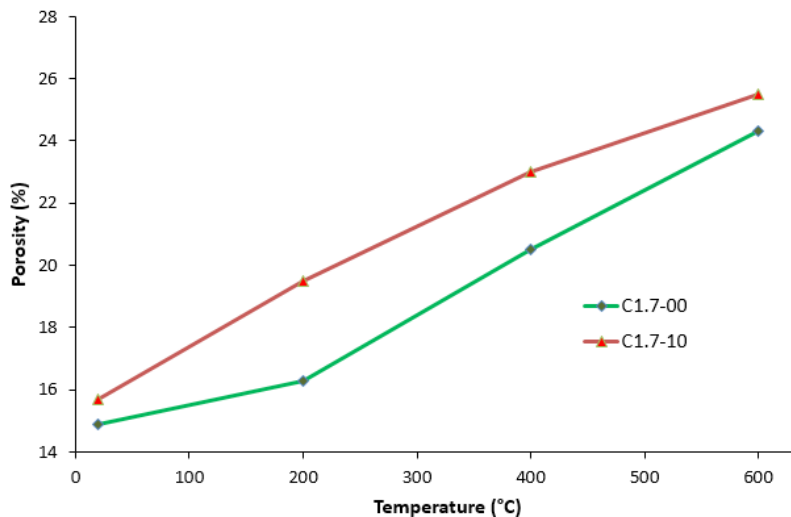
Fig. 13 gives a comparison of the evolution of the compressive strength of concretes C1.7-00 and C1.7-10 as a function of immersion time in hydrochloric acid at pH = 4, in 5% sodium sulfate and in water.

A decrease in compressive strength from an immersion time of six months in hydrochloric acid solution at pH = 4 is observed. This decrease can be explained by the fact that hydrochloric acid attacks the protective layer and causes, in particular, the dissolution of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ to form compounds easily soluble in water according to the formula (53):



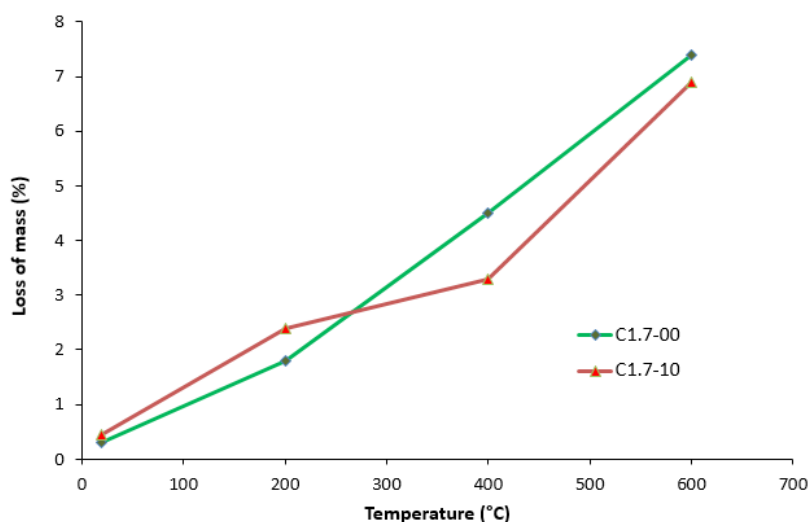
After $\text{Ca}(\text{OH})_2$ leaching, C-S-H phase, and ettringite begin to decompose with the release of Ca^{2+} . The concrete, therefore, begins to disintegrate causing a drop in its strength.

Regarding the specimens immersed in sodium sulfate Na_2SO_4 at 5 %, the compressive strength decreases after 9 months of immersion is found. Indeed, the compressive strength has deteriorated rapidly over the past three months [Fig. 14]. This resistance degradation can be attributed to the reaction of sulfate ions in contact with the anhydrous aluminates contained in the concrete: the sulfate ions attack the protective layer and essentially cause the dissolution of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ according to the following reaction (54):



Rys. 15. Zmiany porowatości w funkcji temperatury.

Fig. 15. Variation of porosity as a function of temperature.



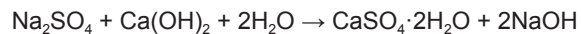
Rys. 16. Zmiany straty masy w funkcji temperatury.

Fig. 16. Variation of mass loss as a function of temperature.

ilości mączki granitowej czy superplastyfikatorów. Zgodnie z oczekiwaniem wzrost temperatury powoduje łuszczenie się betonu i powstawanie pęknięć i porów, jak pokazano na rys. 16. Można również zauważyć, że obecność mączki granitowej spowalnia utratę masy w temperaturach od 200°C do 400°C.

6. Wnioski

Niniejsze badania dotyczyły projektowania składu betonu samozagęszczalnego [SCC] zawierającego piasek pustynny i mączkę granitową. Badanie miało na celu weryfikację wykonalności betonu z wykorzystaniem piasku pustynnego zastępującego piasek rzeczny. Drugim celem było znalezienie optymalnego dodatku mączki granitowej będącej odpadem przemysłowym. Wyniki są bardzo obiecujące i pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków.



This reaction leads to the formation of gypsum, which is very expansive, resulting in the formation of cracks, and therefore causing a significant drop in strength.

5.2. Effect of temperature on strength

The effect of temperature on C1.7-00 and C1.7-10 concrete specimens with dimensions 15x15x15 cm³ after curing for 28 days is studied, then placed in a chamber at 105 ± 5 °C for 24 hours. Next, the samples are directly placed, for 60 minutes, inside an oven preheated to a temperature T. We are interested in the effect of three preheating temperatures: T = 200 °C, T = 400 °C, and T = 600 °C.

Fig. 14 shows the influence of temperature on the compressive strength of self-compacting concrete. A monotonous drop in compressive strength with increasing temperature is seen. This decrease is moderate for temperatures between 200 °C and 400 °C. It then increases for higher temperatures. The drop in strength between 20 and 200 °C can be attributed to a decrease in the cohesive forces between the layers of C-S-H phase. These bonding forces are weaker.

The strength was almost constant between 200 and 300 °C for concrete without granite powder. Above 400 °C, all the concretes tested show a significant drop in strength due to the large quantities of microcracks observed. At 600 °C, the drop in strength is due to a coupled degradation of the cementitious matrix and disintegration of the aggregates causing significant cracking (55).

Fig. 15 shows the evolution of porosity as a function of temperature. The porosity increases monotonously with temperature. For temperatures up to 200 °C, this can be explained by the departure of adsorbed water from the pores and thermal decomposition of C-S-H phase, for higher temperatures the faster increase in porosity is due to the creation of more and more cracks due to concrete cracking (56).

Fig. 16 shows the variation of mass loss as a function of temperature. All the concretes undergo an increase in mass loss with temperature regardless of the dosage of granite powder or superplasticizers. Indeed, it is known that the increase in temperature causes the spalling of the concrete and the creation of cracks and porosity, as observed in Fig. 16. One can also observe that the presence of granite slows down the loss of mass for temperatures between 200 °C and 400 °C.

6. Conclusions

This study explored the feasibility of self-compacting concrete [SCC] design by combining desert sand with granite powder, the

1. Piasek pustylny o średniej wielkości ziarna zastępuje w 100% piasek rzeczny lub kopalniany w zaprojektowanym betonie samozagęszczalnym. Jego drobne ziarna i kulisty kształt sprzyjają uzyskiwaniu dobrej konsystencji i urabialności betonu.
2. Dodanie mączki granitowej do betonu samozagęszczalnego zmniejsza „bleeding” i segregację w tym betonie. Jednak zwiększenie ilości mączki powyżej 15% pogarsza konsystencję betonu samozagęszczalnego.
3. Optymalna ilość mączki granitowej stosowanej jako zamiennika cementu wynosi 10%. Ta substytucja jest korzystna zarówno ekonomicznie, jak i ekologicznie, ponieważ jeśli produkcja jednej tony cementu uwalnia 800 do 900 kg CO₂, użycie mączki granitowej zmniejsza emisję CO₂ o 90 kg/tonę.
4. Wyniki pokazują istnienie liniowej zależności między rozplywem a czasem przepływu T₅₀₀, co dostarcza informacji o prędkości przepływu dla punktu nasycenia superplastyfikatorem wynoszącego 1,7 i 1,8%.
5. Mączka granitowa nie wydaje się wpływać na beton samozagęszczalny poddany działaniom podwyższonej temperatury.

Literatura / References

1. Z. P. Bažant, A. A. Dönmez and H. T. Nguyen, Précis of gap test results requiring reappraisal of line crack and phase-field models of fracture mechanics. *Eng. Struct.* **250**, 113285 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113285>
2. S. Gökçe Gök, I. Kilic , Ö. Sengül, Properties of alkali-activated roller compacted concretes produced from waste aggregates. *Cem. Wapno Beton* **26**(4) 352–363 (2021). <https://doi.org/10.32047/cwb.2021.26.4.7R>
3. M. Ould Ouali, P. Poorsolhjouy, L. Placidi and A. Misra, Evaluation of the effects of stress concentrations on plates using granular micromechanics. *Constr. Build. Mater.* **290**, 123227 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123227>
4. D. Lau, H. J. Pam, Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams. *Eng. Struct.* **32**, 3857–3865 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.08.028>
5. L. Madouni, M. Ould Ouali, N. E. Hannachi, Numerical assessment of the load transfer in steel coupling beam-reinforced concrete shear wall connection. *Asian J. Civil Eng.* **20**(1), pp 35–47, (2019). <https://doi.org/10.1007/s42107-018-0086-4>
6. Y. Agrawal, T. Gupta, R. Sharma, N.L. Panwar, S. A. Siddique, Comprehensive Review on the Performance of Structural Lightweight Aggregate Concrete for Sustainable Construction. *Constr. Mater.* **1**, 39–62 (2021). <https://doi.org/10.3390/constrmater1010003>
7. J. Smoleń, K. Tomaszewska, G. Junak, M. Kozioł, Short glass fiber reinforced polymer concrete with addition of waste cathode-ray tube (CRT) glass. *Cem. Wapno Beton* **27**(2) 102–114 (2022). <https://doi.org/10.32047/cwb.2022.27.2.2>
8. N. Talbi, A. Nekkrouche, M. Ould Ouali, N. E. Hannachi and M. N. Farsi, Modeling the contribution of tire-reclaimed and industrial steels fibers on the strength and ductility of RC-frames structures. *World J. Eng.* **20**(5), 888–904, (2023). <https://doi.org/10.1108/WJE-12-2021-0696>
9. Z. Li, T. Guo, Y. Chen, Y. Wang, Y. Chen, Q. He, X. Yang, J. Wang, Study on Performance of Retarded Composite Semi-Rigid Base Mixed with Rubber Powder. *Materials* **15**, 4683 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15134683>

purpose was twofold. First, the study aimed to show the feasibility of using desert sand to replace river sand to protect groundwater. The second objective was to find an economic use for granite powder as industrial waste. The results are very encouraging and showed that:

1. Desert sand of medium grain size replaces 100 % river or quarry sand in the design of self-compacting concrete. Its richness in fine grain and its spherical shape promote the fluidity and workability of the concrete.
2. Adding granite powder to self-compacting concrete reduces bleeding and segregation in that concrete. However, increasing the amount of granite powder up to 15 % negatively affects the consistency of self-consolidating concrete.
3. The rate of granite powder used as a cement substitute is optimal at 10 %. This substitution is beneficial both economically and ecologically, because if the manufacture of one tonne of cement releases 800 to 900 kg of CO₂, the use of granite powder reduces the rate of CO₂ emitted by 90 kg/t.
4. The results show the existence of a linear relationship between the slump flow and the flow time, which provides information on the flow velocity for a superplasticizer rate of 1.7 and 1.8 %.
5. Granite powder does not appear to affect the behavior of self-consolidating concrete at high temperatures.

10. H. Okamura, M. Ouchi. Self-compacting Concrete. *J. Adv. Concr. Techn.* **1**(1), 5-15 (2003). <http://dx.doi.org/10.3151/jact.1.5>
11. S. Mahesh, Self-Compacting Concrete and its Properties. *J. Eng. Res. Appl.* **4**(8), 72-80 (2014).
12. J. Shen, Mix-design method of self-compacting concretes for pre-cast industry. *Can. J. Civ. Eng.* **36**, 1459–1469 (2008). <https://doi.org/10.1139/L09-083>
13. M. Reddy, Effect of W/C Ratio on Workability and Mechanical Properties of High Strength Self Compacting Concrete. *IOSR-JMCE* **3**(1), 06-13 (2013). <http://dx.doi.org/10.9790/1684-11561521>
14. N. Bouhamou, N. Belas, H. A. Mesbah, R. Jauberthie, A. Ouali, A. Mebrouki, Influence des rapports eau/ciment et fines/ciment sur le comportement à l'état durci du béton auto plaçant à base de matériaux locaux algériens. *Rev. Can. Génie Civ.* **36**, 1195–1206 (2009). <http://dx.doi.org/10.1139/L09-071>
15. Salah E. Belaidi, S. Kenai, El-Hadj Kadri, H. Soualhi, B. Benabed, Effects of experimental ternary cements on fresh and hardened properties of self-compacting concretes. *J. Adh. Sci. Techn.* **30**(3), pp247-261 (2015). <http://dx.doi.org/10.1080/01694243.2015.1099864>
16. R. Dubey, P. Kumar, Effect of superplasticizer dosages on compressive strength of self-compacting concrete. *IJCSE* **3**(2), 360-366 (2012).
17. S. M. Dume, Effect of superplasticizer on fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing fly ash. *AJER* **3**(3), 205-211 (2014).
18. K.S. Johnsirani, Studies on Effect of Mineral Admixtures on Durability of Self-Compacting Concrete. *Eur. J. Adv. Eng. Techn.* **2**(7), 87-94 (2015).
19. R. Cheraghalizadeh and T. Akçaoğlu, Properties of self-compacting concrete containing olive waste ash. *Cem. Wapno Beton*, **25**(3), 178–187 (2020). <https://doi.org/10.32047/CWB.2020.25.3.2>
20. S. Alsanusi, Influence of Silica Fume on the Properties of Self Compacting Concrete. *IJCESCAE* **7**, 348-352 (2013).
21. U. N. Shah, C. D. Modheda, Study on fresh of self-compacting concrete with process fly ash. *IJRET* **2**(5), 271-274 (2014).
22. D. Kumar Ashish, Feasibility of waste marble powder in concrete as partial substitution of cement and sand amalgam for sustainable growth. *J. Build. Eng.* **15**, 236-242 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.11.024>
23. P. Ricardo, L. Roberto Prudêncio Jr, A. E. Lima, F. Pelisser, P. J. P. Gleize. Use of porcelain polishing residue as a supplementary cementitious material in self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.* **193**, 623–630 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.228>
24. S. Kim, S. Choi, E. Yang, Evaluation of durability of concrete substituted heavyweight waste glass as fine aggregate. *Constr. Build. Mater.* **184**, 269–277 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.221>
25. K. Haddad, O. Haddad, S. Aggoun, S. Kaci, Correlation between the porosity and ultrasonic pulse velocity 1 of recycled aggregate concrete at different saturation levels. *Can. Génie Civil*, **44**(11), 911-917 (2017).
26. M. Gravost, JM Sionneau, Interactions entre les carrières et les eaux souterraines et superficielles. *Bilan des connaissances techniques. Bureau de Recherches Géologiques et Minières.* 1988.
27. B T. Ashwini Manjunath, Partial Replacement of Sea and Desert Sand in Place of River Sand for Mortar in Construction. *GRD J. Eng.* **2**(7), 81-85 (2017). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24600.42242>
28. H. Liu, Frost Resistance of Desert Sand Concrete. *Adv. Civil Eng.* 2021, 6620058 (2021). <https://doi.org/10.1155/2021/3617552>
29. J. Kaufmann, Evaluation of the combination of desert sand and calcium sulfo-aluminate cement for the production of concrete. *Constr. Build. Mater.* **243**, 118281 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118281>
30. H. Cai, Predicting the Compressive Strength of Desert Sand Concrete Using ANN: PSO and Its Application in Tunnel. *Adv. Civil Eng.* 2020, 8875922, (2020). <https://doi.org/10.1155/2020/8875922>
31. Jialing Che, Mechanical Properties of Desert Sand-Based Fiber; Reinforced Concrete (DS-FRC). *Appl. Sci.* **9**, 1857 (2019). <https://doi.org/10.3390/app9091857>
32. N. Khelil, M. Ould Ouali, L. Meziane, On the use of fine dune sand in Reactive Powder Concrete: Effect on resistance, water absorption and UPV properties. *Constr. Build. Mater.* **388**, 131684 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131684>
33. G Santha Kumar, Aman Kumar Mishra, Influence of granite fine powder on the performance of cellular lightweight concrete. *J. Build. Eng.* **40**, 102707 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102707>.
34. Z.Z. Woźniak, A. Chajec, L. Sadowski, Effect of the Partial Replacement of Cement with Waste Granite Powder on the Properties of Fresh and Hardened Mortars for Masonry Applications. *Materials* **15**, 9066 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15249066>
35. E. Asadi Shamsabadi, M. Ghalehnovi, J. De Brito, A. Khodabakhshian, Performance of Concrete with Waste Granite Powder: The Effect of Superplasticizers. *Appl. Sci.* **8**(10), 1808 (2018). <https://doi.org/10.3390/app8101808>
36. T. Felix Kala, Effect of Granite Powder on Strength Properties of Concrete. *Int. J. Eng. Sci.* **2**(12), 36-50 (2013).
37. S. Ghannam, Experimental study of concrete made with granite and iron powders as partial replacement of sand. *Sust. Mater. Techn.* **9**, 1–9, (2016). <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2016.06.001>
38. G. Prokopski, V. Marchuk, A. Huts. The effect of using granite dust as a component of concrete mixture. *Case Stud. Constr. Mater.* **13**, e00349 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00349>
39. NF EN 206-2014 : Norme Spécifications, performances, production et conformité, 2014.
40. NF EN 1008 : Norme Eau de gâchage pour bétons, 2003.
41. NFEN 1097 : Norme Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, 2011.
42. NF EN 933 : Norme Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats
43. BS EN 1744-1:2009+A1:2012: Tests for chemical properties of aggregates - Chemical analysis
44. NF EN 12350-8 : Norme Essai pour béton frais - Partie 8 : béton autoplçant - Essai d'étalement au cône d'Abrams, 2010.
45. NF EN 12350-10 : Norme Essai pour béton frais - Partie 10 : béton autoplçant - Essai à la boîte en L, 2010.
46. NF EN 12350-11 : Norme Essai pour béton frais - Partie 11 : béton autoplçant - Essai de stabilité au tamis, 2011.
47. AFGC 2008 : Cussigh F., Recommandations pour l'emploi des Bétons Auto Plaçants. nAFGC/PN, B@P, 2008.
48. NF EN 12390-1 : Norme Essais pour béton durci - Partie 1 : forme, dimensions et autres exigences aux éprouvettes et aux moules, 2012.
49. NF EN 12390-2 : Norme Essais pour béton durci - Partie 2 : confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance, 2019.
50. NF EN 12390-3 : Norme Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes, 2019.
51. NF EN 1250-4: Norme Essais pour béton dans les structures - Partie 4 : détermination de la vitesse de propagation du son, 2005.
52. NF EN 12390-8: Norme Essais pour béton durci - Partie 8 : profondeur de pénétration d'eau sous pression, 2019.

53. M. Moul, Resistance aux acides et à la pénétration des ions chlorures des mortiers avec pouzzolane et fine calcaire. *Comm. Sci. Techn.* 8, 2010.
54. B. Alam, Sulphate Attack in High-Performance Concrete-A Review. *1(1)*, 15-18 (2012).
55. A. Subhan, Performance of self-compacting concrete at room and after elevated temperature incorporating Silica fume. *Adv. Concr. Constr.* **7(1)**, 31-37 (2019). <https://doi.org/10.12989/acc.2019.7.1.031>
56. C. Larissa, Effect of high temperatures on self-compacting concrete with high levels of sugarcane bagasse ash and metakaolin. *Constr. Build. Mater.* **248**, 118715 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118715>