

Wpływ udziału drobnego kruszywa pochodzącego z recyklingu betonu na właściwości reologiczne i mechaniczne zaprawy samozagęszczalnej

Effect of fine recycled concrete aggregate incorporation rates on rheological and mechanical properties of self-compacting mortar

Hanane Amara¹, Fatma Zohra Melais¹, Ghofrane Benkechkache¹, Nourredine Arabi^{1,*}, Mohamed Nour-Elhak Frihi¹, Roumaissa Salhi¹

¹Materials, Geomaterials and Environment Laboratory (LMGE), Badji Mokhtar- Annaba University, P.O. Box 12, 23000, Annaba, Algeria

*Corresponding author: N. Arabi: e-mail: nourredine.arabi@univ-annaba.dz

<https://orcid.org/0000-0001-5381-2422>

Streszczenie

W pracy zbadano wpływ zastąpienia piasku wydowego [DS] drobnym kruszywem pochodzącym z recyklingu betonu [FRCA] na właściwości samozagęszczalnej zaprawy [SCM] przy poziomach substytucji wynoszących 0%, 25%, 50%, 75% oraz 100%. Metodyka badań obejmowała ocenę rozplywu metodą mini-stożka oraz pomiar czasu przepływu z wykorzystaniem V-lejka, uzupełnione wyznaczaniem granicy płynięcia [τ_0] na podstawie testu równi pochyłej [IP], modelu Coussota–Roussela oraz modelu Chateau–Ovarleza [C–O]. Analizowano również wpływ narastania struktury mieszanki podczas okresów spoczynku wynoszących 10, 20 i 30 minut. W pierwszym etapie wytypowano mieszankę referencyjną zawierającą 1% superplastyfikatora, spełniającą wymagania EFNARC, a następnie stopniowo zastępowano piasek wydomy kruszywem FRCA.

Uzyskane wyniki wskazują z jednej strony na zagęszczenie układu ziarnowego związane z obecnością frakcji pylastych oraz szerszym rozkładem uziarnienia kruszywa FRCA, co skutkowało wzrostem gęstości upakowania na sucho [Φ] z 0,55 do 0,62 wraz ze zwiększeniem udziału FRCA od 0% do 100%. Z drugiej strony stwierdzono pogorszenie właściwości roboczych wraz ze wzrostem zawartości FRCA; zmniejszyła się średnica rozplywu, natomiast czas przepływu w lejku V wykazywał tendencję wzrostową. Z punktu widzenia reologii granica płynięcia τ_0 rosła zarówno wraz ze zwiększaniem udziału FRCA, jak i wydłużaniem czasu spoczynku. Model Chateau–Ovarleza, uwzględniający gęstość upakowania oraz objętościowy udział kruszywa, dostarczał wartości zbliżonych do wyników uzyskanych w teście równi pochyłej, podczas gdy model Coussota–Roussela wykazywał większą wrażliwość na

Summary

This study examines the impact of replacing dune sand [DS] with fine recycled concrete aggregate [FRCA] on the properties of self-compacting mortar [SCM] at incorporation rates of 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, and 100 %. The methodological approach is based on the mini-cone test [slump-flow] and the measurement of flow time using the V-funnel, complemented by yield stress [τ_0] estimations through the inclined plane test [IP], the Coussot–Roussel model, and the Chateau–Ovarlez [C–O] model. The effect of structural build-up with rest periods of 10, 20, and 30 minutes was also examined. A reference mix containing 1 % superplasticizer and meeting EFNARC criteria was first selected before the progressive substitution of DS by FRCA. The results highlight, on the one hand, a granular densification related to the presence of fines and the broader particle size distribution of FRCA, leading to an increase in dry packing density [Φ] from 0.55 to 0.62 as FRCA content increased from 0 % to 100 %. On the other hand, workability decreased with higher FRCA content; the slump flow diminished, while the V-funnel flow time tended to increase. From a rheological perspective, the yield stress τ_0 increased both with the FRCA content and with rest time. The C–O model, which integrates packing density and aggregate volume fraction, provided estimations close to those of the IP test, while the Roussel-Coussot model proved more sensitive to variations in the spread diameter. Finally, in the hardened state, compressive strength decreased significantly with substitution. Compared to the reference sample [0 % FRCA], losses reached about 9 % at 50 % and 33.8 % at 100 %, with a similar trend observed in flexural strength.

zmiany średnicy rozptywu. W stanie stwardniałym zaobserwowano natomiast istotny spadek wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem stopnia substytucji. W porównaniu z próbką referencyjną [0% FRCA] obniżenie wytrzymałości wyniosło około 9% dla 50% substytucji oraz 33,8% dla 100% substytucji. Podobną tendencję odnotowano również w przypadku wytrzymałości na zginanie.

Słowa kluczowe: samozagęszczalna zaprawa, drobne kruszywo z recyklingu betonu, rozptyw, granica płynięcia, właściwości mechaniczne

1. Wprowadzenie

Zaprawa samozagęszczalna [SCM z ang. self-compacting mortar] została opracowana w celu zapewnienia zdolności do samoczynnego rozptywu i całkowitego wypełniania deskowania bez konieczności stosowania wibracji, dzięki odpowiedniemu zrównoważeniu zdolności do rozptywu i odporności na segregację składników (1–3). Wytyczne EFNARC (4) uprościły charakterystykę tego typu materiałów poprzez zastosowanie prostych metod badawczych, takich jak test mini-stożka [slump-flow] oraz V-lejka, służących do oceny wymaganych właściwości roboczych. Ze względu na korzystne właściwości reologiczne, zaprawy samozagęszczalne znajdują zastosowanie w naprawach trudno dostępnych elementów konstrukcyjnych, wykonywaniu cienkościennych elementów o wysokich walorach estetycznych i gładkiej powierzchni (5, 6). Prawidłowe projektowanie składu SCM wymaga jednak uwzględnienia ich właściwości reologicznych, co oznacza konieczność zachowania równowagi pomiędzy właściwościami mechanicznymi w stanie stwardniałym a urabialnością i stabilnością mieszanki (7). Poszukiwanie optymalnych właściwości reologicznych pozostaje aktualnym wyzwaniem, ponieważ ich uzyskanie jest złożone i często wymaga szeroko zakrojonych badań wstępnych. W literaturze zaproponowano szereg modeli umożliwiających przewidywanie właściwości reologicznych materiałów cementowych na podstawie udziału objętościowego oraz właściwości kruszywa, co pozwala na szybkie projektowanie mieszanek o pożądanych parametrach reologicznych. Większość tych modeli opiera się na podejściu wieloskalowym (8, 9). W tym kontekście Hafid i współautorzy (10) analizowali zależność pomiędzy właściwościami reologicznymi zapraw a charakterystyką zagęszczania drobnego kruszywa. Uzyskane wyniki wykazały istotny wpływ tych składników na właściwości SCM. Pomijanie tego oddziaływania prowadzi do obniżenia dokładności wyznaczania parametrów reologicznych, takich jak granica płynięcia i lepkość (11). Szczególnie istotne jest zatem uwzględnienie wpływu wzajemnego ułożenia oraz konfiguracji ziaren drobnego kruszywa.

Jednocześnie rosnące zapotrzebowanie budownictwa na surowce naturalne prowadzi do ich stopniowego wyczerpywania oraz generuje problemy środowiskowe, szczególnie w przypadku eksploatacji piasków wydmych [DS, z ang. dune sand] (12). Wykorzystanie drobnego kruszywa pochodzącego z recyklingu betonu [FRCA, z ang. fine recycled concrete aggregate], otrzymywanego z odpadów budowlanych i rozbiórkowych [CDW, construction and

Keywords: self-compacting mortar, fine recycled concrete aggregate, slump flow, yield stress, mechanical behaviour

1. Introduction

Self-compacting mortar (SCM) was designed to flow and fill formwork without vibration, thanks to a precise balance between filling ability and resistance to segregation (1–3). The EFNARC guidelines (4) simplified their characterisation through the use of simple tests, the mini-cone [slump-flow] and the V-funnel, to qualify the desired workability. Due to its rheological performance, SCM is used to carry out repairs in hard-to-access areas, to form thin elements with pronounced aesthetic characteristics and smooth surfaces (5, 6). Nevertheless, to formulate SCM successfully, it is essential to consider its rheological properties, necessitating a balance between mechanical performance in the hardened state and workability, as well as stability in the fresh state (7). The quest for suitable rheological properties is persistent; yet, achieving them is challenging and often requires extensive preliminary research. Several model proposals have been advanced to predict the rheological characteristics of cement-based materials based on the volume fraction and properties of aggregates, thereby enabling the rapid preparation of mixtures that exhibit suitable rheological properties. Most of these models rely on a multi-scale approach (8, 9). In this context, Hafid et al. (10) investigated the relationship between the rheological properties of the mortar and the compaction characteristics of the fine aggregates. Their observations highlighted the significant impact of these aggregates on SCM performance. Consequently, ignoring these effects compromises the precision of the rheological parameters (yield stress and viscosity) of the SCM (11). It is so crucial to consider the influence of the superposition and configuration of fine aggregate particles.

On the other hand, the increasing demand for natural resources in building results in their scarcity and environmental issues, especially the extraction of dune sand [DS] (12). The use of fine recycled concrete aggregates [FRCA], derived from construction and demolition waste [CDW], as a substitute for SD for the production of concrete presents potential values that promote sustainable development (13). Contrary to DS, FRCA, which is derived from the crushing of used concrete, is characterized by particles often having an acicular shape, strong angularity, and a rough surface (14). These characteristics generally depend on the initial composition of the source concrete and also on the crushing process applied for manufacturing the recycled aggregates (15). In addition to these characteristics, the presence of old adherent mortar, which is friable and porous, also leads to a high water absorption rate for

demolition waste], jako zamiennika piasku wydumowego w produkcji betonu stanowi rozwiązanie sprzyjające zrównoważonemu rozwojowi (13). W przeciwieństwie do piasku wydumowego, FRCA uzyskiwane w procesie kruszenia zużytego betonu charakteryzuje się ziarnami o często igielkowym kształcie, dużej kanciastości oraz rozwiniętej, szorstkiej powierzchni (14). Właściwości te zależą zarówno od składu betonu źródłowego, jak i od zastosowanej technologii kruszenia wykorzystywanej do produkcji kruszywa z recyklingu (15). Dodatkowo obecność porowatej i kruchej warstwy starej zaprawy przylegającej do ziaren powoduje wysoką nasiąkliwość FRCA (16). Wymienione cechy znacząco utrudniają kontrolę właściwości reologicznych zapraw, co tłumaczy rosnące zainteresowanie tym materiałem w badaniach naukowych (17).

W związku z transformacją sektora budowlanego w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym, niniejsza praca koncentruje się na zastosowaniu FRCA w samozagęszczalnej zaprawie w celu pogodzenia wymagań dotyczących właściwości użytkowych, stabilności reologicznej oraz efektywnego wykorzystania zasobów. Głównym zagadnieniem badawczym jest powiązanie wyników prostych badań wykonywanych w stanie świeżym [mini-stożek, V-lejek] z podstawowymi parametrami reologicznymi [granica płynięcia τ_0 , lepkość] oraz z mikrostrukturą wynikającą z upakowania ziaren.

Celem pracy było określenie wpływu stopnia zastąpienia kruszywem z recyklingu [0–100%] oraz czasu spoczynku mieszanki na wartość rozplywu i czas przepływu przez lejek V. Ponadto podjęto próbę wyznaczenia granicy płynięcia za pomocą eksperymentalnego testu równi pochyłej [IP test], zbliżonego do rozwiązania zaproponowanego przez Kheyata i współautorów (18), a następnie porównania uzyskanych wyników z wartościami obliczonymi na podstawie modeli analitycznych Coussota i Roussela (19) oraz Chateau i współautorów (20), powszechnie określanego jako model C–O. Pozwoliło to na ocenę czułości oraz zakresu stosowalności poszczególnych metod. Badania miały również na celu określenie ilościowych zależności pomiędzy udziałem FRCA, czasem spoczynku mieszanki i zagęszczeniem ziarnowym poprzez równoległą ocenę granicy płynięcia τ_0 trzema metodami [test IP, model Coussota–Roussela oraz model Chateau–Ovarleza], umożliwiającą ich bezpośrednie porównanie.

2. Materiały i metody badań

2.1. Zastosowane materiały

W badaniach zastosowano cement CEM II/B-L 42.5N zgodny z normą algierską NA 442 (21). Skład chemiczny, skład fazowy według Bogue'a oraz właściwości fizyczno-mechaniczne cementu zestawiono w tablicy 1. Zastosowana mączka wapienna [LSF]

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY, SKŁAD FAZOWY WEDŁUG BOGUE'A ORAZ WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNOMECHANICZNE CEMENTU.

CHEMICAL COMPOSITION, BOGUE PHASE COMPOSITION AND PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT.

CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	Strata prażenia Loss on ignition	Wolne CaO Free CaO
67.59	4.59	16.60	2.85	5.00	0.15	2.19	0.67	0.22	2.21	<1

FRCA (16). These particularities complicate the control of mortar rheological performances, which explains the growing interest in academic research for this material (17).

Based on the transition towards a circular construction, this work focuses on integrating FRCA into an SCM to reconcile performance, rheological stability, and resource economy. The central issue consists of linking simple fresh state tests [mini-cone, V-funnel] to structuring rheological parameters [shear threshold - τ_0 , viscosity] and to the micro-structure induced by granular stacking.

The study aims to quantify the effect of the substitution rate in recycled aggregates [0–100 %] and the rest time on spreading and the V-funnel time. She then seeks to estimate the shear threshold by an experimental test on the inclined plane [Ip test], resembling that developed by Kheyat et al. (18) and compared it with that of the analytical models, Roussel and Coussot (19) and Chateau et al. (20), better known under the term C-O model, then to compare the sensitivity and field of validity of these approaches. The study attempts to establish quantitative relationships between FRCA substitution, rest times, and granular compactness using triple τ_0 evaluation [IP test, Coussot–Roussel, Chateau–Ovarlez], enabling a clear comparison of techniques.

2. Materials and methods

2.1. Materials used

This study used a CEM II/B-L 42.5N type cement, which complies with the Algerian Standard NA 442 (21). The chemical composition, Bogue analysis, and physical properties offered by the company that produced it are listed in Table 1.

The limestone filler [LSF] used was obtained by finely grinding natural limestone rock, with a calcium carbonate [CaCO₃] content of approximately 98 %. The material was ground to a particle size below 80 μm . The origin of the product, designated CFD 15, is attributed to ENG in Constantine, Algeria. The chemical and physical characteristics are detailed in Table 2.

This experiment used a chemical admixture, a superplasticizer [SP], described as a polyvalent superplasticizer/high-range water reducer. The product is non-chlorinated and acrylic copolymer-based, supplied as an aqueous solution with a density of $1060 \pm 10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, pH 4.5 ± 1 , and dry-solids content of $30.2 \% \pm 1.3 \%$. Its chloride content is $< 0.1\%$ and the equivalent Na₂O content is $< 1.0 \%$.

The experimental study employed two sand fractions [Fig. 1]: dune sand [DS] and fine recycled concrete aggregates [FRCA]. The latter

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD CHEMICZNY I WŁAŚCIWOŚCI MĄCZKI WAPIENNEJ [LSF].
CHEMICAL COMPOSITION AND PROPERTIES OF LIMESTONE FILLER [LSF].

CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	Strata prażenia Loss on ignition	pH
55.77	0.02	0.13	0.04	0.02	0.01	43	9

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE KRUSZYW DROBNYCH.
PHYSICAL PROPERTIES OF FINE AGGREGATES.

Właściwość / Property	DS	FRCA
Gęstość właściwa / Absolute density, g/cm ³	2.53	2.49
Gęstość nasypowa / Bulk density, g/cm ³	1.35	1.32
Równoważnik piaskowy / Sand equivalent, %	86	83
Moduł uziarnienia / Fineness modulus, -	2.18	2.94
Gęstość upakowania Φ / Dry packing density Φ , -	0.55	0.62
Nasiąkliwość po 24 h / Water absorption after 24 h, %	2.2	8.5

została otrzymana przez drobne zmielenie naturalnego wapienia o zawartości CaCO₃ wynoszącej około 98%. Materiał zmielono do uziarnienia poniżej 80 μ m. Produkt oznaczony symbolem CFD 15 pochodził z zakładu ENG w Konstantynie [Algieria].

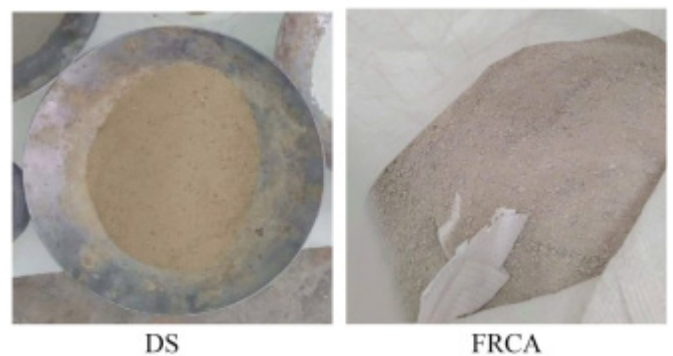
W badaniach zastosowano domieszkę chemiczną w postaci superplastyfikatora [SP], sklasyfikowanego jako wielofunkcyjny superplastyfikator / domieszka silnie redukująca ilość wody zarobowej. Produkt nie zawiera chlorków i jest oparty na kopolimerach akrylowych. Dostarczany był w postaci roztworu wodnego o gęstości 1060 \pm 10 kg/m³, pH równym 4.5 \pm 1 oraz zawartości suchej substancji wynoszącej 30.2% \pm 1.3%. Zawartość jonów chlorkowych była mniejsza niż 0.1%, natomiast równoważna zawartość Na₂O nie przekraczała 1.0%.

W badaniach wykorzystano dwa rodzaje kruszywa drobnego [rys. 1]: piasek wydumowy [DS] oraz drobne kruszywo z recyklingu betonu [FRCA]. Kruszywo FRCA otrzymano w procesie kruszenia odpadów budowlanych i rozbiórkowych [rys. 2], stanowiących mieszaninę starego betonu oraz materiałów ceramicznych. Zgodnie z wytycznymi EFNARC (4), do produkcji zapraw samozagęszczalnych [SCM] należy stosować wyłącznie frakcję kruszywa o uziarnieniu 0.125–4 mm. Krzywe uziarnienia zastosowanych kruszyw przedstawiono na rys. 3, natomiast ich podstawowe właściwości fizyczne zestawiono w tablicy 3.

W tablicy 4 przedstawiono wartości gęstości upakowania na sucho [Φ] dla mieszanin zawierających różne udziały drobnego kruszywa z recyklingu betonu [FRCA]. Wzrost wartości Φ wraz ze zwiększaniem udziału FRCA wynika przede wszystkim z różnic w uziarnieniu obu zastosowanych kruszyw, przedstawionych na rys. 3. Piasek wydumowy [DS] charakteryzuje się stosunkowo wąskim zakresem uziarnienia, o czym świadczy stromy przebieg krzywej uziarnienia w przedziale od 0.3 do 0.6 mm. Natomiast kruszywo FRCA wykazuje szerszy, wielomodalny rozkład wielkości ziaren w zakresie od 0.25 do 4 mm, z większym udziałem frakcji średnich i grubych.

were obtained by crushing construction and demolition waste [Fig. 2], consisting of a mixture of old concrete and masonry materials. EFNARC guidelines (4) specify that the production of SCM is based only on a sand size fraction of 0.125/4 mm. Particle size distributions [as shown in Fig. 3] and physical parameters [as listed in Table 3].

Table 4 presents the dry packing density [Φ] for FRCA with different replacements. The increase of Φ with the percentage of FRCA is explained first by the difference in granular distribution between the two sands, as illustrated in Fig. 3. Dune sand [DS] is relatively thin and narrow in grain size, as indicated by the very steep slope of its curve between 0.3 and 0.6 mm; conversely, the FRCA has a spread grain size [multimodal] over a wider area from 0.25 to 4 mm, with more medium and coarse fractions. According to the stacking models by Funk and Dinger (22) and Larrard (23), the distribution exhibits a more continuous distribution, allowing the smallest particles to lodge in the interstices formed by the larger ones, thereby reducing the porosity of the stack and increasing Φ . In the case of FRCA, this effect is further reinforced by the presence of fines from the old mortar, which consist of hydrated cement particles serving as a micro-filler and improving the filling of voids. The angularity and roughness of recycled grains theoretically decrease compactness by hindering the reorganization of particles. However, in the conditions of measurement, the favourable effect of "particle size + fines"



Rys. 1. Kruszywo drobne użyte w badaniach.
Fig. 1. Fine aggregates used.



Rys. 2. Odpady budowlane użyte do przygotowania FRCA.
Fig. 2. Construction wastes to produce FRCA.

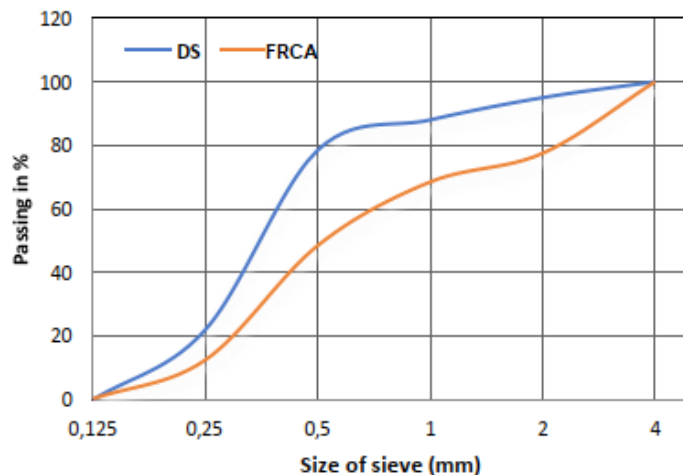
Zgodnie z modelami upakowania ziarnowego zaproponowanymi przez Funka i Dinga (22) oraz de Larrarda (23), bardziej ciągły rozkład uziarnienia sprzyja efektywniejszemu wypełnieniu przestrzeni międzyziarnowych przez mniejsze cząstki. Prowadzi to do zmniejszenia porowatości szkieletu ziarnowego oraz zwiększenia gęstości upakowania Φ . W przypadku kruszywa FRCA efekt ten jest dodatkowo wzmacniany przez obecność drobnych cząstek pochodzących ze starej zaprawy cementowej. Cząstki te, zbudowane głównie z uwodnionych produktów hydratacji cementu, pełnią funkcję mikrowypełniacza, poprawiając stopień wypełnienia pustek w układzie ziarnowym.

Z teoretycznego punktu widzenia zwiększona kanciastość i rozwinęta powierzchnia ziaren kruszywa z recyklingu powinny ograniczać zdolność do zagęszczania poprzez utrudnianie wzajemnego przemieszczania i reorganizacji ziaren. W analizowanym przypadku korzystny wpływ szerszego uziarnienia oraz obecności frakcji drobnych okazał się jednak dominujący w stosunku do niekorzystnego wpływu kształtu ziaren. Szeroki przebieg krzywej uziarnienia FRCA odzwierciedla zdolność tego kruszywa do tworzenia bardziej efektywnego, hierarchicznego szkieletu ziarnowego, w którym kolejne klasy wymiarowe oraz mikrowypełnienie przez frakcję pylistą ograniczają objętość pustek. W konsekwencji wraz ze wzrostem udziału FRCA obserwuje się stopniowe zagęszczanie szkieletu ziarnowego, czego efektem jest wzrost wartości gęstości upakowania na sucho Φ .

Gęstość upakowania na sucho [Φ] wyznaczano na podstawie pomiarów przeprowadzonych na reprezentatywnej próbce kruszywa zgodnie z procedurą opisaną przez Kwana i Funga (24). W pierwszym etapie próbkę suszono do stałej masy w celu wyeliminowania wpływu wilgoci. Następnie pojemnik o znanej objętości V wypełniano suchym kruszywem, po czym poddawano go delikatnemu opukiwaniu lub wibracji, aby ułatwić przemieszczanie i reorganizację ziaren oraz ograniczyć objętość pustek międzyziarnowych. Po ustabilizowaniu układu rejestrowano masę kruszywa znajdującego się w pojemniku M . Gęstość nasypową zagęszczonego kruszywa [ρ_b] obliczano jako stosunek masy do objętości pojemnika: [$\rho_b = M/V$]. Równocześnie wyznaczano gęstość właściwą ziaren kruszywa [ρ_s] z wykorzystaniem piknometru. Ostatecznie gęstość upakowania na sucho [Φ] określano jako bezwymiarowy iloraz gęstości nasypowej i gęstości właściwej zgodnie z zależnością: $\Phi = \rho_s/\rho_b$.

2.2. Projekt składu mieszanek

Wzorując się na pracach Ghorbela i współautorów (25), opracowano i przebadano serię receptur samozagęszczalnych zapraw [SCM] w celu wyznaczenia optymalnego składu spełniającego wymagania wytycznych EFNARC (4). Zgodnie z tymi wytycznymi wartość rozplywu oznaczana metodą mini-stożka [rys. 4] powinna mieścić się w zakresie od 240 do 260 mm, natomiast czas przepływu mierzony za pomocą V-lejka [rys. 5] powinien wynosić od 2 do 10 s. Badania wstępne skoncentrowano na opracowaniu mieszanki referencyjnej niezawierającej drobnego kruszywa z recyklingu betonu [FRCA], co pozwoliło na weryfikację założonych parametrów



Rys. 3. Rozkład ziarnowy kruszyw.

Fig. 3. Particle size distributions of sands used.

outweighs the «shape» effect. The FRCA curve, more spread out, precisely reflects this ability to build a better hierarchical granular skeleton, in which the succession of dimensional classes and micro-filling by fines limits empty volumes. The result is a gradual densification of the stack as the proportion of FRCA increases, hence the observed increase in Φ .

The dry packing density, Φ , was calculated from measurements performed on a representative sand sample following the procedure described by Kwan & Fung (24). First, the sand was oven-dried to a constant mass to eliminate moisture effects. A container of known volume, V , was then filled with the dry sand, and a gentle tapping/vibration was applied to promote particle rearrangement and settlement, thereby reducing inter-particle voids. After stabilization, the mass of sand contained in the container, M , was recorded. The bulk density of the packed sand, ρ_b , was computed as the ratio of mass to container volume, $\rho_b = M/V$. In parallel, the solid density of the sand particles, ρ_s , was determined [using a pycnometer]. Finally, the dry packing density [Φ] was obtained as a dimensionless ratio between the bulk density and the solid density, according to: $\Phi = \rho_s/\rho_b$.

2.2. Mix design

Drawing inspiration from the work of Ghorbel et al. (25), a series of experimental formulations of SCMs was designed and tested to determine an optimal composition that meets the requirements of the EFNARC guidelines (4). These guidelines stipulate that the mini-slump flow [Fig. 4] must range between 240 and 260 mm, and that the flow time measured with the V-funnel [Fig. 5] should be between 2 and 10 seconds. The preliminary trials focused on

Tablica 4 / Table 4

Zmienność upakowania ziaren [Φ] wraz z rosnącym stopniem zastąpienia piasku przez FCRA.

Variation of Φ with the increase of FRCA content.

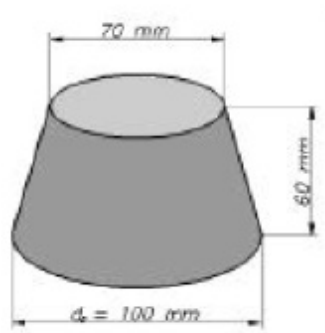
% zastąpienia piasku przez FRCA % FRCA replacement	0	25	50	75	100
Φ , -	0.55	0.55	0.57	0.59	0.62

urabialności i stabilności mieszanki. Na podstawie tej receptury opracowano kolejne warianty mieszanek [SCM1–SCM6], których skład zestawiono w tabelicy 4. Analizowane zmienne obejmowały przede wszystkim zawartość cementu, piasku wydmowego [DS], mączki wapiennej [LSF] oraz domieszki upłynniającej [SP]. Dozowanie superplastyfikatora optymalizowano w zakresie od 0.9 do 1.2% masy cementu, dążąc do uzyskania odpowiedniej płynności przy jednoczesnym zachowaniu odporności na segregację składników. We wszystkich recepturach utrzymywano stały stosunek wody do cementu [W/C] wynoszący 0.58. Wyniki badań rozptyłu [SF] oraz czasu przepływu przez lejek V [VT] dla poszczególnych zawartości superplastyfikatora przedstawiono w tabelicy 5.

Wyniki badań wykazały, że mieszanka SCM6 zawierająca 1.0% superplastyfikatora spełniała wymagania wytycznych EFNARC (4) dotyczące zarówno urabialności, jak i stabilności mieszanki. Z tego względu została ona wybrana jako mieszanka referencyjna do dalszych badań. Po wytypowaniu składu referencyjnego piasek wydmy [DS] zastępowano objętościowo drobnym kruszywem z recyklingu betonu [FRCA] na różnych poziomach substytucji. Odpowiadające im masy poszczególnych składników zestawiono w tabelicy 6. Dzięki takiemu podejściu możliwa była ocena wpływu stopnia zastąpienia kruszywa naturalnego kruszywem z recyklingu na właściwości samozagęszczalnych zapraw.

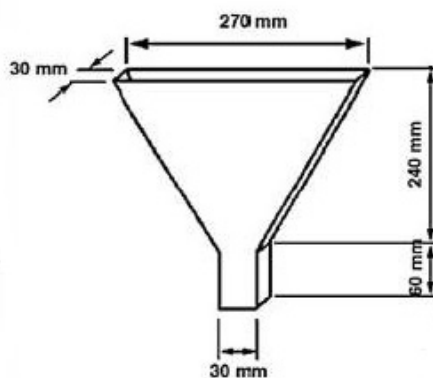
2.3. Metody badań

Proces przygotowania mieszanek obejmował wstępne nasycenie kruszywa dwiema trzecimi całkowitej ilości wody zarobowej oraz pozostawienie go na okres 10 min. Czas ten umożliwił osiągnięcie około 80% stopnia nasycenia wodą, co ograniczało jej absorpcję przez kruszywo podczas dalszego procesu mieszania. Następnie do kruszywa dodawano cement oraz mączkę wapienną [LSF], po czym składniki homogenizowano przez 3 min przy małej prędkości obrotowej mieszadła. W kolejnym etapie wprowadzano pozostałą część wody zarobowej oraz superplastyfikator [SP], a następnie mieszankę mieszano przez 90 s przy dużej prędkości obrotowej.



Rys. 4. Badanie rozptyłu zapraw.

Fig. 4. Test to determine the spread at mini-slump cone.



Rys. 5. Badanie V-lejkiem.

Fig. 5. V-funnel to determine the flow time of the mortar

preparing a reference SCM, formulated without FRCA, to validate the initial conditions of workability and stability. Based on this reference, several formulations [SCM1 to SCM6] were developed, as presented in Table 4. The parameters studied primarily concern the proportions of cement and DS, the amount of LSF, as well as the dosage of SP, which was optimized within a range of 0.9–1.2 % to ensure sufficient fluidity without segregation. The water-to-cement ratio [W/C] was kept constant at 0.58 for all formulations. The results obtained for the mini-slump flow [SF] and the V-funnel flow

Tablica 4 / Table 4

SKŁAD MIESZANEK ZAPRAW SAMOZAGĘSZCZALNYCH.
MIX PROPORTIONS OF SCMS.

	Skład / Proportions, kg/m ³					
	SCM1	SCM2	SCM3	SCM4	SCM5	SCM6
Cement	480	480	450	450	430	430
DS	970	970	1050	1030	1000	1000
FRCA	–	–	–	–	–	–
LSF	80	100	100	120	120	150
E/C	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
Woda / Water	278	278	261	261	249.4	249.4
SP, %	0.9-1-1.2	0.9-1-1.2	0.9-1-1.2	0.9-1-1.2	0.9-1-1.2	0.9-1-1.2

Tablica 5 / Table 5

WARTOŚCI ŚREDNICY ROZPŁYWU [SF] I CZASU WYPŁYWU [VT] DLA BADANYCH MIESZANEK.

RESULTS OF SF AND VT CHANGES FOR THE MIX DESIGNS EXAMINED.

	SCM1			SCM2			SCM3			SCM4			SCM5			SCM6		
SP, %	0.9	1	1.2	0.9	1	1.2	0.9	1	1.2	0.9	1	1.2	0.9	1	1.2	0.9	1	1.2
SF, mm	270	290	310	265	280	310	160	190	237	180	218	238	200	220	260	215	250	280
VT, s	1.8	1.6	1.2	1.9	1.6	1.2	6	4.2	3.4	5.2	3.9	3.4	4	3.6	2.8	3.9	3.4	2.5

W stanie świeżym, oprócz oznaczenia rozplwy metodą mini-stożka oraz czasu przepływu przez lejek V, przeprowadzono również pomiary granicy płynięcia w celu pełniejszej charakterystyki właściwości reologicznych samozagęszczalnych zapraw [SCM]. W tym celu zastosowano metodę równi pochyłej [IP], umożliwiającą wyznaczenie granicy płynięcia na podstawie pomiaru kąta spływu próbki [rys. 6]. Szczegółową procedurę badawczą opisali Khayat i współautorzy (18). Metoda polega na określeniu krytycznego kąta nachylenia równi, przy którym próbka rozpoczyna płynięcie pod wpływem siły ciężkości.

Granice płynięcia [IP_{τ_0}] obliczano zgodnie z zależnością wyrażoną równaniem [1]:

$$IP_{\tau_0} = \rho \cdot g \cdot h \cdot \sin \alpha \quad [1]$$

gdzie:

ρ – gęstość zaprawy, g/cm^3 ,

g – przyspieszenie ziemskie [$9,81 m/s^2$],

h – średnia wysokość próbki po rozplwy w położeniu poziomym, mm,

α – krytyczny kąt nachylenia równi, przy którym próbka rozpoczyna płynięcie.

Badania wytrzymałości mechanicznych przeprowadzono na stwardniałych próbkach w kształcie beleczek o wymiarach $4 \times 4 \times 16$ cm. Oznaczono wytrzymałość na ściskanie oraz wytrzymałość na zginanie w trójpunktowym schemacie obciążenia po 7, 14 i 28 dniach dojrzewania. Przed wykonaniem badań próbki przechowywano w komorze wilgotnościowej w temperaturze $20^\circ C$ i wilgotności względnej wynoszącej 95%.

3. Wyniki badań

3.1. Wpływ zawartości FRCA na rozplwy [SF] i czas przepływu przez V-lejek [VT]

Na rys. 7 przedstawiono wpływ zastąpienia piasku wydmowego [DS] drobnym kruszywem z recyklingu betonu [FRCA] na właściwości robocze zapraw samozagęszczalnych [SCM]. Zwiększenie udziału FRCA od 0 do 100% powodowało niemal liniowe zmniejszenie wartości rozplwy [SF] z 25 do 22 cm [spadek o około 12%] oraz stopniowy wzrost czasu przepływu przez lejek V [VT] z 3.52 do 4.00 s [wzrost o około 14%]. Przeciwny charakter zmian parametrów SF i VT [$SF_{\downarrow}/VT_{\uparrow}$] wskazuje na wzrost lepkości pozornej mieszanki oraz pogorszenie jej zdolności do samoczyn-

Tablica 6 / Table 6

SKŁADY MIESZANEK O SKŁADZIE SCM6 Z RÓŻNYM DODATKIEM FRCA.

MIX PROPORTIONS OF SCM6 BASED ON FRCA.

	Skład / Proportions, kg/m^3				
	FRCA, %				
	0	25	50	75	100
Cement	430	430	430	430	430
DS	1000	750	500	250	0
FRCA	0	246	496	738	984
LSF	150	150	150	150	150
E/C	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
Woda / Water	249.4	249.4	249.4	249.4	249.4
SP	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3

time [VT], varying with the SP dosage, are presented in Table 5.

The experiment's findings showed that the SCM6 mixture with 1% superplasticizer met the EFNARC requirements for workability and stability; therefore, it was selected as the reference mixture. Following this selection, natural sand [DS] was replaced with fine recycled concrete aggregates [FRCA] by volume. Table 6 summarizes the substitution masses corresponding to the different levels of FRCA replacement.

2.3. Testing

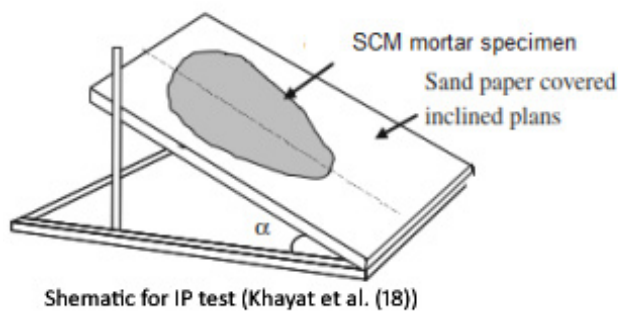
The mixing process included pre-saturating the sand with two-thirds of the total water and permitting it to rest for 10 minutes. This duration is sufficient for the sand to achieve approximately 80 % saturation with water, which helps prevent the water from being absorbed by the aggregates during the mixing process. Cement and limestone filler were then added and homogenized at a low speed for 3 minutes, along with the remaining water and superplasticizer. Finally, the mixture was blended at high speed for 90 seconds.

In fresh state, in addition to the mini-cone slump test and the V-funnel test, a yield stress measurement was conducted to evaluate the rheological behaviour of the SCM further. For this purpose, the inclined plane [IP] method was employed, which determines the yield stress from the measurement of the discharge angle [Fig. 6]. The detailed procedure of this test is extensively described in Khayat et al. (18). The principle consists of determining the critical angle at which the sample begins to flow under the influence of gravity. Accordingly, the yield stress [τ_0] is calculated using [Eq. 1]:

nego rozplywu i wypełniania form. W odniesieniu do wymagań EFNARC [SF: 24–26 cm; VT: 2–10 s] stwierdzono, że mieszanki zawierające od 0 do 50% FRCA spełniały jednocześnie oba kryteria. Wartość rozplywu zmniejszała się w tym zakresie z 25,0 do 24,3 cm, natomiast czas przeplywu przez lejek V wzrastał jedynie nieznacznie – od 3,5 do 3,6 s. W przypadku mieszanek zawierających 75% i 100% FRCA rozplyw obniżył się poniżej dolnej granicy wymaganej przez EFNARC, osiągając odpowiednio 23,5 i 22,0 cm. Pomimo że wartości VT pozostawały nadal w dopuszczalnym zakresie, odpowiednio 3,7 i 4,0 s, mieszanki te nie spełniały już kryterium rozplywu.

Wprowadzenie kruszywa FRCA prowadziło do pogorszenia zdolności rozplywu mieszanek, mimo że objętość zaczynu cementowego pozostawała stała we wszystkich recepturach. Zjawisko to wynika przede wszystkim z wysokiej nasiąkliwości kruszywa FRCA oraz rozwiniętej, szorstkiej powierzchni jego ziaren o znacznej kanciastości. Dla porównania, ziarna piasku wydmorego [DS] charakteryzują się bardziej regularnym, zbliżonym do kulistego kształtem. W literaturze przedmiotu pogorszenie urabialności zapraw zawierających kruszywo z recyklingu jest powszechnie wiązane właśnie z wysoką absorpcją wody oraz niekorzystną morfologią ziaren FRCA. Podobne obserwacje przedstawili Li i współautorzy (8), którzy wykazali, że zwiększenie udziału FRCA od 0 do 100 % powoduje zmniejszenie rozplywu z 25 do 18 cm. Jednocześnie czas przeplywu przez lejek V wzrastał z 9 do 21 s, co potwierdza, że zastosowanie kruszywa z recyklingu prowadzi do ograniczenia płynności oraz zwiększenia lepkości mieszanek.

Uzyskane wyniki wskazują, że przy zastosowanym składzie i dozowaniu superopłastwifikatora możliwe jest zastąpienie piasku



Rys. 6. Test na pochyłej powierzchni.

Fig. 6. IP test.



$$IP_{\tau_0} = \rho \cdot g \cdot h \cdot \sin \alpha \quad [1]$$

where:

ρ is the density of mortar, g/cm^3 ,

g is the gravitational acceleration [$9.81 m/s^2$],

h is the characteristic mean height of the slumped sample at the horizontal position, mm,

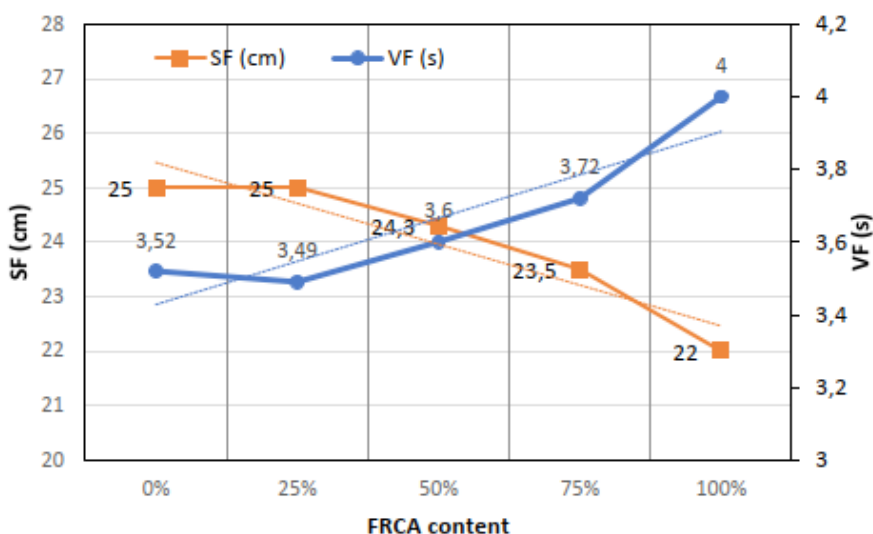
α is the critical angle of the plane when the sample starts to flow, $^\circ$.

Compressive and three-point flexural tests were conducted on hardened prismatic specimens, $4 \times 4 \times 16$ cm, at 7, 14, and 28 days. Prior to the testing process, the specimens had been stored in a moist room [$T = 20$ $^\circ C$, 95 % relative humidity].

3. Results

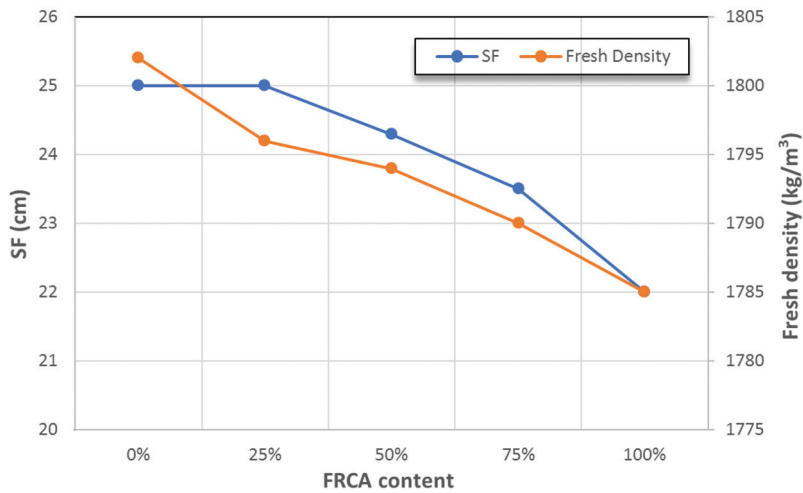
3.1. Effect of FRCA content on SF and VT

Fig. 7 highlights the effect of the substitution of DS by FRCA on the workability of the SCM. The increase in FRCA content from 0 to 100 % is accompanied by a quasi-linear decrease in SF spreading from 25 to 22 cm [-12 %] and a gradual increase in VF time from 3.52 to 4.00 s, [+14 %]. This inverse evolution $SF \downarrow / VF \uparrow$ reflects an increase in apparent viscosity and a reduction in filling power. Regarding the EFNARC thresholds SF: 24 to 26 cm; VF: 2 to 10 s, the 0 to 50 % FRCA formulations remain compliant simultaneously: SF: 25 to 24.3 cm, VF: 3.5 to 3.6 s. On the other hand, at 75 % and 100 % FRCA, spreading drops below 24 cm [23.5 cm, then 22 cm], signifying non-compliance in SF despite still admissible VF times: 3.7 and 4.0 s, respectively. The inclusion of FRCA has contributed to a decrease in filling capacity, even if the paste volume remains the same across all mixtures. This occurs because FRCA particles absorb a large amount of water and have rough, angular surfaces, while DS particles are almost spherical in shape. The literature concordantly attributes the degradation of



Rys. 7. Wpływ zawartości FRCA na średnicę rozplywu [SF] oraz czas wyplywu [VT].

Fig. 7. Influence of FRCA content on variation of SF and VT.



Rys. 8. Zmiany średnicy rozplywu zapraw samozagęszczalnych oraz ich gęstości.

Fig. 8. Variations of SF and fresh density of SCM.

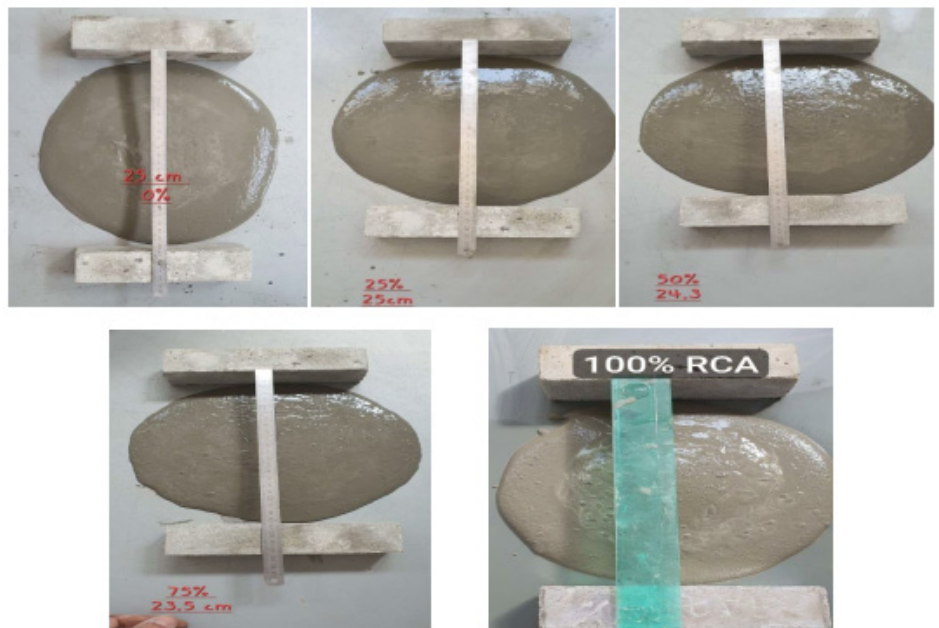
wydumowego kruszywem FRCA do poziomu 50%, przy zachowaniu właściwości świeżej mieszanki zgodnych z wymaganiami EFNARC.

Jednoczesne zmniejszenie gęstości świeżej mieszanki oraz wartości rozplywu [SF] wraz ze wzrostem udziału FRCA [rys. 7] wskazuje, że dominujący mechanizm odpowiedzialny za obserwowane zmiany nie jest związany ze zmianą zawartości powietrza w mieszance. Najbardziej prawdopodobnego wyjaśnienia należy upatrywać w specyficznych właściwościach kruszywa FRCA. Duża kanciastość ziaren, rozwinięta powierzchnia oraz wysoka zdolność absorpcji wody wynikająca z obecności przylegającej starej zaprawy prowadzą do zmniejszenia ilości efektywnie dostępnej wody zarobowej oraz zwiększenia tarcia wewnętrznego w układzie. Dodatkowo kruszywo FRCA charakteryzuje się niższą gęstością w porównaniu z piaskiem wydumowym. Współwystępowanie tych zjawisk skutkuje wzrostem granicy płynięcia [τ_0] oraz lepkości pozornej [μ_p] mieszanek.

Należy podkreślić, że badanie rozplywu [SF] dostarcza informacji dotyczących właściwości reologicznych materiału, w szczególności granicy płynięcia [τ_0] i lepkości pozornej [μ_p], natomiast pomiar gęstości świeżej mieszanki pozwala przede wszystkim ocenić wpływ gęstości składników oraz zawartości powietrza. Parametry te wzajemnie się uzupełniają, jednak nie mogą być traktowane jako równoważne. Ponadto, ze względu na mniejszą gęstość mieszanek zawierających FRCA, siła grawitacji działająca podczas podnoszenia stożka jest odpowiednio mniejsza, co dodatkowo ogranicza zdolność zaprawy do rozplywu. Pomimo niższej gęstości ziaren FRCA nie obserwuje się jednak ich segregacji względem zączynu cementowego. Wynika to z faktu, że podczas przepływu mieszaniny

the workability of mortars to the high-water absorption and the unfavourable morphology of FRCA. Li et al. (8) show that when changing from 0 to 100 % FRCA, the spreading drops from 25 to 18 cm. In parallel, the V-funnel time increases from 9 to 21 s, confirming that the incorporation of FRCA reduces fluidity and increases the viscosity of the mixture. Finally, these results indicate that with the current SP composition and dosage, a substitution of up to 50 % allows remaining within the “EFNARC window” for fresh properties.

The simultaneous decrease in fresh density and SF with the increase in FRCA content [Fig. 7] shows that the predominant effect is not related to a variation of entrained air. The most coherent explanation lies in the specific properties of FRCA: their angularity, roughness, and strong absorption capacity, due to the adherent mortar, reduce the effective water available and increase internal friction. To this is added their intrinsically lower density. The combination of these phenomena increases the yield stress τ_0 and apparent viscosity μ_p . Thus, the SF assay provides information on rheology [τ_0 , μ_p], while fresh density mainly informs about air content and constituent density. These two parameters complement each other but do not replace one another. Moreover, as the FRCA-based mortar is subject to less gravitational force during cone uplift, the mixture spread is reduced. Despite the lower bulk density of FRCA, the particles would not move relative to the paste because the paste would exert a tugging force on the FRCA when the slurry flow pulls it together. Fig. 8 illustrates the macroscopic aspect of the spreads obtained after the test, showing that FRCA can be uniformly dispersed in the paste, except for the mixture containing 100 % FRCA, where a phenomenon of particle accumulation is observed at the centre of the spread.



Rys. 9. Rozplyw mieszanek.

Fig. 9. Spread of mixtures.

zaczyn oddziałuje na ziarna kruszywa, przemieszczając je wraz ze strumieniem płynącej zaprawy.

Na rys. 8 przedstawiono makroskopowy wygląd rozpliwów uzyskanych po zakończeniu badania. Obserwacje wizualne wskazują, że kruszywo FRCA było równomiernie rozmieszczone w matrycy zaczynu cementowego w większości analizowanych mieszanek. Wyjątek stanowiła mieszanka zawierająca 100% FRCA, w której zaobserwowano lokalne nagromadzenie ziaren w centralnej części rozpliwu, świadczące o pogorszeniu zdolności mieszaniny do jednorodnego rozprowadzania kruszywa.

3.2. Właściwości reologiczne

Oprócz klasycznych badań z wykorzystaniem reometrów, do oceny właściwości reologicznych zapraw można stosować alternatywne metody analityczne, takie jak metoda równi pochyłej (18) oraz modele teoretyczne zaproponowane przez Roussela i Coussota (19) oraz Chateau i współautorów (20). Metody te umożliwiają wyznaczenie granicy płynięcia, która jest jednym z podstawowych parametrów opisujących zachowanie materiałów cementowych w stanie świeżym. Wartość granicy płynięcia zależy przede wszystkim od właściwości zaczynu cementowego, kształtu ziaren kruszywa oraz ich gęstości właściwej.

3.2.1. Metoda równi pochyłej [IP test]

Metoda równi pochyłej [IP] polega na umieszczeniu określonej ilości zaprawy na płaszczyźnie, której kąt nachylenia $[\alpha]$ jest stopniowo zwiększany. Pod wpływem siły ciężkości przepływ materiału rozpoczyna się w momencie, gdy składowa ciężaru równoległa do powierzchni równi $[m \cdot g \cdot \sin \alpha]$ przekroczy siłę tarcia $[f_k]$ działającą pomiędzy materiałem a powierzchnią podłoża. Krytyczny kąt nachylenia $[\alpha]$, odpowiadający momentowi rozpoczęcia ruchu próbki, umożliwia wyznaczenie granicy płynięcia w spoczynku $[IP\tau_0]$ na podstawie równania (1).

Metoda ta stanowi prostą i szybką technikę szacowania granicy płynięcia, odzwierciedlającej początkowy opór materiału przeciwko płynięciu.

Badania metodą IP przeprowadzono po trzech okresach spoczynku mieszanki: 10, 20 oraz 30 min. W tabelicy 7 zestawiono wartości kąta nachylenia równi $[\alpha]$, średniej wysokości próbki $[h]$ oraz czasu spoczynku dla mieszanek zawierających różne udziały kruszywa FRCA.

3.2.2. Model Roussela–Coussota

Metoda teoretyczna opracowana przez Roussela i Coussota (19) umożliwia uproszczone i szybkie wyznaczenie granicy płynięcia $[\tau_0]$ materiałów o konsystencji pasty. Zaproponowany model analityczny równanie [2] opiera się na zależności pomiędzy granicą płynięcia a parametrami rozpliwu, dzięki czemu jest szczególnie przydatny w analizie wyników badań wykonywanych metodą mini-stożka. Opracowane równanie [2] zostało potwierdzone zarówno rozważaniami teoretycznymi, jak i wynikami badań eksperymentalnych oraz symulacji numerycznych.

Tablica 7 / Table 7

ZALEŻNOŚĆ KĄTA α I WYSOKOŚCI W TEŚCIE RÓWNI POCHYLEJ OD ZAWARTOŚCI FRCA I CZASU SPOCZYNKU.

VARIATION OF α , h , AND REST PERIODS WITH INCREASING FRCA CONTENT.

FRCA, %	0	25	50	75	100
h , mm	255	250	240	230	220
α at 10 min, °	32	37	40	45	48
α at 20 min, °	33	38	43	47	52
α at 30 min, °	34	40	45	49	54

3.2. Rheological behaviour

In addition to traditional rheometer testing, alternative analytical techniques, such as the inclined plane method (18) and the theoretical models proposed by Roussel and Coussot (19) and Chateau et al. (20), facilitate the assessment of the yield stress. This property is mainly influenced by factors such as paste yield stress, sand particle shape, and specific gravity.

3.2.1. Inclined Plane approach [IP test]

The IP test involves placing a mass of mortar on a plane whose angle of inclination $[\alpha]$ is gradually increased. Under the action of gravity, the flow starts when the weight component parallel to the plane $[m \cdot g \cdot \sin \alpha]$ exceeds the friction force f_k between the material and the support surface. The critical angle α , which is the angle at which movement starts, permits us to use [Eq. 1] to calculate the yield stress at rest $[IP\tau_0]$. This simple technique provides an approximate estimate of the yield stress, which represents the material's initial resistance to flow.

The IP test experiment is conducted at three rest periods, after 10, 20, and 30 minutes. Table 7 summarises the different values for the inclination angle α , h , and rest period, according to the varied percentage of FRCA.

3.2.2. Roussel and Coussot model

The theoretical method developed by Roussel and Coussot (19) simplifies and accelerates the measurement of the yield stress $[\tau_0]$ of pasty materials. Their method of analysis [Eq. 2] is volume-dependent and is hence highly relevant to spread measurement. Theoretical considerations, experimental results, and numerical simulations supported the analytical expression utilised:

$$\tau_0 = \frac{225 \rho g \Omega^2}{128 \pi^2 R^5} \quad [2]$$

where:

ρ is material density in kg/m^3 ,

g is acceleration of gravity,

Ω sample volume [cone volume] in m^3 ,

R is spread radius in mm.

$$\tau_o = \frac{225 \rho g \Omega^2}{128 \pi^2 R^5} \quad [2]$$

gdzie:

ρ – gęstość materiału, kg/m³,

g – przyspieszenie ziemskie, m/s²,

Ω – objętość próbki (objętość stożka), m³,

R – promień rozplywu, mm.

3.2.3. Model Chateau–Ovarleza [C–O]

Do wyznaczania granicy płynięcia samozagęszczalnych zapraw zawierających kruszywo FRCA zastosowano również model Chateau–Ovarleza [C–O] (20). Model ten uwzględnia wpływ gęstości upakowania [φ_{div}] oraz udziału objętościowego kruszywa [φ] i jest powszechnie stosowany do szacowania granicy płynięcia zawieszin zawierających sztywne cząstki (20, 26).

Granice płynięcia mieszaniny obliczono zgodnie z zależnością [3]:

$$\tau_{M,0} = \tau_{P,0} \sqrt{(1-\varphi) \cdot \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_{div}}\right)^{-2}} \quad [3]$$

gdzie:

$\tau_{M,0}$ – granica płynięcia matrycy (zaczynu cementowego). Pa,

$\tau_{P,0}$ – granica płynięcia mieszaniny zawierającej kruszywo, Pa,

φ – udział objętościowy kruszywa w mieszance, -.

Udział objętościowy kruszywa [φ] obliczano jako stosunek objętości kruszywa do całkowitej objętości mieszanki wg. równania [4]:

$$\varphi = \text{Objętość kruszywa} / \text{Całkowita objętość mieszanki} \quad [4]$$

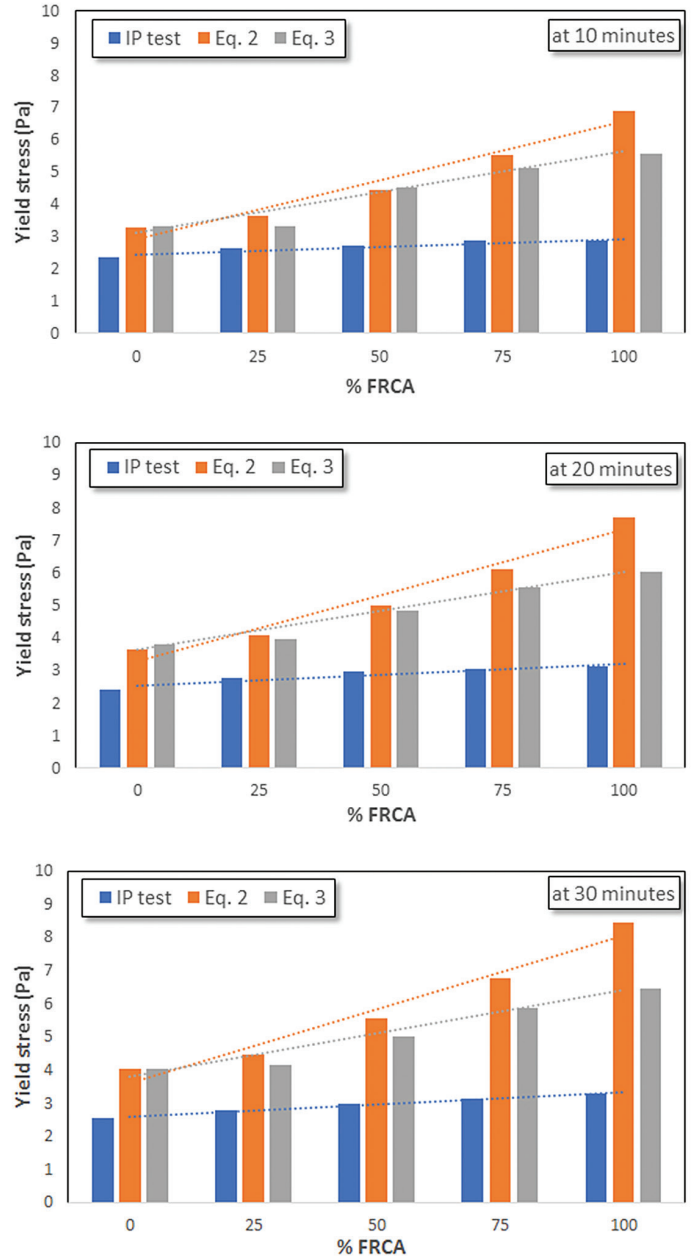
gdzie parametr φ_{div} oznacza graniczny udział objętościowy kruszywa, przy którym wartość granicy płynięcia dąży do nieskończoności. Dla kruszyw traktowanych jako sztywne cząstki parametr ten jest powiązany z maksymalną gęstością upakowania [φ_m] zależnością [5]:

$$\varphi_{div} = 0.8 \varphi_m \text{ mieszanki zaprawy} [\tau_{M,0}] \quad [5].$$

3.3. Oszacowanie granicy płynięcia

Na rys. 10 przedstawiono wartości granicy płynięcia [τ_o] wyznaczone po okresach spoczynku wynoszących odpowiednio 10, 20 i 30 minut. Wartości te obliczono na podstawie testu IP oraz z wykorzystaniem równań [2] i [3].

Wpływ dodatku FRCA jest wyraźnie widoczny we wszystkich trzech metodach wyznaczania granicy płynięcia – wraz ze wzrostem zawartości FRCA obserwuje się wzrost wartości τ_o . Efekt ten jest bardziej zaznaczony w przypadku wartości wyznaczonych z równania [2] niż dla wyników uzyskanych z równania [3] oraz testu IP. Dla stałej zawartości FRCA uwzględniono również wpływ czasu spoczynku. Wartość τ_o wzrasta wraz z jego wydłużaniem, szczególnie w przypadku wyników obliczonych na podstawie równań [2] i [3].



Rys. 10. Granica płynięcia po 10, 20 i 30 minutach spoczynku wyznaczona metodą testu IP oraz na podstawie równań [2] i [3] w funkcji stopnia zastąpienia kruszywa FRCA.

Fig. 10. Yield stress after 10, 20, and 30 minutes of rest periods for the IP test, Eq. 2, and Eq. 3 as a function of FRCA substitution.

3.2.3. Chateau and Ovarlez [C–O] model

To determine the yield stress of SCM with FRCA, one can utilise the Chateau and Ovarlez [C–O] model (20). This model is dependent on the packing density [φ_m] and volume fraction [φ] of the aggregate, and it is proficient in estimating the yield stress of fluids containing rigid particles (20, 26). The specific equation for yield stress in the C–O model reads as follows [Eq. 3]:

$$\tau_{M,0} = \tau_{P,0} \sqrt{(1-\varphi) \cdot \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_{div}}\right)^{-2}} \quad [3]$$

where:

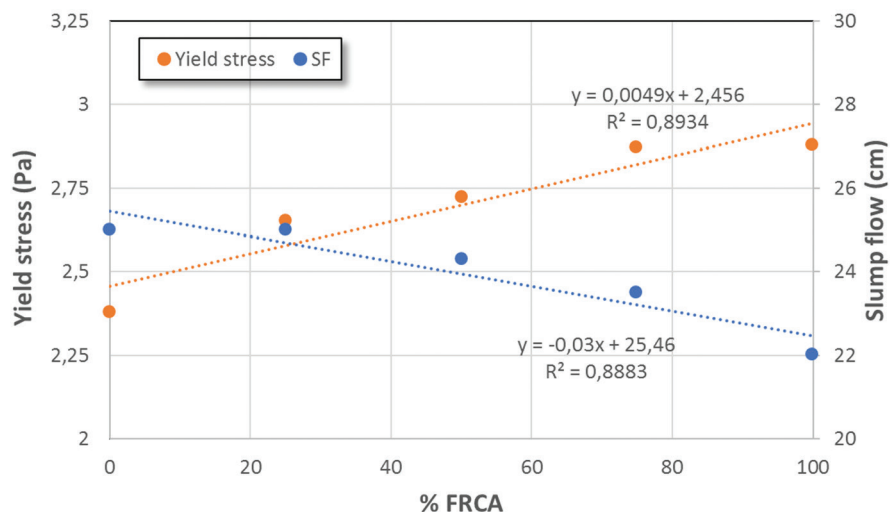
Różnice w oszacowanych wartościach τ_0 wynikają ze specyfiki poszczególnych modeli. Eksperymentalny test IP pozwala określić granicę płynięcia na podstawie krytycznego kąta inicjacji przepływu α oraz uwzględnić efekt tiksotropowy związany z odbudową struktury materiału podczas spoczynku [27]. Model opisany równaniem [2] przekształca swobodny rozplływ mieszanki w wartość τ_0 , która zależy od promienia rozplwywu R, a ten z kolei jest funkcją zawartości FRCA oraz czasu spoczynku. Zmniejszenie końcowej wartości R prowadzi do istotnego wzrostu τ_0 , przede wszystkim dlatego, że równanie [2] opisuje zależność typu $\tau_0 \propto R^{-5}$, co w praktyce powoduje bardzo dużą wrażliwość modelu na niepewności pomiarowe [28,29].

Model opisany równaniem [3] ma bardziej złożony charakter. Granica płynięcia jest w nim silnie uzależniona od stopnia upakowania szkieletu ziarnowego, efektywnego udziału objętościowego kruszywa oraz oddziaływań pomiędzy ziarnami [30]. Dodatkowo istotną rolę odgrywają właściwości reologiczne zaczynu cementowego, traktowanego jako zawiesina w ośrodku ciekłym, w której kształt cząstek, rozkład ich wielkości oraz oddziaływania koloidalne determinują zachowanie układu.

Zazwyczaj pomiędzy granicą płynięcia a średnicą rozplwywu występuje zależność odwrotna. Materiał o niskiej granicy płynięcia charakteryzuje się zazwyczaj dużym rozplwywem, co świadczy o wysokiej płynności. Natomiast materiał o wysokiej granicy płynięcia wykazuje niewielki rozplływ, wskazujący na większy opór wobec przepływu. Zależność tę ilustruje rys. 11. Wzrost zawartości FRCA prowadzi do wzmocnienia struktury mieszanki, zwiększenia wartości τ_0 , obniżenia płynności oraz zmniejszenia średnicy rozplwywu SF. Efekty te są zgodne z oczekiwaniami i wynikają ze zwiększonej kanciastości kruszywa pochodzącego z recyklingu.

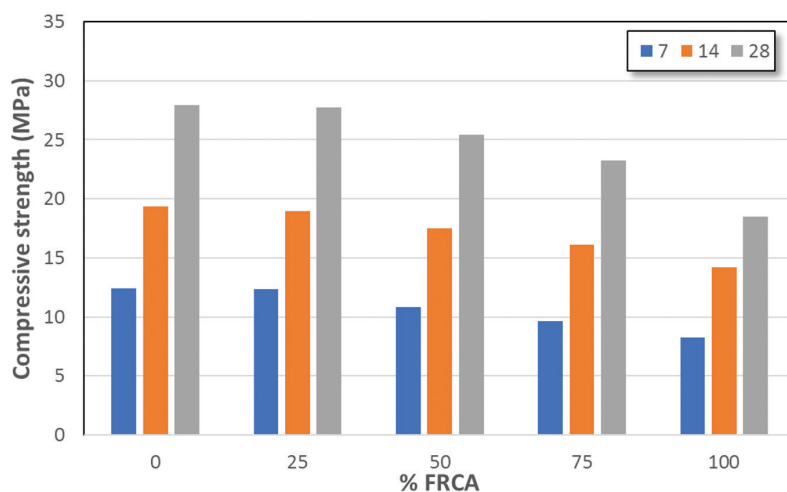
3.4. Właściwości stwardniałych zapraw

Na rys. 12 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie zapraw samozagęszczalnych z częściowym lub całkowitym zastąpieniem piasku wydumowego [DS] kruszywem drobnym z recyklingu betonu [FRCA] w zakresie od 0 do 100%, po 7, 14 i 28 dniach dojrzewania. Wraz ze wzrostem zawartości FRCA obserwuje się wyraźny spadek wytrzymałości na ściskanie. W porównaniu z mieszanką referencyjną niezawierającą FRCA, wytrzymałość na ściskanie zmniejsza się odpowiednio o 9,0%, 17,0% oraz 33,8% przy stopniu zastąpienia wynoszącym 50%, 75% i 100%. Obniżenie wytrzymałości jest zauważalne już przy 25% udziale FRCA i stopniowo nasila się wraz ze



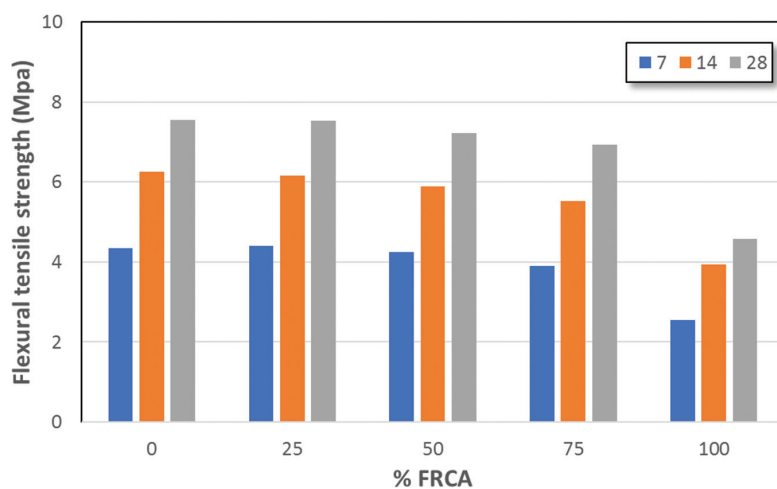
Rys. 11. Zależność pomiędzy granicą płynięcia wyznaczoną metodą testu IP a średnicą rozplwywu [SF] badanych mieszanek samozagęszczalnych.

Fig. 11. Relationship between yield stress from the IP test and the slump flow of SCMs.



Rys. 12. Zmiany wytrzymałości na ściskanie zapraw samozagęszczalnych po 7, 14 i 28 dniach dojrzewania w funkcji zawartości FRCA.

Fig. 12. Variation of compressive strength at 7, 14, and 28 days of curing vs FRCA content of SCMs.



Rys. 13. Zmiany wytrzymałości zapraw samozagęszczalnych na rozciąganie przy zginaniu po 7, 14 i 28 dniach dojrzewania w funkcji zawartości FRCA.

Fig. 13. Variation of flexural tensile strength at 7, 14, and 28 days of curing vs FRCA content of SCMs.

wzrostem poziomu substytucji. Spadek wytrzymałości na ściskanie związany z zastępowaniem kruszywa naturalnego kruszywem pochodzącym z recyklingu był również obserwowany przez Li i wsp. (31) oraz Özodabaş (32).

Na rys. 13 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na zginanie zapraw dla różnych poziomów zastąpienia kruszywa naturalnego przez FRCA. Wraz ze wzrostem zawartości FRCA obserwuje się spadek wytrzymałości na zginanie. Tendencja obniżania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu jest zbliżona do tej zaobserwowanej w przypadku zmian wytrzymałości na ściskanie.

4. Dyskusja

W celu scharakteryzowania właściwości zapraw samozagęszczalnych [SCM] w stanie świeżym porównano wyniki badań eksperymentalnych z modelami teoretycznymi. Zastosowano trzy niezależne metody badawcze: pomiar średnicy rozptywu [SF], oznaczenie czasu przepływu w lejku V [VF] oraz wyznaczenie granicy płynięcia τ_0 na podstawie krytycznego kąta nachylenia inicjującego ciągły przepływ, określane jako badanie na płaszczyźnie pochyłej ([P, z ang. inclined-plane test] (18). Takie podejście jest zgodne z wcześniejszymi badaniami dotyczącymi zapraw zawierających kruszywa pochodzące z recyklingu (24, 16, 8, 33).

Wyniki badań właściwości mieszanki, uzyskane metodami konwencjonalnymi, wskazują, że wzrost udziału FRCA prowadzi do stopniowego zmniejszenia średnicy rozptywu SF oraz jednoczesnego wydłużenia czasu przepływu VF [rys. 7], co świadczy o zwiększaniu się lepkości pozornej i zmniejszeniu zdolności wypełniania form. Tendencja ta jest zgodna z większą nasiąkliwością, kanciastością oraz rozwiniętą chropowatością powierzchni FRCA w porównaniu z piaskiem standardowym [DS], co potwierdzają również dane literaturowe (25).

Badanie IP umożliwiło wyznaczenie wartości τ_0 niezależnie od średnicy rozptywu SF poprzez zmianę kąta nachylenia płaszczyzny. W niniejszej pracy granica płynięcia wzrastała zarówno wraz ze zwiększaniem zawartości FRCA, jak i wydłużaniem czasu spoczynku [odbudowy struktury]: od 2,4 do 2,9 Pa po 10 minutach, od 2,4 do 3,1 Pa po 20 minutach oraz od 2,6 do 3,3 Pa po 30 minutach dla mieszanek zawierających odpowiednio 0 i 100% FRCA. Chociaż Khayat i wsp. (18) odnotowali znacznie wyższe wartości τ_0 (96 Pa po 10 minutach oraz 260 Pa po 30 minutach), różnice te wynikają z odmiennego składu mieszanek [600 kg/m³ cementu i 1300 kg/m³ piasku w ich badaniach wobec odpowiednio 430 kg/m³ i 1000 kg/m³ w niniejszej pracy], co w istotny sposób wpływa na objętość zaczynu i opór przepływu. Właściwości materiałowe uwzględnione w równaniu [1], takie jak gęstość ρ oraz wysokość h , wydają się mieć niewielki wpływ na uzyskiwane wyniki. Z drugiej strony metoda IP jest wrażliwa na chropowatość i przyczepność podłoża, a także nie uwzględnia w sposób jawny wielkości ziaren ani udziału objętościowego piasku, przez co może prowadzić do niedoszacowania wartości τ_0 w porównaniu z modelami analitycznymi.

$\tau_{P,0}$ stands for the yield stress of the matrix [cement paste], Pa,
 $\tau_{M,0}$ represents the yield stress of the mixture containing the rigid aggregate, Pa,

φ : denotes the volume fraction of the aggregate, -.

To calculate the aggregate's volume fraction φ , we use the formula [4]:

$$\varphi = \text{Volume of aggregate} / \text{Total volume of mix} \quad [4]$$

where φ_{div} signifies the volume fraction of the aggregate at which the yield stress diverges. For rigid aggregate φ_{div} and φ_m are connected by the equation [5]:

$$\varphi_{div} = 0.8 \varphi_m \text{ mieszanki zaprawy } [\tau_{M,0}] \quad [5]$$

3.3. Yield stress estimations

Fig.10 illustrates the yield stress [τ_0] values determined after 10, 20, and 30 minutes rest periods, respectively. These represent the calculus from the IP test, Eq. 2, and Eq.3.

The effect of FRCA for the three methods is well marked; the τ_0 increases with the content of FRCA. The τ_0 determined by Eq. 2 is more emphasized than the one obtained by Eq.3 and the IP test. At fixed FRCA, the duration of rest time is also reported; τ_0 increases with the rest time, especially for [Eq. 2] and [Eq.3]. This difference in estimate τ_0 results from the specificities of each model. The experimental IP test estimates τ_0 from the critical angle α of flow initiation and the thixotropic effect due to the structural build-up as a result of rest time (27). The model of [Eq. 2] converts free dispersion to a τ_0 , which therefore depends on the spread radius R , which in turn depends on FRCA content and rest period. A decrease in final R leads to a significant increase in τ_0 mainly since Eq. 2 follows a type $\tau_0 \propto R^{-5}$ dependency, which in practice makes the model extremely sensitive to experimental uncertainties (28, 29). The model of the [Eq. 3] is more complex: the yield stress strongly depends on the packing of the granular skeleton, the effective volume fraction of the aggregates and their interactions (30). Added to this are the rheological properties of the cementitious paste, which is assimilated to a suspension in a liquid medium, where the shape, particle size distribution, and colloidal interactions of the cement particles play a determining role.

Usually, an inverse relationship exists between yield stress and slump flow. A material with low yield stress commonly demonstrates high slump flow, signifying excellent fluidity. In contrast, a material with a high yield stress will demonstrate a low slump flow, indicating more resistance to flow. This is illustrated by Fig. 11. Increasing the FRCA content reinforces the structure, increases τ , decreases fluidity, and reduces SF. These impacts are anticipated with increased angularity of recycled aggregates.

3.4. Hardened-state properties

Fig. 12 reports the compressive strength of SCMs based on DS replacement by FRCA from 0 % to 100 % at 7, 14, and 28 days of

Na podstawie wyników rozplywu SF granicę plynięcia oszacowano równiez za pomocą modelu Roussela i Coussota [równanie 2]. Dla wszystkich analizowanych poziomów substytucji FRCA oraz czasów spoczynku (rys. 10) wartość τ_0 wzrastała wraz ze wzrostem zawartości FRCA, co było zgodne z obserwowanym zmniejszaniem średnicy rozplywu. Ograniczony zakres stosowności modelu dla bardzo płynnych mieszanek oraz jego silna zależność od pojedynczej wielkości pomiarowej [SF] znajdują odzwierciedlenie w uzyskanych wynikach, które po 30 minutach spoczynku mieściły się w zakresie od 4,0 Pa dla 0% FRCA do 8,5 Pa dla 100% FRCA. Model opisany równaniem [2] przekształca wartość swobodnego rozplywu w granicę plynięcia τ_0 , która zależy od promienia rozplywu, będącego funkcją zawartości FRCA oraz czasu spoczynku. Zmniejszenie końcowego promienia rozplywu prowadzi do istotnego wzrostu τ_0 . Ponadto model ten opiera się na idealizowanym założeniu przepływu cieczy typu Bingham i nie uwzględnia bezpośrednio morfologii ziaren.

Model Chateau–Ovarlez [C–O] [równanie 3], który uwzględnia upakowanie kruszywa poprzez parametry ϕ i ϕ_{div} oraz granicę plynięcia zaczynu cementowego, dostarczył wyników zbliżonych do uzyskanych w badaniu IP. Dla mieszanek zawierających 0% i 100% FRCA wartości τ_0 wynosiły odpowiednio od 3,3 do 5,6 Pa po 10 minutach, od 3,8 do 6,0 Pa po 20 minutach oraz od 4,0 do 6,5 Pa po 30 minutach spoczynku. Uzyskane wyniki wskazują na monotoniczny wzrost granicy plynięcia wraz ze zwiększaniem zawartości FRCA oraz wydłużaniem czasu spoczynku. Podobne zależności zaobserwowali Li i wsp. (31), podkreślając kluczową rolę udziału objętościowego kruszywa w kształtowaniu właściwości reologicznych mieszanek w stanie świeżym.

Zgodnie z wynikami badań Liu i wsp. (34), równanie [2] znajduje zastosowanie wyłącznie dla materiałów wykazujących opad stożka Abramsa w zakresie od 5 do 25 cm. W związku z tym w przypadku zapraw samozagęszczalnych wyniki pomiarów rozplywu wykonywanych przy użyciu mini-stożka należy interpretować ostrożnie, co ogranicza możliwość stosowania i wiarygodność równania [2] dla materiałów analizowanych w niniejszej pracy. W przeciwieństwie do tego zarówno badanie IP, jak i model C–O uwzględniają wiele czynników wpływających na wartość granicy plynięcia. Test IP nie opiera się wyłącznie na wyniku pomiaru SF, lecz uwzględnia również kąt nachylenia, co umożliwia dokładniejsze oszacowanie granicy plynięcia mieszanki. Z kolei model C–O stanowi istotne narzędzie analityczne bazujące na granicy plynięcia zaczynu cementowego, gęstości upakowania oraz udziale objętościowym zastosowanego kruszywa. Jak wskazują Li i wsp. (8), modele C–O uwzględniają parametr udziału objętościowego kruszywa ϕ , dzięki czemu możliwa jest ilościowa ocena wpływu zmian tego parametru na właściwości reologiczne zapraw.

Spadek wytrzymałości na ściskanie i zginanie zapraw cementowych wraz ze wzrostem stopnia zastąpienia kruszywa naturalnego przez FRCA wynika z charakterystycznych właściwości kruszywa pochodzącego z recyklingu. Su i wsp. (35) wykazali, że rozkład wielkości ziaren kruszywa z recyklingu [RCA] różni się od rozkładu

curing. An apparent decrease is observed as the FRCA content increases: compared to the control 0 % of FRCA, the compressive resistance decreases by 9, 17, and 33.8 % at rates of 50, 75, and 100 % of FRCA, respectively. The reduction is already noticeable from 25 % FRCA and gradually becomes more pronounced at higher substitution levels. The drop in compressive strength is evident with the replacement of natural aggregates by those from recycled materials, as noted by Li et al. (31) and Özodabaş (32).

Fig. 13 presents the flexural strength results of SCMs at different levels of FRCA substitution. The graph shows a decrease as the FRCA content increases. The trend of decreasing flexural tensile strength is similar to that observed for the evolution of compressive strength.

4. Discussion

To characterize the fresh behaviour of SCM, experimental tests were compared with theoretical models. Three distinct experiments were used: slump flow measurement, the V-funnel flow time, and the third to estimate the yield stress τ_0 from the critical inclination that starts continuous flow, known as the inclined-plane [IP] test (18). This framework aligns with prior studies on SCM incorporating recycled aggregates (24, 16, 8, 33).

Fresh-state results, obtained from traditional testing, indicate that increasing the proportion of FRCA results in a gradual reduction of SF and a simultaneous increase in VF time [Fig. 7], suggesting elevated apparent viscosity and diminished filling capacity. This trend is consistent with the higher water absorption, angularity, and surface roughness of FRCA compared to DS, aligning with the literature (25).

The IP test provided τ_0 independently of SF by varying the inclination angle. In this study, τ_0 rose both with FRCA content and with rest period [structural build-up]: 2.4–2.9 Pa at 10 min, 2.4–3.1 Pa at 20 min, and 2.6–3.3 Pa at 30 min for 0 and 100 % FRCA, respectively. Although, Khayat et al. (18) reported much higher τ_0 [96 Pa at 10 min and 260 Pa at 30 min], the difference is attributable to distinct mix designs [600 kg/m³ cement and 1300 kg/m³ sand in their study vs. 430 kg/m³ and 1000 kg/m³ here], which strongly affect paste volume and resistance. The material properties in [Eq. 1], including density ρ and height h , seem to exert minimal influence. On the other hand, it is influenced by the roughness/adhesion of the support material and does not explicitly parameterize the particle size or the volumetric fraction of the sand; it tends to underestimate the value of τ_0 compared to analytical models.

From the SF test, τ_0 was estimated using the model of Roussel and Coussot [Eq. 2]. Across the FRCA substitutions and rest periods considered [Fig. 10], τ_0 increased with FRCA content, in agreement with the observed SF decrease. The restricted validity range for very fluid mixes and strong dependence on a single observable [SF] are demonstrated by the values, which ranged from 4.03 Pa at 0 % FRCA to 8.45 Pa at 100 % FRCA; these values were obtained

charakterystycznego dla kruszyw naturalnych. Różnice te mogą wpływać na urabialność, wytrzymałość na ściskanie oraz trwałość materiału. W szczególności kruszywa z recyklingu charakteryzują się zwykle większym udziałem drobnych frakcji, co może prowadzić do obniżenia ogólnej wytrzymałości zaprawy.

5. Wnioski

W niniejszej pracy przeanalizowano wpływ zastosowania kruszywa drobnego pochodzącego z recyklingu betonu [FRCA] na właściwości reologiczne w stanie świeżym oraz właściwości użytkowe stwardniałych zapraw samozagęszczalnych [SCM]. Zbadano mieszanki zawierające od 0% do 100% FRCA w celu ilościowej oceny zmian gęstości właściwej, średnicy rozptywu oraz czasu przepływu w lejku V. Odpowiedź reologiczna materiału, wyrażona granicą płynięcia, została określona przy użyciu testu na płaszczyźnie pochyłej [IP] oraz modeli Roussela–Coussota i Chateau–Ovarlez [C–O].

Uzyskane wyniki wskazują na wyraźny i jednoznaczny wpływ FRCA na właściwości mieszanek zapraw. Wraz ze wzrostem udziału FRCA zmniejsza się gęstość właściwa zaprawy, co stanowi niekorzystną zmianę z punktu widzenia właściwości mechanicznych. Badania rozptywu wykazały, że większy stopień substytucji prowadzi do zmniejszenia średnicy rozptywu, podczas gdy czas przepływu w lejku V ulega wydłużeniu, co świadczy o spadku płynności i wzroście lepkości mieszanek. Negatywny wpływ tych czynników staje się jeszcze bardziej widoczny po okresach spoczynku materiału.

Modele zastosowane do oceny granicy płynięcia mają przede wszystkim charakter jakościowy, a nie ilościowy, mimo że uwzględniają różne parametry materiałowe.

- Model płaszczyzny pochyłej [IP] jest szczególnie przydatny w prostych przypadkach, gdy możliwe jest zastosowanie płaszczyzny nachylonej, a wpływ oddziaływań powierzchniowych może zostać pominięty. Model ten zakłada znikome oddziaływanie pomiędzy materiałem a płaskim podłożem, co nie zawsze odpowiada rzeczywistym warunkom badania.
- Model Roussela–Coussota jest dobrze dostosowany do geometrii cylindrycznych. W dużym stopniu opiera się na średnicy rozptywu, przez co dostarcza oszacowań granicy płynięcia, które mogą znacząco odbiegać od wartości uzyskiwanych przy użyciu reometru.
- Model Chateau–Ovarlez [C–O] jest szczególnie użyteczny w przypadku materiałów charakteryzujących się intensywnymi oddziaływaniami międzycząstkowymi i znajduje zastosowanie w analizie złożonych mieszanek. Wymaga jednak bardziej szczegółowej znajomości właściwości materiału oraz mechanizmów oddziaływań między ziarnami. Ponadto kluczowe znaczenie ma dokładne wyznaczenie parametru ϕ_{div} , co stanowi zadanie trudne z punktu widzenia eksperymentalnego.

after a 30-minute rest period. The model of [Eq. 2] converts the free spread into a τ_0 , therefore dependent on the spread radius, which in turn depends on the FRCA content and the rest time. A decrease in final R leads to a significant increase in τ_0 . Moreover, this model is based on the idealized flow hypothesis, the Bingham type, and does not directly integrate grain morphology.

The Chateau–Ovarlez [C–O] model [Eq. 3], which incorporates aggregate packing via ϕ and ϕ_{div} and paste yield stress, produced estimates close to the IP test. For 0 % and 100 % FRCA, τ_0 ranged from 3.3 to 5.6 Pa at 10 min, 3.8 to 6.0 Pa at 20 min, and 4.0 to 6.5 Pa at 30 min, showing a monotonic increase with both FRCA content and rest period. Similar trends were reported by Li et al. (31) using the C–O model, emphasizing the central role of aggregate volume fraction in controlling fresh-state rheology.

According to the work of Liu et al. (34), which concluded that [Eq. 2] applies only to materials exhibiting a slump of 5 to 25 cm in the Abrams cone test. Consequently, in the case of SCM, the results of slump flow measurements using the mini-cone should be treated with caution, which limits the application and reliability of [Eq. 2] for a material such as that used in this study. In contrast, the IP test and the C–O model incorporate multiple factors to determine the yield stress. The IP test is not solely reliant on the SF test result; the inclination angle also factors in, allowing for a more precise estimation of the mixture's yield stress. The C–O model is a significant equation that relies on the yield stress of the paste [cement], packing density, and volume fraction of the aggregate employed. Li et al. (8) indicate that C–O models incorporate the aggregate volume fraction ϕ term; thus, the impact of variations in ϕ on the rheological parameters of the mortar may be quantitatively evaluated using this model.

The decrease in compressive and flexural strengths of the SCM with each increment in the substitution rate by FRCA is attributable to distinct characteristics. Su et al. (35) reported that the size distribution of RCA particles is different from that of natural aggregates. This can change workability, compressive strength, and durability. More specifically, RCAs tend to have a higher proportion of fine particles, which can reduce the overall strength of the mortar.

5. Conclusion

This study investigates the impact of incorporating FRCA on the flow behaviour and hardened performance of SCM. FRCA contents from 0 % to 100 % are examined to quantify changes in absolute density, slump flow, and V-funnel results. The rheological responses, as determined by the yield stress, are evaluated using the IP test, along with the Roussel–Coussot and Chateau–Ovarlez [C–O] models.

The obtained results indicate a clear and consistent effect of FRCA on the fresh behaviour of SCM. As the FRCA fraction increases, the mortar's absolute density decreases, an unfavourable change associated with weaker mechanical performance. Slump-flow tests

Konflikt interesów

Badania nie były finansowane ze środków zewnętrznych.

Podziękowania

Autorzy składają serdeczne podziękowania panu Karimowi Kaciemu, inżynierowi zatrudnionemu w przedsiębiorstwie Sider Entreprise Annaba w Algierii, za cenny wkład w projektowanie i wykonanie stanowisk badawczych do testu na płaszczyźnie pochylej [IP] oraz V-lejka, które były niezbędne do przeprowadzenia badań reologicznych przedstawionych w niniejszej pracy.

Literatura/ References

1. H. Okamura, M. Ouchi M, Self-compacting concrete, *J. Adv. Concr. Techn.* **1**(1), 5–15, (2003). <https://doi.org/10.3151/jact.1.5>
2. B. Benabed, E. H. Kadri, L. Azzouz, S. Kenai, Properties of self-compacting mortar made with various types of sand. *Cem. Concr. Comp.* **34**(10), 1167–1173, (2012). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.07.007>
3. A. Kounadis, A. Galatis, A. Papakonstantinou, E. Badogiannis, Predicting the Rheological Performance of Self-Compacting Mortar and Concrete Using Artificial Neural Network, *J. Soft. Comput. Civ. Eng.* **9-4** 1–21, (2025). <https://doi.org/10.22115/scce.2024.415097.1711>
4. EFNARC, Specification and Guidelines for Self-compacting Concrete. European Association for Producers and Applicators of Specialist Building Products. EFNARC Association House, Farnham, UK, (2002).
5. O. K. Djelloul, B. Menadi, S. Kenai, The effect of slag and natural poz-zolan on the rheological and compressive strength properties of recycled self-compacting mortar. *Eur. J. Env. Civ. Eng.* **28**(16), 3793–3810, (2024) <https://doi-org.snd1.arn.dz/10.1080/19648189.2024.2357680>
6. B. Amar, A. Boukhelkhal, A. Lakhdar, Durability self-compacting mortar under external chemical attacks based on composite binder, *Cem. Wapno Beton* **29**(1), 71–81, (2024). <https://doi.org/10.32047/CWB.2024.29.1.5>
7. H. Amara, N. Arabi, A Perrot, Unconventional tools for the study of the flow properties of concrete equivalent mortar based on recycled concrete aggregates. *Environ. Sci. Poll. Res.* **28**(35), 48524–48543, (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14789-4>
8. T. Li, R. Nogueira, M. F. Costa Pereira, J. de Brito, J. Liu, Effect of the incorporation ratio of recycled concrete aggregate on the properties of self-compacting mortar. *Cem. Concr. Comp.* **147**, 105429, (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105429>
9. J.H. Lee, J.H. Kim, J.Y. Yoon, Prediction of the yield stress of concrete considering the thickness of excess paste layer. *Constr. Build. Mater.* **137**, 411–418, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.124>
10. H. Hafid, G. Ovarlez, F. Toussaint, P.H. Jezequel, N. Roussel, Effect of particle morphological parameters on sand grains packing properties and rheology of model mortars, *Cem. Concr. Res.* **80**, 44–51, (2016). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.11.002>
11. M. Lv, X. An, H. Bai, P. Li, J. Zhang, Influence of the fine aggregate particle packing effects on the paste rheological thresholds of self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* **397**, 132379, (2023). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132379>
12. F. Alahmad, H. Al Abdallah, T. El Maaddawy, B. Abu-Jdayi, Development of unsaturated polyester mortar made with dune sand as a sustainable

indicate that more elevated substitution levels are associated with lower spread values, while V-funnel times increase, suggesting reduced fluidity and increased viscosity. These properties devalue further when resting periods are imposed on the material.

The models applied for assessing yield stress are predominantly qualitative rather than quantitative, although they pertain to several parameters.

- The inclined plane model is particularly suitable for simple cases where an inclined plane can be used and surface effects can be neglected. It assumes negligible interaction between the material and the flat surface, an assumption that is not always accurate.
- The model of Coussot–Roussel is well adapted to cylindrical geometries. Extremely independent of the diameter of the spread, it provides an estimate of the stress level that is far from actual measurements using a rheometer.
- The Chateau–Ovarlez model is beneficial for materials exhibiting significant particle interactions and is ideal for complex mixtures. Nonetheless, it necessitates a more profound understanding of material properties and particle interactions. Moreover, the precise determination of ϕ_{div} is essential, although it is a challenging task.

Conflict of interest

This study was unfunded.

Acknowledgments

The authors wish to express their sincere gratitude to Mr. Karim Kaci, an engineer at Sider Entreprise Annaba in Algeria, for his valuable contribution to the design and construction of the inclined plane and V-funnel experimental devices, which were essential to conducting the rheological tests in this study.

- alternative in construction, *Result. Eng.* **25**, 104335, (2025). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104335>
- 13 F. Z. Melais, K. Dorbani, N. Arabi, D. Achoura, The use of marine shells as aggregates in pervious concretes, *Cem. Wapno Beton* **28**(2), 76–91, (2023). <https://doi.org/10.32047/CWB.2023.28.2.2>
- 14 L. Berredjem, N. Arabi, L. Molez, J.Y. Brossault, Influence of recycled sand containing fillers on the rheological and mechanical properties of masonry mortars, *J. Mater. Env. Sci.* **9**(4), 1255–1265, (2018). <https://doi.org/10.26872/jmes.2017.9.4.137>
- 15 K. Dorbani, F.-Z. Melais, S. Kirane, D. Draghnia, N. Arabi, Development of self-consolidating concretes based on recycled aggregates: Effect of parent concrete strength. *MATEC Web Conf.* **394**, 02002, (2024). <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439402002>
- 16 H; Amara, N. Arabi, Resting time effects on flow properties of cementitious materials: a study on self-compacting concrete equivalent mortar made with recycled aggregates, *Eur. J. Env. Civ. Eng.* **28**(16), 3894–3920. <https://doi.org/10.1080/19648189.2024.2363453>
- 17 J. Ma, Y. Wang, L. Zhang, L. Zeng, X. Wang, J. Dang, Influence of geometric shape, pore structure and surface modification of recycle fine aggregate on the rheology behaviour and strength development of mortar, *J. Build. Eng.* **91**, 109604, (2024). <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109604>
- 18 K.H. Khayat, A.F. Omran, S. Naji, P. Billberg, A. Yahia, Field-oriented test methods evaluate structural build-up at the rest of the flowable mortar and concrete. *Mater. Struc.* **45**(6), 1547-1564, (2012). <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9856-8>
- 19 N. Roussel, P. Coussot, Fifty-cent rheometer” for yield stress measurements: from slump to spreading flow. *J. Rheol.* **49**(3), 705–718, (2005). <https://doi.org/10.1122/1.1879041>
- 20 X. Chateau, G. Ovarlez, K. L. Trung, Homogenization approach to the behaviour of suspensions of noncolloidal particles in yield stress fluids. *J. Rheol.* **52**, 489–506, (2008) <https://doi.org/10.1122/1.2838254>.
- 21 NA 442, Algerian standard, cement: composition, specifications and conformity criteria for common cements, IANOR, Algiers, (2003).
- 22 J. E.Funk, D. R. Dinger, Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions. 1st Ed., Springer publisher, N.Y, USA, (1994).
- 23 F. de Larrard, Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach. E & FN Spon Edition, London and New York, (1999).
- 24 A.K.H. Kwan, W.W.S. Fung, Packing density measurement and modeling of fine aggregate and mortar. *Cem. Concr. Comp.* **31**, 349–357, (2009). <https://doi-org.www.snd11.arn.dz/10.1016/j.cemconcomp.2009.03.006>
- 25 E. Ghorbel, G. Wardeh, H. Gomart, P. Matar, Formulation parameters affect the performances of concrete equivalent mortars incorporating different ratios of recycled sand. *J. Build. Phys.* **43**(6), 545-572, (2019). <https://doi.org/10.1177/1744259119896>
- 26 W. Zuo, H.B. Bey, Q. Tian, C. Miao, N. Roussel, Robustness of cement-based materials: from dosage variations to yield stress fluctuations, *Cem. Concr. Res.* **139**, 106260, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106260>.
- 27 ACI Committee 237, Form Pressure Exerted by Self-Consolidating Concrete: Primary Factors and Prediction Models—Report, ACI PRC-237.2-21, American Concrete Institute, (2021).
- 28 W. Li, L. Guo, G. Liu, A. Pan, T. Zhang, Analytical and experimental investigation of the relationship between spread and yield stress in the mini-cone test for cemented tailings backfill. *Constr. Build. Mater.* **260**, 119770, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119770>
- 29 M. Thiedeitz, T. Kränkel, D. Kartal, J.J. Timothy, The Slump Flow of Cementitious Pastes: Simulation vs. Experiments. *Materials* **17**, 532, (2024). <https://doi.org/10.3390/ma17020532>
- 30 T. Li, R. Nogueira, J. de Brito, J. Liu, Prediction model of the mortar’s yield stress based on the aggregate’s volume fraction and properties, *J. Mater. Res.* **29**, 3591–3597, (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.02.103>
- 31 T. Li, R. Nogueira, J. de Brito, J. Liu A simple method to address the high water absorption of recycled aggregates in cementitious mixes. *Constr. Build. Mater.* **411**, 134404, (2024). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134404>
- 32 A. Özodabaş, Increasing the strength of alkali activated mortars prepared without cement by adding lime and crushed brick, *Cem. Wapno Beton* **29**(3), 233-248, (2024). <https://doi.org/10.32047/CWB.2024.29.3.5>
- 33 A. Bouvet, E. Ghorbel, R. Bennacer, The mini-conical slump flow test: Analysis and numerical study, *Cement Concr. Res.* **40**, 1517-1523, (2010). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.06.005>
- 34 G. Liu, W. Cheng, L. Chen, G. Pan, Z. Liu, Rheological properties of fresh concrete and its application on shotcrete, *Constr. Build. Mater.* **243**, 118180, (2020) <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118180>
- 35 Y. Su, J. Zhang, X. Wang, V. W. Y. Tam, Modification of recycled concrete aggregate and its use in concrete: A critical review, *Buildings* **13**(10), 2541, (2023). <https://doi.org/10.3390/buildings13102541>