

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСПЕРСНОЇ ФРАКЦІЇ ПЕРЕРОБЛЕНОГО БЕТОННОГО БРУХТУ ЯК МІНЕРАЛЬНОЇ ДОБАВКИ ДО БЕТОНУ

INVESTIGATION OF THE RECYCLED CONCRETE FINES AS A MINERAL ADDITIVE FOR CONCRETE

Житковський В.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-1710-6082, **Рудой В.В.**, аспірант, ORCID: 0009-0008-7659-1480 , (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), **Лушнікова Н.В.**, к.т.н., постдокторка, ORCID: 0000-0002-5781-4051 (Технічний університет Ейндговену, Нідерланди), **Сятковський О.А.**, інженер ORCID: 0009-0000-1945-1838

Zhitkovsky V., candidate of technical sciences, associate professor, ORCID: 0000-0003-1710-6082, **Rudoi V.**, postgraduate, ORCID: 0009-0008-7659-1480 (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), **Lushnikova N.** PhD, postdoctoral researcher ORCID: 0000-0002-5781-4051 (Eindhoven University of Technology, the Netherlands), **Siatkovskiy O.**, ORCID: 0009-0000-1945-1838

У статті наведені результати дослідження впливу дисперсної фракції, що отримується при подрібненні бетонного бруксту (ББ) на властивості бетону. Дисперсну фракцію ББ (<0.3 мм) вводили як мінеральну добавку, для зниження витрати цементу. Дослідження проводили з використанням методу математичного планування експерименту. Отримано експериментально-статистичні моделі впливу факторів складу бетону на рухомість бетонної суміші та його міцність. Встановлено, що при умові компенсації негативного впливу дисперсних частинок ББ на водопотребу при оптимальному їх вмісті зниження міцності несуттєве.

This research investigates the potential of utilizing the recycled-concrete fines (RCF) as a partial replacement for Portland cement in concrete production. The study addresses the growing concern of construction and demolition waste management, particularly in the context of Ukraine's post-war reconstruction and alignment with European Union environmental regulations (specifically, Regulation (EU) 2024/1159).

The research focuses on the influence of key concrete mix parameters on workability and compressive strength. These parameters include the water-cement ratio (W/C), the percentage of cement replaced by the RCF (<0.3 mm), and the dosage of superplasticizer (SP). A designed experiment approach was

employed to analyze the effects of these factors. The results of the study are presented through regression models that describe the relationships between the mix parameters and concrete workability and strength (at 3 and 28 days). The findings indicate that the W/C ratio is the most influential factor on compressive strength, while the superplasticizer dosage primarily affects workability. Notably, replacing up to 10-15% of cement with the RCF does not significantly compromise strength and has a limited impact on workability. The research also reveals an interaction between factors, where the effect of RCF is more significant at higher W/C ratio.

This research contributes to the development of sustainable concrete production methods by providing valuable insights into the effective utilization of recycled concrete waste. The findings support efforts to reduce reliance on virgin materials, minimize waste, and promote circular economy principles within the construction sector, particularly in the context of reconstruction efforts and adherence to evolving environmental standards.

Ключові слова: бетонний брукт, дисперсна фракція, мінеральна добавка, планування експерименту, цементний бетон, міцність на стиск, рухомість, водоцементне відношення, суперпластифікатор.

Concrete waste, dispersed fraction, mineral additive, experiment planning, cement concrete, compressive strength, workability, water-to-cement ratio, superplasticizer.

Вступ. Майбутня масштабна повоєнна відбудова України генеруватиме значні обсяги будівельних відходів, зокрема бетонного брукту [6], і водночас вимагатиме застосування сучасних, ресурсоефективних та екологічно безпечних рішень. У цьому контексті дослідження можливостей ефективного використання відходів бетону, зокрема його дисперсної фракції, як компонента нових бетонних сумішей, набуває особливої актуальності саме для України. Це критично важливим для розробки технологій виробництва якісних та довговічних бетонів з використанням вторинних ресурсів, що не лише сприятиме раціональному використанню ресурсів під час відбудови [6] та зменшенню навантаження на довкілля, але й дозволить українським виробникам підготуватися до імплементації вимог Регламенту (ЄС) 2024/1159 [3].

Будівельна індустрія є одним із ключових секторів економіки, але водночас одним із найбільших споживачів природних ресурсів та генераторів відходів у світі [1, 2]. Усвідомлення цього впливу на довкілля та необхідність переходу до принципів сталого розвитку знайшли своє відображення в новій законодавчій ініціативі Європейського Союзу – Регламенті (ЄС) 2024/1159, прийнятому у квітні 2024 року [3]. Цей документ встановлює гармонізовані умови для розміщення будівельної продукції на ринку ЄС, приділяючи безпрецедентну увагу екологічним аспектам, зокрема циркулярній економіці,

ресурсоефективності та максимальному залученню вторинної сировини у виробничий цикл [3, 4].

Для України, яка має статус кандидата на вступ до Європейського Союзу та проходить процес активної гармонізації свого законодавства і технічних стандартів з європейськими нормами [5], положення нового Регламенту (ЄС) 2024/1159 мають стратегічне значення. У найближчій перспективі український будівельний сектор повинен буде адаптуватися до цих вимог, щоб забезпечити конкурентоспроможність своєї продукції на європейському ринку та відповідати зобов'язанням у рамках євроінтеграційного курсу. Це робить вивчення та впровадження технологій, орієнтованих на сталість та циркулярність, не просто бажаним, а нагальною потребою для вітчизняної галузі.

У процесі подрібнення відходів бетону окрім крупних фракцій, які використовуються як щебінь, утворюється значна кількість дрібних та дисперсних частинок [2]. На даний час у найбільшій мірі використовується щебенева фракція переробленого бетону як крупний заповнювач. Використання фракції піску є здебільшого проблематичним через наявність цементного каменю на зернах, котрий підвищує водопотребу такого заповнювача [10]. Водночас, дисперсна фракція (частинки $<0,2...0,3$ мм), котра збирається системами аспірації подрібнювальних установок, практично не використовується, хоча містить значну кількість подрібненого цементного каменю, включаючи непрогідратовані клінкерні мінерали та частинки з потенційною пуцолановою активністю [8, 9]. Це відкриває перспективу її використання як активної мінеральної добавки, здатної частково замінити клінкерну складову (цемент) у бетонах, що сприятиме зниженню собівартості та покращенню екологічних показників виробництва [8, 9].

Аналіз останніх досліджень. Потенціал використання дрібнодисперсної фракції бетонного брухту, відомої як перероблений порошок (ПП), у будівельних матеріалах активно вивчається. Було встановлено, що ПП складається переважно з гідратованого цементного каменю, залишків негідратованого цементу та дрібних частинок вихідного заповнювача. Ключовою характеристикою цього матеріалу визнано його низьку пуцоланову активність порівняно з традиційними мінеральними добавками, такими як зола виносу чи мікрокремнезем [12, 13]. Через це його основний внесок у властивості цементних систем часто є фізичним (ефект наповнення), а не хімічним.

Найбільш поширеним напрямком досліджень стало використання ПП як часткового заміника цементу. Було показано, що його введення до складу суміші зазвичай збільшує водопотребу та може негативно впливати на реологічні властивості [14, 15], що вимагає відповідної корекції рецептури. Щодо властивостей затверділого матеріалу, встановлено, що заміна значної частки цементу (особливо понад 15-25%) на ПП, як правило, призводить до зниження показників міцності, таких як міцність на стиск та згин [16, 17]. Це

пояснюється ефектом розбавлення активного в'язучого. Дослідження також вказують на потенційне погіршення показників довговічності (наприклад, стійкості до агресивних середовищ, морозостійкості) при високих відсотках заміни [16, 17].

Крім використання як заміни в'язучого, вивчалася можливість заміни природного піску дрібними фракціями переробленого бетону в розчинах [18, 19]. Такі дослідження показали, що це також впливає на оброблюваність, міцність та адгезію розчину, причому результати значною мірою залежать від якості та кількості використаного вторинного матеріалу.

З огляду на низьку власну реакційну здатність ПП, важливим напрямком досліджень є пошук та вивчення методів її активації. Було досліджено різні підходи, зокрема: механічна активація шляхом тонкого помелу для збільшення питомої поверхні [20], термічна активація через нагрівання до високих температур (зазвичай 600-800°C) з метою дегідратації певних фаз [21], хімічна активація за допомогою різних реагентів (лугів, сульфатів) [22] та карбонізація, тобто обробка вуглекислим газом (CO_2) [23].

Слід відзначити, що екологічні переваги використання RP та інших перероблених матеріалів були підтверджені за допомогою методу оцінки життєвого циклу (LCA) [24, 25, 26]. Ці дослідження показали потенціал для зменшення споживання природних ресурсів та зниження викидів CO_2 у будівельній галузі.

Таким чином, попередні дослідження встановили основні властивості RP, його можливий вплив на цементні системи при використанні як заміни цементу чи заповнювача, виявили проблему низької активності та активно досліджували різні методи її активації, а також підтвердили екологічну доцільність його використання. Незважаючи на досягнутий прогрес, залишається важливим пошук шляхів підвищення ефективності використання ПП для часткової заміни цементу, вивчення впливу хімічного та гранулометричного складу ПП, а також наявних у ньому шкідливих домішок.

Метою даного дослідження є вивчення можливостей часткової заміни цементу дисперсною фракцією бетонного брухту при одночасній зміні факторів складу бетону, а також отримання експериментально-статистичних моделей ключових параметрів бетону для їх оптимізації.

Матеріали та методика досліджень. Для досліджень використовували дисперсну фракцію (ПП), отриману шляхом подрібнення бетонних відходів руйнування будівель віком 30...40 років у лабораторній шоківій дробарці з відсіванням дисперсної фракції через сито 0,315 мм. Такий спосіб обробки відходів бетону аналогічних комерційним подрібнювальним установкам, обладнаним системою аспірації (для прикладу установка нідерландської фірми C2CA, котра розпочинає роботу з переробки відходів бетону в рамках міжнародного проекту «S3 - Безпечна, стійка та швидка відбудова України»). Хіміко-мінералогічний склад отриманої фракції представлено у табл. Як

в'яжуче використовували портландцемент ПЦ II/A-III-500 (Волинь-цемент). Заповнювачі – пісок річковий та щебінь гранітний фракції 5-20 мм. Використовували полікарбоксилатний суперпластифікатор PCE50 (виробництво ТОВ ЮСейхемікал (Україна))» (далі - СП).

Таблиця 1

Хімічний склад дисперсної фракції бетонного брухту (ПП)

XRF, %									
ВПП	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Сума
10.06	60.27	6.28	3.56	13.18	0.61	0.86	2.17	0.67	97.66

Дослідження проводили за трирівневим планом для трьох факторів (план типу В₃) відповідно до методології планування експерименту [11]. Змінними факторами були обрані: x_1 – Водцементне відношення (В/Ц); x_2 – Вміст ПП (% від маси цементу); x_3 – Витрата СП (% від маси цементу). Рівні та інтервали варіювання факторів наведено в табл. 2. Для всіх дослідів витрату води підтримували постійною – 160 л/м³. Для кожного складу бетону визначали рухомість за осадкою стандартного конуса (ОК, см) та виготовляли по 6 зразків-кубів 100×100×100 мм, які тверднули в нормальних умовах. Міцність на стиск визначали у віці 3 та 28 діб. Отримані експериментальні дані обробляли методами математичної статистики з побудовою експериментально-статистичних моделей (рівняння (1-3)) впливу факторів на вихідні параметри (рухомість бетонної суміші та міцність бетону) [11].

Таблиця 2

Умови планування експериментів

Фактори	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	-1	0	+1	
Водцементне відношення, В/Ц, x_1	0,45	0,55	0,65	0,1
Витрата бетонного брухту, % від маси цементу, ПП, x_2	0	10	20	10
Витрата суперпластифікатора, % від маси цементу, СП, x_3	0	0,25	0,5	0,25

Результати досліджень. Обробка і статичний аналіз отриманих даних дав змогу побудувати математичні моделі рухомості за осадкою стандартного конуса, та міцності при стиску у віці 3 та 28 діб у вигляді поліноміальних рівнянь регресії.

$$OK = 15 - 1,4 \cdot x_1 - 0,5 \cdot x_2 + 2,6 \cdot x_3 - 0,5 \cdot x_1 x_2 - 0,5 \cdot x_1 x_3 - 0,2 \cdot x_1^2 + 0,05 \cdot x_2^2 + 0,05 \cdot x_3^2 \quad (1)$$

$$R^3_{ct} = 14,9 - 6,7 \cdot x_1 - 2,6 \cdot x_2 + 0,8 \cdot x_3 - 0,1 \cdot x_1 x_2 + 0,01 \cdot x_1 x_3 - 1,1 \cdot x_2 x_3 - 2,58 \cdot x_1^2 - 1,1 \cdot x_2^2 + 0,2 \cdot x_3^2 \quad (2)$$

$$R^{28}_{ct} = 32,2 - 9,5 \cdot x_1 - 5,5 \cdot x_2 + 1,4 \cdot x_3 - 0,4 \cdot x_1 x_2 - 0,5 \cdot x_1 x_3 + 4,1 \cdot x_2 x_3 - 2,58 \cdot x_1^2 - 3,1 \cdot x_2^2 - 0,1 \cdot x_3^2 \quad (3)$$

Аналіз рівняння (1) та графіків на рис. 1 показує, що найбільш значущими факторами, що впливають для рухомість бетонної суміші з ПП є витрата суперпластифікатора (x_3) та, власне, кількість дисперсної фракції: збільшення дозування СП суттєво підвищує ОК, а при збільшенні вмісту ПП рухомість суміші знижується. Хоча крупність ПП більша ніж у цементу, визначаючим фактором у даному випадку, скоріше за все, є пористість зерен. Водоцементне відношення (x_1) практично не впливає на рухомість, так як склади бетону знаходяться у межах дії відомого правила постійної водопотреби бетонної суміші [7]. Важливим висновком із аналізу даної моделі є наявність помітної взаємодії факторів x_2 та x_3 , що вказує на суттєву компенсацію збільшення водопотреби бетонної суміші, викликаной дисперсною фракцією бетонного брухту за рахунок підвищення вмісту СП. Такий ефект повинен позитивно відобразитись на міцності бетону з ПП.

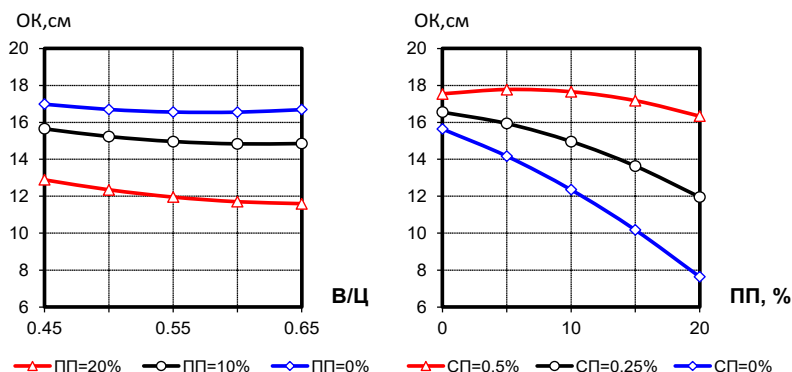


Рис. 1. Вплив досліджуваних факторів на рухомість бетонної суміші (ОК, см).
Позначення факторів відповідає табл. 2.

На основі експериментально-статистичної моделей проведено аналіз впливу окремих та комбінованих факторів на міцність бетону. Фактор x_1 (водоцементне відношення) має найбільш негативний вплив на міцність у 28 діб: зі збільшенням В/Ц відбувається істотне зниження міцності. Наявність квадратичного ефекту у рівнянні (3) вказує на нелінійну залежність: при низькому В/Ц спостерігається оптимум, після чого зниження стає ще інтенсивнішим. Вміст дисперсної фракції подрібненого бетону (x_2) здебільшого негативно впливає на міцність, особливо при високих дозуваннях (рис. 2). Однак за участі інших факторів, особливо СП, цей ефект може бути частково компенсований. Квадратична залежність вказує на існування граничного оптимального дозування (близько 10–15%). Фактор x_3 (вміст суперпластифікатора) позитивно впливає на міцність, хоч і в меншій мірі. Його дію можна охарактеризувати як допоміжну — за рахунок покращення реології суміші, зниження водопотребі та кращого ущільнення бетону. Взаємодія факторів x_1 та x_2 має слабкий негативний характер: підвищення В/Ц у поєднанні з високим вмістом мінеральної добавки знижує міцність ще більше, ймовірно через зниження щільності структури та недостатню гідратацію. Взаємодія x_2x_3 є позитивною і найбільш вираженою: використання суперпластифікатора дозволяє нейтралізувати негативний вплив добавки бетонного брукху за рахунок покращення зв'язування частинок та ущільнення бетону (рис. 3).

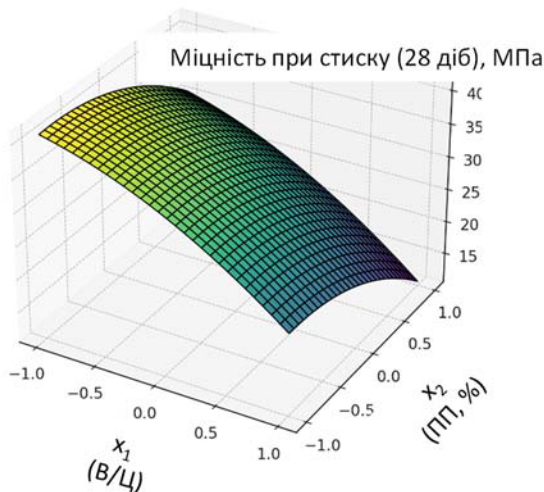


Рис. 2. Поверхня відгуку міцності при стиску у 28 діб на зміну В/Ц та вмісту дисперсної фракції бетонного брукху (ПП)

На початковому етапі (3 доба твердіння) спостерігається більш різкий негативний вплив дисперсної фракції бетонного брукху (фактор x_2) на

міцність, котрий теж компенсується за рахунок СП, однак у значно меншій мірі. Характерно, що недобір міцності бетону з бетонним порошком, помітний у ранній період твердіння, суттєво знижується у більш пізній термін, що може свідчити про активну участь дисперсної фракції бетонного брукху у процесах структуроутворення цементного каменю. Таким чином, максимальне підвищення міцності бетону досягається за умов помірного В/Ц (ближче до 0,45), оптимального дозування дисперсної фракції (до 10%) та застосування суперпластифікатора (до 0,3–0,4%). Поеднання СП з дисперсною фракцією забезпечує максимальний синергетичний ефект, тоді як високе В/Ц знижує ефективність усіх інших факторів (рис 3).

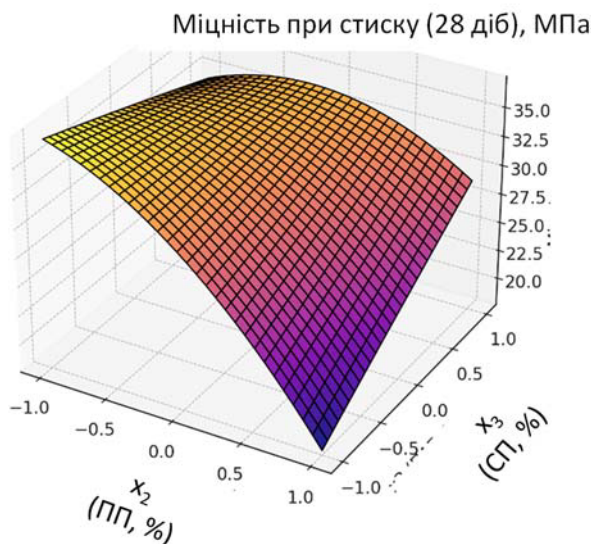


Рис. 3. Поверхня відгуку міцності при стиску у 28 діб на зміну вмісту дисперсної фракції бетонного брукху (ПП) та суперпластифікатора полікарбоксилатного типу (СП)

Висновки.

За допомогою методу математичного планування експериментів встановлено вплив факторів складу на властивості бетонів з використанням дисперсної фракції розміром менше 0,315 мм, отриманої при подрібненні бетонного брукху.

Введення бетонного брукху замість частини цементу суттєво впливає на рухомість бетонних сумішей, однак помітно компенсується за рахунок збільшення вмісту суперпластифікатора полікарбоксилатного типу.

Додавання дисперсних бетонних частинок не знижує міцність бетону на 28 діб при умові введення його кількості 10...15% та нівелювання

негативного впливу на водопотребу за рахунок введення суперпластифікатора у кількості 0,3...0,4%. Це вказує на активну участь дисперсного бетонного порошку у формуванні структури цементного каменю і дає можливість використовувати його як мінеральну добавку для зниження витрати цементу в бетоні.

Дослідження було виконане за підтримки програми Innovate Ukraine, що реалізується, британським інноваційним агентством, "Інноваційна Україна – підтримка енергетичного відновлення України" / Innovate Ukraine, funded by UK International Development та implemented by the Innovate UK "Innovate Ukraine – supporting Ukraine's energy recovery" у рамках грантового проекту no. 10097027 «S3 – Безпечна, стійка та швидка відбудова України» / "S3 – Safe, Sustainable, and Swift Reconstruction of Ukraine".

1. European Environment Agency (EEA). Construction and demolition waste: challenges and opportunities in a circular economy. EEA Report No 11/2020. Published 17 Nov 2020. [Електронний ресурс]: <https://www.eea.europa.eu/publications/construction-and-demolition-waste-challenges>.

2. Дворкін Л. Й. Проблеми утилізації відходів будівництва та знесення / Л. Й. Дворкін, В. В. Житковський, І. Г. Скрипник // Будівельні матеріали і виробн. – 2019. – № 3/4. – С. 30-33.

3. Regulation (EU) 2024/1159 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products, amending Regulation (EU) 2019/1020 and Directive (EU) 2020/2614, and repealing Regulation (EU) No 305/2011. Official Journal of the European Union, L, 2024/1159, 30 April 2024. [Електронний ресурс]. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1159/oj>

4. European Commission. Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe. COM(2020) 98 final. Brussels, 11.3.2020. [Електронний ресурс]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098> 1

5. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони. Офіційний вісник Європейського Союзу, L 161, 29.5.2014. та Урядовий портал України. Європейська інтеграція. [Електронний ресурс]. <https://www.kmu.gov.ua/diyalnist/yevropejska-integraciya>

6. The World Bank. Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3). February 2024. [Електронний ресурс]. <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2024/02/15/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released>

7. Дворкін Л. Й. Проектування складів бетонів / монографія / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін ; МОН України, НУВГП. – Рівне : НУВГП, 2015.

8. Житковський В. В. Тонкомолота фракція з переробки бетону як мінеральна добавка для цементних бетонів / В. В. Житковський, Л. Й. Дворкін, І. Г. Скрипник // Будівельні матеріали і виробн. – 2022. – № 1. – С. 14-17.

9. Silva R.V., de Brito J., Dhir R.K. Properties and compositional characteristics of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production // Journal of Cleaner Production. – 2019. Vol. 144. pp. 1-41. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117855>

10. Montgomery, D. C. Design and analysis of experiments / D. C. Montgomery. – 9th ed. – John Wiley & Sons, 2017. – 730 p.
11. Дворкін Л.Й. Будівельне матеріалознавство : підручник / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін. – К. : Основа, 2006. – 550 с.
12. Zhu, P.; Chen, T.; Long, W.; Chen, H.; Xu, J. Pozzolan activity of waste concrete powder produced from waste concrete containing high content limestone powder under different producing processes. *Cem. Concr. Compos.* 2021, 124, 104, 253.
13. Shui, Z.; Zhang, R.; Chen, W.; Xuan, D.; Rui, Y. Cementitious characteristics of hydrated cement paste powder. *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.* 2008, 23, 546–550.
14. Li, W.; Xiao, J.; Cao, W.; Liu, W. Effects of recycled concrete powder on the stress-strain curve relationship of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 2017, 152, 1013–1025.
15. Zhang, J.; Liu, J.; Tan, Y.; Shi, C.; García, R. Influence of recycled powder obtained from waste concrete on the properties of fresh and hardened mortar. *Constr. Build. Mater.* 2018, 158, 185–194.
16. Duan, Z.; Poon, C.S. Use of recycled powder from waste of clay brick/concrete block production plant in mortar. *Constr. Build. Mater.* 2013, 40, 329–335.
17. Kang, T.H.-K.; Kim, W.; Kwak, Y.-K.; Hong, S.-G. Mechanical properties of concrete containing recycled concrete powder under uniaxial compression. *Struct. Concr.* 2019, 20, 1732–1742.
18. Silva, R.V.; de Brito, J.; Dhir, R.K. Use of recycled fine aggregates from concrete demolition waste in the production of structural concrete. *Constr. Build. Mater.* 2014, 66, 437–448.
19. Khatib, J.M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cem. Concr. Res.* 2005, 35, 763–769.
20. Wang, D.; Shi, C.; Farzadnia, N.; Shi, Z.; Jia, H. Mechanical activation of recycled cement paste powder. *Cem. Concr. Compos.* 2020, 108, 103524.
21. Zhang, Z.; Chen, Z.; Shao, H.; Wang, S. Improvement of recycled cement powder activity by thermal treatment and its mechanism. *J. Clean. Prod.* 2022, 377, 134435.
22. Li, J.; Yang, S.; He, X.; Su, Y.; Wang, F.; Strnad, B. Composite activation of recycled concrete powder using sodium sulfate and calcium hydroxide. *Constr. Build. Mater.* 2019, 211, 113–121.
23. Zhan, B.; Poon, C.S.; Shi, C. CO₂ curing for improving the properties of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 2014, 67, 378–385.
24. Dias, A.; Nezami, S.; Silvestre, J.; Kurda, R.; Silva, R.; Martins, I.; de Brito, J. Environmental and Economic Comparison of Natural and Recycled Aggregates Using LCA. *Recycling* 2022, 7, 43.
25. Cuenca-Moyano, G.M.; Zanni, S.; Bonoli, A.; Valverde-Palacios, I. Development of the life cycle inventory of masonry mortar made of natural and recycled aggregates. *J. Clean. Prod.* 2017, 140, 1272–1286.
26. Cuenca-Moyano, G.M.; Martín-Morales, M.; Bonoli, A.; Valverde-Palacios, I. Environmental assessment of masonry mortars made with natural and recycled aggregates. *Int. J. Life Cycle Assess.* 2019, 24, 24191–24210.