

Innovazione green dei calcestruzzi ultra-performanti: approcci *knowledge-based* per il progetto

RICERCA E
SPERIMENTAZIONE/
RESEARCH AND
EXPERIMENTATION

Ricerca avanzata (Under 35)

jenineprincipe@gmail.com

Jenine Principe,

Dipartimento di Architettura, Università di Napoli Federico II, Italia

Abstract. Sebbene il calcestruzzo sia responsabile del 27% delle emissioni di CO₂ dell'intero settore industriale, il suo fabbisogno cresce ogni anno. Per diminuirne impatti e quantità impiegate, l'International Energy Agency suggerisce anche l'ottimizzazione della composizione molecolare del calcestruzzo per migliorarne le prestazioni. Su tale principio si basano i calcestruzzi ultra-performanti che, nel settore italiano delle costruzioni, sono al centro di una positiva convergenza di istanze ambientali, produttive ed economiche. Il contributo presenta approcci *knowledge-based* per mediazione tra progetto e produzione industriale e applicazioni per la riqualificazione di edifici e infrastrutture, dimostrando la validità delle soluzioni proposte al raggiungimento di obiettivi *carbon neutral*.

Parole chiave: UHPFRC; Calcestruzzi innovativi; Riqualificazione sostenibile; Green innovation; Sperimentazione.

Introduzione

A dispetto della centralità che occupa nella ricerca internazionale, la transizione ecologica del settore delle costruzioni evidenzia alcune contraddizioni in vari contesti produttivi e operativi. Una di queste è rappresentata dal settore dei calcestruzzi, la cui responsabilità in termini di emissioni di CO₂ va di pari passo con l'aumento delle quantità impiegate ogni anno: a esso è imputabile il consumo mondiale del 7% dell'energia utilizzata nell'intero settore industriale e il 27% delle emissioni totali di CO₂ da esso prodotte. Queste derivano in larga parte dal processo produttivo e possono essere solo parzialmente ridotte con l'efficientamento del sistema energetico: la CO₂ rilasciata in seguito alla calcinazione dei materiali calcarei copre infatti ben il 63% delle emissioni totali derivanti dall'intero comparto (IEA, 2017) (Fig. 1). Inoltre, delle 4 miliardi di tonnellate (CEMBUREAU, 2020) di calcestruzzo necessarie a soddisfarne la richiesta a livello mondiale, il 56,2% proviene dalla Cina che, lo scorso luglio, ha rifiutato – assieme all'India, produttrice del 7,8% – l'accordo internazionale che puntava a limitare l'innalzamen-

Green innovation of ultra-high performance concrete: a knowledge-based approach for the project

Abstract. Although concrete is responsible of 27% of the CO₂ emissions of the entire industrial sector, the material is required more every year. To reduce the impacts and quantities used, the International Energy Agency suggests the optimisation of the molecular composition of the concrete to enhance its performances. Based on this principle, ultra-high performance concretes are at the centre of a positive convergence of environmental, production and economic demands in the Italian construction sector. This paper presents both knowledge-based approaches for improving the cohesion between the design and production phases and applications for the redevelopment of buildings and infrastructures, thus demonstrating the validity of the proposed solutions for achieving carbon neutral objectives.

Keywords: UHPFRC; innovative concrete; sustainable redevelopment; Green innovation; Experimentation.

to della temperatura globale di 1,5 gradi rispetto all'era preindustriale entro il 2030, sostenendo che un'eventuale adesione avrebbe implicato gravi perdite economiche. Tuttavia, guardando al solo settore del calcestruzzo in Cina, come in moltissimi paesi emergenti, una rinuncia al materiale potrebbe intaccare il soddisfacimento del fabbisogno abitativo: infatti, anziché essere adoperato prevalentemente per riqualificazioni di edifici e infrastrutture come avviene in Europa¹, in tali paesi il calcestruzzo è il materiale più utilizzato per la realizzazione di nuove abitazioni. Non a caso, è ancora estremamente competitivo per resa prestazionale, prezzo e ampie e rapide possibilità di approvvigionamento. Per tale motivo, appare più che mai urgente una svolta verso un suo sviluppo sostenibile: tra le possibili soluzioni, l'ottimizzazione della composizione molecolare del calcestruzzo migliorandone le performance e diminuendone impatti e quantità impiegate si configura una delle possibili strade da percorrere.

Il calcestruzzo e la questione ambientale: strategie internazionali per una svolta sostenibile

Nel 2018 il CEMBUREAU – organizzazione rappresentativa dell'industrie cementifere in Europa – ha introdotto l'approccio delle 5C, ovvero clinker, cemento, calcestruzzo, costruzione, e carbonatazione, con l'obiettivo di intervenire in ciascuna delle macroaree così individuate per raggiungere l'obiettivo zero emissioni entro il 2050. Le strategie più ampie prevedono lo sviluppo di un network per il trasporto e l'immagazzinamento di CO₂ (i cosiddetti processi di *carbon capture and storage*, CCS²), l'avvio di azioni di economia circolare per supportare l'uso di rifiuti non riciclabili e bio-

Introduction

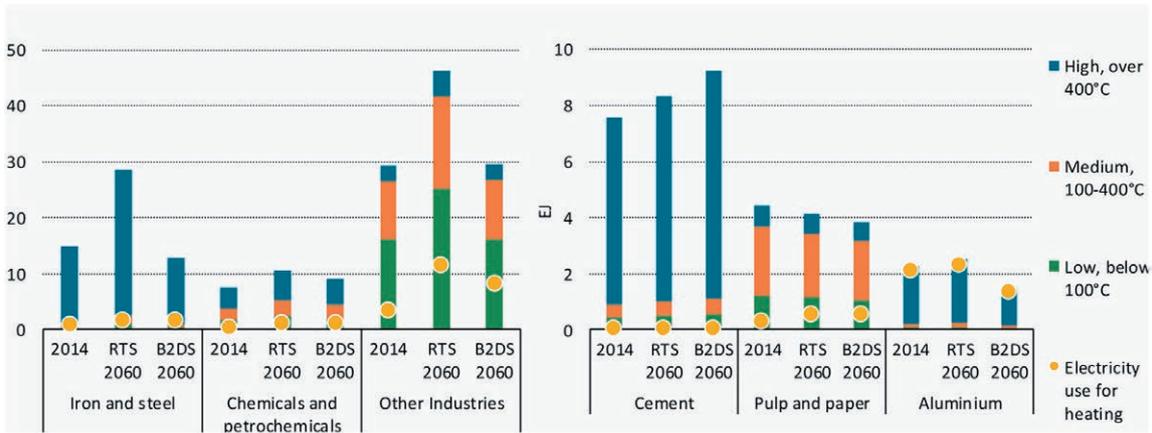
In spite of the centrality it occupies in international research, the ecological transition of the construction sector highlights some contradictions in various production and operational contexts. One of these is represented by the concrete sector, whose responsibility in terms of CO₂ emissions is flanked by a constant increase in its demanded quantities: 7% of the energy used in the entire industrial sector and 27% of the total CO₂ emissions produced by it are due to concrete. The emissions derive largely from the production process and can only be reduced to a certain extent by a higher efficiency of its energy system: in fact, the CO₂ released following the calcination of calcareous materials accounts for as much as 63% of the total emissions deriving from the entire sector (IEA, 2017) (Fig. 1). Furthermore, of the 4 billion tons (CEM-

BUREAU, 2020) of concrete needed to meet the global demand, 56.2% comes from China, which last July refused – together with India, producer of 7.8% – to sign up to the international agreement aimed at limiting by 2030 the rise in global temperature of 1.5 degrees compared with the pre-industrial era, arguing that any adherence to the programme would imply significant economic losses. However, looking at the concrete sector in China, as well as in many emerging countries, giving up the material would lead to a possible housing crisis: in fact, instead of being used mainly for building and infrastructure redevelopment as happens in Europe¹, in China, as in many emerging countries, concrete is the most used material for the construction of new homes. Not surprisingly, concrete is still extremely competitive in terms of performance, price and

CONCRETE: ENERGY CONSUMPTION AND EMISSIONS WORLDWIDE

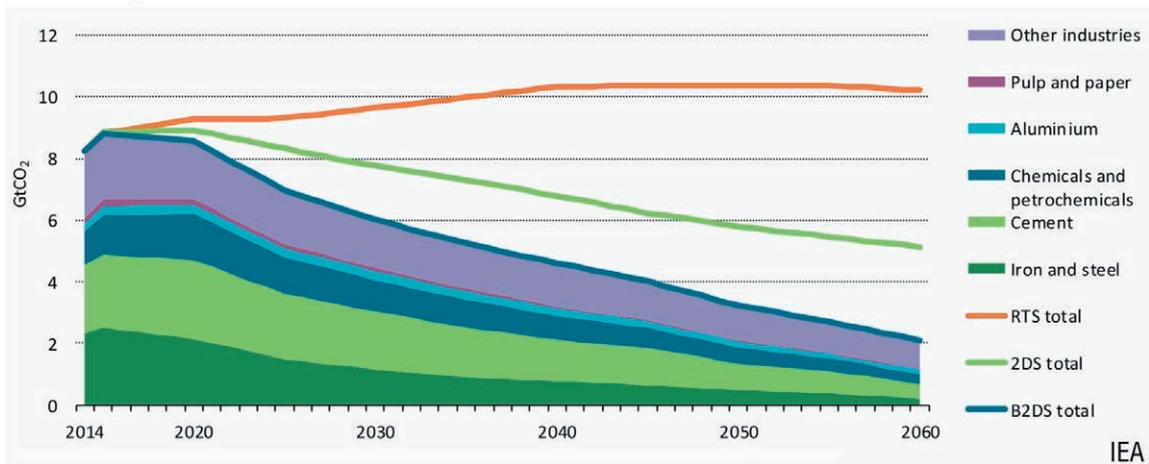
ELECTRICITY CONSUMPTION FOR HEAT GENERATION AND HEAT DEMAND IN INDUSTRY

| 01

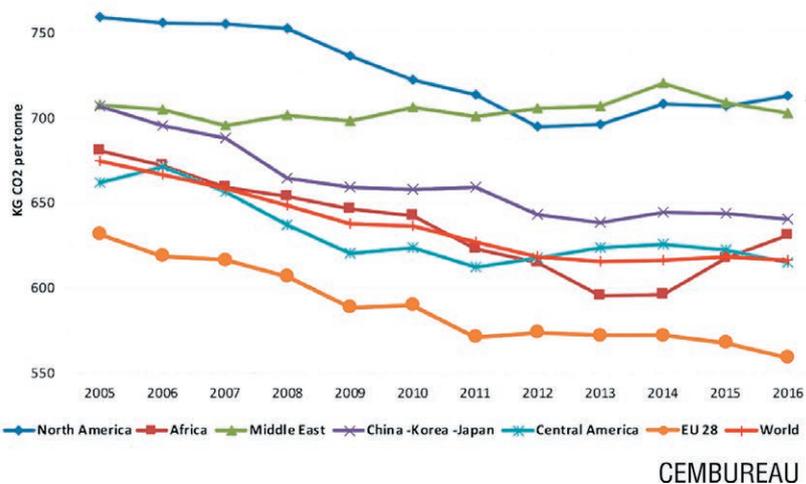


The Reference Technology Scenario (RTS) considers that, by 2060, the environmental policies currently in place will be maintained. In the B2DS, or Beyond 2 °C Scenario, the environmental policies considered are consistent with the Paris agreements. The increase in the energy used by the concrete sector in 2060 is compatible with the expected increase in consumption.

DIRECT CO₂ EMISSIONS BY INDUSTRY SUBSECTOR



NET CO₂ EMISSIONS OF CEMENTITIOUS PRODUCTS



masse nella produzione di calcestruzzo e politiche finalizzate alla riduzione del *footprint* degli edifici. Allo stesso tempo, si lavora anche alla scala microscopica, puntando all'utilizzo di materie prime meno emissive (sostituendo, ad esempio, il clinker con *substitutive cementitious materials*, SCM³) e all'efficiamento delle performance del calcestruzzo: nei calcestruzzi ultra-performanti (UHPC, Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete) meno del 20% dei silicati tricalcici e bicalcici, responsabili della resistenza meccanica, vengono idratati, facendo sì che una parte di cemento e reagenti risulti inutilizzata (Van Damme, 2018).

Per l'ottimizzazione del processo produttivo, l'International Energy Agency ha previsto che la sola sostituzione dei forni a via umida con forni rotativi a via secca porterebbe a un impiego di energia termica pari a soli 2,9 GJ per tonnellata di clinker (al 2060) rispetto ai 3,5 GJ/t del 2014 (IEA, 2017). Un'ulteriore soluzione potrebbe essere un passaggio spinto alla prefabbricazione, in modo da avere maggiore controllo sul processo produttivo ed evitare sprechi di materiale, molto più frequenti per il gettato in opera: una delle stime prevede una riduzione dei rifiuti fino al 30% (Scrivener, 2017).

La situazione europea si riflette anche in ambito italiano, dove Federbeton, in collaborazione con l'Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento (AITEC) ha presentato, nel 2019, il suo Rapporto di Sostenibilità (Federbeton, 2019), manifestando così la sua piena adesione al raggiungimento del Green New Deal europeo. Nel triennio 2017-2019 le aziende italiane hanno investito oltre 110 milioni di euro in tecnologie per minimizzare gli impatti del processo produttivo del calcestruzzo. In Italia, tuttavia, il tasso di utilizzo dei combustibili di recupero in so-

wide and rapid supply possibilities. For these reasons, a turning point towards sustainable development appears more urgent than ever: among the various solutions, the optimisation of the molecular composition of concrete by improving its performance and decreasing its impacts and used quantities is one of the possible ways to go.

Concrete and environmental issues: international strategies for a sustainable turn

In 2018, CEMBUREAU – the representative organisation of the cement industries in Europe – introduced the 5C approach, i.e., clinker, cement, concrete, construction and carbonation, with the objective of promoting intervention in such areas in order to reach zero emissions by 2050. The broader strategies envisage the development of a transport and storage

network of CO₂ (the so-called carbon capture and storage processes, CCS²), the launch of circular economy actions to support the use of non-recyclable waste and biomass in the production of concrete and policies aimed at reducing the footprint of buildings. At the same time, on a microscopic scale, the research is focused on the use of less emissive raw materials (replacing, for example, clinker with substitutive cementitious materials, SCM³) and on the efficiency of the performances of the concrete mix: for example, in ultra-high performance fibre-reinforced concretes (UHPC), less than 20% of the tricalcium and dicalcium silicates, responsible for the mechanical resistance, is hydrated, leaving unused most of the cement and reagents involved (Van Damme, 2018).

For the optimisation of the production process, the International Energy

Agency has foreseen that the sole replacement of wet process furnaces with dry process rotary ovens would lead to the use of thermal energy equal to 2.9 GJ per ton of clinker (by 2060), far inferior to the 3.5 GJ/t used in 2014 (IEA, 2017). Another solution can be a forced passage to prefabrication in order to have greater control over the production process and to avoid wasting material. One of the estimates even foresees a reduction in waste of up to 30% (Scrivener, 2017).

The European situation is also reflected in the Italian context, where Federbeton, in collaboration with the Italian Economic Technical Association of Cement (AITEC) presented its sustainability report in 2019 (Federbeton, 2019), thus demonstrating its full adherence to the achievement of the European Green New Deal. In the three-year period 2017-2019, Italian

stipuzione di quelli fossili è pari solo al 20,3%, dato purtroppo ancora lontano dalla media europea (47%). Infatti, la sola sostituzione dei combustibili tradizionali con quelli derivati da rifiuti potrebbe condurre a un'eliminazione delle emissioni dirette pari a circa il 16% (Federbeton, 2019). Altrettanto significativo potrebbe essere il contributo della filiera del calcestruzzo alla crescita di processi di economia circolare: utilizzando aggregati provenienti dai rifiuti da costruzione e demolizione, si risparmierebbero fino a 15 milioni di tonnellate di aggregati naturali e, di conseguenza, di materiale di scarto (attualmente ne sono impiegate solo 1,6) (Buzzi, 2019). In un clima di cambiamento dunque, è sicuramente rilevante che molte delle strategie descritte per il calcestruzzo – riduzione del contenuto di clinker, utilizzo di SCM, incremento dell'intensità prestazionale del cemento, maggiore utilizzo delle tecniche di prefabbricazione, ottimizzazione della distribuzione molecolare delle particelle – si basino proprio sui principi che hanno portato alla nascita degli ultra-performanti, che si configurano quindi come una delle possibili soluzioni alla riduzione dell'impatto dell'intero settore.

UHPC e mercato delle costruzioni italiano

Attualmente le principali aree di applicazione dei calcestruzzi ultra-performanti vanno dalla realizzazione di elementi di facciata, alla riqualificazione di edifici e infrastrutture fino al settore dell'arredo, in particolare quello di lusso, che ha saputo ben sfruttare le capacità estetiche dell'UHPC, applicandogli rapidamente il marchio di qualità Made in Italy⁴.

Agency has foreseen that the sole replacement of wet process furnaces with dry process rotary ovens would lead to the use of thermal energy equal to 2.9 GJ per ton of clinker (by 2060), far inferior to the 3.5 GJ/t used in 2014 (IEA, 2017). Another solution can be a forced passage to prefabrication in order to have greater control over the production process and to avoid wasting material. One of the estimates even foresees a reduction in waste of up to 30% (Scrivener, 2017).

The European situation is also reflected in the Italian context, where Federbeton, in collaboration with the Italian Economic Technical Association of Cement (AITEC) presented its sustainability report in 2019 (Federbeton, 2019), thus demonstrating its full adherence to the achievement of the European Green New Deal. In the three-year period 2017-2019, Italian

companies invested over 110 million euros in technologies to minimise the production impact. In Italy, however, the usage rate of recycled fuels is only 20.3%, still far from the European average (47%): in fact, only by replacing traditional fuels with those derived from waste can 16% of direct emissions be eliminated (Federbeton, 2019).

The contribution of the concrete supply chain to the growth of circular economy processes can be instead achieved using construction and demolition waste, saving up to 15 million tons of natural aggregates and, consequently, of waste material (currently only 1,6 are used) (Buzzi, 2019).

In such a context, it is quite significant that many of the strategies described for concrete – reduction of clinker content, use of SCM, increase in the performance intensity of cement,

Le applicazioni già diffuse degli UHPFRC risultano coerenti con dati del settore italiano del 2020, anche se influenzati dalla pandemia: sebbene siano state ridotte le gare per lavori pubblici, si osserva nel complesso una dinamica positiva (+ 28,7%) dovuta ai bandi di importo superiore ai 5 milioni, trainati dalle grandi opere o interventi voluti da ANAS e RFI (ANCE, 2021). A ciò si aggiungono gli effetti positivi del Superbonus 110% e delle risorse stanziati a livello europeo (Next Generation EU e Dispositivo per la Ripresa e la Resilienza). Tali dati, incrociati con le strategie ambientali di *deep renovation* promosse in Europa, aprono a interessanti dinamiche per l'UHPFRC.

A ciò si aggiunge la compatibilità del materiale con la riqualificazione di strutture in calcestruzzo armato che, com'è noto, caratterizza gran parte del patrimonio edilizio e infrastrutturale italiano. Quest'ultimo è stato recentemente sottoposto a un estensivo programma di interventi di riqualificazione che hanno visto stanziati per il 2021 circa 640 milioni, raddoppiando le spese previste negli anni precedenti (Il Sole 24 Ore, 2021). Per le riqualificazioni di infrastrutture, il contributo dell'UHPFRC si è già dimostrato fondamentale negli Stati Uniti dove, a partire dal 2000, la Federal Highway Administration li ha applicati con successo soprattutto nella sostituzione di manti stradali, o realizzando elementi prefabbricati in calcestruzzi convenzionali giuntati con ultra-performanti in modo da sfruttarne la duttilità, oppure gettando in opera layer sottili del materiale.

Le prospettive di applicazione dell'UHPFRC per il mercato italiano dunque non mancano e, considerata la sua compatibilità con la questione ambientale, resta solo da superare la difficoltà che caratterizza l'ingresso di qualsiasi innovazione in un set-

tore restio al cambiamento come quello delle costruzioni. Per spingere la tecnologia, dunque, è necessario agire sul e con il progetto, a partire «dall'adozione di criteri corretti con cui orientare la scelta dei materiali e delle soluzioni da adottare» (Manzini, 1990) lavorando, prima di tutto, sul fattore conoscenza. L'obiettivo è, dunque, duplice: favorire, da un lato, la diffusione del materiale e dimostrarne, dall'altro, la validità come soluzione tecnologica sostenibile alle questioni poste dal settore delle costruzioni.

Applicazioni *knowledge-based* per la penetrazione degli ultra-performanti sul mercato italiano delle costruzioni

La prima applicazione presentata è indirizzata specificamente alla mediazione tra progettazione e produzione di elementi in UHPFRC, sviluppando un protocollo di prove sperimentali atto a diffondere la conoscenza del materiale. La seconda applicazione, una vera e propria soluzione tecnologica indirizzata invece alla riqualificazione, si pone l'obiettivo di fornire un rapido e comprensibile metodo di pre-dimensionamento per interventi su strutture esistenti in calcestruzzo armato, mediante l'utilizzo di un sottile strato di ultra-performante all'estradosso degli elementi portanti.

L'idea di sviluppare un protocollo di prove sperimentali nasce dal presupposto che, a dispetto delle pressoché illimitate possibilità formali offerte dal calcestruzzo, che sembrerebbero implicare, quindi, una conoscenza profonda del materiale, «il calcestruzzo, o cemento, è spesso trattato più come una pasta generica di cui solo le proprietà fisiche essenziali sono utili (e note) agli architetti» (Morel, 2016). Più che un protocollo di prove quindi,

greater use of precast techniques, optimisation of the molecular distribution of particles – are based precisely on the principles that led to the birth of UHPFRC, which are therefore among the possible technological solutions to reduce the impact of the entire sector.

UHPFRC and Italian construction market

Currently, the main areas of application of ultra-high performance concretes range from the construction of façade elements to the redevelopment of buildings and infrastructures up to the furniture sector, in particular the luxury one, which has been able to exploit the aesthetic capabilities of UHPFRC, quickly applying to it the Made in Italy quality mark¹.

The already widespread applications of UHPFRCs are coherent with the 2020 data of the Italian sector, even if

influenced by the pandemic: although state funding has been reduced, an overall positive trend is observed (+ 28.7%) thanks to more than 5 million euros spent on calls for tenders, mostly directed towards major works or interventions by ANAS (Italian National Freeway Society) and RFI (Italian Rail Network society) (ANCE, 2021). Also, the positive effects of the Superbonus 110% and the resources allocated at European level (Next Generation EU and Recovery and Resilience Facility) must be considered. These data, combined with the environmental deep renovation strategies promoted in Europe, open up interesting dynamics for UHPFRCs.

The compatibility of the material with the redevelopment of reinforced concrete structures, which characterise much of the Italian building and infrastructural heritage, must also be con-

sidered. The latter has recently been subjected to an extensive programme of redevelopment interventions with an allocation of 640 million euros for 2021, doubling the expenses provided in the previous years (Il Sole 24 Ore, 2021). For the requalification of infrastructures, the contribution of the UHPFRCs has already proven fundamental in the United States where, since 2000, the Federal Highway Administration has successfully applied ultra-high performance concrete in the replacement of road surfaces, casting thin layers of the material on site or using it to join together prefabricated elements in conventional concrete, thereby exploiting UHPFRC's ductility.

Hence, given its compatibility with the environmental issue, UHPFRC applications in the Italian market are both possible and advantageous for the

sector. However, the difficulties that characterise the entry of any innovation in a sector reluctant to change, such as that of construction, are still to be overcome. To push the technology, therefore, it is necessary to act on and with the project, starting «from the adoption of the correct criteria to guide the choice of materials and solutions to be adopted» (Manzini, 1990), first of all working on the material knowledge. There are two objectives: to promote the spread of the material and to demonstrate its validity as a sustainable technological solution.

Knowledge-based applications for the penetration of ultra-high performance concrete in the Italian construction market

The first application presented is specifically aimed at mediating the relationship between the design and

si tratta di un metodo di costruzione della conoscenza avente l'obiettivo di comprendere le cause macroscopiche che determinano le proprietà meccaniche e di durabilità degli UHPFRC e che ne influenzano la costruibilità e l'aspetto, così riportando l'attenzione sul calcestruzzo come sistema costruttivo. Il programma di prove si pone, dunque, sia a monte della progettazione, perché consente un utilizzo informato del materiale, che a valle di essa, configurandosi come un valido strumento per verificare le scelte progettuali adottate, soprattutto in termini di compatibilità con le proprietà del calcestruzzo.

Sono state quindi sviluppate tre prove sperimentali: test di sensibilità al ritiro (Fig. 2), avente lo scopo di indurre le fessurazioni in elementi sottoposti a diverse condizioni ambientali; test di caratterizzazione estetica dei prodotti (Fig. 3), inerente quindi alla classe esigenziale dell'aspetto, che si traduce in una serie di indicatori per definire la capacità del materiale di riprodurre alcune finiture particolari; prova di fluidità (Fig. 4), mirata a verificare l'abilità di saturare una cassaforma appositamente studiata per porsi come un ostacolo al flusso restituendo, alla fine, un prodotto ancora esteticamente valido.

Il protocollo di prove rappresenta a tutti gli effetti un avanzamento nel panorama conoscitivo del materiale, soprattutto per il taglio progettuale e produttivo che dà alla strutturazione della conoscenza. La possibilità di comprendere a priori i limiti costruttivi del materiale, nonché i possibili ostacoli nel corso della produzione, consentono un approccio alla progettazione ottimizzato in partenza e significativo in un'ottica impostata sulla riduzione di materiale ed energia impiegati. Infatti, la complessità che caratterizza la progettazione con ultra-performanti richiede tanto una continua relazione con le industrie di

production of UHPFRC elements, developing an experimental test protocol directed at spreading the knowledge of the material. The second application, a real technological solution for redevelopment purposes, provides a quick and understandable pre-dimensioning method for interventions on existing reinforced concrete structures, using a thin layer of ultra-high performance concrete on the extrados of load-bearing elements.

The idea of developing an experimental test protocol stems from the assumption that despite the almost unlimited formal possibilities offered by concrete, which would therefore seem to imply a profound knowledge of the material, «concrete, or cement, is often treated more like a generic paste of which only the essential physical properties are useful (and known) to architects» (Morel, 2016).

More than a test protocol, it is a method to construct knowledge aimed at understanding the macroscopic causes that determine the mechanical and durability properties of UHPFRC and influence their constructability and appearance, thus bringing back the attention to concrete as a construction system. The test protocol is then present both before and after the design phase allowing, in the first case, an informed use of the material and being, and in the second one, a useful tool to verify the adopted design choices, especially in terms of compatibility with the characteristics of the material. Three experimental tests were developed: shrinkage sensitivity test (Fig. 2), with the aim of inducing cracks in elements subjected to different environmental conditions; test for defining the aesthetic characteristics of the products (Fig. 3), inherent to the requirement

prefabbricazione, quanto una profonda conoscenza di tecniche, processi e modalità produttive (Fig. 5).

Per la seconda applicazione è stato sviluppato⁵ un *tool* di pre-dimensionamento strutturale in grado di valutare l'aumento della capacità portante di una lastra o una trave rinforzata con un sottile strato di UHPFRC gettato in opera. L'impostazione generale del *tool* è tale da garantire la massima flessibilità progettuale, con la possibilità di scegliere tra diverse tipologie di calcestruzzo, acciaio e UHPFRC e di settare i parametri geometrici della sezione. Una volta definito il *solver*, sono stati effettuati più di 1.200 test per stabilirne l'efficacia, per definire le relazioni tra i vari parametri considerati e, soprattutto, per comprenderne l'impatto sul guadagno in termini di resistenza. Le principali variabili testate sono il tipo di UHPFRC, lo spessore dello strato aggiunto – 25, 30, 35 e 40 mm – e la percentuale di armatura presente nella sezione (da 0,5 % al 5,00 % dell'area totale). I dati ottenuti mostrano che per basse percentuali di rinforzo, il contenuto di fibre non influenza l'aumento di resistenza, che è invece principalmente determinata dalla percentuale di armatura già presente nella sezione. Ne deriva che se il rinforzo preesistente è minimo, è sufficiente utilizzare un ridotto spessore di UHPFRC per ottenere buoni risultati. Altrettanto importanti sono le considerazioni riguardo al tipo di UHPFRC da utilizzare, non essendoci differenze significative tra UHPFRC contenente il 3,25% e il 2,00% di fibre metalliche. Dal momento che quest'ultime sono estremamente costose ed energivore dal punto di vista produttivo, è sempre conveniente utilizzarne quantitativi minimi, non essendoci un ritorno importante dal punto di vista del comportamento strutturale (Fig. 6).

class of appearance and that translates into a series of indicators capable of defining the ability of the material to reproduce some particular finishes; a fluidity test, (Fig. 4) aimed at verifying the ability to saturate a formwork specifically designed to act as an obstacle to the flow returning a product still aesthetically valid at the end.

The test protocol represents an advancement in the fact-finding panorama of the material, above all because of the design and production perspective given to the construction of knowledge. The possibility of knowing *a priori* the constructive limits of the material, as well as the possible production obstacles, allow an approach to design which is optimised from its very beginning and works on the reduction of material and energy used. In fact, the complexity that characterises the design with ultra-high per-

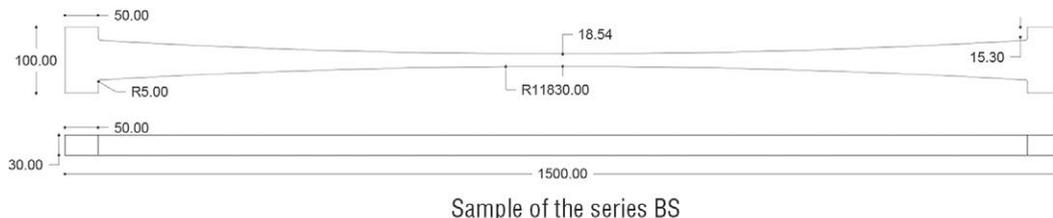
formance requires both a continuous relationship with the prefabrication industries, as well as a deep knowledge of techniques, processes and production methods (Fig. 5).

For the second application, a structural pre-dimensioning tool was developed, able to evaluate the increase in the bearing capacity of a slab or a beam reinforced with a thin layer of UHPFRC cast on site⁵.

The general setting of the tool guarantees the maximum design flexibility, letting the designer choose between different types of concretes, steels and UHPFRCs and set the geometric parameters of the section. Once the solver was defined, more than 1,200 tests were carried out to evaluate its effectiveness to understand the relationships between the various parameters considered and, above all, to assess the gain in terms of resistance. The

SHRINKAGE SENSITIVITY

| 02

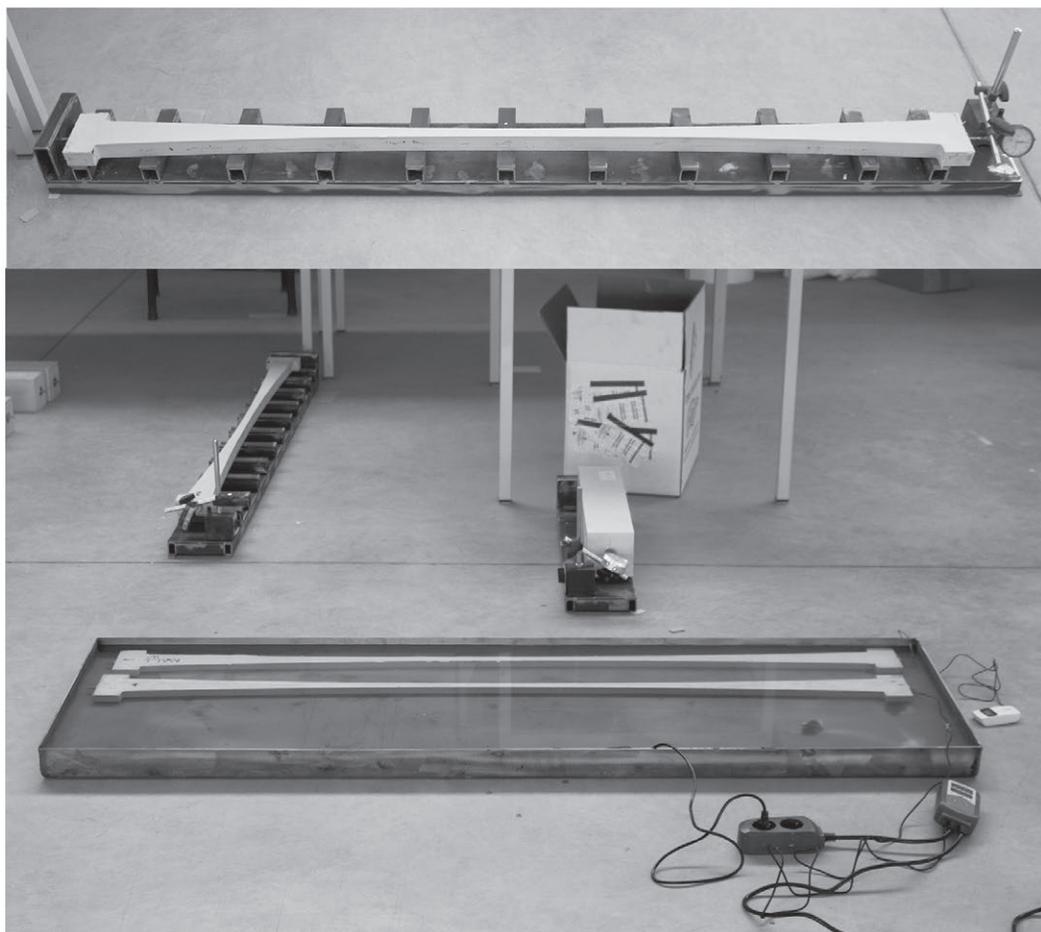


Sample of the series BS

SAMPLE

	COMPONENTS	W/C	TEMP.	% FIBER	GRANULOMETRY
UHPFRC 1 BS_1	Portland, quartz powder, calcium carbonate, fillers, admixtures, super-plasticizer, accelerator, polyvinyl alcohol fibers and water	BSA_0,17 BSB_0,16 BSC_0,16	BSA_20,7° C BSB_23,8° C BSC_32,4° C	3,00	0,5 mm (media)
UHPFRC 2 BS_2	Portland, quartz power, microsilica, silica sand, fillers, admixtures, super-plasticizer, accelerator, polyvinyl alcohol fibers and water	BSA_0,15 BSB_0,17 BSC_0,18	BSA_24,5° C BSB_21,8° C BSC_30,9° C	3,50	max 1,25 min 0,125 mm

COMPOSITION



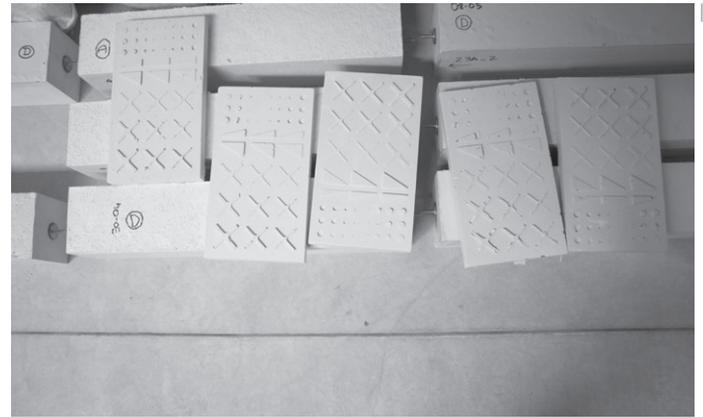
MEASUREMENT

Test apparatus: temperature controller, aquarium heater, self-produced tank and temperature recorder.

03 | Provini per i test di caratterizzazione estetica. Foto dell'autrice
Sample for aesthetic quality test. Photo by the author

04 | Apparato di prova, Test di fluidità. Foto e grafici dell'autrice
Test apparatus, fluidity test. Photo and graphic by the author

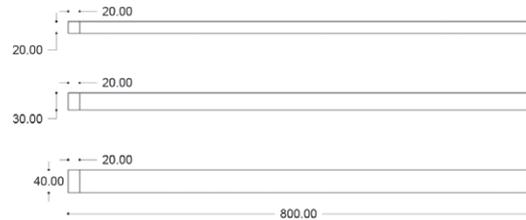
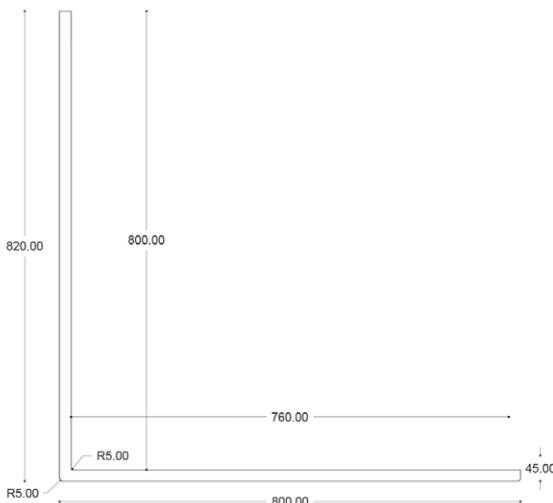
Seppur indirizzato al solo pre-dimensionamento delle strutture miste in calcestruzzo armato e UHPFRC, tale *tool* ha un particolare rilievo per diverse ragioni. In Italia, il settore della riqualificazione, ad esempio, è sempre alla ricerca di soluzioni efficaci per il recupero del patrimonio edilizio, tra l'altro in larga parte realizzato in calcestruzzo armato. A ciò si aggiunge che, date le elevate prestazioni di resistenza meccanica e di durabilità, l'UHPFRC non è nemmeno particolarmente impattante dal punto di vista economico in quanto, oltre a non richiedere l'impiego di armature, sono sufficienti spessori minimi, portando così anche ad un risparmio di materiale (interventi analoghi in calcestruzzi convenzionali richiedono almeno 40 mm).



| 03

Un altro vantaggio riguarda la penetrazione dell'innovazione tecnologica nel settore delle costruzioni. L'UHPFRC è, infatti, un materiale avanzato che richiede particolare accortezza nella realizzazione dell'impasto e, in generale, nella gestione dell'intera catena produttiva. Tuttavia, nel caso delle applicazioni

04 | **AESTHETIC QUALITY
 FLUIDITY**



Sample lateral view (left) and the three possible configurations possible modifying the formwork (right)

CONFIGURATION



FORMWORK

05 | Primo degli UHPFRC testati. A sinistra, valori di ritiro (mm/m) in relazione alle diverse condizioni ambientali e al rapporto acqua/cemento. In alto a destra, comportamento dei provini per la resa estetica in relazione alle modalità di getto (per pressione o per gravità). In basso a destra, i risultati del test di fluidità in relazione al rapporto acqua/cemento e alle caratteristiche dello stampo.

First UHPFRC tested. On the left, shrinkage values (mm/m) in relation to the different environmental conditions and to the water/cement ratio. Above right, behavior of the aesthetic quality test samples in relation to the casting method (by pressure or by gravity). Bottom right, results of the fluidity test in relation to the water/cement ratio and to the characteristics of the mold.

gettate in opera, dov'è non è necessario ottenere una superficie particolarmente curata, né impedire che si formino microfessurazioni da ritiro, né, tantomeno, realizzare sezioni sottili e ben definite, l'UHPFRC si riavvicina, per semplicità di realizzazione, al calcestruzzo convenzionale configurandosi di facile applicazione per gli addetti del settore.

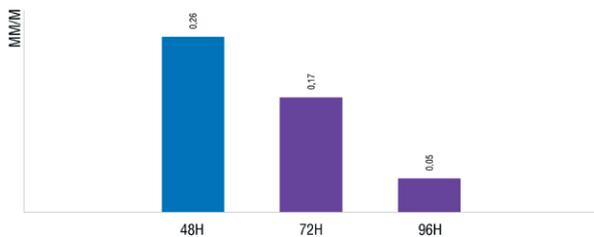
Conclusioni L'industria del calcestruzzo, ben consapevole delle sue responsabilità in termini di emissioni, ha ormai iniziato un percorso finalizzato a raggiungere l'ambizioso obiettivo delle zero emissioni entro il 2050. In tale contesto, gli UHPFRC, ben ponendosi all'interno della questione ambientale, possono rientrare in un rinnovato spazio di ripresa del mercato italiano delle costruzioni, in particolare nell'ambito della qualificazione

di edifici e infrastrutture. Non potendo intervenire sulla distribuzione molecolare delle particelle per migliorare le prestazioni del calcestruzzo, occorre agire sul e con il progetto. Ciò si traduce, per gli UHPFRC, in un approccio basato sulla conoscenza del materiale, puntando infine alla dematerializzazione degli elementi: in questo caso, istanze di carattere ambientale – meno materia e più performance – si sposano con altre più tipicamente progettuali che, inizialmente indirizzate alla ricerca della 'forma perfetta', si sono rapidamente convertite a una riduzione delle risorse e dei materiali impiegati che va ben oltre l'esplorazione morfologica.

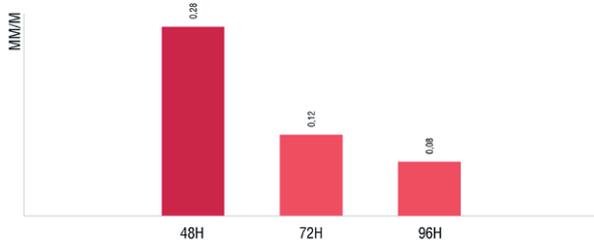
UHPFRC1 - RESULTS SHRINKAGE SENSITIVITY

environmental condition
 °C(20/25) - %UR(20/30)
 °C(20/25) - %UR(25/35)
 °C(20/25) - %UR(40/50)
 °C(20/25) - %UR(45/55)

W/C RATIO_0,17

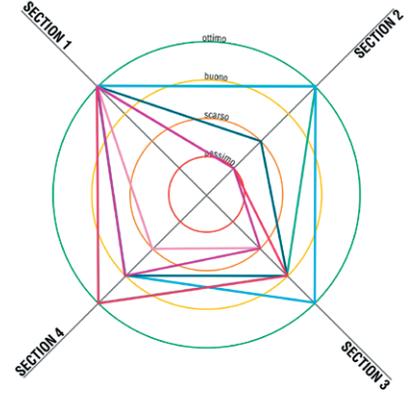


W/C RATIO_0,16



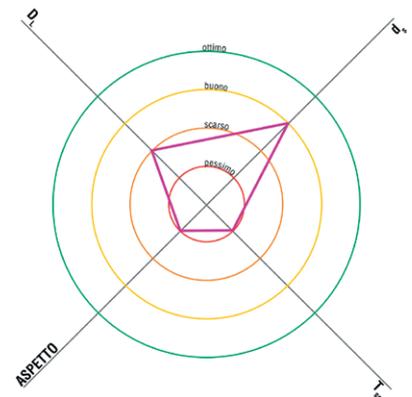
AESTHETIC QUALITY

pression pour C3
 C2
 C1
 gravity pour C3
 C2
 C1



FLUIDITY

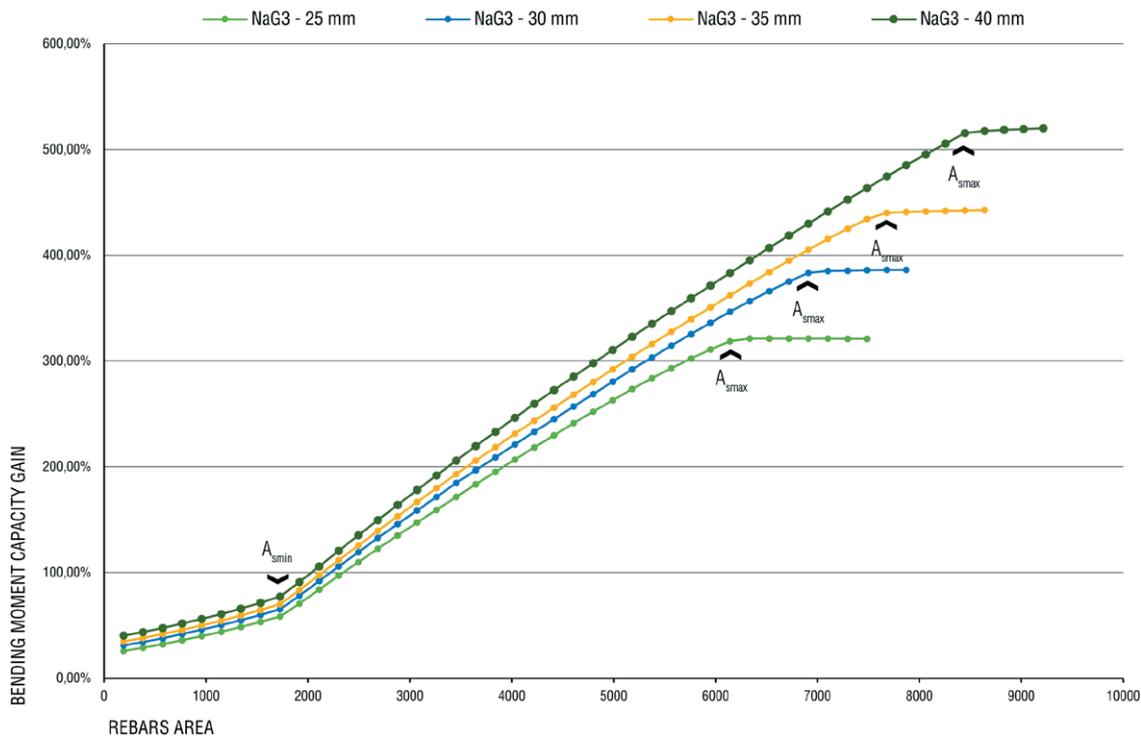
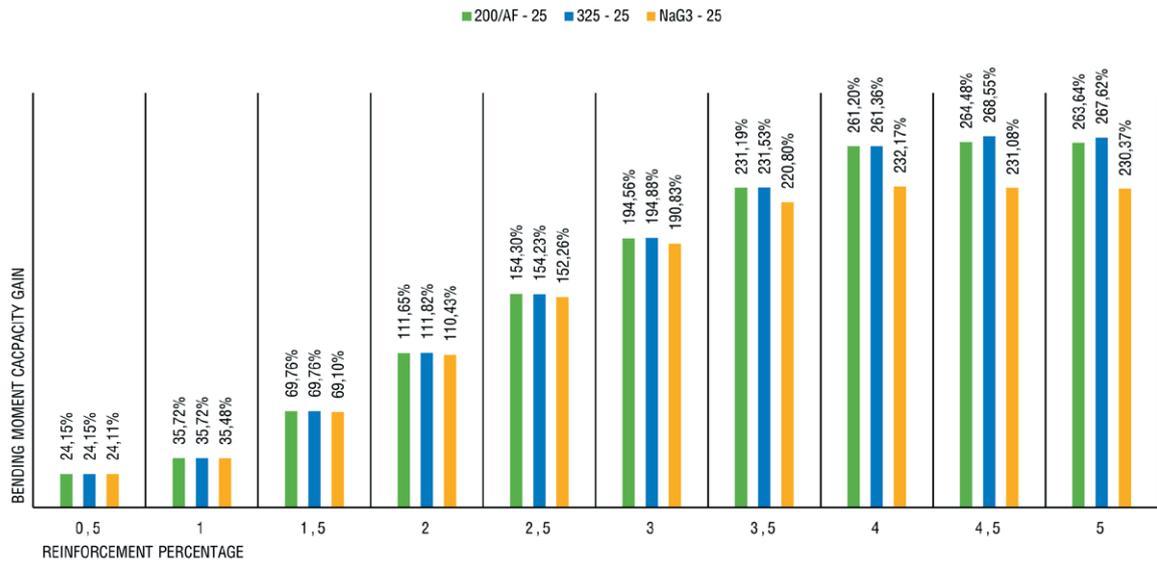
SECTION 2*3 - °C(25/30)
 w/c
 0,17



06 | In alto, aumento della resistenza in relazione alla percentuale di armatura. Per valori medi, si può notare che, a parità di spessore, non vi è differenza significativa tra i diversi prodotti. In basso, stessi risultati tenendo costante il prodotto e variando lo spessore

On the top, increased resistance in relation to the percentage of reinforcement. For average values, it can be noted that, with the same thickness, there is no significant difference between the different products. Below, the same results by keeping the product constant and varying the thickness

06 |



main variables tested are the types of UHPFRC, the thickness of the added layer – 25, 30, 35 and 40 mm – and the percentage of reinforcement present (from 0.5% to 5.00% of the total area). The data obtained show that for low percentages of reinforcement, the fibre content does not influence the increase in strength, which is instead mainly determined by the percentage of reinforcement already present in the section. It follows that if the pre-

existing reinforcement is minimal, it is sufficient to use a reduced thickness of UHPFRC to obtain good results. Equally important are the considerations regarding the type of UHPFRC to use, as there are no significant differences between UHPFRC containing 3.25% and 2.00% of metal fibres. Since the latter are extremely expensive and energy-intensive from a production point of view, it is always convenient to use minimal quantities as there is

no significant return from the point of view of structural behaviour (Fig. 6). Although addressed only to the pre-dimensioning of reinforced concrete/UHPFRC structures, this tool is of particular importance for several reasons. The Italian redevelopment sector, for example, is always looking for effective solutions for the recovery of the concrete building stock. Moreover, given its high mechanical strength and durability, UHPFRC does not have a

particular impact from an economical point of view when considering that it does not require the use of reinforcements for such applications. Since similar interventions in reinforced concrete would require at least 4 centimetres of thickness in addition to the reinforcement, there is also a significant gain in terms of material used. Another advantage concerns the penetration of the technological innovation in the construction sector. UHP-

NOTE

¹ Ciò è coerente con i dati europei: nel 2019 sono state prodotte solo 219 Mt rispetto alle 261 del 2014, mentre il consumo, seppur variabile nei vari stati membri, è diminuito sensibilmente nel 2020 (-11% rispetto al 2018), anche a causa della pandemia da Covid-19. Sebbene sia prevista una ripresa (+3.0% nel 2022), i dati sulle costruzioni confermano il *trend* in calo. Il comparto dominante è sempre quello delle riqualificazioni (41%) mentre le opere di ingegneria civile si aggirano intorno al 20% (CEMBUREAU, 2020).

² I processi CCS per il calcestruzzo si basano sul fatto che, in seguito all'idratazione, gli ossidi di calcio (CaO) del clinker formano idrossido di calcio - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - che può reagire con l'anidride carbonica presente in atmosfera - carbonatazione - diventando ancora CaCO_3 .

³ Tra i minerali aventi un'attività idraulica tale da poter sostituire il calcare presente nel clinker tradizionale, rientrano, ad esempio, quelli ricchi di belite (silicato bicalcico) e i clinker a base di solfo-alluminati di calcio (Cartner, 2014).

⁴ Molte grandi aziende italiane hanno lanciato una linea d'arredo in UHPFRC, tra cui B&B Italia e Molteni&C.

⁵ Il lavoro svolto è stato elaborato durante il Dottorato di Ricerca in Architettura presso l'Università di Napoli Federico II con LafargeHolcim e Atelier Masse (Parigi). Si veda Fabbri, R., Principe, J., Derimay, J. and Bernardi, 2019.

REFERENCES

ANCE (2021), *Osservatorio congiunturale sull'industria delle costruzioni. Nota di sintesi*, Roma, Italia.

Buzzi, A. (2019), *Il contributo della filiera del calcestruzzo all'economia circolare*, available at: www.casaclima.com.

Cartner, F. et al. (2014), "A novel Atmospheric Approach to the Mineral Capture of CO_2 from Industrial Point Sources", *Proceedings of the CCUS 2014-Carbon Capture, Utilization and Storage Conference*, Pittsburgh, Pennsylvania.

FRC is, in fact, an advanced material that requires particular care in making the concrete mix and, in general, in managing the entire production chain. However, in the case of cast-on-site applications, where it is not necessary to obtain a particularly well-finished surface, nor to prevent micro-cracks from shrinking, nor to create thin and well-defined sections, the UHPFRC is very similar in terms of implementation to conventional concrete, well known by actors in the construction sector.

Conclusions

The concrete industry, well aware of its responsibilities in terms of emissions, has started a process aimed at reaching the ambitious goal of zero emissions by 2050. In this context, the UHPFRC, well placed in the environmental issue, can be part of a new recovery phase of the Italian construction market, in

particular for building and infrastructure redevelopment. Not being able to intervene in the molecular distribution of the particles to improve concrete performances, it is necessary to act on and with the project. For UHPFRCs, this translates into an approach to the material which is both knowledge-based and aimed at the dematerialisation of the elements. In this case, environmental issues - less matter and more performance - are combined with others which typically belongs to the design phase: the latter, no more aimed at the research of the 'perfect form', quickly started looking for solution addressed at reducing resources and materials, going far beyond a simple morphological exploration.

NOTES

¹ This is consistent with the European data: in 2019 only 219 Mt were pro-

duced compared to 261 Mt in 2014,

while consumption, albeit variable in the various Member States, decreased significantly in 2020 (-11% compared to 2018), also due to the COVID-19 pandemic. Although a recovery is expected (+ 3.0% in 2022), construction data confirm the downward trend. The dominant sector is always that of redevelopment (41%), while civil engineering works are around 20% (CEMBUREAU, 2020).

² CCS processes for concrete are based on the fact that, after the hydration, the calcium oxides (CaO) of the clinker form calcium hydroxide - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - which can react with carbon dioxide present in the atmosphere - carbonation - becoming CaCO_3 again.

³ Among the minerals having a hydraulic activity so as to be able to replace the limestone present in traditional clinker, there are those rich in

belite (dicalcium silicate) and clinkers based on calcium sulphoaluminates (Cartner, 2014).

⁴ Many large Italian companies have launched a furniture line in UHPFRC, including B&B Italia and Molteni & C.

⁵ The work carried out was developed during the PhD in Architecture at the University of Naples Federico II with LafargeHolcim and Atelier Masse (Paris). See Fabbri, R., Principe, J., Derimay, J. and Bernardi, S., 2019.

CEMBUREAU (2020), *Activity Report*, Brussel, Belgium.

IEA (2017), *Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations*, OECD/IEA.

Fabbri, R., Principe, J., Derimay, J. and Bernardi, S. (2019), "Key Parameters for Building Reinforcement with an UHPFRC Overlay", *Proceedings of the Second International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete (2IIS-UHPC)*, June 2-5, 2019, Albany.

Federbeton (2019), *Rapporto di sostenibilità*, Roma, Italia.

Manzini, E. (1990), *Artefatti. Verso una nuova ecologia dell'ambiente artificiale*, Domus Academy, Milano, Italia.

Morel, P. (2016), "Un cemento del XXI secolo per un'architettura del XXI secolo", in Andriani, C. (Ed.), *Cemento Futuro*, Skira Editore, Milano, Italia.

Scrivener, K. L. et al. (2017), "Eco-Efficient Cements: Potential, Economically Viable solutions for a Low- CO_2 Cement-Based Materials Industry", in *United Nations Environment Program*, New York, US.

Van Damme, H. (2018), "Concrete material science: Past, present, and future innovations", in *Cement and Concrete Research*, Vol. 112, pp. 5-24.

Il Sole 24 ore (2021), "Austostrade, dopo il caos del 2020 un piano decennale per i cantieri", available at: https://www.ilsole24ore.com/art/autostrade-il-caos-2020-piano-decennale-i-cantieri-ADvQ0oCB?refresh_ce=1 (accessed 15 January 2022).