



Calcestruzzo & Prefabbricazione International
Edizione Italia

 2 | 2020
www.cpi-worldwide.com

REPRINT | TECNICA DEL CALCESTRUZZO

Confusione babelica e soluzioni
semplici per l'attività pratica



Reprint
C&Pi 2/2020

© DCS, Mr. Ayman Badr



Confusione babelica e soluzioni semplici per l'attività pratica

■ Thomas Deuse, Stefan Hainer, Frank Parker, Thomas Sievert, Dyckerhoff GmbH, Wiesbaden, Germania

“I teologi considerano la costruzione della torre di Babele il tentativo degli uomini di somigliare a Dio. Per questa autoesaltazione, Dio fa fermare la costruzione della torre senza spargimento di sangue causando una confusione linguistica, che costringe ad abbandonare il progetto per le difficoltà di comunicazione insormontabili” [1]. Le diverse definizioni che abbiamo per i calcestruzzi ad alte prestazioni ci ricordano in qualche modo quest’opera storica, ma in questo caso speriamo in un finale migliore. Nonostante in un contesto europeo tutto dovrebbe diventare più semplice, per una matrice più compatta a base cementizia e di vari materiali finissimi (pozzolanici) con o senza fibre abbiamo una serie di definizioni...

Dopo una presentazione volutamente semplificata di importanti concetti, in questo articolo saranno esposte le possibilità che offre la moderna tecnologia del cemento sulla base di pluriennali esperienze positive in applicazioni di calcestruzzo ad alte prestazioni e ad altissime prestazioni (HPC e UHPC). L’articolo presenterà inoltre le prospettive in linea con le regole di conformità tedesche in merito all’uso di calcestruzzi ad alte prestazioni in accordo con le linee guida UHPC che il Comitato tedesco per il calcestruzzo strutturale ha intenzione di pubblicare. Particolarmente promettente è il pratico utilizzo

di cementi standard in combinazione con aggregati comuni sfruttando la tecnologia di miscelazione del calcestruzzo esistente, che offre notevoli vantaggi in termini economici ed ecologici rispetto alle formule di tipo tradizionale con aggiunte come i fumi di silice o simili.

A livello internazionale, per questi calcestruzzi speciali vengono utilizzati i seguenti termini (senza alcuna pretesa di esaustività):

- UHPC “Ultra high performance concrete”
- UHSC “Ultra high strength concrete”
- UHPFRC “Ultra high performance fiber reinforced concrete”
- DFRCC “Ductile fiber reinforced cementitious composite”
- SHCC “Strain hardening cementitious composite”
- ECC “Engineered cementitious composite”
- UHP-HFRC “Ultra high performance hybrid fibre reinforced concrete”
- HPRFRC “High performance fiber reinforced cementitious composites”
- RPC “Reactive powder concrete”
- UHFB “Ultra hochfester Beton” (Germania)

Tabella 1: Materiali da costruzione ad alte prestazioni di Dyckerhoff

Prodotto Dyckerhoff	Tipo			Composizione						Sistema	
	Cemento secondo la norma EN 197-1	Miscela legante	Calcestruzzo ad alte prestazioni	Cemento grigio	Cemento bianco	Filler minerale	Aggregati	Fibre d'acciaio	Acqua + additivo	Tecnologia Microdur	Tecnologia Nanodur
Variodur 30	x			x						x	
Variodur 40	x			x						x	
Variodur 50	x			x						x	
Flowstone grey		x		x		x				x	
Flowstone white		x			x	x				x	
Nanodur Compound 5941 grey		x		x		x				x	x
Nanodur Compound 5941 grey		x			x	x				x	x
XPosal 105			x	x			x	x	x	x	

- UHFB "Ultra-Hochleistungs-Faserbeton" (Svizzera)
- UHLB "Ultra Hochleistungsbeton" (Germania)
- BFUP "Béton fibré à ultra-hautes performances" (Francia)
- BPR "Béton de Poudres Réactives" (Francia) [2].

In Germania, è particolarmente difficile operare una distinzione tra l'inglese "Ultra High Performance Concrete (UHPC)" e il tedesco "Ultra-Hochfester Beton (UHFB)". In "Beton Wiki" troviamo correttamente: "Il termine "Calcestruzzo ad alte prestazioni" serve a chiarire che per numerose applicazioni i criteri di durabilità sono più importanti della resistenza o altrettanto importanti. Sotto il profilo tecnologico del calcestruzzo, in genere non vi è alcuna differenza tra il calcestruzzo ad alta resistenza e il calcestruzzo ad alte prestazioni" [3].

Calcestruzzo ad alte prestazioni

Struttura compatta e idratazione del cemento

Semplificando grossolanamente, i calcestruzzi classici ad alte prestazioni sono costituiti da cementi standard (quasi sempre a basso contenuto di C3A) in combinazione con fumi di silice, aggregati con definita granulometria ed eventualmente microfibre d'acciaio. Una successiva compattazione della matrice idratata è dovuta alla reazione pozzolanica tra l'idrossido di calcio, formatosi durante l'idratazione del cemento, e i fumi di silice. Quando i materiali di partenza sono molto fini, la matrice della pasta di cemento diventa più compatta - e quindi anche più resistente e durevole - rispetto al calcestruzzo normale. Partendo dalle materie prime anidre, il principio della struttura compatta viene ottimizzato da anni presso numerosi Politecnici e Università, si esegue il rinforzo con le più svariate fibre e viene accelerata la reazione del cemento con il trattamento termico. Sono stati inoltre creati sistemi complessi che possono influire a incrementare la confusione in un utente. In linea di principio si tratta di approcci corretti, tuttavia l'idratazione del cemento è un sistema dinamico, durante l'idratazione delle materie prime anidre la crescita delle singole fasi d'idratazione da inizio alla formazione della matrice cementizia.

Dopo il cosiddetto periodo latente, i cristalli prismatici del primo periodo d'idratazione sviluppano una microstruttura costituita da fasci di fibre CSH (silicati di calcio idrati), idrossido di calcio e cristalli di ettringite che crescono in lunghezza [4]. Inoltre, i materiali finissimi in combinazione con il cemento come silice, ceneri volanti, farine fini di sabbia metallurgica e polvere di calcare possono influire in uno stadio d'idratazione iniziale sulla microstruttura [5].

In sintesi, si può affermare che la microstruttura della pasta di cemento è influenzata da diversi parametri. Una curva granulometrica ottimizzata delle materie prime non si traduce automaticamente nella condizione ottimale per lo sviluppo delle strutture cristalline durante l'idratazione in combinazione con additivi e materie prime finissime.

Rapporto acqua/cemento e superfluidificante PCE (polycarboxylate ether)

Con alte prestazioni di un elemento prefabbricato si intendono caratteristiche meccaniche e durabilità eccezionali.

Oltre alla ottimizzata granulometria delle materie prime, è risaputo che il parametro più importante è il rapporto a/c, che grazie a superfluidificanti a base di PCE va regolato al livello più basso possibile. Molto importante è, però, anche sapere quale sia la lavorabilità che richiede la rispettiva applicazione nella produzione. Mentre nell'industria della prefabbricazione per i calcestruzzi autocompattanti è adatta una viscosità ispesente al taglio (dilatante), per il calcestruzzo gettato in opera vibrato risulta vantaggiosa piuttosto una viscosità assottigliante al taglio (tixotropica). Le caratteristiche reologiche e quindi la lavorabilità sono aspetti importanti dei calcestruzzi ad alte prestazioni.

Produzione

Da oltre 20 anni l'UHPC è oggetto di ricerche e finora nella messa in pratica si è tenuto poco conto della situazione esistente nell'industria del calcestruzzo sotto il profilo impiantistico. I premiscelati utilizzati in tutto il mondo richiedono una minor capacità di silo e dosaggio, ma di regola non possono fare a meno di miscelatori ad alte prestazioni. In quest'ottica, poche aziende si sono specializzate, e in ogni caso non è presente una vasta applicazione dei calcestruzzi ad alte prestazioni classici a base di cemento Portland e di aggiunte di pozzolane fini.

Tuttavia, sulla base della moderna tecnologia del cemento, da oltre 15 anni sono disponibili promettenti calcestruzzi ad alte prestazioni, alcuni esempi pratici applicativi saranno esposti nel presente articolo. La tabella 1 fornisce una panoramica delle diverse varietà consolidate nella pratica.

Premiscelati di leganti per calcestruzzi autocompattanti

Flowstone HPC nello stabilimento di prefabbricazione

L'industria del calcestruzzo non ha bisogno di altissime prestazioni tecniche, ma di mix design robusti. In questo campo, Dyckerhoff ha svolto un lavoro pionieristico e ha sviluppato un legante premiscelato per HPC basato sulla tecnologia Mikrodur®, costituito da componenti cementizi standard e a granulometria ottimizzata e di sabbie fini di quarzo. Da anni questo premiscelato è usato con successo nel calcestruzzo artistico e architettonico con opportuni additivi, aggregati e pigmenti raccomandati in base all'applicazione. Con rapporti a/c inferiori a 0,4 si possono progettare accuratamente calcestruzzi durevoli con resistenze alla compressione > 100 MPa e resistenze a flessione fino a 15 MPa. Di per sé queste ultime sono più importanti, poiché, come nei pannelli per facciate, si tratta quasi sempre di elementi costruttivi snelli e leggeri che vengono sollecitati più a livello di flessione che a livello di pressione. Dal lancio sul mercato avvenuto oltre 15 anni fa, Flowstone ha portato a validi risultati nei seguenti campi applicativi:

- lastre in conglomerato cementizio d'alta qualità per interni ed esterni
- lastre di grandi dimensioni e gradini angolari

Esempi per l'applicazione di Flowstone

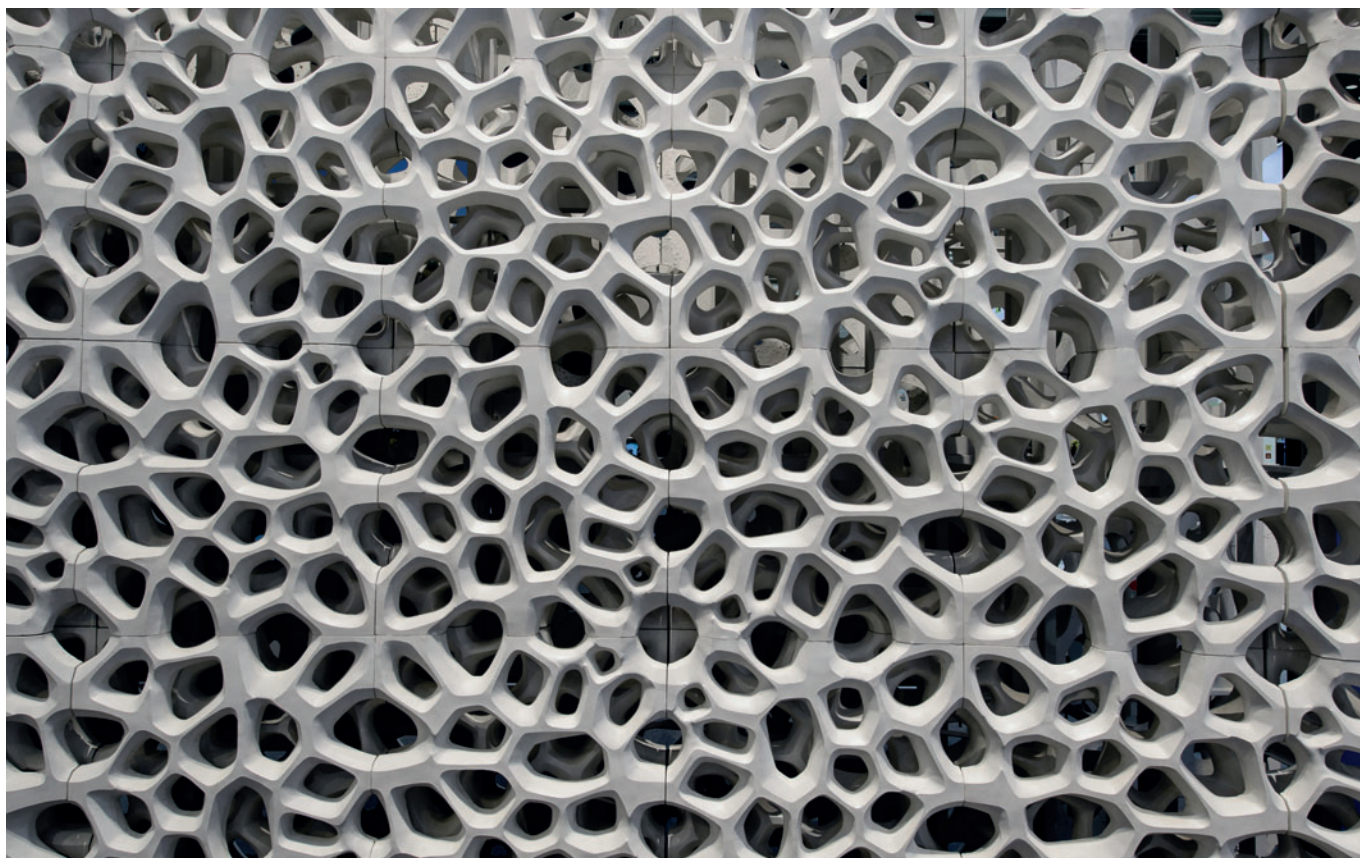


Fig. 1: Muro a nido d'ape a Francoforte



Fig. 2: Linea Wehrhahn di Düsseldorf (foto: Joerg Hempel)

- manufatti in calcestruzzo ad altissima resistenza al gelo e disgelo con sali antigelo
- facciate in conglomerato cementizio non rinforzate
- arredo in calcestruzzo per interni ed esterni
- copertine per muri, colonne e balaustre
- davanzali ed elementi speciali.

Nanodur® UHPC nello stabilimento di prefabbricazione e come calcestruzzo gettato in opera

Nanodur Compound 5941 è un legante premiscelato costituito al 59 % da componenti di cemento standard e cemento a granulometria ultra fine ottimizzata, aggiunte di silice sintetica, e al 41 % da sabbia fine di quarzo. Robuste formulazioni di base molto semplici con sabbia essiccata all'aria 0/2 e pietrisco 2/5 mm come variante a grana grossa o solo con sabbia 0/2 mm come miscela a grana fine consentono la produzione di UHPC in semplici betoniere.

Con un aggregato speciale è possibile ottenere persino un modulo di elasticità di 80.000 MPa, corrispondente a quello dell'alluminio. Oltre ai superfluidificanti adatti, a base di PCE, si consiglia di utilizzare circa 8 l/m³ di additivo antiritiro, per ridurre al minimo le tensioni indotte durante la maturazione e le alterazioni della forma dell'elemento costruttivo finito.

Nanodur per basi delle macchine e telai per utensili (stabilimento di prefabbricazione)

Oggi uno dei fondamentali campi applicativi dell'UHPC in Europa e Cina è quello della produzione di basi per macchine e telai per utensili [6].

Spesso le geometrie sono molto complesse e per evitare i gravosi lavori di compattazione nelle casseforme d'acciaio (come si rende necessario per il calcestruzzo polimerico) si usano stampi in legno e plastica per l'UHPC autocompattante. Oltre ad essere semplice da lavorare, l'UHPC è vantaggioso rispetto ai materiali metallici come la ghisa grigia o le strutture saldate in acciaio soprattutto per quanto riguarda l'attenuazione delle vibrazioni. Le macchine utensili diventano sempre più veloci e la precisione della lavorazione dipende in larga misura dalla stabilità di funzionamento del banco macchina. Naturalmente questo si ripercuote sulla durabilità degli utensili e in questo caso l'UHPC garantisce una vita utile dal 10 al 20 % maggiore rispetto alle strutture saldate in acciaio.

Nanodur per elementi speciali nell'industria edile (stabilimento di prefabbricazione)

Considerando che il premiscelato Nanodur Compound 5941 non è standardizzato, in Germania l'uso nell'industria edile è limitato ad elementi speciali. L'inizio risale alla BAU 2011 di Monaco, con una scala dimostrativa a sbalzo con gradini di soli 29 mm di spessore incollati tra due lastre di vetro di sicurezza stratificato di 20 mm di spessore. Da uno stress test svolto dall'Università Tecnica di Dresda è emersa una capacità di carico di circa 2 Ton a gradino. La miscela a grana fine rinforzata con microfibre d'acciaio di 75 kg/m³ ha sostenuto il peso fino a 3 mm di flessione, manifestando una buona energia di deformazione e un comportamento duttile senza acciaio d'armatura di tipo tradizionale [7].

Tabella 2: Mix design standard con Nanodur Compound 5941

Esempio mix design		Grana grossa E80	Grana grossa E45	Grana fine
Nanodur Compound 5941 grigio	[kg/m ³]	1.050	1.050	1.050
Sabbia 0/2 mm (essiccata all'aria)	[kg/m ³]	-	430	1.150
Pietrisco 2/5 mm (essiccato all'aria)	[kg/m ³]	-	880	-
Durigid 1/3 mm	[kg/m ³]	1.193	-	-
Durigid 3/6 mm	[kg/m ³]	430	-	-
Microfibre di acciaio 020/10	[kg/m ³]	-	60	-
Superfluidificante a base di PCE	[kg/m ³]	17	15	18
Acqua	[kg/m ³]	149	158	168

Valori meccanici caratteristici dopo una stagionatura di 28 giorni dei provini in acqua

Resistenza a flessione a 3 punti*	[MPa]	23	20	18
Resistenza a compressione prismatica*	[MPa]	180	150	130
Resistenza a compressione cilindrica**	[MPa]	150	130	120
Modulo di elasticità statico**	[MPa]	80.000	50.000	45.000

*Prisma 4 cm x 4 cm x 16 cm | **Cilindro Ø = 15 cm, h = 30 cm



Fig. 3: Cella con robot (foto: FPT Robotik GmbH & Co. KG)

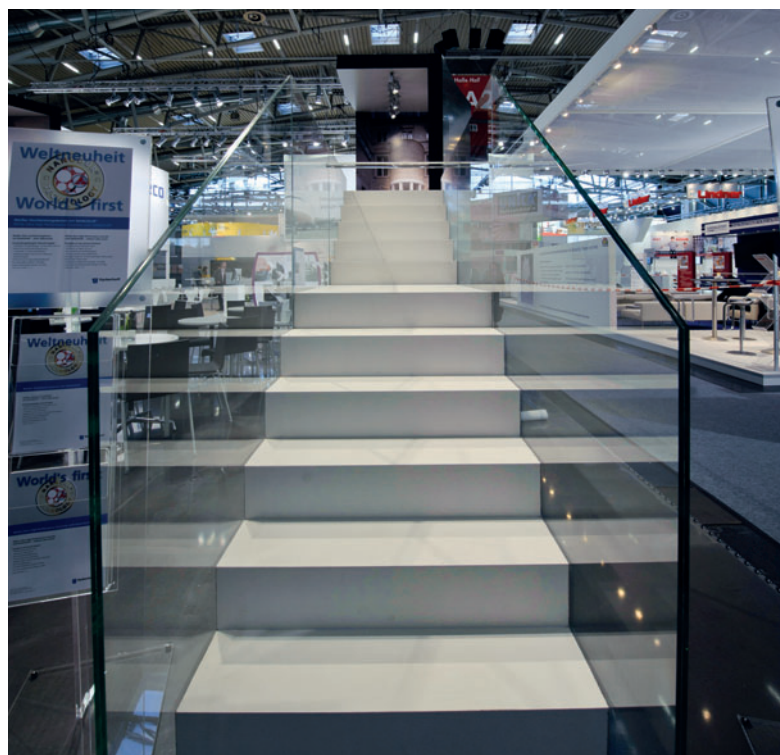


Fig. 4: Scala dimostrativa

I cilindri parabolici vengono usati nelle centrali eliotermitiche per produrre energia con la concentrazione dei raggi solari. Di solito i collettori sono in versione tralicci d'acciaio. A titolo di ricerca, un consorzio interdisciplinare costituito da rappresentanti del mondo economico e scientifico, guidato dal Centro aerospaziale tedesco Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, ha messo a punto una grande unità dimostrativa in calcestruzzo ad alte prestazioni sulla base di un'idea dell'Università Tecnica di Kaiserslautern e della Ruhr-Universität di Bochum. Lamiere riflettenti di alluminio fungono da riflettori incollate su due cilindri parabolici di 12 m di lunghezza e 6 m di larghezza, prodotti nello stabilimento di prefabbricazione di Borchon. La TU di Kaiserslautern ha provveduto anche agli appoggi e alla meccanica sotto forma di ruota dentata e falci per inseguire il sole con la miscela a grana grossa UHPC basata sul Nanodur Compound 5941 della TU di Kaiserslautern.

Mentre, dalla collaborazione con l'impresa di costruzioni Drössler di Siegen e la Green Aqua Farming di Grevesmühlen, è stata sviluppata una struttura modulare costituita da singoli elementi in UHPC incollati tra di loro costituendo due moduli di 35 m di lunghezza e 5 m di larghezza per l'allevamento di gamberetti. Gli elementi con uno spessore di soli 6 cm sono stati realizzati con la miscela a grana grossa con Nanodur Compound 5941 senza rinforzo. A montaggio ultimato, i giunti sono stati sigillati con un adesivo a resina reattiva in combinazione con una copertura tramite coprigiunti in UHPC. Per sigillare i giunti tra i coprigiunti e gli elementi della vasca, è stato fatto ricorso ad una malta idraulica omologata per l'acqua potabile [9].



Fig. 5: Specchio parabolico

Il ponte sul Walser di Oberstdorf fa parte del sistema di protezione dalle piene del fiume Stillach; il parapetto del ponte costituisce il prolungamento dell'argine per la protezione dalle piene. In caso di piena, la ridotta sezione del flusso nell'area del ponte si forma volutamente un ristagno d'acqua, per questo motivo il nuovo parapetto del ponte doveva essere realizzato in forma chiusa. A causa dell'impatto prevedibile da parte del legname galleggiante e dell'altissima sollecitazione del sale antigelo è stato necessario realizzare un parapetto particolarmente robusto. Per risparmiare sui costi, solo il



Fig. 6: Vasca per l'allevamento di gamberetti



Fig. 7: Ponte sul fiume Walsler (foto: Rainer Retzlaff)



Fig. 8: Involucro di un edificio nel Qatar (foto: Ayman Badr)

guscio esterno è stato prodotto dallo stabilimento di prefabbricazione Bayer di Munderkingen come elemento prefabbricato UHPC usando il Nanodur Compound 5941 [10].

Nel Qatar è stato realizzato l'involucro di un edificio snello e sottile con elementi UHPC lunghi in media 6 m. Con Nanodur Compound 5941 in combinazione con un aggregato speciale, Doha Cladding Solutions ha ottimizzato un mix design con una resistenza alla compressione cubica compresa tra 170 e 180 MPa e una resistenza a flessione di quasi 25 MPa dopo 56 giorni.

Nanodur per il rinforzo strutturale (calcestruzzo gettato in opera)

Su iniziativa dell'Università Tecnica di Graz, in Austria nel corso di un progetto pilota è stata testata con successo l' idoneità alla pratica di un rinforzo per ponti con UHPC. In uno stabilimento di produzione di calcestruzzo premiscelato sono stati gettati 40 m³ di UHPC con Nanodur Compound 5941. L'obiettivo era quello di aumentare la capacità portante con contemporanea impermeabilizzazione in sostituzione della pavimentazione bituminosa. Si è dovuto ottimizzare la curva granulo-



Fig. 9: Rinforzo di un ponte (foto: TU Graz)

metrica per la messa in opera con una pendenza di max 4,5 %. Su cubi con lati lunghi 100 mm sono state misurate resistenze alla compressione di 146 MPa dopo 28 giorni e di 172 MPa dopo 98 giorni. La resistenza alla flessione nella prova a 4 punti su travi di 150 x 150 x 700 mm³ è risultata di 11,5 MPa - il modulo di elasticità è arrivato a 52.000 MPa [11].

Come ci dimostrano gli esempi sopra riportati, da anni i premiscelati di leganti Flowstone e Nanodur Compound 5941 si sono dimostrati validi nei più svariati campi applicativi pratici. I lavori di ricerca nei progetti finanziati mostrano le potenziali possibilità di ottimizzazione nel cementificio [12]. Ma poiché si tratta di un mix di prodotti quali costituenti principali del legante e aggregati sottoposti a controllo della qualità ed essiccati a forno, in Germania l'utilizzo nel settore delle costruzioni non è possibile senza omologazioni costose e che richiedono molto tempo. L'approvazione del caso specifico può essere concessa soltanto in relazione a un progetto e i costi per un'omologazione generale dell'ispettorato all'edilizia non sono affatto commisurati ai ricavi. Per questo motivo, al momento questi mix design vengono impiegati in applicazioni di nicchia che risultano più costose a livello di produzione, ma più vantaggiose per la maggiore durabilità.

Diversa è la situazione se i calcestruzzi ad alta resistenza vengono prodotti sulla base di cementi standard. Con la tecnologia Mikrodur di Dyckerhoff la struttura compatta auspicata si regola senza fumi di silice, grazie ai componenti cementizi con granulometria ottimizzata ad elevata finezza. In questo modo, possono essere implementati - nei Paesi Bassi senza problemi e in Germania con l'approvazione del caso specifico - ad esempio calcestruzzi in classe di resistenza C90/105.

Cementi standard Variodur® per HPC, UHPC

Le resistenze a compressione sono solo il requisito di base necessario per il rinforzo di ponti. Resistenza a flessione e



Fig. 10: Ponte Ewijk (foto: Bart van Hoeck)

modulo di elasticità devono garantire, in combinazione con l'armatura di acciaio in barre e in fibre d'acciaio, che i carichi adeguatamente trasferiti. Per le forti sollecitazioni a cui sono sottoposti i ponti stradali e per gli sbalzi di temperatura in combinazione con la resistenza al gelo/disgelo in presenza di sali antigelo, è indispensabile una struttura del calcestruzzo decisamente compatta. Nei Paesi Bassi in questi casi sono già stati usati con successo calcestruzzi ad alte prestazioni, sia miscele speciali a base di cemento standard e fumi di silice sia i cementi Premium di Dyckerhoff con tecnologia Mikrodur come unico legante nel calcestruzzo premiscelato. Quest'ultima scelta ha portato ad una performance relativamente elevata nella messa in opera.

Rinforzo di un ponte con il calcestruzzo premiscelato Xposal® 105 HPC sulla base del cemento standard Variodur 30 CEM II/B-S 52,5 R

Il vecchio ponte sul Waal (chiamato anche ponte Ewijk) è stato costruito nel 1976. Era uno dei ponti in acciaio dei Paesi Bassi, che prima della riqualificazione non era più in grado di far fronte alle attuali sollecitazioni dovute al traffico. Uno dei metodi più volte utilizzati nei Paesi Bassi è il rinforzo della soletta con uno strato di copertura in calcestruzzo armato ad alta resistenza (C90/105). Questo procedimento riduce dell'80 % le tensioni nella soletta rispetto ad uno strato di copertura in asfalto, quindi aumenta sensibilmente la durabilità del ponte. La composizione del calcestruzzo ad alta resistenza è stata messa a punto da Dyckerhoff Basal insieme all'istituto Wilhelm Dyckerhoff di Wiesbaden. Il risultato - Xposal 105 - è un robusto calcestruzzo ad alta resistenza che ha classe di resistenza alla compressione C90/105 sulla base del cemento standard Variodur 30 CEM II/B S 52,5 R. Tutto il calcestruzzo è stato fornito dall'impianto Dyckerhoff Basal di Arnheim. Nel complesso, tra il mese di giugno e il mese di dicembre 2016, nei 20 giorni di getto sono stati forniti circa 2.400 m³ di Xposal 105, per due volte il getto è avvenuto anche di notte. Per la

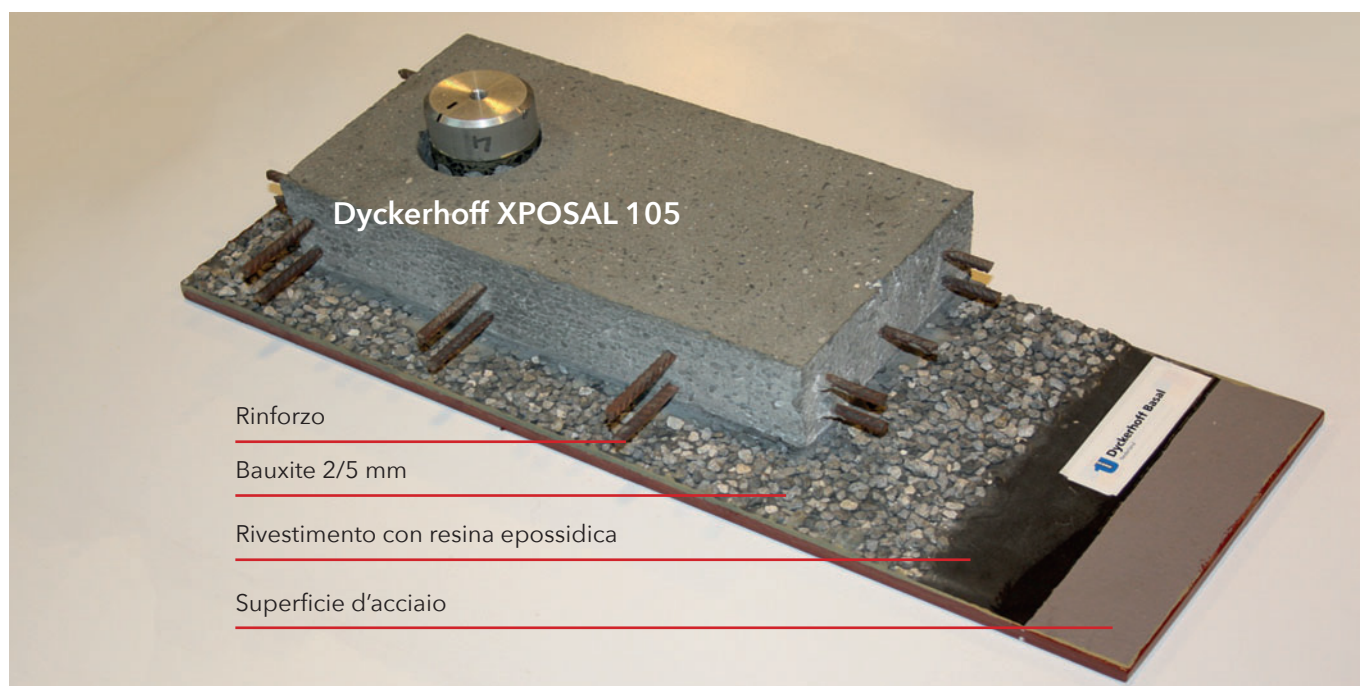


Fig. 11: Progettazione

messa in opera di questo calcestruzzo di 8 cm di spessore, il consorzio appaltatore (Strukton e Ballast Nedam) ha sviluppato una speciale macchina che richiede elevati requisiti per quanto riguarda l'omogeneità del calcestruzzo. La macchina è in grado di realizzare con un'elevata energia di compattazione un fortissimo legame tra calcestruzzo e l'acciaio su una larghezza di 12 metri. Ad una velocità di 20 cm al minuto sono stati realizzati 100 m di impalcato del ponte al giorno. Per un'aderenza ottimale sulla superficie in acciaio è stato applicato un ponte di aderenza di bauxite e resina epossidica. Si è fatto ricorso sia all'armatura tradizionale in acciaio sia a fibre d'acciaio di 75 kg/m^3 , aggiunte con un nuovo impianto di dosaggio nello stabilimento di prefabbricazione [13].

Miscela a grana grossa UHPC senza fumi di silice con cemento standard Variodur 40 CEM III/A 52,5 R

Questo cemento Premium CEM III/A 52,5 R si è già dimostrato valido in diversi calcestruzzi con elevati requisiti di durabilità, ad esempio nei tubi in calcestruzzo in occasione della rinaturazione del fiume Emscher [14] o nelle banchine prefabbricate per British Rail [15]. È stato quindi un passo naturale svolgere prove preliminari con questo cemento per ottenere classi di resistenza a partire da C130/145. L'obiettivo era una formulazione del calcestruzzo semplice, senza particolari frazioni granulometriche del legante e dell'aggregato. Le massime resistenze sono state ottenute (tab. 4) a seguito di

Tabella 3: Formula

Requisiti del calcestruzzo

Classe di resistenza / di esposizione	C90/105 / XF4
Slump flow	F3/ F4: 450-500 mm
Tempo di lavorabilità	≥ 2 ore
Contenuto di aria	$\leq 2,0 \%$
Densità	$\leq 2.500 \text{ kg/m}^3 (\pm 5 \%)$
Resistenza alla flessione	10 MPa ($\pm 15 \%$)
Modulo di elasticità	50.000 MPa ($\pm 10 \%$)
Ritiro autogeno	$\leq 3,0 \%$
Resistenza al gelo e disgelo con sali disgelanti	$\leq 100 \text{ g/m}^2$
Migrazione dei cloruri	$\leq 2,0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$
Aggregati grossolani 2/5	Resistente alle reazioni alcali-silice
Fibre d'acciaio (L = 12,5 mm, $\varnothing = 4$ mm)	$\geq 75 \text{ kg/m}^3$ (distribuite in modo omogeneo)

numerose prove con sabbia 0/2 mm e pietrisco 2/5 mm come aggregati in Nanodur UHPC in un rapporto 30 : 70. L'influenza sulla resistenza alla compressione del contenuto di cemento e del rapporto a/c da un lato e il dosaggio di uno speciale superfluidificante a base di PCE dall'altro sono illustrati di seguito (fig. 12 e 13).

Senza aggiunte minerali reattive supplementari come ad es. i fumi di silice, l'ottimale contenuto di Variodur 40 CEM III/A 52,5 R per una buona lavorabilità e resistenza alla compressione > 150 MPa è circa 700 kg/m³.

Nonostante il basso rapporto a/c di 0,20, una buona lavorabilità (spandimento 430 mm) si ottiene con uno speciale superfluidificante a base di PCE. Tuttavia, i dosaggi elevati di questo superfluidificante rallentano lo sviluppo della resistenza, qui rappresentato con la curva della temperatura

a brevi scadenze (cfr. fig. 14). Per gli elementi prefabbricati la formula a grana grossa con un dosaggio elevato di 2,4 %m in massa del cemento e un rapporto a/c basso è indicata solo in modo condizionato, dato che la resistenza dopo 24 ore è stata di soli circa 15 MPa. Con l'aumento del rapporto a/c a 0,22 e la riduzione a ciò connessa del dosaggio di PCE a 1,6 di %m, già dopo 16 ore inizia uno sviluppo significativo della resistenza e dopo 20 ore sono stati raggiunti quasi 40 MPa.

La resistenza finale viene ridotta di circa il 5-10 % con il maggiore rapporto a/c. Rispetto alle formule UHPC a grana grossa riportate in letteratura sulla base del cemento Portland e di fumi di silice, con l'impiego - vantaggioso anche sotto il profilo economico - del cemento standard Variodur 40 CEM III/A 52,5 R come unico legante si riduce, inoltre, di circa il 30 % l'impatto di CO₂ del calcestruzzo.

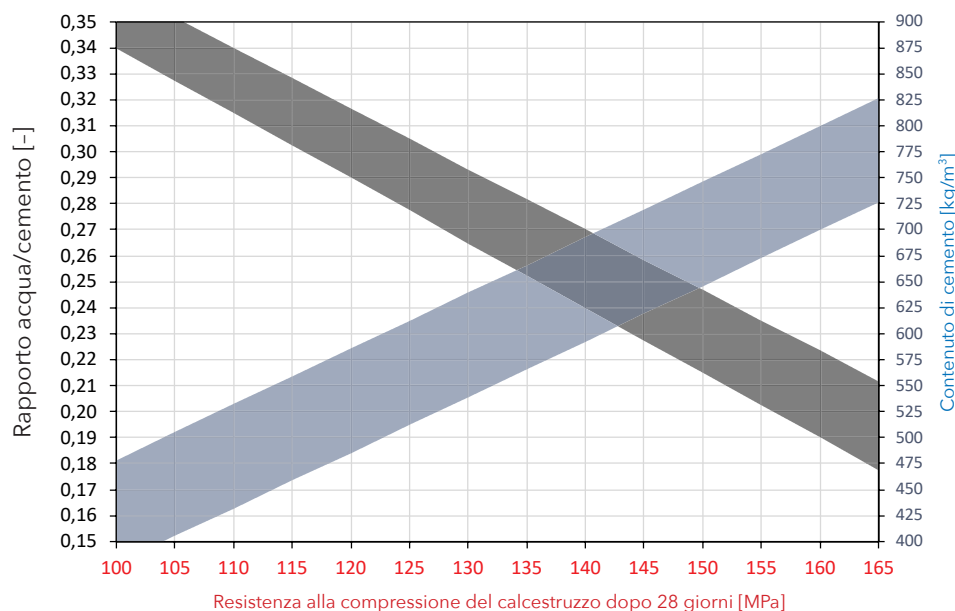


Fig. 12: Contenuto di cemento vs. rapporto a/c

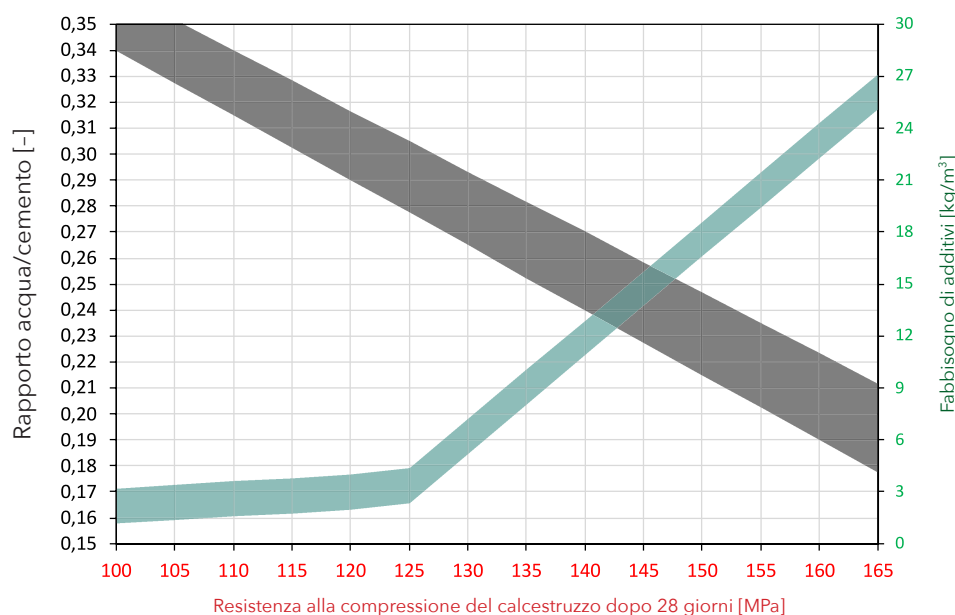
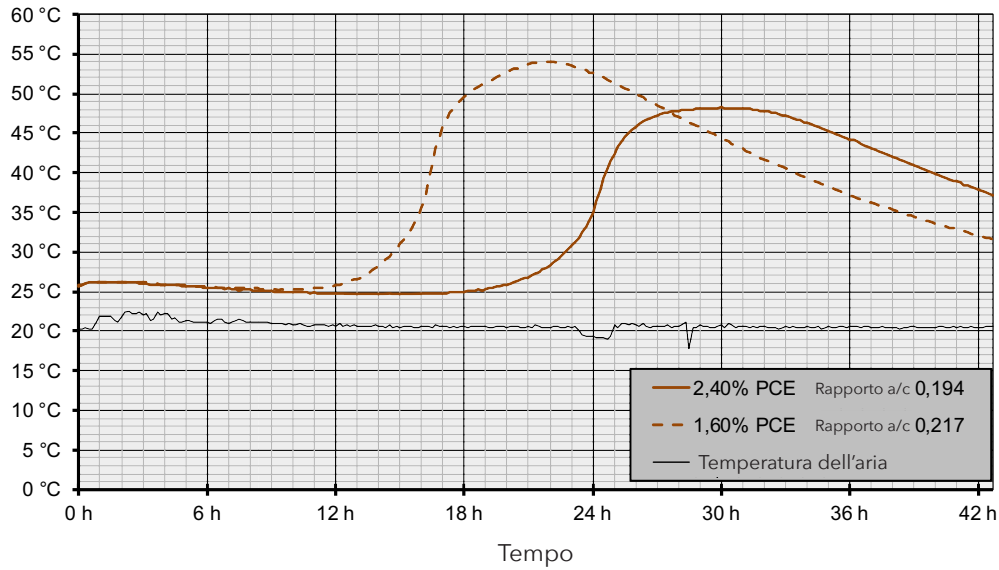


Fig. 13: Contenuto di additivo vs. rapporto a/c

Curva della temperatura nel calcestruzzo

Fig. 14:
Curva della temperatura

Miscela a grana fine UHPC senza fumi di silice con microfibre d'acciaio e cemento standard Variodur 40 CEM III/A 52,5 R

Per rinforzare le superfici destinate al traffico, in Svizzera per esempio [16] si ricorre in misura sempre maggiore a strati di UHPC a grana fine, con un'alta proporzione di microfibre d'acciaio. L'utilizzo di aggregati < 1 mm garantisce, in combinazione con fumi di silice, una struttura compatta [17]. Solitamente, più di 10 componenti devono essere dosati insieme agli additivi in una centrale di betonaggio e questo è difficilmente attuabile sotto il profilo tecnico nella pratica con i silos e le bilance esistenti. Di conseguenza, spesso i componenti vengono aggiunti a mano, sicuramente fattibile nel caso dei progetti pilota che tengono conto con grande dispendio

delle direttive in materia di sicurezza sul lavoro, ma difficilmente attuabile per una soluzione economica permanente. Le miscele tradizionali di UHPC contengono di solito circa il 50 % di legante di cemento Portland e fumi di silice. Con rapporti a/c molto bassi, soltanto alcune parti reagiscono idraulicamente, oltre il 60 % del cemento e oltre il 20 % dei fumi di silice permangono come "aggregato di qualità" nella matrice più compatta [18].

Per semplificare le composizioni sopra citate, è stato prodotto un UHPC a grana fine (tab. 4) soltanto con Variodur 40 CEM III/A 52,5 R, una sabbia fine di quarzo, microfibre d'acciaio e un PCE speciale per rapporti a/c bassi. Il calcestruzzo C130/145 a seconda dell'applicazione prevista può variare



Fig. 15: Formula a grana grossa



Fig. 16: Formula a grana fine

Tabella 4: Formule standard

Ricette UHPC ad alte prestazioni		Particella grossa	Particella fine	
VARIODUR 40 CEM III/A 52,5 R	kg/m ³	700	900	900
UHPC Additive CEM III/C 52,5 N	kg/m ³	-	-	80
Sabbia fine di quarzo 0,063/0,25 mm	kg/m ³	-	1.230	1.150
Sabbia del Reno 0/2 mm	kg/m ³	480	-	-
Pietrisco di basalto pregiato 2/5 mm	kg/m ³	1.300	-	-
Microfibre di acciaio	kg/m ³	-	200	200
PCE per bassi rapporti a/c	kg/m ³	17	25	22
Acqua (incl. l'acqua del PCE)	kg/m ³	136	196	196
Rapporto a/c	-	0,20	0,22	0,20
Spandimento	mm	430	450	510

Caratteristiche del calcestruzzo indurito dopo 28 giorni

Resistenza alla compressione cubo	MPa	162	157	173
Resistenza alla compressione cilindro	MPa	158	145	157
Modulo di elasticità	MPa	55.600	43.900	46.800
Resistenza alla flessione	MPa	-	22,0	22,3

da 200 a 250 kg/m³, i rapporti a/c da 0,20 a 0,24 e le percentuali di cemento dal 42 al 49 %, in relazione alla miscela a secco.

Miscela a grana fine UHPC con la combinazione di cemento standard di Variodur 40 CEM III/A 52,5 R e additivo UHPC CEM III/C 52,5 N

Le miscele UHPC ricche di fibre sono stabili in pendenza e ben lavorabili nella compattazione con macchine per il

rinforzo di ponti. Nei rinforzi sottili è particolarmente importante un'elevata duttilità attraverso una buona trasmissione della forza alle microfibre d'acciaio da incorporare in modo molto compatto. L'additivo UHPC, un cemento a granulometria ottimizzata molto fine ($d_{95} < 9,5 \mu\text{m}$), conforme allo standard come CEM III/C 52,5 N, è in grado di rendere ulteriormente compatta la struttura. Con 80 kg/m³ a svantaggio della sabbia fine di quarzo, nella formula standard a grana fine la proporzione di acqua di quasi 200 kg/m³ è rimasta costante, ossia il rapporto a/c da 0,22 è sceso a 0,20. Di conseguenza

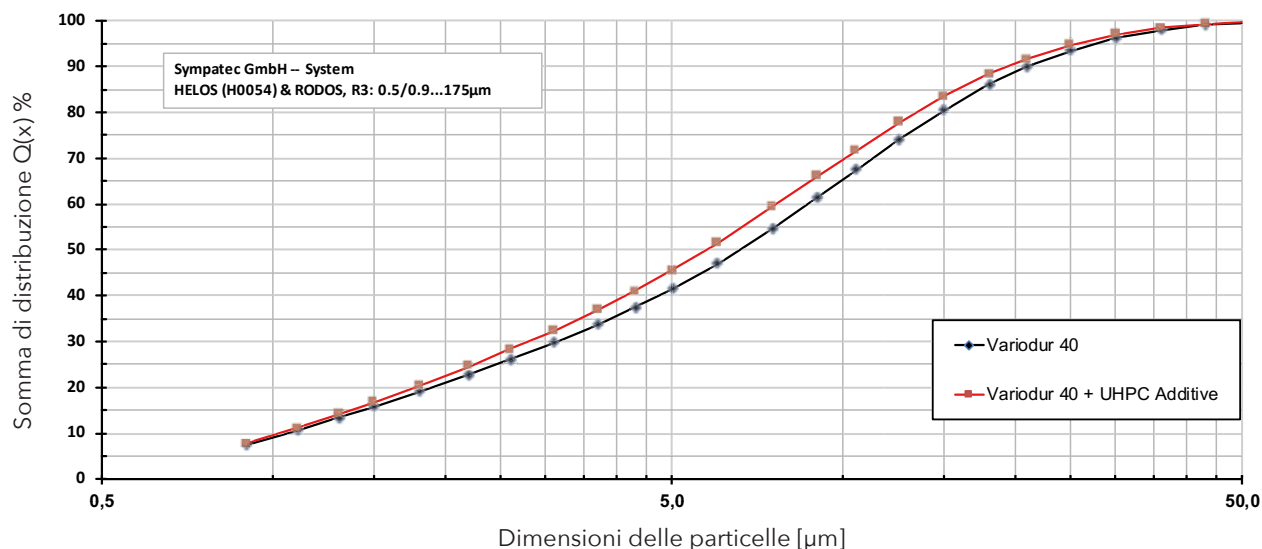


Fig. 17: Granulometria laser



Foto: VENTUR GmbH

VENTUR 4.0 – UHPC con Dyckerhoff VARIODUR®
Pronti per nuove sfide!

www.dyckerhoff.com

ventur
Wind turbine towers
Simple. Unrestricted.

Dyckerhoff

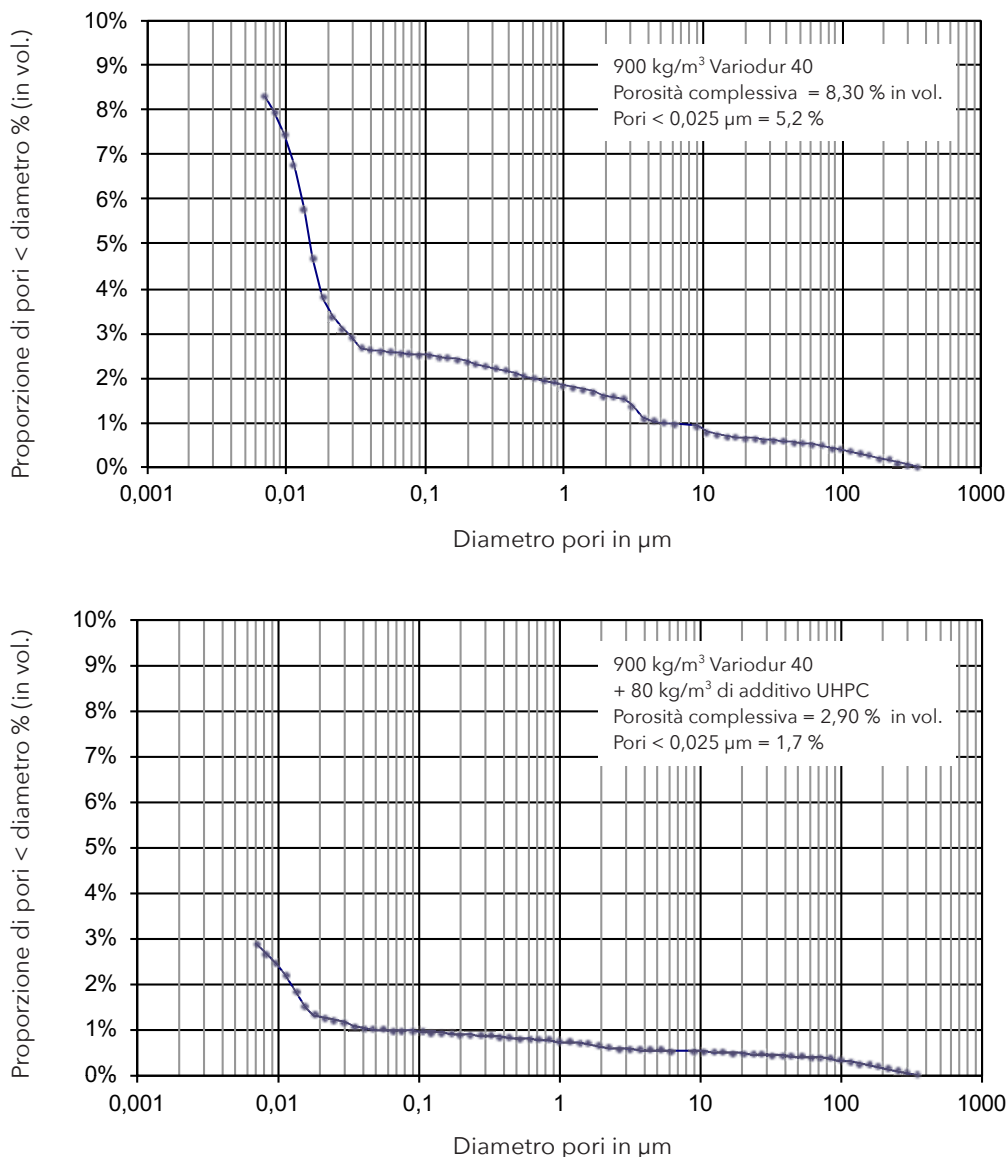


Fig. 18: Variazione della distribuzione cumulativa dei pori aggiungendo 80 kg/m³ di additivo UHPC

le resistenze a compressione sono aumentate di circa il 10 % e riducendo la quantità di PCE da 25 a 22 kg/m³ lo spandimento è salito da 460 a 510 mm. Con la granulometria laser, confrontando Variodur 40 da solo e con l'aggiunta dell'additivo UHPC si nota lo spostamento nelle aree più fini della distribuzione granulometrica (fig. 17).

La porosimetria a intrusione di mercurio mostra una chiara riduzione della porosità complessiva del calcestruzzo da 8,3 a 2,9 di % in volume e un calo dei pori < 0,025 µm dal 5,2 all'1,7 %.

L'additivo UHPC aumenta inoltre anche la resistenza a trazione post-fessura centrica.

Per i requisiti in Germania, con la variante semplice solo di cemento standard Variodur 40 CEM III/A 52,5 R, sabbia fine di

quarzo 0,063/0,25 mm, PCE per rapporti a/c bassi e 200 kg/m³ di microfibre d'acciaio si può produrre un C130/145. Per i requisiti di duttilità superiori, con l'aggiunta dell'additivo UHPC (conforme alla norma come CEM III/C 52,5 N) il calcestruzzo può essere ottimizzato ulteriormente, ad esempio per soddisfare i requisiti del calcestruzzo fibrorinforzato iperresistente secondo la scheda SIA 2052 dell'Associazione svizzera degli ingegneri ed architetti.

In linea di principio, tutti i mix design indicati nel presente articolo costituiscono la base per lo sviluppo mirato di UHPC secondo i requisiti concreti derivanti dai progetti, tenendo conto della situazione delle materie prime a disposizione dell'utente. Nel caso della formula standard a grana grossa, l'ottimizzazione mirata è già stata applicata con successo nella pratica.

Sintesi e conclusioni

La struttura compatta dei calcestruzzi ad alte prestazioni migliora notevolmente le resistenze a compressione e a flessione, aumenta la resistenza agli attacchi chimici e meccanici, consente elevate caratteristiche funzionali ed una maggiore durabilità. Le soluzioni espone nel presente articolo sulla base della moderna tecnologia del calcestruzzo non hanno bisogno di additivi pozzolanici come i fumi di silice e si possono realizzare con comuni aggregati e la normale tecnologia di miscelazione del calcestruzzo.

- Flowstone: Premiscelato di leganti per l'HPC - High Performance Concrete come conglomerato cementizio nello stabilimento di prefabbricazione.
- Nanodur: Premiscelato di leganti per l'UHPC Ultra High Performance Concrete per elementi speciali e ingegneria meccanica nello stabilimento di prefabbricazione.

Questo metodo di costruzione, più costoso a livello di produzione rispetto al calcestruzzo standard, normalmente si ammortizza in pochi anni in combinazione con una significativa riduzione della sezione. Con questi leganti premiscelati sperimentati da tanti anni anche in futuro le applicazioni sono possibili soltanto con l'approvazione del caso specifico (ZiE) o l'omologazione generale dell'ispettorato all'edilizia (abZ). Ma poiché per ora le possibilità di utilizzo sono ancora molto limitate, gli elevati costi per le citate omologazioni non sono decisamente commisurati ai ricavi.

- Variodur: Cemento standard per produrre HPC e UHPC senza fumi di silice nello stabilimento di prefabbricazione e come calcestruzzo in opera, inoltre per riparare e rinforzare elementi costruttivi.
- Additivo UHPC: Cemento finissimo standardizzato per l'ottimizzazione granulometrica di qualsiasi formula HPC e UHPC.

Per sfruttare gli interessanti risultati dei progetti sovvenzionati dalla pubblica amministrazione [12], Dyckerhoff è alla continua ricerca di nuove strade per produrre calcestruzzi ad alte prestazioni con pochi semplici componenti standardizzati. Con un superfluidificante speciale a base di PCE per rapporti a/c bassi è possibile abbinare con successo l'utilizzo di cementi standard sperimentati da anni sulla base della tecnologia Mikrodur® in diversi progetti UHPC. È risultato utile semplificare ripetutamente le formule e non integrare, in aggiunta, ogni singola materia prima ipoteticamente adatta nelle composizioni già di per sé complicate.

L'utilizzo del cemento di base standard senza aggiunte minerali reattive come ad esempio i fumi di silice riduce l'onere per i processi di autorizzazione da parte dell'ispettorato all'edilizia. È possibile raggiungere requisiti superiori con un additivo UHPC standardizzato come componente di controllo.

In questo modo, si ottiene per ogni caso applicativo una soluzione su misura con formule facili da mettere in atto nella pratica, quindi il consenso nei confronti dei calcestruzzi ad alte prestazioni dovrebbe subire un'accelerazione. Inoltre in

futuro si dovrebbe ridurre il gran numero di termini citati all'inizio.

Il vantaggio generale in termini ecologici dei calcestruzzi ad alte prestazioni è la riduzione di CO₂ dovuta alle masse inferiori grazie alla possibilità di realizzare elementi costruttivi più snelli. L'interessante alternativa economica, ossia il cemento standard Variodur 40 CEM III/A 52,5 R come unico legante, rispetto alle comuni formule UHPC con combinazioni di cemento Portland e fumi di silice comporta circa il 60% di carico di CO₂, aumentando così anche il vantaggio ecologico. ■

Bibliografia

- [1] https://de.wikipedia.org/wiki/Turmbau_zu_Babel
- [2] https://de.wikipedia.org/wiki/Ultrahochfester_Beton
- [3] <https://www.beton.wiki/index.php?title=Hochleistungsbeton>
- [4] Zement-Taschenbuch 51. Ausgabe, 2008
- [5] OLAF: Abschlussbericht BMBF Projekt OLAF (FK 03X0066A Dyckerhoff), TIB- Hannover, 2012.
- [6] Sagmeister, Bernhard; Maschinenteile aus zementgebundenen Beton, Beuth Verlag, Berlin, 2017. ISBN 978-3-410-27186-4
- [7] Curbach, M.; Schladitz, F.; Untersuchungsbericht zur Tragfähigkeit einer Treppe der Dyckerhoff AG, TU Dresden 2012 (unveröffentlicht)
- [8] Forman, Patrick et al.; A concrete solar collector, VGB Power Tech 9/2018
- [9] Deuse, Thomas et al.; Hochleistungsbeton mit Klebeverbindung. BetonWerk International, 6/2014.
- [10] Sagmeister, Bernhard et al.; Verschleißfeste Schutzschichten aus UHPC, Der Bauingenieur, Band 94, Mai 2019
- [11] Hadl, Philipp. et al.; Anwendung von UHPC als direkt befahrener Aufbeton bei der Integralisierung eines bestehenden Brückenbauwerks in Österreich. Beton- und Stahlbetonbau 2/2015
- [12] Deuse, Thomas et al.; Nanotechnically optimized binders for the production of user-friendly high-performance concrete, Issue No.: 1 and 5 of Cement International 2018
- [13] Laurini, G; Tragplatte der Ewijk-Brücke verstärkt: Decklage aus hochfestem Beton, beton 6/2018
- [14] Diefenseifen, Maik et al.; Beton mit hohem Säurewiderstand, Betonwerk International, 6/2008
- [15] Grebe, Rainer et al.; Bahnsteige für England mit hohem elektrischen Widerstand, BFT International 09/2009
- [16] Brühwiler, Eugen; „Revitalisierung“ von Brücken mittels UHFB, Vortrag beim 4. Grazer Betonkolloquium, Graz 2018
- [17] Orgass, Marko et al.; Überführungsbauwerk der L 3378 bei Fulda-Lehnerz, Beton- und Stahlbetonbau 113 (2018), Heft 11
- [18] Heinz, Detlef; UHPC mit alternativen Bindemitteln, Vortrag beim 9. Münchener Baustoffseminar, TU München, 2011

ALTRE INFORMAZIONI



Dyckerhoff GmbH, Product Marketing
Postbox 2247
65012 Wiesbaden, Germania
T +49 611 676 1181
marketing@dyckerhoff.com
www.dyckerhoff.com