

**SPECIAL PRINT | TECNICA DEL CALCESTRUZZO**  
Calcestruzzo ad alta resistenza contro l'attacco degli acidi

**SPECIAL PRINT  
C&PI 08/06**

Maik Diepenseifen, Ditmar Hornung, Werner Schultz

## Calcestruzzo ad alta resistenza contro l'attacco degli acidi

a base di cemento Premium Dyckerhoff VARIODUR®

... con Mikrodur Technology



# Dyckerhoff



Dyckerhoff AG, 65203 Wiesbaden, Germania

# Calcestruzzo ad alta resistenza contro l'attacco degli acidi

Per esperienza, i requisiti di durata degli impianti tecnici per le acque reflue in caso di sollecitazione da parte delle comuni acque reflue comunali sono pienamente soddisfatti utilizzando il calcestruzzo normale. Se le acque reflue contengono concentrazioni elevate di sostanze che possono intaccare il calcestruzzo o se nell'atmosfera del canale si forma acido solforico biogeno, spesso dopo alcuni anni di esercizio si osservano forti fenomeni di corrosione. Da qui possono derivare notevoli limitazioni all'idoneità all'uso e alla stabilità dell'impianto di depurazione. Rispetto ad altri materiali utilizzati nella tecnica delle acque reflue, il calcestruzzo presenta vantaggi tecnici ed economici decisivi; infatti i gestori delle reti di fognature richiedono calcestruzzi molto resistenti contro gli acidi per le zone di smaltimento particolarmente esposte alla corrosione chimica.

■ Maik Diepenseifen, E + F GmbH, Rohrwerk Epiton,  
Dr. Ditmar Hornung, Werner Schultz, Dyckerhoff AG,  
Germania ■

## Leganti ad alte prestazioni con sabbie metallurgiche finissime

I calcestruzzi caratterizzati da un'alta resistenza agli acidi presentano una densità strutturale particolarmente elevata, garantita da un lato da un basso rapporto acqua/legante e dall'altro dall'impiego di additivi reattivi. Grazie alla granulometria ottimizzata dei leganti è possibile aumentare ulteriormente la densità strutturale del materiale. Oltre a ciò, il volume dei leganti e la quantità di componenti del calcestruzzo potenzialmente solubili negli acidi viene ridotta il più possibile, aumentando di conseguenza ancora di più la resistenza agli acidi. L'ottimizzazione delle caratteristiche di durabilità deve avvenire in modo che la curva di maturazione del legante/calcestruzzo soddisfi i requisiti della tecnologia di produzione.

Le misure citate possono tuttavia causare problemi nella produzione e nella lavorazione del calcestruzzo. I calcestruzzi idonei all'impiego pratico richiedono pertanto un'ottimizzazione tra l'aumento della resistenza agli acidi, da un lato, e una sufficiente lavorabilità, dall'altro. Le misure obbligate sono quindi l'uso di fluidificanti ad alto rendimento e appositamente progettati per i leganti in combinazione con una curva granulometrica degli inerti ricca di grana grossa.

Sulla base dell'esperienza di un lavoro di sviluppo pluriennale, i requisiti summenzionati vengono soddisfatti al meglio se i componenti dei leganti vengono composti ad hoc in miscelatori ad alte prestazioni in seguito ad una macinazione e ad uno smistamento separati. L'ottimizzazione differenziata avviene quindi sia per motivi di reattività chimica sia in base a criteri granulometrici. I cementi Premium di categoria CEM II e

Tab. 1: Formule dei calcestruzzi

	Calcestruzzo 1	Calcestruzzo 2
<b>Cemento</b>	Variodur 40 CEM III/A 52,5 R 350 kg/m <sup>3</sup>	Sulfadur CEM I 42,5 R-HS/NA 245 kg/m <sup>3</sup>
<b>Genere volante</b>	-	77 kg/m <sup>3</sup>
<b>Microsilice</b>	-	56 kg/m <sup>3</sup>
<b>Acqua</b>	147 kg/m <sup>3</sup>	127 kg/m <sup>3</sup>
<b>Rapporto acqua / legante</b>	0,42	0,42

CEM III sviluppati da Dyckerhoff AG come risultato di tale ottimizzazione offrono un importante contributo anche dal punto di vista della protezione delle risorse e della riduzione di emissioni di CO<sub>2</sub>.

Come per altri calcestruzzi ad alte prestazioni, anche per il calcestruzzo ad alta resistenza agli acidi occorre garantire un'elevata uniformità durante la produzione del calcestruzzo. A tale proposito è necessario un monitoraggio approfondito dei materia-

li di base e del calcestruzzo fresco, che in parte superano le prescrizioni normative.

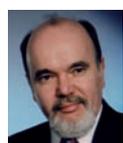
La Dyckerhoff AG iniziò lo sviluppo del legante ad alte prestazioni = XA 3 verso la fine degli anni '90, per contrastare sufficientemente e in modo duraturo un attacco chimico da parte di acidi fino al valore di pH pari a 3,5 senza ulteriore protezione della superficie del calcestruzzo. Già dai primi esperimenti furono utilizzati cementi contenenti sabbia metallurgica, che insie-



■ Dipl.-Ing. Maik Diepenseifen ha studiato ingegneria civile presso l'Università-Gesamthochschule di Essen dal 1995-2000 e si è specializzato in costruzione idraulica e tecnica delle fondazioni. Dal 2000 al 2002 ha svolto l'attività di direttore dei lavori e calcolatore presso aziende di carpenteria metallica di medie dimensioni (edilizia del soprassuolo in acciaio, edilizia industriale, costruzione di impianti, costruzione chiavi in mano). Dal 2002 è direttore di stabilimento presso la E+F GmbH, Rohrwerk Epiton, dove, in qualità di titolare di certificato E (attestato di frequenza ad un corso di perfezionamento sulla tecnologia del calcestruzzo) è responsabile anche della progettazione tecnologica del calcestruzzo e del controllo dello stabilimento. Parallelamente a questa attività di responsabilità, sta ultimando gli studi per una seconda laurea in scienze economiche.



■ Dott. Ing. Ditmar Hornung, 1968 - 1975 studi universitari/dottorato presso l'Università Tecnica di Dresda. 1975 - 1990 attività presso il cementificio Deuna/Turingia con varie funzioni tecniche. 1991 - 2004 responsabile qualità, sviluppo e applicazione dei prodotti presso Deuna Zement GmbH (Dyckerhoff AG) con specializzazioni in reologia delle miscele dei materiali edili e cementi compositi con polvere di calcare e sabbia metallurgica. Dal 2005 responsabile sviluppo gamma prodotti e consulenza tecnica cemento presso Dyckerhoff AG



■ Il Dipl. Ing. Werner Schultz ha studiato ingegneria civile a Essen. Ha lavorato nel centro di prove della Hochtief AG di Essen, per ultimo come vice responsabile di tale centro di prove. Successivamente ha rivestito la carica di incaricato prove nell'ambito del controllo della qualità del Deutscher Beton Verein (Associazione Tedesca del Calcestruzzo). In seguito è passato alla BauMineral, vendite tecniche di genere volante di carbone fossile. Dal 1991 è consulente edile della Dyckerhoff AG. Fa parte della commissione Tecnica e Normativa del Bundesverband Mineralische Rohstoffe MIRO (federazione tedesca materie prime minerali), della Commissione norme DIN calcestruzzo a proiezione e del Comitato Tedesco per la normativa europea del calcestruzzo a proiezione. Inoltre è docente nel campo della formazione ampliata sulla tecnologia del calcestruzzo (certificato E).

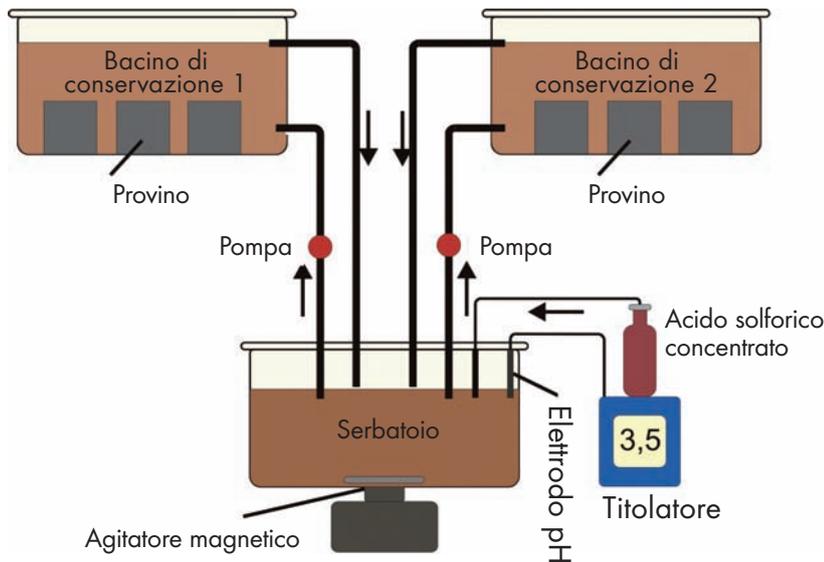


Fig. 1: Disegno schematico del banco di prova per gli acidi

Tab. 2: Risultati delle prove sul calcestruzzo fresco e indurito

	a5/a45 [mm]	Contenuto LP [%]	Peso specifico apparente [kg/m <sup>3</sup> ]	Età [giorni]	fc [N/mm <sup>2</sup> ]	Modulo di elasticità [N/mm <sup>2</sup> ]	ft [N/mm <sup>2</sup> ]
Calcestruzzo 1	490 / 460	0,5	2.420	1	35,9	24.600	2,5
				28	89,3	39.000	4,9
				56	93,5	38.600	4,8
Calcestruzzo 2	560 / 430	1,2	2.400	1	19,8	22.200	1,8
				28	88,0	37.300	4,3
				56	95,9	39.400	4,9

me al clinker di cemento Portland veniva macinata separatamente, per poi ottimizzare il materiale dal punto di vista granulometrico e successivamente produrlo con miscelatori ad alte prestazioni aggiungendo un agente di solfato.

### Studio comparativo su due calcestruzzi con elevata resistenza agli acidi

#### Situazione iniziale

Presso la facoltà della tecnica dei materiali edili dell'Università Ruhr di Bochum, venne eseguito uno studio comparativo su due calcestruzzi dietro incarico della Dyckerhoff AG. Per ogni calcestruzzo fu creato un profilo di proprietà, contenente le caratteristiche essenziali del calcestruzzo fresco e indurito. Uno degli obiettivi principali dello studio era l'analisi comparativa della resistenza agli acidi dei calcestruzzi presi in esame.

I calcestruzzi differivano per la composizione dei leganti. Il calcestruzzo 1 era prodotto con un cemento d'altoforno utilizzando sabbie metallurgiche finissime ottenute con macinazione separata. Il calcestruzzo 2, al contrario, era prodotto utilizzando cemento Portland con alta resistenza ai solfati, cene-

re volante e polvere di silice [1]. Entrambi i calcestruzzi presentavano un rapporto A/L pari a 0,42 e furono realizzati con inerti a base di quarzo (grana massima 16 mm). Oltre ai calcestruzzi da laboratorio furono esaminati nelle prove con gli acidi anche altri provini da un tubo di grande formato prodotto con il calcestruzzo 1.

#### Prove con gli acidi

La prova della resistenza agli acidi venne effettuata introducendo ogni calcestruzzo in un bacino di conservazione separato. Come soluzione di prova venne utilizzato acido solforico con un valore di pH di 3,5. Per tutta la durata degli esperimenti l'acido solforico era tenuto in circolazione mediante delle pompe. La soluzione di prova del serbatoio e del bacino di conservazione veniva cambiata completamente ogni 2 settimane. La struttura complessiva del banco di prova per gli acidi è rappresentata nella fig. 1. Durante il periodo di deposito di 15 settimane venne misurata la perdita di peso su tre provini di calcestruzzo spazzolato e su tre provini di calcestruzzo non spazzolato. I test sulla fenoltaleina eseguiti sulle superfici di rottura fresche chiarirono l'entità dei danni. L'area non colorata della superficie

di rottura venne osservata al microscopio e misurata. Da ciascuno dei dischi spazzolati e non spazzolati di entrambi i tipi di calcestruzzo vennero asportate delle sottili sezioni e analizzate al microscopio.

#### Caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito

Tenendo in considerazione una produzione in stabilimento di tubi di calcestruzzo entrambe le formule consentivano di ottenere un calcestruzzo fresco facilmente lavorabile e adatto all'impiego pratico. Dopo un giorno di maturazione, il calcestruzzo 1 presentava una maggiore resistenza alla compressione rispetto al calcestruzzo 2. Dopo 28 e 56 giorni, invece, le differenze tra le caratteristiche meccaniche di entrambi i calcestruzzi apparivano più livellate (Tabella 2)

#### Variazione di peso

I provini non spazzolati di entrambi i calcestruzzi presentavano significativi incrementi di peso già dopo pochi giorni di conservazione in acido solforico (fig. 2). L'incremento di peso iniziale diminuiva poi col passare del tempo, anche se quello del calcestruzzo 1 rimaneva sempre leggermente più elevato. Questo comportamento fu notato già nei primi lavori e venne ricondotto alla nuova formazione di prodotti della reazione di componenti del calcestruzzo e dell'acido rimanenti nella struttura del calcestruzzo [2, 3]. Nei provini spazzolati, la sovrapposizione di prodotti della reazione e la riduzione di peso a seguito dell'attacco degli acidi è meno rilevante, poiché in questo caso i prodotti di reazione che aderiscono facilmente alla superficie possono essere rimossi meccanicamente. Un'effettiva perdita di peso rispetto al peso iniziale prima dei test venne rilevata per il calcestruzzo 2 dopo 73 giorni e per il calcestruzzo 1 dopo persino 107 giorni di conservazione nell'acido solforico, però non si notava alcuna differenza visibile nei provini di entrambi i materiali. L'incremento di peso nei provini di tubi è più marcato che nel calcestruzzo da laboratorio realizzato con la stessa composizione.

#### Entità dei danni (test della fenoltaleina)

Sulle superfici di rottura fresche sulle quali venne applicata la fenoltaleina, il contrasto cromatico consentì di rilevare un determinato livello di danneggiamento tramite l'osservazione al microscopio ottico. Secondo le aspettative l'entità dei danni era ripartita uniformemente in tutti i provini. Dopo soli 31 giorni di conservazione nell'acido solforico il calcestruzzo 1 presentava meno danni rispetto al calcestruzzo 2. Il calcestruzzo del tubo risultava nel complesso più danneggiato del calcestruzzo da laboratorio 1 [4].

### Tecnica spingi-tubo presso lo Zoom di Gelsenkirchen

Nello zoo "Zoom - Erlebniswelt", situato del bacino della Ruhr nelle vicinanze di Gelsenkirchen, è stato installato un canale di scarico composto da due tratti di avanzamento curvilinei con raggio di 470 m da un pozzo doppio nella marna dell'Emscher. L'impresa esecutrice dei lavori W. Epping Spezialtiefbau ha utilizzato un impianto spingitubi con fronte di avanzamento aperto e scarpa tagliente comandabile. La stazione di lavoro principale installata nel pozzetto iniziale è formata da 4 cilindri idraulici telescopici con una forza di pressione di 3.000 KN ciascuno. Per evitare di raggiungere forze di pressione eccessive sono state installate apposite valvole di sovrappressione.

Con una fresa ad attacco puntuale fissata al tubo della macchina il terreno è stato rimosso dal fronte di avanzamento e trasportato in un vagoncino con un nastro trasportatore. Gli argani trainano il vagoncino attraverso la camera dell'aria compressa verso il pozzo iniziale, dove viene svuotato da un escavatore a funi. Per sigillare la fessura anulare e ridurre l'attrito della roccia, durante la spinta è stata utilizzata una sospensione di bentonite. Lo stesso fronte di avanzamento liberamente transitabile è stato sostenuto da una sovrappressione di aria, che spostava la falda acquifera presente e impediva il riversamento di terreno non stabile.

#### Requisiti dei tubi a spinta

I tubi a spinta dovevano essere prodotti in conformità alle norme DIN EN 1916 e DIN V 1201, sulla base delle specifiche tecniche concordate da contratto e del capitolato tecnico supplementare (ZTV) del committente Emscher-genossenschaft come indicato di seguito:

- Tubi a spinta DN1600/DA2240

- Lunghezza costruttiva standard 4,00 m
- Peso 19,5 t
- con collari in acciaio inossidabile, come tutte le altre parti applicate
- Calcestruzzo con elevata resistenza agli acidi (SWB)

#### Produzione dei tubi

I tubi sono stati prodotti nello stabilimento di Hünxe della E+F GmbH Rohrwerk Epiton. Prima di intraprendere la produzione dei tubi è stato necessario redigere un piano di garanzia della qualità in collaborazione con tutte le parti coinvolte e secondo le direttive della facoltà della tecnica dei materiali edili dell'Università Ruhr di Bochum. La prima verifica completa è stata effettuata nell'aprile del 2007 sotto la supervisione della Emscher-genossenschaft e dell'Università Ruhr di Bochum. Per l'occasione sono stati realizzati numerosi provini, anche per l'analisi della resistenza alle sostanze chimiche.

Per produrre le gabbie di armatura è stata utilizzata una delle soldatrici per gabbie di armatura più grandi al mondo, fornita dalla MBK - Maschinenbau GmbH. Questa macchina produce in modo completamente automatico le gabbie di armatura interne ed esterne separatamente, in base ai calcoli statici o ai piani d'armatura. La gabbia finita deve essere controllata e i dati devono essere registrati nel documento di accompagnamento del tubo. La Emscher-genossenschaft ha richiesto una tolleranza massima di soli  $\pm 5$  mm per il copriferro. I tubi sono stati prodotti in getto in verticale all'interno di stampi di acciaio centrati. Da giugno a dicembre 2007 sono stati realizzati due tubi di spinta al giorno con un kit di stampi.

#### Produzione del calcestruzzo e misure di garanzia della qualità

Per la produzione dei tubi di spinta, la Emscher-genossenschaft ha stabilito i rigorosi

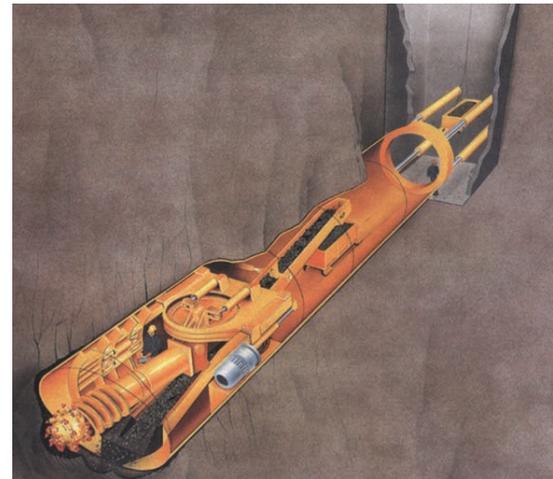


Fig. 4: Fresa scudata



Fig. 5: Tubo di spinta

Andamento della variazione del peso

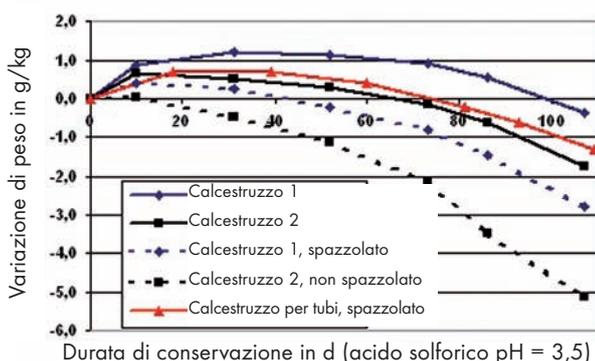


Fig. 2: Andamento della variazione del peso

Entità massima dei danni (test della fenolfaleina)

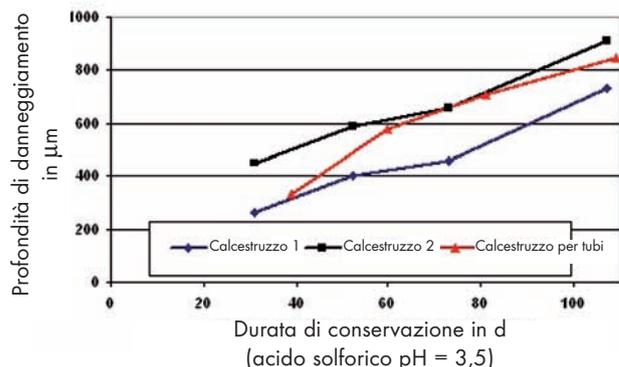


Fig. 3: Andamento delle entità massime dei danni osservate

Tab. 3: Composizione del calcestruzzo SWB

Denominazione	kg / m <sup>3</sup>
CEM III/A 52,5 R	320
Sabbia da frantumazione 0 / 2 mm	701
Ghiaia 2 / 8 mm	301
Ghiaia 8 / 16 mm	1.002
Acqua	133
Fluidificante del calcestruzzo (PCE)	2

requisiti indicati di seguito per il calcestruzzo con elevata resistenza agli acidi (SWB):

- Classe di resistenza alla compressione del calcestruzzo: C50/60 (limite superiore della resistenza alla compressione dopo 28 giorni = 90 N/mm<sup>2</sup>)
  - Classi di esposizione: XC4, XD3, XM2, XA3\*
- \*Si è rinunciato esplicitamente ad ulteriori misure di protezione secondo il requisito della classe di esposizione XA3 a causa delle particolari misure tecnologiche del calcestruzzo
- Grana massima degli inerti: 16 mm (no inerti calcitici)
  - Rapporto acqua/cemento o acqua/legante: = 0,42
  - Contenuto di leganti (cemento + additivi del calcestruzzo): = 350 kg/m<sup>3</sup>

Tra le 2 varianti del testo del capitolato d'appalto è stato scelto quello seguente:

- Tipo di cemento: CEM III / A 52,5 R secondo DIN EN 197-1
- Contenuto di sabbia metallurgica: 40 M.-% ± 3 M.-%
- Macinazione separata di clinker di cemento e sabbia metallurgica
- Requisiti del clinker di cemento Portland macinato:  
 Finezza di macinazione secondo Blaine:  
 5.000 cm<sup>2</sup>/g ± 500 cm<sup>2</sup>/g  
 Parametro di posizione d':  
 11 µm ± 1,5 µm
- Requisiti della sabbia metallurgica macinata:  
 Finezza di macinazione secondo Blaine:  
 8.000 cm<sup>2</sup>/g ± 500 cm<sup>2</sup>/g  
 Parametro di posizione d': 6 µm ± 1,5 µm

Tab. 4: Propriétés Variodur 40 CEM III/A 52,5 R

Parametro di posizione d'	8,20 µm
Pendenza n	0,99
Consistenza normale H <sub>2</sub> O	31,5 M.-%
Inizio indurimento	200 min
Fine indurimento	230 min
Indurimento errato	12,8 cm
Le Chat.	0,0 mm
<b>Resistenza alla compressione N/mm<sup>2</sup></b>	
N 1	21,0
N 2	37,6
N 7	63,2
N 28	78,0
N 56	80,1
Contenuto SO <sub>3</sub>	1,72 M.-%
<b>Calore d'idratazione</b>	
0 á 0,5h	12,2 J/g
0 á 1 d	173 J/g
0 á 2 d	259 J/g
0 á 3 d	305 J/g
0 á 7d	358 J/g

Le prime verifiche complete del calcestruzzo comprendevano anche quanto segue:

- Determinazione della resistenza all'acido solforico secondo la procedura di prova agli acidi di Hüttl
- Valore pH dell'acido solforico 3,5
- Determinazione del coefficiente di migrazione del cloruro
- Determinazione della porosità totale

Queste verifiche sono state eseguite su ordine del committente presso l'ufficio di prova dei materiali (MPA) di Berlino-Brandeburgo. I costi dell'esecuzione delle verifiche sono stati coperti dalla Emschergerossenschaft.

Calcestruzzo per tubi SWB C 50/60 Stagionatura 28 giorni

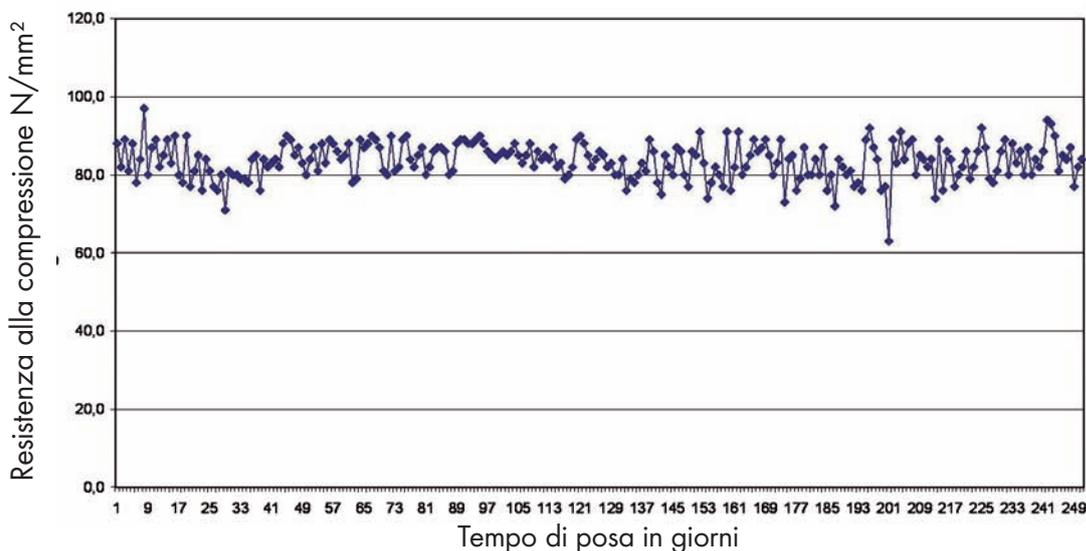


Fig. 6: Resistenze alla compressione del calcestruzzo per tubi



Fig. 7/8: Impianto di depurazione di MG-Neuwiek

Per l'esecuzione è stato utilizzato calcestruzzo prodotto mediante la variante del legante A. La formula utilizzata per il calcestruzzo è descritta nella tabella 3.

Il cemento è stato fornito da Dyckerhoff AG, stabilimento di Neuwied, il calcestruzzo dalla Elskes Transportbeton GmbH & Co. KG, stabilimento di Hünxe. La produzione del calcestruzzo è stata controllata dalla Melius Baustofftechnik. Le prove di resistenza per il calcestruzzo fornito sono state effettuate per conto della E+F GmbH, Rohwerk Epiton da parte del centro di prova Kondor Wessels.

Misura di garanzia della qualità preventiva e durante i lavori

- Stesura di un piano di garanzia della qualità in collaborazione con il committente e l'Università Ruhr di Bochum, facoltà della tecnica dei materiali edili
- Formazione dei collaboratori e dei subappaltatori da parte dell'Università Ruhr di Bochum, facoltà della tecnica dei materiali edili
- Il calcestruzzo SWB doveva essere classificato nella classe di monitoraggio 3
- Granulometria laser dei materiali di base
- Granulometria laser del cemento
- Composizione chimica del cemento
- Inizio e fine dell'indurimento
- Temperatura del calcestruzzo fresco 10 °C - 30 °C

I dati del cemento selezionato CEM III / A 52,5 R (Variodur 40) della Dyckerhoff AG, stabilimento di Neuwied, sono riportati nella tabella 4.

Il cemento è stato mescolato secondo l'ordine in un miscelatore ad alte prestazioni unendo i singoli componenti macinati, ovvero cemento e sabbia metallurgica, e successivamente prodotto direttamente "a fresco" nell'autocisterna. Durante il processo di produzione sono stati prelevati provini di cemento, analizzati nel laboratorio dello stabilimento della Dyckerhoff AG e successivamente è stato autorizzato il caricamento dell'autocisterna. Durante il tragitto dell'autocisterna dallo stabilimento del cemento a quello del calcestruzzo preconfezionato, i dati del cemento rilevati (granulometria laser e contenuto di SO<sub>3</sub>) sono stati trasmessi per e-mail al destinatario, in modo che prima dell'arrivo del veicolo nel secondo stabilimento i documenti richiesti dal committente fossero già presenti. La tabella 5 mostra i dati rilevati durante un intervallo di tempo di circa undici mesi.



Tab. 5: Valori caratteristici di granulometria laser e contenuto di SO<sub>3</sub>

	Variodur 40 CEM III / A 52,5 R		
	Parametro di posizione d' $\mu\text{m}$	n	SO <sub>3</sub> M.-%
<b>Media</b>	9,3	1,00	1,81
<b>Min.</b>	8,2	0,93	1,72
<b>Max.</b>	9,7	1,03	1,89

Le cifre mostrano l'elevata uniformità del cemento prodotto che rispettava il margine di fluttuazione stabilito nel parametro di posizione d' non solo dal punto di vista dei singoli componenti quali la sabbia metallurgica e il clinker di cemento Portland, ma anche nel cemento prodotto.

Il calcestruzzo è stato prodotto nella classe di consistenza F3 e controllato nello stabilimento del calcestruzzo preconfezionato e in quello dei prefabbricati in calcestruzzo secondo quanto previsto dal piano di garanzia della qualità. Dopo un sopralluogo visivo per la valutazione della consistenza, il calcestruzzo è stato gettato uniformemente nella cassaforma mediante un piatto di distribuzione. Per la compattazione sono stati utilizzati aghi vibranti disposti ad anello (vibratori ad immersione), che venivano sollevati in base alla quantità di calcestruzzo. L'imbocco maschio è stato ricoperto di calcestruzzo e compattato successivamente con i vibratori ad immersione. L'estremità del tubo è stata sfilata sull'altezza, per garantire la perpendicolarità e la regolarità superficiale delle superfici frontali importanti per i tubi di spinta. La superficie dell'imbocco maschio è stata coperta e i tubi sono stati lasciati maturare per almeno otto ore nello stampo dopo la gettata di calcestruzzo.

Le resistenze alla compressione del calcestruzzo dopo una maturazione di 28 giorni dietro automonitoraggio della E+F GmbH, Rohwerk Epiton, sono riportate nella fig. 6. La classe C 50 / 60 richiesta è stata raggiunta regolarmente in ogni momento della produzione.

Al termine del post-trattamento di 3 giorni, subito dopo il disarmo sopra il tubo è stata collocata una calotta. Quindi è stata immessa acqua sotto la calotta per ottenere un'umidità relativa minima dell'85%. Il tubo è stato rimosso dal manicotto inferiore dopo tre giorni dall'ultima procedura e i tubi sono stati conservati in verticale per almeno sei giorni. Per documentare le fasi di produzione, gli scostamenti effettivi, le parti annesse, i dati sui materiali, ecc., è stato redatto un documento di accompagnamento per ogni tubo. I tubi sono stati spediti dopo almeno quindici giorni. Prima di caricare i

Tab. 6: Dati tecnici dell'impianto di depurazione di Mönchengladbach - Neuwerk

Abitanti equivalenti	635.000 a.e.
Portata in tempo asciutto Qt	150.000 m <sup>3</sup> /d 6.250 m <sup>3</sup> /h
Portata acque miste Qm	288.000 m <sup>3</sup> /d
Livello di depurazione biologico	12.000 m <sup>3</sup> /h
Livello di depurazione meccanico	38.000 m <sup>3</sup> /h

veicoli ogni tubo è stato sottoposto ad un controllo finale e l'esito è stato annotato su ciascun documento di accompagnamento.

### Esperimenti di esternalizzazione della Niersverband

Poiché non è possibile ricreare in laboratorio tutti i tipi di attacchi chimici che possono verificarsi negli impianti di depurazione, parallelamente agli esperimenti in laboratorio della Dyckerhoff AG, si è tentato di effettuare gli esperimenti in un altro luogo. L'appalto per l'esecuzione di un programma completo di esternalizzazione è stato vinto dalla Niersverband. Nell'impianto di depurazione di Mönchengladbach Neuwerk (fig. 7 - 10) sono stati collocati prismi di malta con cementi diversi in gabbie appositamente realizzate in punti particolarmente esposti.

### Dati tecnici dell'impianto di depurazione di Mönchengladbach - Neuwerk

L'esperimento di esternalizzazione iniziato nel maggio del 2006 è il più completo del suo genere effettuato nelle reti fognarie tedesche:

- 420 provini
- 6 punti di esposizione (4 nella cella di gas/2 nella zona di ricambio dell'acqua)
- 1 deposito di controllo
- Durata dell'esperimento: 5 anni

### Esperimenti in laboratorio della Niersverband / istituto Wilhelm Dyckerhoff

L'esternalizzazione è accompagnata a brevi intervalli dai controlli seguenti specificati in un accurato programma di analisi:

- Analisi delle acque di scarico
- Analisi dei gas
- Modulo di elasticità
- Degrado
- Peso
- Resistenza alla compressione
- Analisi al microscopio elettronico a scansione della struttura della pasta di cemento
- Analisi Rietveld
- Porosimetria a mercurio

Le analisi chimiche dei gas e dell'acqua vengono eseguite normalmente dal laboratorio della Niersverband. Le altre analisi vengono effettuate mettendo a confronto i provini di controllo conservati nell'istituto Wilhelm Dyckerhoff, per ottenere anche nozioni sulle variazioni della struttura della pasta di cemento dei provini trasferiti.

In caso di attacco chimico con acidi (valori di pH = 3,5), i cementi d'altoforno prodotti a macinazione separata con farine di sabbie metallurgiche finissime ottimizzate dal punto di vista granulometrico hanno mostrato notevoli vantaggi rispetto alle formule ottimizzate con cementi Portland e additivi. Il potenziale di componenti solubili è molto più basso e le analisi al microscopio elettronico a scansione mostrano strutture della pasta di cemento estremamente compatte, quasi ceramiche (fig. 11 e 12).

### Torri di raffreddamento a tiraggio naturale senza rivestimento

Un ulteriore campo di applicazione per i nuovi cementi è stato creato quasi in contemporanea con la nuova costruzione di centrali elettriche a lignite e carbone fossile. Le moderne centrali elettriche non scaricano più i gas di combustione attraverso camini, ma mediante alte torri di raffreddamento a tiraggio naturale. La prima centrale dotata di questa tecnologia è stata la centrale elettrica alimentata a lignite di Niederaußem (BOA 2) fornita nel 2002 dalla RWE. Il sistema del calcestruzzo si basa sul principio della struttura più compatta e consente di ottenere calcestruzzi con valori di pH molto bassi altamente resistenti agli attacchi chimici. La formula brevettata nel frattempo è composta da circa 228 kg/m<sup>3</sup> di cemento Portland altamente resistente ai solfati, 65 kg/m<sup>3</sup> di cenere volante di carbone e 33 kg/m<sup>3</sup> di polvere di silice [5]. Con questa soluzione è stato possibile utilizzare come leganti anche la cenere volante di carbone e la polvere di silice insieme al cemento Portland. Poiché il contenuto minimo di cemento di 270 kg/m<sup>3</sup> per le opere in calcestruzzo armato non viene rispettato, questa formula necessita di un'approvazione tecnica. Sulla base dei risultati positivi dei numerosi esperimenti effettuati in laboratorio e sul campo, era ovvio iniziare una sperimentazione del cemento con farine finissime di sabbia metallurgica ottimizzate dal punto di vista granulometrico anche per calcestruzzi resistenti caratterizzati da valori di pH bassi = XA 3. Questo avvenne con Variodur 30 CEM II/B-S 52,5 R, un cemento normalizzato conforme ai requisiti della norma DIN EN 197-1, utilizzabile senza approvazione tecnica per opere in calcestruzzo armato e in calcestruzzo precompresso. La resistenza agli acidi è stata dimostrata presso l'ufficio di prova dei materiali (MPA) di Berlino-

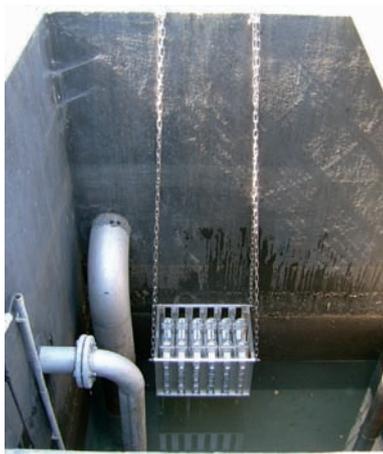


Fig. 9: Trasferimento nella cella di gas



Fig. 10: Posizioni dei punti di esposizione

- A** Afflusso totale
- B** Afflusso parziale Nord (diffusore condotta in pressione)
- C** Biofiltro griglia
- D** Dissabbiatore 1/2
- E** Preaddensatore II
- F** Pozzetto di drenaggio Biofiltro 2

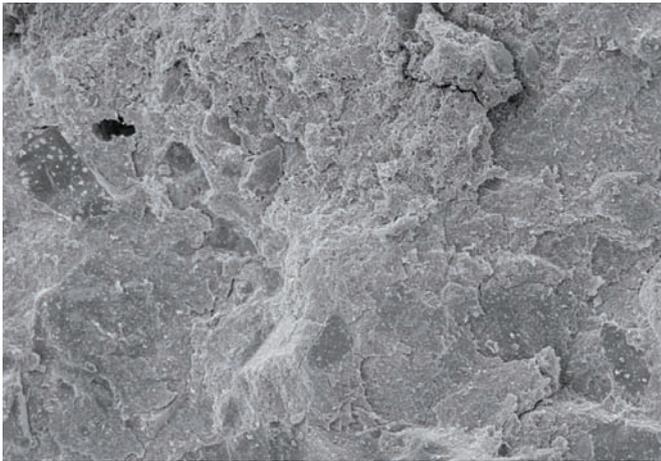


Fig. 11: Ingrandimento 100x dell'immagine del microscopio elettronico a scansione

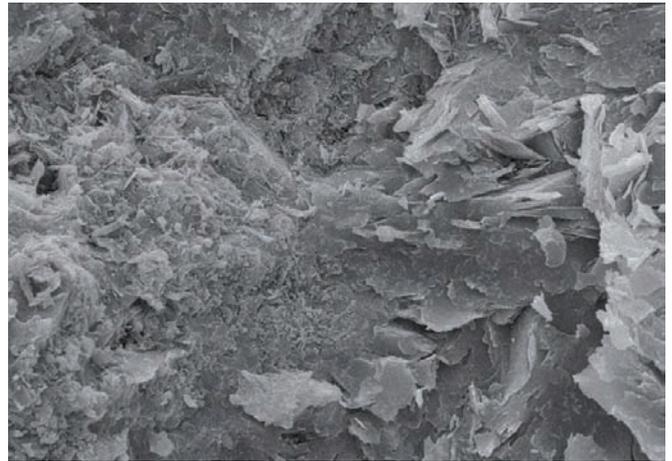


Fig. 12: Ingrandimento 2.500x dell'immagine del microscopio elettronico a scansione

Brandeburgo, in modo che la EON potesse approvare il sistema di calcestruzzo con Variodur 30 CEM II/B-S 52,5 R per la torre di raffreddamento a tiraggio naturale del nuovo edificio della centrale elettrica di Datteln.

### Prospettiva

Una durabilità elevata viene richiesta sempre più frequentemente non solo per gli elementi costruttivi qui descritti particolarmente sollecitati da sostanze aggressive, ma anche per gli elementi normali. I materiali da costruzione del futuro, come ad esempio il calcestruzzo iperresistente UHPC (Ultra High Performance Concrete), traggono il proprio spettro di caratteristiche da una struttura della pasta di cemento particolarmente compatta. Attualmente, questa struttura si ottiene solo a causa della sempre maggiore scarsità di polvere di silice in combinazione con cementi standard poveri di C3A, e talvolta solo con approvazione

tecnica. Questi sistemi di leganti richiedono anche un notevole lavoro in termini di dosaggio e garanzia della qualità, poiché le materie prime quali il cemento e la polvere di silice devono essere controllate sia singolarmente che nel complesso. In questo senso, è più semplice ottenere una struttura della pasta di cemento particolarmente compatta ottimizzando i componenti del cemento dal punto di vista granulometrico. Questo processo può avvenire, come illustrato nel contributo, mediante le finissime farine di sabbia metallurgica ottenute da smistamento separato e la successiva miscelazione con un cemento Portland. Il risultato è un cemento normalizzato che può essere dosato e lavorato senza problemi come qualsiasi altro legante in uno stabilimento di calcestruzzo preconfezionato. Durante la procedura di garanzia della qualità occorre controllare un solo componente del legante senza interagire con gli altri. Il nuovo concetto di leganti è variabile, ovvero consente di realizzare anche

altre combinazioni con farine finissime di sabbia metallurgica classificate in base alla grana e di clinker [5]. In questo modo si vengono a creare cementi normalizzati facili da lavorare con caratteristiche modificabili in modo mirato per produrre in modo sicuro calcestruzzi ad alte prestazioni.

### Bibliografia

- [1] Hillemeier, B.; Hüttl, R.: Säureresistenter Beton mit einstellbarer Festigkeit für den höchsten Kühlturm der Welt. Tagungsband 44. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage 2000.
- [2] Grabau, J.: Untersuchungen zur Korrosion zementgebundener Materialien durch saure Wässer unter besonderer Berücksichtigung des Schwefelsäureangriffs. ISBN 3-8265-0443-7, Shaker Verlag, Aachen, 1995.
- [3] Lohaus, L.; Petersen, L.: Hochleistungsbetone mit erhöhtem Säurewiderstand für den Kühlturmbau. Betoninformationen, Heft 5/6 2007, 47. Jahrgang, Verlag Bau+Technik GmbH, 2007
- [4] Ruhr Universität Bochum, Lehrstuhl für Baustofftechnik Projekt B 2-49-7-2006, „Beton mit erhöhtem Säurewiderstand für großformatige Betonrohre“ Bericht B 2-7 (unveröffentlicht)
- [5] Patentschrift DE 199 12 652 C 2
- [6] Deuse, T.; Schultz, W.; Strunge, J.: Spezialzemente für Hochleistungsbeton. BWI, Betonwerk International Nr. 1, Februar 2007



Fig. 13: Torri di raffreddamento a tiraggio naturale di Datteln

### ALTRE INFORMAZIONI



Dyckerhoff AG  
 Biebricher Straße 69, 65203 Wiesbaden, Germania  
 T +49 611 6760, F+ 49 611 6761040  
[info@dyckerhoff.com](mailto:info@dyckerhoff.com), [www.dyckerhoff.de](http://www.dyckerhoff.de)