

tecnologia

**LEVIGATO**  
Una spatola livella  
il calcestruzzo: un  
materiale  
modellabile da  
fresco, ma  
resistente una  
volta indurito.

# CALCEMENTO

# 1000

Autoriparante, mangiasmog,  
ultraresistente. Il **calcestruzzo**  
è sempre più **smart**. E cerca  
di limitare le emissioni di **CO<sub>2</sub>**.  
Con scoperte inattese.

di Vito Tartamella

## SFUMATURE DI GRIGIO

Ogni secondo, nel mondo, se ne producono quasi 8 mila tonnellate. È il materiale di cui sono fatti gli edifici, i ponti, le dighe. Nella storia ne sono state create 549 gigatonnellate: se fossero divise fra tutti gli abitanti della Terra, ciascuno ne avrebbe un cubo di quasi 3 metri di lato. È ubiquitario come la plastica, e come quest'ultima deve il suo successo al fatto d'essere modellabile appena pronto, ma resistente una volta indurito.

Parliamo del calcestruzzo (da non confondere col cemento: v. riquadro nelle pagine seguenti), il materiale da costruzione per eccellenza. Diventato – come la plastica – il simbolo dell'uomo che soffoca la natura: il calcestruzzo rappresenta quasi la metà del peso totale dei manufatti artificiali, secondo l'Istituto Weizmann (Israele). Ora, spinto dalla ricerca, questo materiale sta cambiando pelle. La stampa 3D lo ha liberato dalla necessità delle casseforme, i contenitori in cui prende forma: si possono stampare componenti cementizi direttamente nelle geometrie volute. Mentre quello tradizionale acquisisce prestazioni inedite: può illuminarsi (calcestruzzo fotoluminescente), degradare le sostanze inquinanti dell'aria (fotocatalitico), autoripararsi e segnalare in tempo reale ai tecnici, grazie a sensori, gli interventi di manutenzione necessari. E in futuro potrebbe persino catturare calore e generare energia.

Il calcestruzzo, infatti, vuole anche diventare sempre più ecologico, anzi, addirittura "carbon neutral" entro il 2050: una sfida epocale per un materiale che, da solo, produce l'8% delle emissioni globali di CO<sub>2</sub>. Se fosse un Paese, infatti, il calcestruzzo sarebbe il terzo più grande emettitore di gas serra dopo Cina e Usa. La ricerca sta tentando in tutti i modi di limitare questo trend. Anche perché questo materiale non ha alternative altrettanto valide e testate (v. riquadro alla fine).

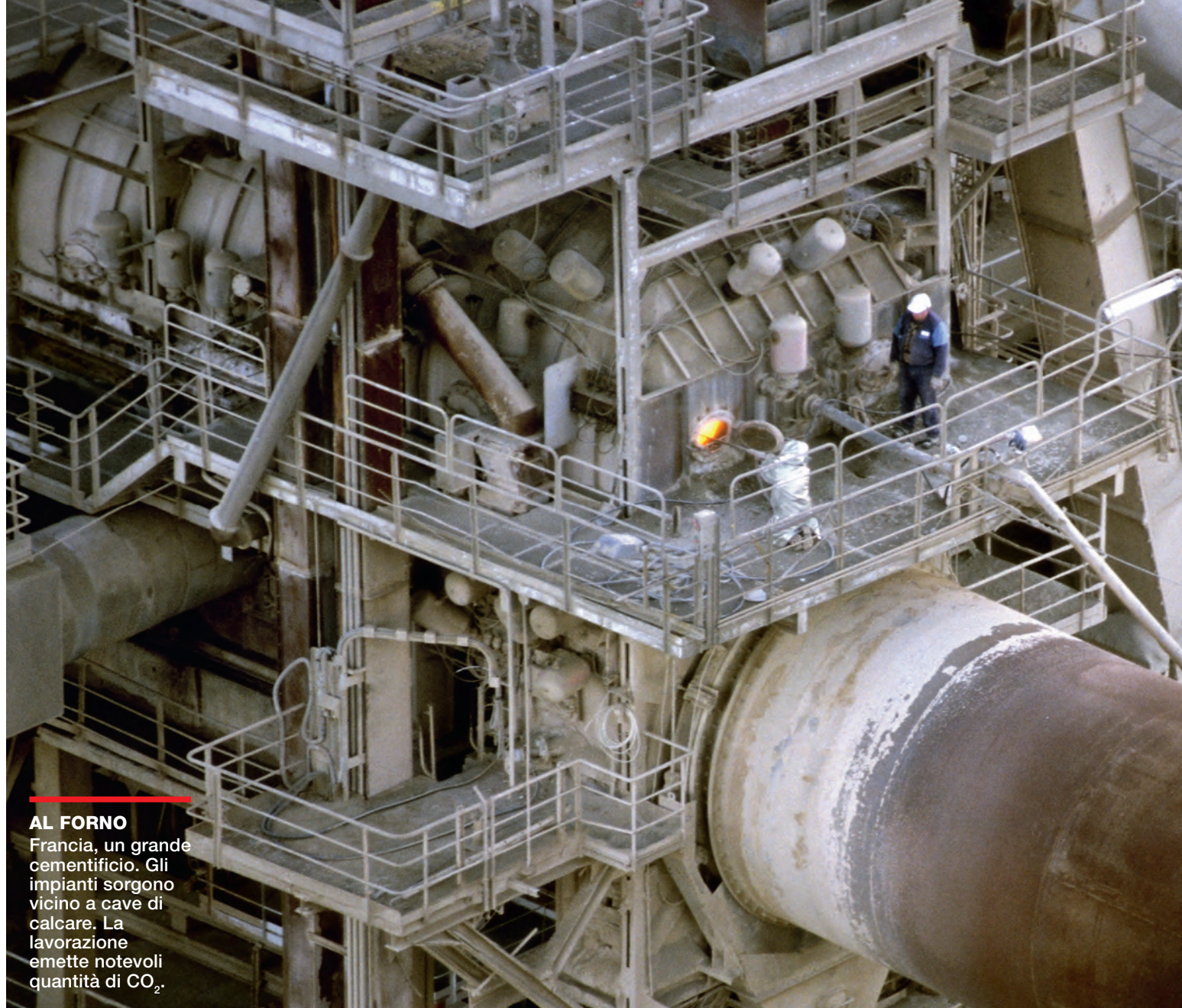
### ECONOMICO, MODELLABILE, RESISTENTE

Il calcestruzzo moderno fu inventato due secoli fa, nel 1824 in Inghilterra: il cemento Portland, un legante artificiale ottenuto cuocendo calcare e argilla in un forno ad alta temperatura. La reazione fa ottenere il clinker, un materiale che, unito all'acqua, diventa una pietra artificiale sempre più dura col tempo (v. infografica alle prossime pagine).

«Il successo del calcestruzzo», spiega Francesca Tittarelli, docente di scienza e tecnologia dei materiali all'Università Politecnica delle Marche, «consiste nella sua resistenza a compressione: può sostenere carichi elevati senza fratturarsi. Ma ha anche altre prestazioni importanti: costa poco, è facilmente modellabile allo stato fresco e, a differenza del legno, è resistente al fuoco (non brucia e non emette fumi tossici), è inerte (non è attaccabile da muffe, non marcisce), ha una buona resistenza all'acqua, è termoriflettente (la superficie chiara riflette il calore) ed è un isolante termico».

Fra i suoi limiti, la scarsa resistenza alla trazione, cioè alle forze orizzontali: «Per sopportare le scosse di terremoto, il calcestruzzo va rinforzato inserendo barre d'acciaio nel getto (calcestruzzo armato). L'altro suo punto debole è il degrado cui

## I Romani avevano scoperto la formula del cemento autoriparante



**AL FORNO**  
Francia, un grande cementificio. Gli impianti sorgono vicino a cave di calcare. La lavorazione emette notevoli quantità di CO<sub>2</sub>.

può andare incontro: il calcestruzzo è poroso, e questo favorisce l'infiltrazione d'acqua che può fessurarlo se congela, oppure di sali che corrodono le barre di rinforzo», aggiunge Paola Fabbri, docente di scienza dei materiali all'Università di Bologna.

### L'INGREDIENTE SEGRETO DEI ROMANI

Il cuore del calcestruzzo è il cemento, un legante idraulico, capace cioè di sviluppare proprietà adesive a contatto con l'acqua. Fu questo materiale che consentì agli antichi Romani di erigere grandi opere sopravvissute fino a oggi, grazie a un ingrediente speciale: la pozzolana, la cenere vulcanica estratta a Pozzuoli, ricca di minerali allumino-silicatici. Unita a calce e sabbia, dava vita al primo legante che si induriva quando entrava a contatto con l'acqua: i minerali vulcanici reagivano con la calce creando alluminosilicati di calcio idrati, che oggi sappiamo essere i responsabili dell'elevata resistenza del calcestruzzo. Grazie a questa cenere, che inviavano in tutte le province dell'Impero, i Romani poterono erigere la cupola del Pantheon, tuttora la più grande al mondo costruita in calcestruzzo non armato. Nel Medioevo la ricetta fu dimenticata: fu riscoperta nel Rinascimento, grazie al trattato *De architectura* dello scrittore dell'antica Roma Vitruvio.

Ma solo l'anno scorso, studiando le malte del Mausoleo di Cecilia Metella, sull'Appia antica a Roma, Admir Masic, docente di ingegneria civile al Mit di Boston, ha scoperto un altro, determinante ingrediente nel calcestruzzo dei Romani: grani di calce. Si pensava che fossero residui di miscele impure. Invece i Romani sapevano quel che facevano: miscelevano a caldo il calcestruzzo con una parte di calce viva che, reagendo con l'acqua, riscaldava la miscela. Se nel calcestruzzo, una volta gettato, si formavano crepe, quando vi penetrava l'acqua piovana, la calce reagiva subito cristallizzandosi in carbonato di calcio e riempiva la fessura. Da questa scoperta è nata una startup, Dmat, con sede anche in Italia, che vende un calcestruzzo autoriparante e prodotto con il 20% in meno di emissioni di CO<sub>2</sub>.

### EMISSIONI DA AZZERARE

A proposito di emissioni: perché la produzione del cemento ha un impatto così alto? Per due motivi: le reazioni chimiche coinvolte, e l'energia necessaria per attivarle. Il primo passo per fabbricare il cemento, infatti, è la calcinazione, cioè la cottura delle materie prime (tra cui il calcare) per ottenere la calce, che in natura non è disponibile in grandi quantità. La reazione chimica produce anidride carbonica (v. infografica).

L'altra rilevante fonte di CO<sub>2</sub> sono i forni per la cottura delle ▶

### CALCESTRUZZI "SMART"

- 1 Fotoluminescente:** assorbe energia solare di giorno e la riemette di notte. Usato per le piste ciclabili.
- 2 Mangiasmog (fotocatalitico):** grazie ai raggi ultravioletti abbatte le sostanze organiche e inquinanti.
- 3 Con dispositivi anti-Covid:** camici, mascherine e guanti di gomma nell'impasto lo rendono più resistente.
- 4 Autoriparante:** contiene sostanze in grado di reagire con l'acqua che si infiltra, formando cristalli che chiudono le fessure.
- 5 Drenante:** è permeabile e consente alla pioggia di raggiungere il terreno, aiutando a disperdere calore.
- 6 Vivente:** si ottiene mescolando cianobatteri fotosintetici con sabbia e idrogel.
- 7 Spaziale:** si possono ottenere blocchi resistenti mescolando pietrisco lunare o marziano, sale (dalle lacrime degli astronauti) e fecola di patate.





**FORME A PIACERE**  
Una stampante 3D edifica muri dosando il calcestruzzo uno strato per volta.

materie prime (calcare e argilla) che devono raggiungere 1.500 °C di temperatura: per farli funzionare occorre bruciare combustibili che emettono CO<sub>2</sub>. Così per ogni tonnellata di cemento prodotta, se ne produce una di anidride carbonica.

Che fare? La ricerca ha imboccato diverse strade. La prima, usare combustibili alternativi (non di origine fossile) per alimentare gli impianti: scarti di pneumatici, biomassa e rifiuti indifferenziati più plastica non riciclabile. Oggi in Europa coprono il 50% dell'energia termica: per il 2050 si arriverà al 90%.

#### MASCHERE, GAMBERETTI, PNEUMATICI

Un altro metodo è sostituire gli ingredienti del calcestruzzo con materiali più sostenibili, sia per il cemento sia per gli aggregati. «La ricerca ha testato soluzioni creative, come l'uso di scarti di lavorazione industriale (ceneri volanti dall'industria termoelettrica, fumo di silice dall'industria dei chip o loppa d'altoforno dalla produzione di acciai e ghise), per ridurre l'uso di cemento Portland», racconta Tittarelli. I ricercatori della Washington State University hanno sperimentato anche gusci di gamberetti, e quelli del Royal Melbourne Institute of Technology pneumatici triturati e i dispositivi di protezione anti-Covid (guanti, mascherine, camici): incorporati nelle matrici cementizie, aumentano dal 20 al 40% la resistenza alla compressione del calcestruzzo. E, aspetto non trascurabile, riciclano materiali difficili e costosi da smaltire: l'Università di Kitakyushu (Giappone) ha sperimentato anche i pannolini usati.

«Sono tutti modi per aggiungere fibre polimeriche, lunghe molecole che migliorano il comportamento a trazione dei conglomerati. Funzionano anche le fibre di cellulosa dai residui di carta igienica estratti dai depuratori», aggiunge Tittarelli. «Ma l'aggiunta di nuovi materiali può talvolta complicare lo smaltimento del calcestruzzo a fine vita».

Il nuovo ponte stradale San Giorgio di Genova, che ha sostituito il ponte Morandi crollato nel 2018, è stato costruito con un calcestruzzo ottenuto usando cementi di miscela con loppa d'altoforno (sottoprodotto della ghisa) che garantisce un'elevata resistenza e durabilità, «perché con il tempo chiude i pori del calcestruzzo ostacolando l'ingresso di agenti aggressivi», racconta Sergio Tortelli, responsabile soluzioni sostenibili di Italcementi.

A proposito di crolli, le cautele non sono mai troppe. Per questo si sono sviluppati diversi sistemi per monitorare la durabilità delle strutture: dai sensori annegati nel getto, fino all'uso di materiali conduttivi a base di carbonio per rendere più precisa la misura della resistenza elettrica, modificata dalla presenza di fessure, deformazioni o infiltrazioni. Intervenire in tempo reale, infatti, riduce i costi di manutenzione e i rischi.

#### EMISSIONI DA CATTURARE

L'uso di ingredienti o combustibili ecologici nel calcestruzzo, però, non sarà risolutivo nel limitare le emissioni di CO<sub>2</sub>. La via maestra è catturarla prima che sia immessa in atmosfera, per immagazzinarla allo stato liquido nelle fessure delle rocce del sottosuolo. Oppure può essere usata per produrre carburanti sintetici, reiniettata nel calcestruzzo (ne favorisce l'indurimento) o per altre procedure industriali: a Montalieu-Vercieu (Francia) la si usa per coltivare alga spirulina.

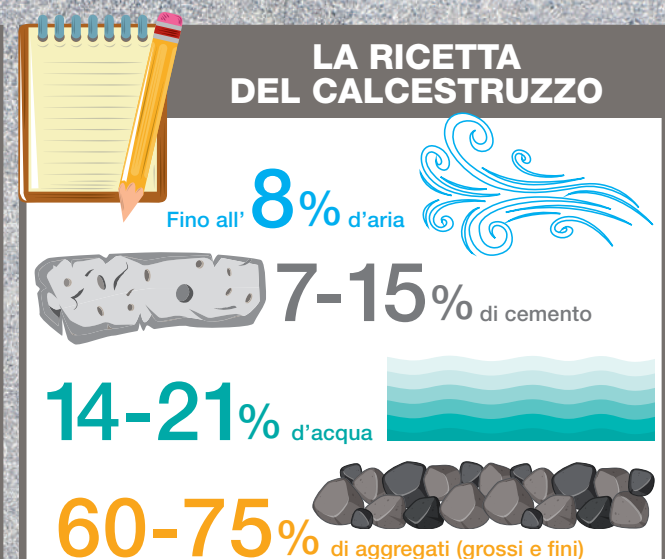
«La CO<sub>2</sub> dei cementifici può essere estratta in due modi: o utilizzando solventi a base di ammine, che l'assorbono, oppure attraverso l'ossicombustione, cioè bruciando i combustibili in ossigeno, procedura che emette CO<sub>2</sub> pura facilmente prelevabile e acqua. Ma sono tutti approcci da testare: prima del 2030 ▶

**I rifiuti (maschere Covid, pannolini) aumentano la forza del calcestruzzo**

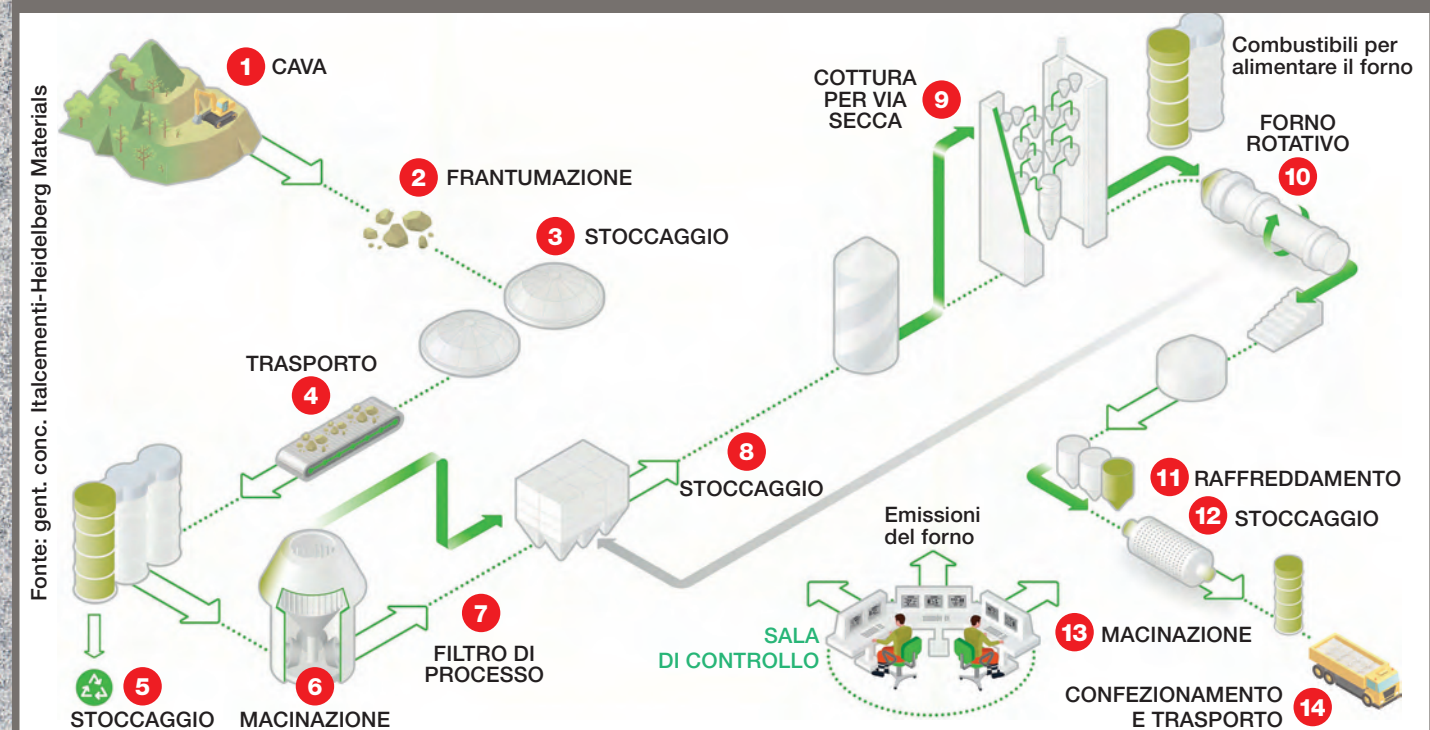
### CEMENTO? NO, CALCESTRUZZO

I termini "cemento" e "calcestruzzo" sono spesso usati come sinonimi: in realtà, però, il cemento è un ingrediente del calcestruzzo. Per essere più precisi, il cemento è un legante: un materiale che a contatto con l'acqua fa presa (perde gradualmente la sua lavorabilità) e indurisce (aumenta la sua resistenza meccanica). Il cemento è ottenuto dalla cottura in forno di calcare e argilla che formano una roccia artificiale chiamata "clinker"; al clinker, una volta macinato, è aggiunto gesso (2-3%), come regolatore del tempo di presa. Se il cemento è unito a inerti fini, produce la malta; se è miscelato a sabbia o ghiaia produce il calcestruzzo. Per usare una metafora, il calcestruzzo è come una torta di frutta: la farina è il cemento, la frutta sono sabbia e ghiaia. Ma mentre nella torta è il calore a modificare le caratteristiche dell'impasto, nel calcestruzzo è il cemento che, reagendo con l'acqua, lega il tutto in una pietra artificiale. L'indurimento continua per anni: il calcestruzzo diventa più forte man mano che invecchia.

### LA RICETTA DEL CALCESTRUZZO



### COME SI PRODUCE



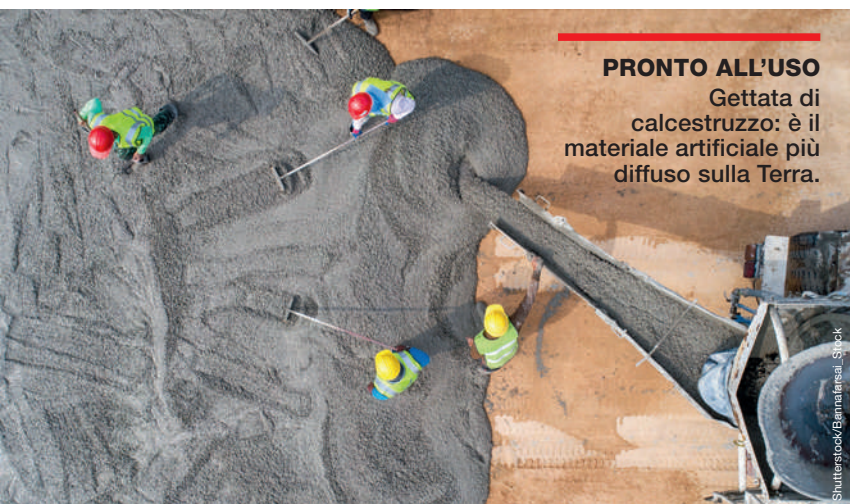
- 1 I cementifici sorgono vicino a cave di calcare, marna o gesso, che forniscono le materie prime necessarie. Possono occorrere piccole quantità di ferro, bauxite, scisto, argilla o sabbia per fornire gli ingredienti minerali extra, cioè ossido di ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), ossido di alluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e silice (SiO<sub>2</sub>).
- 2 - 5 La materia prima viene trasportata ai frantoi, frantumata e stoccata in pezzi. Alcune materie prime naturali sono sostituite da materiali recuperati da altri processi produttivi.
- 6 - 8 Le materie prime (calcare, sabbia e argilla) vengono mescolate e macinate finemente per produrre la "farina cruda". Un filtro di processo trattiene le polveri (e le emissioni del forno successivo), poi la farina viene stoccata.
- 9 La farina viene riscaldata a 950 °C in modo che il calcare (CaCO<sub>3</sub>) si trasformi in calce viva (CaO): questa fase, la calcinazione, produce il 35% delle emissioni di CO<sub>2</sub> del processo (il 50% è dovuto ai combustibili che fanno funzionare i

- forni successivi).
- 10 La farina riscaldata entra nel forno, dove le materie prime raggiungono i 1.450 °C. Il calore provoca reazioni chimico-fisiche che trasformano la farina in clinker, una roccia artificiale. Il forno è molto lungo per permettere le lente reazioni chimiche di cristallizzazione e aggregazione.
- 11 12 Poi il clinker viene raffreddato utilizzando grandi quantità di aria. In questo modo si creano i minerali che definiscono le prestazioni del cemento.
- 13 Al clinker viene aggiunto il 4-5% di gesso per controllare il tempo di presa. La miscela di clinker e gesso raffreddata viene macinata in una polvere grigia chiamata cemento Portland oppure può essere aggiunta ad altri minerali per diversi usi.
- 14 Il prodotto finale viene immagazzinato in silos per poi essere imballato in sacchi da 25 kg e trasportato.

# In Giappone creato il calcestruzzo **senza pori**: regge 4.700 tonnellate/cm<sup>2</sup>

sarà difficile che entrino nella routine», spiega Matteo Romano, docente di sistemi per l'energia e l'ambiente al Politecnico di Milano. La ricerca è in fermento: solo in Europa ci sono oltre 70 progetti sperimentali. Il più importante, in Italia, è Hercules, che prevede di iniettare nei pozzi esausti di gas sotto i fondali del Nord Adriatico la CO<sub>2</sub>, catturata da un impianto pilota.

L'aspetto critico di questi sistemi sono i costi di installazione e di gestione: «Non devono superare la carbon tax europea, circa 100 euro per tonnellata di CO<sub>2</sub> emessa, altrimenti il gioco non vale la candela», aggiunge Romano. «La vera differenza la faranno le infrastrutture per trasportare la CO<sub>2</sub>, compressa o liquida, con una rete di oleodotti, via nave o via terra». Tutti investimenti costosi, tanto che Cembureau, l'associazione europea del settore, chiede con urgenza gli aiuti di Stato per sostenerli. Anche per evitare che i cementi ecologici costino troppo rispetto a quelli tradizionali.



**PRONTO ALL'USO**  
Gettata di calcestruzzo: è il materiale artificiale più diffuso sulla Terra.

Intanto, le prestazioni del calcestruzzo migliorano grazie alla ricerca. Il gruppo giapponese Taiheiyō ha creato il più resistente al mondo, capace di sopportare 4.700 tonnellate per cm<sup>2</sup>: è il calcestruzzo senza pori (Pfc, Pore Free Concrete) ottenuto inserendo materiali di dimensione intermedia fra il fumo di silice e il cemento. Il Pfc, a prova di corrosione, è usato per rinforzare le dighe marine. E permetterà di costruire strutture prima impossibili, come ponti sospesi o grattacieli altissimi senza uso di barre d'acciaio. Una startup tedesca ha creato Magment, un calcestruzzo con particelle magnetiche riciclate: usato come pavimentazione stradale, con l'aggiunta di bobine di cavi elettrificati produrrà un campo magnetico che potrà ricaricare i veicoli elettrici che vi transitano.

## BATTERI RIPARATORI

Ancora più ambizioso il progetto "Te-co2ncrete", finanziato con 1,5 milioni di dollari dalla National Science Foundation statunitense: un gruppo guidato dall'Università del Texas ne approfondirà la struttura atomica e nanometrica, per ottenere un calcestruzzo termoelettrico a emissioni zero. Sarà cioè capace di assorbire CO<sub>2</sub>, ma anche di catturare il calore dell'ambiente e convertirlo in energia elettrica.

Altrettanto affascinanti i tentativi di ottenere un cemento "vivente". Gli scienziati del Politecnico dell'Università federale dell'Estremo oriente (Russia) hanno inserito nell'impasto una colonia di batteri alcalofili scoperti nel 1993, il *Bacillus cohnii*, che sopravvivono nei pori del cemento fino a 200 anni. Se l'acqua penetra nelle fessure, li risveglia, facendo loro produrre carbonato di calcio che si cristallizza riparando le fessure. E l'Università del Colorado è riuscita a ottenere "mattoni viventi", facendo crescere colonie di cianobatteri fotosintetici su un'impalcatura di sabbia e idrogel: hanno resistenza simile alla malta a base di cemento. In futuro il calcestruzzo si espanderà oltre la Terra: sarà impiegato sulla Luna e su Marte, per costruire alloggi che proteggano gli astronauti dagli asteroidi e dalle radiazioni spaziali. Ma trasportarlo dalla Terra costerebbe troppo. Perciò l'Università di Manchester ha creato un nuovo materiale, "Starcrete", un calcestruzzo con una resistenza alla compressione fra 700 e 900 kg/cm<sup>2</sup>. Si può ottenere mescolando rocce lunari o marziane, sale dalle lacrime degli astronauti e fecola di patate come legante. Spazio, l'ultima frontiera. Del cemento. **F**

## L'ALTERNATIVA? I GEOPOLIMERI

C'è un'alternativa ecologica al cemento? Una strada promettente sono i geopolimeri. «Sono polveri di ossido d'alluminio e di silicio che, reagendo con una soluzione alcalina, formano un polimero inorganico: una pietra artificiale che fa presa in 12 ore e si indurisce a temperatura ambiente in un processo a basse emissioni di CO<sub>2</sub>», spiega la professoressa Francesca Tittarelli. Creati dal chimico francese Joseph Davidovits nel 1979, hanno prestazioni meccaniche paragonabili al cemento. Basta trovare la giusta miscela: «In laboratorio abbiamo ottenuto geopolimeri con buona resistenza a compressione (450 kg/cm<sup>2</sup>) utilizzando gli scarti delle miniere di rame cilene. Ma si possono usare anche altri sottoprodotti industriali come ceneri volanti provenienti da centrali elettriche alimentate a carbone, polvere delle fornaci per cemento, cenere di reflui fognari e fango rosso dalla produzione di ossido d'alluminio». L'aspetto critico dei geopolimeri è l'uso di soluzioni alcaline,

che hanno un impatto ambientale perché sono caustiche: «Non è pensabile lasciarle maneggiare dagli operai di un cantiere. Per questo si stanno sviluppando premiscelati geopolimerici già pronti all'uso (basta aggiungere acqua) e nuovi additivi capaci di fluidificare l'impasto. È un campo promettente, ma in Europa le leggi limitano il loro uso: la ricerca galoppa in Australia, dove ci sono meno vincoli», aggiunge Tittarelli. A Brisbane è stato costruito il primo edificio multipiano al mondo assemblando blocchi prefabbricati in geopolimeri, la sede del Global Change Institute dell'Università del Queensland's. E l'aeroporto di Toowoomba Wellcamp, piste comprese. «Ci sono applicazioni che impiegano geopolimeri», conferma Tortelli di Italcementi, «ma allo stesso tempo esistono riserve dovute alla mancanza di dati storici sul loro comportamento nel lungo periodo in strutture reali. E questo, nel campo delle costruzioni, è un aspetto fondamentale».