

Rendere Sostenibile l'Insostenibile: Cosa Aspetta la Filiera del Calcestruzzo nel Quadro del Rispetto degli Accordi sul Clima di Parigi (2015)

Michel di Tommaso – Direttore IMM SA / Consulente internazionale

Da professionista attivo da un ventennio nell'ambito della progettazione, della specifica, delle prove ed indagini sul calcestruzzo, ho cominciato un bel po' di anni fa a confrontarmi con l'impatto che l'industria in cui sono coinvolto ha sul cambiamento climatico.

Il peggioramento repentino delle condizioni climatiche a scala globale di cui siamo tutti testimoni e l'indiscutibile e dimostrata dipendenza dell'incremento della concentrazione dei gas serra (nello specifico CO₂) dalle attività antropiche, dovrebbero aumentare il nostro livello di consapevolezza sull'impatto che ognuno di noi ha sul cambiamento climatico, sia come individui che come membri della comunità degli ingegneri civili.

Dovremmo infatti essere tutti consci che la nostra professione ha a che fare con processi responsabili per la produzione di un volume di emissioni di CO₂ antropica secondo solo ai combustibili fossili. Dovremmo quindi chiederci cosa significa, all'atto pratico per la nostra filiera, centrare gli obiettivi di neutralità del ciclo della CO₂ fissati per il 2050 dagli accordi di Parigi del 2015.

In effetti, dovremmo anche chiederci quanto fattibile nella pratica sia rendere sostenibile l'insostenibile, e dovremmo anche porci qualche domanda su quali siano gli strumenti disponibili per questa transizione, cosa ci manca, se e quanto complesso sarà raggiungere gli obiettivi e quali sono, soprattutto, i principali ostacoli al loro raggiungimento.

Quanto segue è quindi una revisione critica (ma lungi dal volere essere esaustiva) del tema mirata a rispondere ad alcune di queste domande da parte di un professionista che dedica buona parte della sua carriera alla tecnologia del calcestruzzo ed ha avuto la fortuna di confrontarsi con sfide lavorative nei cinque continenti osservando ed elaborando quindi le notevoli differenze tecniche e di retroterra culturale che si incontrano nella nostra sfera professionale (che comprende: progettisti, imprese, direzioni lavori, committenti, laboratori, fornitori, etc.)

CALCESTRUZZO SOSTENIBILE: UNA CONTRADDIZIONE IN TERMINI?

È un dato di fatto incontrovertibile che il calcestruzzo sia stato il materiale da costruzione più di successo del 20° secolo, ed i primi vent'anni del 21° secolo non sembrano indicare nessuna inversione di tendenza. Stanti le sue peculiari proprietà, la "pietra liquida" può essere modellata allo stato fresco in innumerevoli forme, una volta indurita, fornisce protezione all'armatura e, grazie alla sua omogeneità ed isotropia, trasmette/dissipa i carichi. Per questi motivi annualmente produciamo **decine di miliardi di tonnellate** di calcestruzzo a scala globale.

Tuttavia, considerato che il processo di produzione del cosiddetto Cemento Portland¹ è un'industria altamente inquinante per quanto concerne l'immissione di CO₂ nell'aria, seconda solo a quella dei combustibili fossili, dovremmo essere molto cauti nel ricevere i proclami di presunta sostenibilità dei processi manifatturieri del cemento Portland che ogni tanto emergono dalla comunità.

Infatti, un'industria che per ogni tonnellata di clinker prodotto introduce in atmosfera tra 0.60 e 0.90 tonnellate di CO₂², non può certamente definirsi *realmente* sostenibile, ma d'altro canto, con le tecnologie disponibili al giorno d'oggi, non abbiamo molte alternative all'aggiunta di cemento Portland per produrre la pietra liquida ai ritmi e volumi richiesti annualmente dall'industria. Questo è il calcestruzzo come oggi noi lo conosciamo: un sistema multifase liquido allo stato fresco che necessita dell'idratazione del cemento Portland per fare presa ed indurire.

¹ Cemento che contiene circa il 95% di clinker prodotto per combustione ad alta temperatura del calcare

² A dipendenza dei paesi e tipologia di cemento prodotto

Ci sono certamente delle soluzioni promettenti, come i calcestruzzi alcali-attivati³, le quali sono tuttavia ancora lontane dal diventare applicazioni industriali di larga scala su, per esempio, progetti infrastrutturali. E la ragione (o, meglio, una delle ragioni) è semplice: nessun sostituto innovativo del calcestruzzo sarà mai accettato se non è stato normalizzato prima di tutto, e se manca di esempi di applicazioni in contesti simili. Quale committente si assumerebbe oggi la responsabilità di costruire le sue strutture con materiali innovativi le cui proprietà meccaniche e di stabilità chimica e volumetrica non sono mai state messe alla prova in contesti realistici e con periodi di osservazione sufficientemente lunghi?

In altre parole quindi, il cemento Portland resterà con noi ancora per qualche decennio. Il cemento Portland agisce come fase singola che idrata, va in presa ed indurisce nel calcestruzzo “convenzionale” e/o agisce come catalizzatore di reazioni pozzolaniche multifase che coinvolgono la presa ed indurimento di materiali cementizi supplementari come le ceneri volanti e la loppa. Definiremo questi materiali come: aggiunte minerali.

Quindi anche se oggi non possiamo certo esaltarci troppo in merito alla sostenibilità della produzione del cemento Portland, possiamo comunque discutere criticamente sui modi in cui il calcestruzzo può essere reso più sostenibile, da subito, diminuendogli per quanto possibile l'impronta ecologica⁴, in modo da allinearsi agli obiettivi di medio termine definiti dagli accordi di Parigi.

Le due tappe fondamentali del processo di raggiungimento della neutralità della CO₂ secondo gli accordi di Parigi sono il 2030 (dimezzamento, sul medio termine, dei volumi attuali di CO₂ immessi annualmente) ed il 2050 (neutralità), e la produzione di calcestruzzo non è certo in diminuzione, anzi. Quindi, invece di focalizzarsi su scenari utopici dove il calcestruzzo 2.0 a ciclo della CO₂ chiuso, ha rimpiazzato in pochi anni il calcestruzzo che conosciamo oggi, dovremmo pragmaticamente pensare che ogni innovazione tecnologica che fosse introdotta in questi anni inerente al calcestruzzo 2.0 diventerebbe applicabile a livello industriale solo dopo lunghissime ed elaborate procedure burocratiche che coinvolgono commissioni tecniche nazionali, enti di normazione, etc.

Definiamo il calcestruzzo 2.0 come un nuovo tipo di conglomerato liquido allo stato fresco che va in presa ed indurisce tramite alcali-attivazione o calore o altri meccanismi, *senza* l'aggiunta di cemento Portland.

Quindi, una volta che il calcestruzzo 2.0 fosse anche eventualmente approvato sotto il profilo tecnico-scientifico, i codici di progettazione dovrebbero essere aggiornati/modificati per permettere agli ingegneri di progettare con questo materiale innovativo, mettendoli anche in grado di specificarne le proprietà e definire le metodologie di prova e verifica.

Ed alla fine di tutto il processo di cui sopra, ci sarebbe anche bisogno di committenti audaci e coraggiosi che decidono di essere le cavie per il cambiamento, affidando al calcestruzzo 2.0 la costruzione delle loro infrastrutture, nonostante ci sarà, all'inizio, una scarsissima conoscenza delle leggi costitutive fondamentali e quindi una relativa incognita sulla riposta di questi materiali sul medio e lungo termine in esercizio.

Da questa breve introduzione possiamo concludere che saremmo naïve a pensare che, siccome il calcestruzzo come lo intendiamo oggi non è certo il candidato per costruire un futuro carbon-neutrale, dovremmo rimpiazzarlo al più presto possibile con il calcestruzzo 2.0. Perché “il più' presto possibile”, nel mondo reale, potrebbe vuol dire in effetti decenni!

Allora, sviluppare il calcestruzzo 2.0 è un obiettivo di lungo termine (2050 ed oltre) che dobbiamo in ogni caso iniziare seriamente a perseguire da subito, mentre cerchiamo però **già da oggi** di tamponare l'emorragia di CO₂ dell'industria della produzione del cemento riducendogli al massimo l'impronta climatica con la sua sostituzione **parziale** con materiali cementizi alternativi sostenibili. Diciamo parziale perché la stragrande maggioranza delle aggiunte minerali in uso non induriscono da sole, necessitando del cemento Portland come catalizzatore.

³ Chiamato anche calcestruzzo geo-polimerico

⁴ Inglese: carbon footprint

EMISSIONI E SERBATOI: UN EQUILIBRIO COMPROMESSO

Le emissioni di CO₂ possono essere divise in emissioni da sistemi naturali, oppure emissioni antropiche. Emissioni naturali includono sorgenti come: foreste, incendi, oceani, paludi, permafrost, vulcani di fango, vulcani e terremoti.

Le emissioni antropiche contavano per il circa il 55% del globale delle emissioni della CO₂ nel 2016. Il sequestro naturale del carbonio attraverso serbatoi naturali (piante e oceani) bilancia del tutto soltanto le emissioni naturali, il che significa che ogni aggiunta extra di CO₂ rende il sistema sbilanciato con un accumulo di CO₂ nell'atmosfera. Nel nostro caso le aggiunte extra sono, appunto, quelle antropiche.

Inoltre, di pari passo con la recente crescita in frequenza ed intensità degli incendi boschivi estivi in regioni come gli USA occidentali, la Siberia, la Europa meridionale etc., l'equilibrio naturale tra emissioni e serbatoi è destinato a sbilanciarsi ulteriormente con un aumento di CO₂ prodotta anche da sistemi naturali che è maggiore della loro capacità di assorbimento. Quindi, quelli che erano serbatoi naturali (le foreste) diventano essi stessi emettitori. Con il progressivo deterioramento delle foreste si rende maggiormente disponibile CO₂ per essere assorbita dagli oceani.

Una parte della CO₂ assorbita dagli oceani è essenziale per il sostentamento degli organismi a guscio calcareo. La concentrazione di equilibrio della CO₂ negli oceani è sempre stata tale, almeno negli ultimi 12'000, anni da favorire la deposizione del calcare. Ma se la concentrazione cresce, le acque diventano acide per aumento della concentrazione di acido carbonico ed i calcari diventano instabili sciogliendosi, mettendo a rischio interi ecosistemi quali le barriere coralline e mettendo a disposizione del sistema oceanico un eccesso di CO₂. Questo eccesso favorisce, oltre alla acidificazione, anche la proliferazione di alghe unicellulari che traggono sostentamento dalla CO₂ a sfavore però della ossigenazione degli ambienti in cui proliferano, che diventano quindi anossici e mortali per altre specie viventi.

La CO₂ atmosferica è rimasta stabile a circa 280 ppm per tutto l'Olocene⁵. Durante questo periodo relativamente stabile l'umanità è fiorita in condizioni ambientali prevedibili (le famose stagioni di una volta) che hanno permesso di programmare raccolti, colonizzare nuove nicchie, etc. Proprio la stabilità di questo periodo ha culminato nella prima rivoluzione industriale dei primi decenni del 19° secolo, seguita dal boom economico successivo al termine del secondo conflitto mondiale.

I modelli previsionali climatici di lunga durata di cui disponiamo oggi richiedono un dimezzamento della concentrazione della CO₂ del 50% entro il 2030, e la neutralità al ciclo del carbonio entro il 2050 per contenere l'aumento della temperatura di massimo 2.0°C entro il 2100 (ma con un obiettivo di non superare 1.5°C). Questo obiettivo è stato sancito dagli stati che hanno aderito agli accordi di Parigi del 2015.

Mancare questi obiettivi vorrebbe dire raggiungere un potenziale punto di non ritorno, da cui le risposte del sistema climatico diventano marcatamente non lineari facendo diventare i nostri modelli poco robusti sotto il profilo previsionale.

Se infatti lo stare dentro un incremento di 1.5°C permette in qualche modo di attenderci risposte lineari e prevedibili sul lungo termine, il superamento di questo limite potrebbe condurre ad un comportamento del clima di tipo caotico⁶. In altre parole quelli che oggi prevediamo essere gli scenari peggiori per i prossimi decenni sulla base degli input dei modelli climatici attuali, potrebbero in realtà essere gli *scenari migliori* di uno spettro di eventi estremi che potrebbero anche includere la riduzione irreversibile dell'habitat di *homo sapiens* a causa di calore estremo persistente in alcune zone geografiche oggi abitabili, l'innalzamento estremo del livello marino, eventi climatici estremi sulle zone costiere (onde di maree anomale, uragani), geo-pericoli etc. Senza contare, in tutto questo, l'incertezza legata alla, del tutto possibile e non prevedibile, manifestazione nei prossimi decenni di eventi naturali quali super-eruzioni vulcaniche su scala globale, che nulla hanno a che vedere con il cambiamento climatico, ma che ad esso contribuiscono immettendo in aria in pochi giorni quantità enormi di gas serra. Ovvero non ci sarebbe limite al peggio se, oltre ad esserci già fatti molto male da soli nell'uso smodato delle risorse

⁵ Per approssimativamente 12,000 anni

⁶ Nella sua accezione matematica: piccole variazioni nei valori di ingresso (input) portano a fortissime incertezze nei valori di uscita (output)

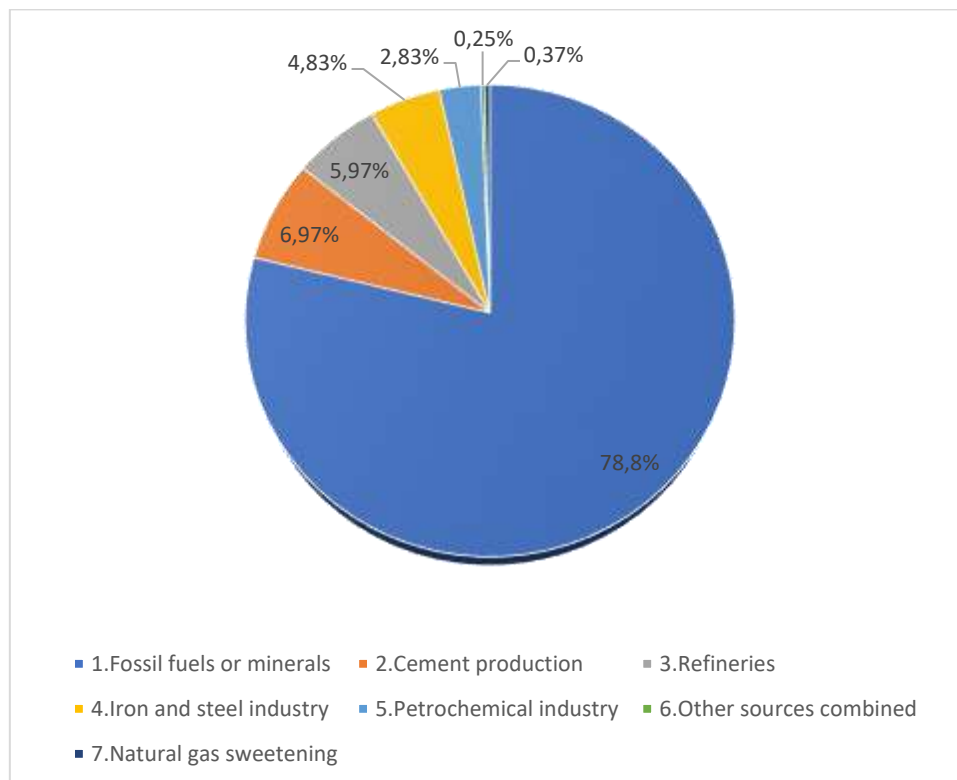
naturali negli ultimi 200 anni, ci si aggiungessero anche fenomeni naturali catastrofici a scala globale da qui a fine secolo.

EMISSIONI ANTROPICHE

Sono stati identificati più di 7500 grandi emettitori⁷, ma soltanto una piccola frazione di questi contribuisce a circa il 99.6% delle emissioni antropiche

Questi sono riportati in figura 1. La filiera dei combustibili fossili è di gran lunga, con il suo 78.8%, il principale contribuente delle emissioni antropiche, seguito dall'industria cementiera (6.79%), raffinerie (5.97%) e dalla produzione siderurgica (2.83%).

Figura 1.

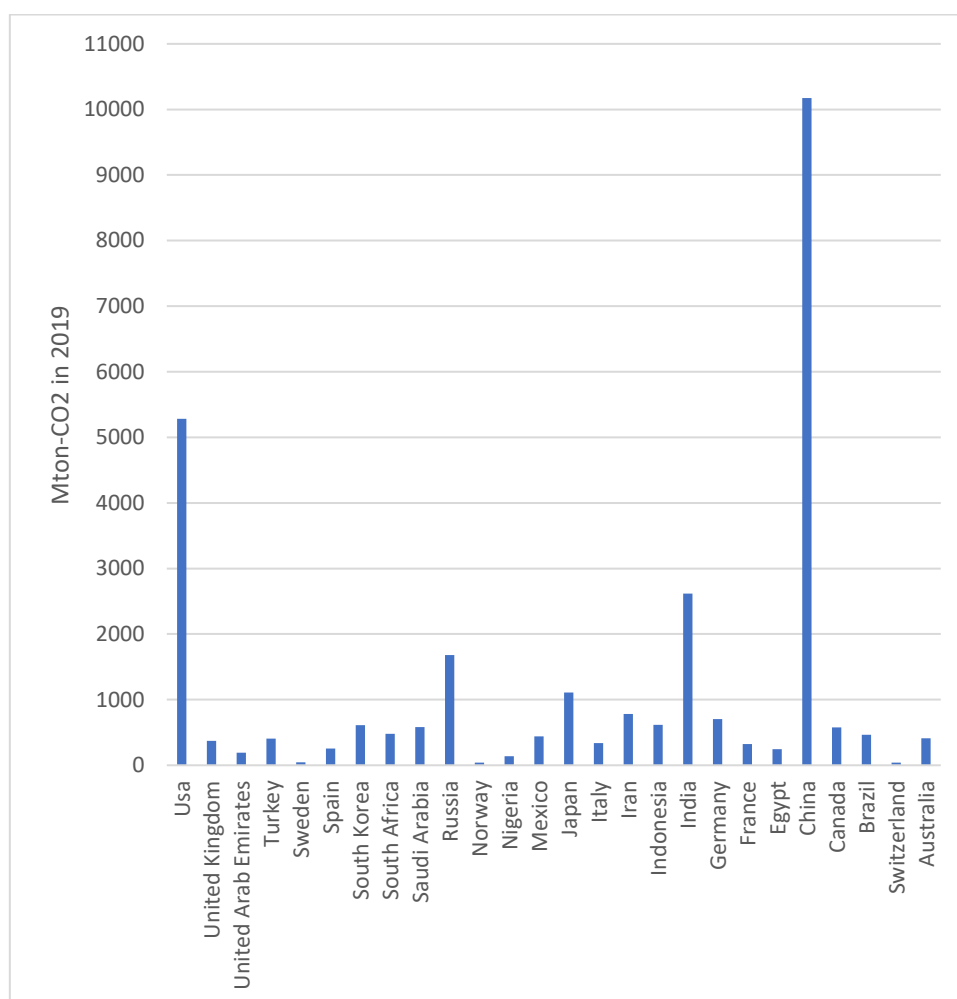


Il grafico in figura 2 confronta le emissioni nel 2019 (esprese in milioni di tonnellate, Mton) pubblicato da <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions> per alcune nazioni industrializzate del primo mondo e delle economie emergenti. Queste nazioni, vuoi per il fatto di essere fortemente industrializzate (quali: USA, Giappone, Australia e gli stati della comunità europea, per esempio), oppure perché sono soggette ad una forte espansione demografica possono essere prese come esempi di quanto contribuiscono singolarmente alle emissioni annuali di CO2.

Possiamo osservare che la Cina, seguita dagli USA, India, Russia e Giappone conducono la classifica con oltre 1.000 Mton di CO2 prodotta annualmente nel 2019. La Turchia ed Iran, che non hanno nemmeno ratificato i patti di Parigi peraltro, sono anch'esse tra i principali contribuenti alle emissioni di CO2 secondo quanto presentato in figura 2.

⁷ Sopra 0.1 Mton

Figura 2.



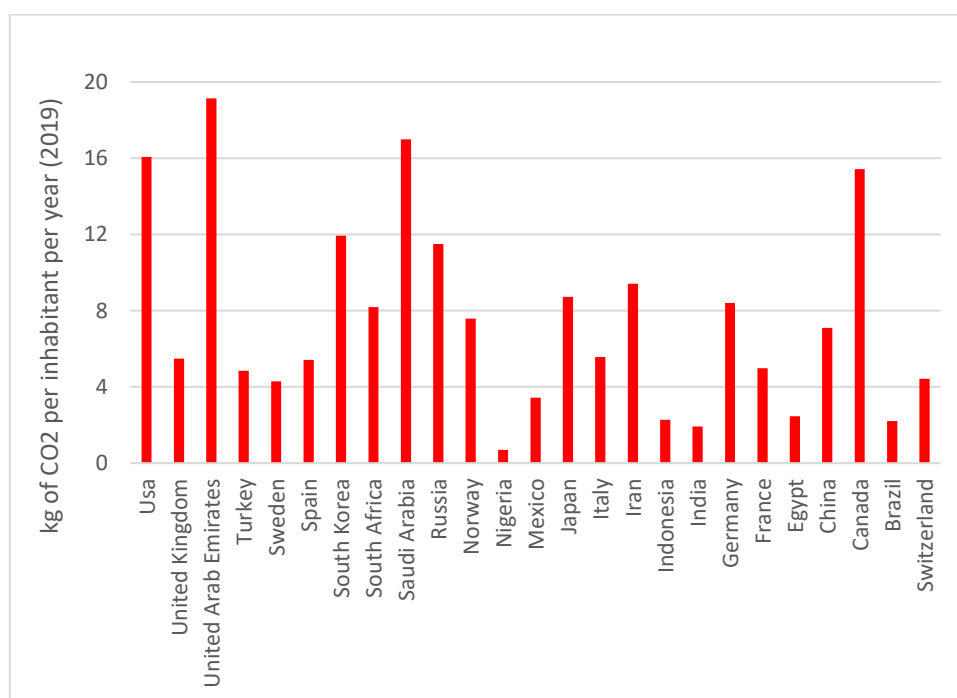
Otteniamo uno scenario un po' diverso invece se normalizziamo le emissioni di CO2 per abitante dividendo la produzione annuale per la popolazione censita al 2019 in queste stati (fonte: <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>).

I risultati sono riportati in figura 3. Osserviamo che l'impronta ecologica per abitante per anno più alta è quella degli USA con una popolazione di 329,064,917 abitanti e che questa è doppia ed addirittura otto volte quella della Cina ed India rispettivamente, nazioni con approssimativamente 1.5 miliardi di abitanti.

È anche interessante notare che due nazioni con popolazione confrontabile quali Canada (37,411,047) ed Arabia Saudita (34,628,528) sono in cima alla classifica vicine agli USA. Ancora più interessante risulta il fatto che gli Emirati Arabi Uniti, che hanno una popolazione di soli 9,977,529 abitanti, hanno una produzione di CO2 annuale per abitante superiore agli USA. La Svizzera, che per numero di abitanti (8,591,365) è confrontabile agli Emirati possiede un'impronta ecologica che è cinque volte inferiore per esempio.

Per quanto concerne le nazioni della comunità Europea (Italia inclusa) osserviamo che le emissioni pro-capite si attestano sui 4.0 e 8.0 kg/CO2/abitante/anno.

Figura 3.



RENDERE SOSTENIBILE L'INSOSTENIBILE

Per poter raggiungere gli obiettivi di Parigi dovremmo considerare che, mediamente, ogni contribuente di tipo antropico deve essere ridotto di almeno la metà entro il 2030 e diventare carbon-neutrale entro il 2050. Vediamo dove siamo con il calcestruzzo.

Dal momento che il clinker è prodotto dalla combustione del calcare (CaCO_3) per produrre calce (CaO) ed anidride carbonica, e dal momento che la CO_2 prodotta nel processo non è riutilizzata per produrre nuovo clinker, fino a che il cemento sarà prodotto in questo modo, la sua impronta ecologica non diminuirà.

Abbiamo visto che la produzione di cemento è un importante contribuente alle emissioni di CO_2 antropica, seconda solo ai combustibili fossili, trasporti compresi. Ovviamente il calcestruzzo è prodotto e trasportato con l'ausilio di combustibili fossili che si aggiungono quindi all'impronta ecologica dei suoi componenti, ma qui ci soffermeremo solamente sull'analisi dell'impatto dei componenti del calcestruzzo. I processi corollari di miscelazione, trasporto, messa in opera etc. dovranno, ovviamente, perseguire gli stessi obiettivi degli accordi di Parigi.

Un esempio d'impronta ecologica per alcuni processi associati alla produzione del calcestruzzo è il seguente:

- Impianto di betonaggio: $0.18 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$
- Betoniera (agitatore): $0.07 \text{ kg CO}_2/\text{km}$
- Pompa: $0.74 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$
- Vibratore: $0.04 \text{ CO}_2 \text{ kg}/\text{m}^3$

Se l'obiettivo è quello di ridurre del 50% le emissioni antropiche, dobbiamo di conseguenza ridurre le emissioni per ognuno dei contribuenti della figura 1. Alcuni settori potrebbero vedere riduzioni di più del 50% ed altri meno, ma in media ogni contribuente dovrebbe ridurre le emissioni in modo che, globalmente, esse siano meno del 50% delle attuali entro il 2030, per raggiungere la neutralità al ciclo della CO_2 entro il 2050.

Ci chiediamo quindi come possiamo rendere più sostenibile un materiale prodotto con un componente (il cemento Portland) che è uno dei principali contribuenti alle emissioni globali di CO_2 .

L'impronta ecologica di ognuno dei componenti del calcestruzzo può essere trovata in varie pubblicazioni sul tema. La tabella 1 riporta un sommario dei valori rappresentativi per cemento, aggregati etc. presenti in letteratura. L'impronta si esprime come kilogrammi di anidride carbonica richiesti per la produzione di un kilogrammo di componente.

Prenderemo qui in considerazione soltanto le aggiunte minerali quali la loppa d'altoforno granulata, un sottoprodotto dell'industria siderurgica, e le ceneri volanti, un sottoprodotto della combustione del carbone nelle centrali termiche e di alcuni tipo di materia organica selezionata negli inceneritori, come esempi di aggiunte minerali che possono ridurre l'impronta ecologica del calcestruzzo.

Altri materiali a basso impatto sulla CO₂ e con simili proprietà come l'argilla calcinata (metakaolino) o la microsilice (sottoprodotto della produzione con arco voltaico) possono sostituire solo fino a massimo il 20% del cemento (la prima) o il 10% (la seconda).

C'è poi un gran numero di aggiunte minerali che sono stati studiate nel corso degli ultimi anni come surrogati promettenti del cemento, ma, siamo realisti, prima che possano diventare materiali oggetto di specifica ed approvati dalle commissioni normative nazionali, dovremo aspettare ancora qualche decennio. Dopo tutto il calcestruzzo autocompattante, di cui abbiamo iniziato a parlare verso le fine degli 80' del secolo scorso, è stato normalizzato nelle specifiche e codici di progettazione non prima che trascorressero 25-30 anni, ed ancora oggi alcuni professionisti del settore guardano a questo calcestruzzo con sospetto, come se fosse ancora una novità.

Componente	CO₂/kg	A	B	C	D
<i>Cemento Portland</i>	<i>0.90</i>	380	190	95	247
<i>Loppa</i>	<i>0.083</i>	0	190	285	0
<i>Ceneri volanti</i>	<i>0.008</i>	0	0	0	133
<i>Aggregati</i>	<i>0.0045</i>	1800	1800	1800	1800
<i>Kg-CO₂ / m³</i>		350	195	117	231
Riduzione rispetto alla miscela di riferimento			-44%	-67%	-34%

La tabella 1 considera la composizione di una ipotetica miscela di calcestruzzo, considerato che probabilmente il calcestruzzo con resistenza caratteristica di 40 MPa è, a livello globale, quello più usato, e ad essa è associato un dosaggio di cemento di 380 kg/m³. Si potrebbe argomentare che questo dosaggio è arbitrario e non si avrebbe torto, ma qui usiamo un dosaggio esemplificativo per fare confronti relativi e non assoluti ed abbiamo messo a frutto la nostra esperienza professionale con svariati retroterra tecnici e culturali utilizzati per fare calcestruzzo nei cinque continenti. Questa quindi sarà la nostra miscela di riferimento che ha, come si vede in colonna A della tabella 1, un'impronta di 350 kg-CO₂/m³, il che vuol dire che per ogni m³ di calcestruzzo di questo tipo prodotto con 100% di cemento Portland si producono 0.350 ton di CO₂.

Le colonne B, C e D presentano delle opzioni dove una parte del cemento Portland è sostituito sia da loppa che da cenere volante. In colonna B abbiamo una sostituzione del 50% con loppa, nella colonna C abbiamo una sostituzione di loppa del 75% ed infine, nella colonna D, abbiamo una sostituzione del 35% con le ceneri volanti.

Osserviamo innanzitutto che con sostituzioni di loppa comprese tra il 50% ed il 75%, l'impronta ecologica delle miscele risultanti è più che dimezzata rispetto alla miscela di riferimento. Osserviamo anche che la sostituzione con il 35% di cementi volanti non permette lo stesso risultato.

Quindi se massimizziamo la sostituzione di cemento Portland con un volume sufficientemente alto di aggiunte minerali abbiamo intrapreso un passo importante verso il dimezzamento dell'impatto della miscela di riferimento per raggiungere l'obiettivo fissato dagli accordi di Parigi entro il 2030 su un materiale il cui consumo, a livello globale, è secondo solo a quello dell'acqua. Da quanto visto però la minima sostituzione applicabile dovrebbe essere non inferiore al 50%-60%.

Loppa e ceneri volanti sono già disponibili sul mercato globale sia come aggiunte minerali separate da aggiungere al calcestruzzo durante il processo di miscelazione che come aggiunte primarie introdotte durante il processo di manifattura del cemento Portland. In ambo i casi la loro aggiunta al posto del cemento comporta una riduzione automatica dell'impronta ecologica per ogni tonnellata di cemento composito prodotta.

La norma EN 197-1 classifica i cementi sulla base della loro composizione e comprende sia cementi alla cenere (CEM II/B-V) che ne contengono tra il 21% e 36%, che cementi alla loppa (CEM III/A, B, C) che ne contengono tra il 36% e 95% rispettivamente.

Nonostante l'industria del carbone è destinata, necessariamente a scomparire nei prossimi decenni a causa delle pressioni della comunità internazionale di allentamento dalla dipendenza di combustibili fossili, è tuttavia irrealistico pensare che le ceneri non saranno disponibili anche nell'intervallo temporale dal 2030 al 2050, ed a maggior ragione la loppa.

Inoltre, cosa molto importante, sia la loppa che la cenere sono aggiunte minerali le cui proprietà sono state normalizzate da anni a livello internazionale da vari standard come ASTM (americani), EN (europei), BS (anglosassoni), CSA (canadesi), IS (indiani), AS (australiani), etc.

Abbiamo solo otto anni al 2030 e se vogliamo ridurre concretamente le emissioni di CO₂ delle miscele di calcestruzzo ed affini, dobbiamo agire rapidamente massimizzando la quantità di cemento Portland sostituita da questi materiali. Nella maggior parte dei casi poi questi prodotti costano meno o come il cemento Portland (salvo speculazioni ingiustificate di certi mercati) rendendoli attrattivi anche sul piano economico, oltre che sul ben noto piano tecnico di materiali atti ad incrementare la durabilità del calcestruzzo ed a ridurre il calore d'idratazione di strutture massive.

Solo attraverso questi semplici passi quindi potremmo dimezzare come minimo l'impronta ecologica nel calcestruzzo, e potremmo anche andare oltre, se gli aggregati fossero in parte o del tutto sistematicamente sostituiti con aggregati di riciclo. Non dovremmo nemmeno temere di costruire miscele ternarie e quaternarie in cui il cemento Portland è ridotto al minimo, a favore di combinazioni di altre aggiunte minerali a basso impatto.

Questa strategia è stata usata dallo scrivente per progettare una miscela di calcestruzzo auto-compattante per una mega torre a Dubai (Emirati Arabi Uniti) avente resistenza caratteristica cilindrica di 100 MPa (quindi con una resistenza media intorno ai 115 MPa) dove il cemento Portland era soltanto meno del 50% del volume totale di legante, mentre la restante parte era un cocktail di loppa, cenere e microsilice aggiunte, in quel caso, direttamente all'impianto di betonaggio.

In definitiva sappiamo come dimezzare l'impronta ecologica del calcestruzzo introducendo un volume importante di aggiunte minerali e tuttavia l'uso di miscele in cui la sostituzione del cemento Portland con aggiunte minerali sia veramente massiccia è ancora limitato a fondazioni massive, dighe a gravità (incluse quelle in Roller Compacted Concrete, RCC) dove si hanno sostituzioni di loppa fino anche dell'80%. Nonostante poi l'uso di ceneri volanti in dosaggi importanti sia noto e studiato da anni, la massima sostituzione che si fa solitamente con questa aggiunta è di massimo il 35%.

Ci sono situazioni però dove le imprese sono obbligate (come vedremo più avanti) ad utilizzare calcestruzzi che sviluppino certe resistenze entro certi tempi ristretti per completare cicli costruttivi compressi come discuteremo a breve. Dal momento che il tempo è denaro, ritardare queste operazioni, perché si usano materiali come la loppa e la cenere volante che sviluppano resistenza lentamente a causa della velocità ridotta con cui avvengono le reazioni di idratazione pozzolaniche, non è permesso. E le scelte tecniche-economiche si focalizzano quindi su miscele in cui il cemento Portland è massimizzato in volume, non il contrario.

IL RUOLO DEI PROGETTISTI E COMMITTENTI

Quindi, ci chiediamo, se la riduzione dell'impronta ecologica del calcestruzzo non è "scienza dei razzi" con la tecnologia disponibile, perché non decidiamo semplicemente di massimizzare l'uso di aggiunte minerali ogni volta che costruiamo con il calcestruzzo? E qui c'è il primo problema. La struttura delle specifiche e dei requisiti contrattuali oggi fungono da deterrente per opzioni di calcestruzzi sostenibili nel senso dato in questo documento. Vediamo perché.

Iniziamo con la **resistenza caratteristica**. 28 giorni è l'età convenzionale a cui si misura la resistenza a compressione del calcestruzzo. Questo limite, del tutto arbitrario, è stato introdotto decine di anni fa quando l'unico legante noto nei calcestruzzi era appunto il cemento Portland. Sappiamo tutti che il cemento Portland guadagna resistenza velocemente grazie soprattutto alle fasi C3A (aluminato tricalcio), C4AF (tetra-calcio-alumino-ferrite) e C2S (silicato bi-calcico). L'unica eccezione sono i cementi Portland solfato-resistenti che, avendo contenuti di C3A limitati, sviluppano resistenza iniziale più lentamente.

Quindi il calcestruzzo fatto con solo cemento Portland raggiunge, nel primo mese, valori di resistenza meccanica non troppo distanti da quelli che avrà, per esempio, a dodici mesi e quindi si assume che la resistenza a 28 giorni sia indicativa della resistenza "ultima" del materiale e che l'incremento che avviene tra 28 giorni ed i mesi successivi sia solo un margine aggiuntivo trascurabile.

I cementi compositi al contrario, in virtù del contenuto di aggiunte minerali, hanno un processo di idratazione governato dalle reazioni pozzolaniche che richiedono la formazione prima dell'idrossido di calcio dalla combinazione di acqua e cemento Portland a cui i componenti silico-calcici presenti nelle loppe e ceneri volanti si legano per formare più fasi C2S e C3S (silicato tri-calcico). Le reazioni pozzolaniche sono quindi necessariamente più lente rispetto a quelle di idratazione del cemento Portland da solo e questo ha ovviamente impatto su come si sviluppa la resistenza meccanica che risulta rallentata nelle prime settimane, senza però essere influenzata sul lungo termine (anzi, in molti casi le aggiunte minerali aumentano anche la resistenza a lungo termine rispetto a miscele identiche ma con solo cemento Portland). Infatti comunemente si possono osservare resistenze a 90 giorni di calcestruzzi contenenti un elevato volume di aggiunte che sono più del doppio rispetto a quelle misurate a 28 giorni.

Quindi se si usano calcestruzzi sostenibili con un volume molto importante di aggiunte minerali non si dovrebbe valutare la resistenza caratteristica a 28 giorni, ma invece a 56 giorni, o anche 90 giorni.

Incredibilmente però, nonostante a livello internazionale si raccomandino, anche ai fini della loro evidente sostenibilità, di estendere oltre i 28 giorni i criteri di valutazione della resistenza caratteristica dei calcestruzzi contenenti aggiunte minerali per massimizzarne l'uso e ridurre al massimo i dosaggi totali di legante, i progettisti e committenti quasi mai deviano dai criteri di accettazione contrattuali definiti a progetto. E non possiamo nemmeno biasimarli troppo visto che chiedono semplicemente che siano rispettate delle clausole contrattuali che nessuno vuole prendersi la responsabilità di modificare in corso d'opera.

Questo quindi forza in qualche modo le scelte delle imprese verso miscele che massimizzino il ciclo produttivo e che raggiungano i valori minimi richiesti in tempo utile (28 giorni), specialmente quando si devono produrre miscele di resistenza superiore ai 60-70 MPa, come spesso richiesto al giorno d'oggi per alcune infrastrutture e torri.

Questo dato di fatto forza, in essenza, le imprese a scegliere miscele poco sostenibili da un punto di vista ambientale ma che garantiscono il risultato del rispetto dei tempi costruttivi ed i termini contrattuali.

Nella realtà invece, rimanendo pragmatici, non ci sono motivi tecnici per non accettare un'estensione della scadenza di prova della resistenza meccanica oltre i 28 giorni, se non appunto i vincoli contrattuali predefiniti per un calcestruzzo prodotto con cemento Portland.

Quindi, introducendo molto semplicemente nelle specifiche e contratti moderni, clausole per la valutazione della resistenza meccanica oltre i 28 giorni se si usano miscele sostenibili, potrebbe contribuire largamente a ridurre l'impatto ambientale dei calcestruzzi.

Passiamo adesso alla **maturazione**. La tecnologia del calcestruzzo ci insegna che, più lunga è la maturazione, migliori sono le proprietà finali del calcestruzzo del copriferro e migliore sarà la durabilità di questa zona contro l'attacco chimico (carbonatazione, cloruri, solfati, etc.).

Sappiamo anche che, come e più che per il cemento Portland, quando si utilizzano aggiunte minerali occorre fornire sufficiente umidità alla superficie del calcestruzzo nei primi giorni di maturazione mentre l'acqua libera è progressivamente consumata sia per idratare i componenti minerali, che per evaporazione.

Usando aggiunte minerali il periodo di cura ad umido, quindi, si allunga. Allora, quando si usano aggiunte minerali, le operazioni di maturazione del calcestruzzo costano di più ed hanno anche un impatto sul ciclo

produttivo del cantiere (getto/rimozione casseri/maturazione) che potenzialmente si allunga perché, sia la rimozione dei casseri che la maturazione, richiedono maggiore tempo quando si usano le aggiunte minerali.

La norma EN 13670, che definisce le regole per l'esecuzione delle strutture in calcestruzzo, richiede che il periodo di cura sia definito in base a quanta resistenza superficiale è stata raggiunta nel calcestruzzo del copriferro rispetto alla resistenza a 28 giorni in funzione, anche, della temperatura media dell'ambiente.

Ovviamente siccome le aggiunte sviluppano resistenza lentamente e tanto più l'ambiente è freddo tanto più questo è vero, la durata della maturazione si dilata notevolmente rispetto ad un calcestruzzo a sviluppo di resistenza rapido (quindi con cemento Portland come componente dominante).

Quindi, salvo che l'uso massiccio di aggiunte non fosse richiesto espressamente nelle specifiche, ed a meno che le specifiche richiedano chiaramente dei tempi minimi di cura quando si usano aggiunte minerali, le imprese cercheranno per quanto possibile di ridurre il volume di aggiunte per massimizzare i cicli produttivi e rispettare le scadenze contrattuali ed i programmi lavori, fatti sempre (e bene ricordarlo) avendo in testa un comportamento convenzionale del calcestruzzo fatto con cemento Portland (quindi rapido nello sviluppare le sue proprietà).

Analizziamo infine la **resistenza a breve termine**. Ci sono situazioni dove la resistenza a 3 giorni o 7 giorni deve essere superiore ad un certo valore minimo per permettere operazioni quali la movimentazione, lo scasso o la precompressione.

Come detto prima, il tempo è denaro e quindi il ritardo di questi processi dettato da miscele che sviluppassero resistenza lentamente, moltiplicato per decine o centinaia di ripetizioni comporta notevoli ritardi nella produzione del cantiere.

Tuttavia se non avessimo altra scelta che aspettare perché ci è stato imposto di usare calcestruzzi sostenibili direttamente dalle specifiche, la filiera rallenterebbe *in toto*, ed i costi globali dell'opera crescerebbero proporzionalmente per i committenti, non già perché le imprese sono in ritardo sotto la propria responsabilità, ma invece perché sono stati voluti scientemente calcestruzzi sostenibili nel progetto.

COSA DOVREBBE CAMBIARE PER RAGGIUNGERE GLI OBIETTIVI DEL 2030?

Il primo e più importante cambiamento necessario è quindi un **cambiamento nella mentalità della comunità tecnica/ingegneristica, imprese e committenti compresi**.

Soltanto favorendo l'uso massiccio di calcestruzzi sostenibili, per esempio limitandone la loro impronta ecologica ad un valore massimo direttamente nelle specifiche tecniche di progetto, possiamo iniziare il percorso che dovrebbe portarci alla riduzione delle emissioni entro il 2030 per la filiera del calcestruzzo.

I calcestruzzi dovrebbero quindi essere specificati non solo per quanto concerne parametri come lavorabilità, resistenza e durabilità, ma anche e soprattutto per raggiungere certi limiti massimi di impronta ecologica che soltanto l'uso massiccio di aggiunte minerali e la riduzione del dosaggio totale di legante permettono.

Per esempio, fissando l'impronta ecologica delle miscele di calcestruzzo in un progetto a 150 kg - CO₂/m³ staremmo in effetti imponendo di produrre calcestruzzi che hanno sicuramente meno della metà dell'impronta ecologica del calcestruzzo medio globale (vedi tabella 2).

Ma nel fare questo è necessario che le specifiche siano adattate di conseguenza, perché la reologia, la resistenza a breve e medio termine, la durabilità etc. delle miscele di calcestruzzo sostenibili sono diverse da quelle del calcestruzzo convenzionale, fatto con cemento Portland soltanto.

La resistenza caratteristica andrebbe quindi valutata a scadenze superiori a 28 giorni per massimizzare il potenziale di sviluppo di miscele a basso tenore di legante totale e con uso intensivo di aggiunte minerali.

I progetti, così facendo, finiranno necessariamente per essere finanziariamente più onerosi per i committenti, ma lo saranno scientemente, il che significa che non saranno necessariamente le imprese con le offerte più basse a

vincere le gare, ma quelle che propongono le soluzioni con il minore impatto ambientale a costi magari più elevati, ma necessari e riconosciuti per garantire la sostenibilità globale.

Sia i volumi di loppa che di ceneri disponibili negli anni a venire sono tali da permetterci di pensare che possiamo permetterci di massimizzarne l'uso fino a che ne disponiamo come prima ed essenziale misura, fattibile senza troppe complicazioni e con la tecnologia attuale, per raggiungere gli obiettivi del 2030.

Ma affinché tutto quanto sopra diventi realtà è necessario essenzialmente che i criteri con cui si aggiudicano gli appalti di costruzione virino verso il concetto di sostenibilità delle miscele di calcestruzzo con la piena comprensione che i costi lieviteranno per un fine superiore e comune, che è la riduzione delle emissioni. In effetti si tratta più di un investimento che di un costo, senza il quale siamo solo destinati a peggiorare le cose investendoli (i soldi) comunque nei prossimi decenni per riparare i danni strutturali ciclopici che il cambiamento climatico apporterà.

Questo vuol dire che i preventivi di spesa per la progettazione e costruzione di strutture sostenibili aumenteranno negli anni se l'obiettivo condiviso è quello della riduzione dell'impronta ecologica della filiera. In quest'ottica il settore pubblico dovrà essere la forza trainante del cambiamento di questa evoluzione, e possiamo notare che alcune nazioni illuminate del Nord Europa hanno già iniziato a muoversi in questo senso.

I codici di progettazione e le normative dovranno adeguarsi di pari passo e velocemente verso l'inclusione di soluzioni di progetto e costruttive sostenibili. Le università dovrebbero includere corsi sulla sostenibilità dei materiali da costruzione nei loro corsi di ingegneria civile, perché è solo cambiando la mentalità delle nuove generazioni di tecnici che potremo beneficiare di un cambiamento di mentalità nei prossimi anni da parte dei futuri professionisti del settore.

E ADESSO?

Abbiamo visto, con la discussione fatta fino ad ora, che per raggiungere gli obiettivi del 2030 non dobbiamo in effetti fare troppo sforzi per rendere il calcestruzzo più sostenibile se il settore pubblico, auspicabilmente seguito da quello privato, spingerà con efficacia le strategie appena descritte.

Quindi, in linea di principio, le competenze per ridurre di almeno la metà l'impronta ecologica del cemento Portland sono già disponibili oggi.

In pratica però questo cambio di paradigma per cui il rendere sostenibili i progetti significherà incrementare i costi di costruzione, stanti le caratteristiche differenti delle miscele ad alto volume di aggiunte, deve essere accettato dalla comunità ingegneristica tutta, dalle imprese e dai committenti. Ma in un mondo come quello delle costruzioni dove, ci ripetiamo, il tempo, ed anche tutto il resto, è denaro questo potrebbe essere, in tutta franchezza, più facile a dirsi che a farsi.

Per soddisfare gli obiettivi di neutralità del 2050 poi dovremmo, in teoria, produrre calcestruzzo attraverso un ciclo della CO₂ chiuso, il che significa che, per ogni tonnellata di CO₂ emessa dalla produzione di cemento e calcestruzzo, una tonnellata è usata/riassorbita da qualche altra parte nel sistema. La carbonatazione è un processo naturale che assorbe CO₂ e rende il calcestruzzo un serbatoio di parte della CO₂ che l'industria cementeria rimette in atmosfera, ma non c'è ancora chiarezza sul volume potenziale di CO₂ assorbibile da questo fenomeno naturale che interessa tutti i conglomerati cementizi esposti all'aria.

Lo stesso principio è adottato oggi da alcune start-up che propongono di catturare CO₂ atmosferica per immetterla nel calcestruzzo durante la miscelazione per legarsi alla calce libera, ma ad oggi stiamo parlando, nella migliore delle ipotesi, di progetti pilota di piccolissima scala.

Una linea di ricerca interessante è quella che fa ricorso ad alcali-attivatori per permettere la presa ed indurimento di aggiunte minerali come le ceneri ed il metakaolino, senza dover ricorrere al cemento Portland e quindi riducendo di fatto l'impronta ecologica del calcestruzzo risultante.

Altre direzioni di ricerca vertono, diversamente, sulla attivazione termica in assenza di cemento Portland.

Ma siamo realisti. Anche quando le ricerche di cui sopra diventassero commercializzabili industrialmente e su grandissimi volumi, quanto tempo dovrebbe trascorrere per queste novità tecnologiche per diventare prodotti certificati che soddisfino dei ben precisi gruppi di specifiche (peraltro aggiornate per comprenderli) che sono state ratificate, nel frattempo, a livello internazionale?

Quanto tempo ci vorrà per i codici di progettazione internazionali per definire le leggi costitutive, i modelli di degrado del calcestruzzo 2.0, se, ancora oggi, dibattiamo se superare il 35% di cenere volante nel calcestruzzo possa comportare problemi sul lungo termine?

Come reagirebbero i paesi industrializzati a forte rischio sismico quando ricevessero la notizia che il calcestruzzo senza cemento Portland del futuro avrà forse una resistenza meccanica minore del calcestruzzo di oggi e quindi si dovranno adeguare fortemente i criteri progettuali?

Quindi, pragmaticamente parlando, il calcestruzzo 2.0 non sarà disponibile in tempo per il 2030 o, se anche lo fosse, non lo sarà certamente alla scala produttiva necessaria per contribuire a diminuire le emissioni di CO₂ in modo sensibile.

Però dovremmo essere pronti per avere delle soluzioni percorribili almeno per il 2050 in un modo o nell'altro, perché gli obiettivi che ci siamo dati indicano chiaramente che, con lo stato di conoscenza attuale, raggiungere la neutralità è un obiettivo arduo che richiede innanzitutto di eliminare del tutto il cemento Portland dai calcestruzzi (salvo che non si trovi nel frattempo il modo per renderlo neutrale come materiale), mantenendo la resistenza a durabilità necessarie per produrre in futuro strutture con vite di servizio di 50, 100, 150 anni.

Proprio il livello di prestazioni meccaniche raggiungibili oggi con il calcestruzzo 2.0 sembra essere un limite tecnico non trascurabile per produrlo senza cemento Portland (e senza dover aggiungervi decine di litri di colle polimeriche il cui impatto ambientale è altrettanto pesante). Inoltre, se introduciamo come dovremmo, sempre più aggregati di riciclo in luogo degli aggregati naturali potremmo vedere una progressiva diminuzione del modulo elastico rispetto ai valori che possiamo raggiungere oggi e che sono necessari in certe applicazioni per il controllo delle deformazioni sul lungo termine (creep).

Dovremmo dopo tutto rassegnarci forse a rinunciare alla famigerata “corsa alla resistenza” che ha caratterizzato gli ultimi anni del 20° secolo ed i primi venti del 21° con l'avvento delle mega-torri che richiedono calcestruzzi con resistenze in eccesso di 80 MPa già a 28 gg di età.

Potremmo in effetti subire un'involuzione del modo in cui pianifichiamo, progettiamo e costruiamo le strutture dove l'estrema snellezza delle forme che raggiungiamo oggi usando miscele ad alta resistenza e rigidità sarà sostituita nuovamente da sezioni tozze e gravi per compensare una minore resistenza sviluppata dal calcestruzzo 2.0 del futuro (non troppo) prossimo.

Dopo tutto i Romani ci hanno lasciato acquedotti, il Pantheon ed il Colosseo che ancora oggi reggono agli attacchi del tempo usando una miscela di “concretum” contenente calce viva, acqua, ceneri vulcaniche del Vesuvio, sabbia, acqua e proto-aggregati (cocci, pietre) grazie all'uso di sezioni importanti nei muri e colonne.

La reazione della calce con acqua e CO₂ atmosferica creava carbonato di calcio ed idrossido di calcio instabile che poteva legarsi ulteriormente ai silicati presenti nelle ceneri per formare alluminati-idrati di calcio e quindi una matrice solida stabile da un punto di vista volumetrico e durevole, anche se di resistenza meccanica molto bassa.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Per produrre miscele di calcestruzzo economiche e che soddisfino i requisiti metodologici ed i vincoli di costruzione attuali per le nuove infrastrutture, non abbiamo molte opzioni se non quella di massimizzare il volume di aggiunte minerali impiegando miscele binarie, ternarie o perfino quaternarie con esse in combinazione, e con percentuali ridotte di cemento Portland che agisce (quasi) solo da catalizzatore delle reazioni pozzolaniche.

La quantità minima di cemento per produrre miscele con sufficiente resistenza dipende dal tipo di aggiunte minerali con la loppa al primo posto in termini di volume di legante sostituibile, seguita dalle ceneri, dal metakaolino e dalla microsilice per citare i prodotti più noti.

Per raggiungere quindi gli obiettivi del 2030 dobbiamo iniziare da subito a massimizzare il dosaggio di aggiunte riducendo il cemento Portland, ma **adeguando nel contempo tutto il sistema di progettazione, specifica, accettazione e verifica di un calcestruzzo che sviluppa resistenza più lentamente e necessita di una cura prolungata.**

Ma fino a che le specifiche non imporranno un valore massimo di impronta ecologica delle miscele di calcestruzzo così come impongono lavorabilità, resistenza minima ed altri parametri, sarà **difficile poter rendere sostenibile l'insostenibile**, perché le soluzioni proposte dalle imprese saranno sempre mirate a comprimere i tempi, non a dilatarli, se questi ritardi non gli sono permessi/riconosciuti finanziariamente. Quindi il cambiamento deve arrivare da progettisti e committenti, ed il ruolo del settore pubblico dovrebbe essere, e lo è in alcuni paesi illuminati del Nord Europa, il vero motore trainante del cambiamento.

Prima che il calcestruzzo 2.0 (che non usa più cemento Portland) sia disponibile commercialmente, dovremo invece attendere lunghi processi di standardizzazione⁸ e di adeguamento dei codici di progettazione. Questi sono certamente obiettivi a lungo termine (del 2050 ed oltre) mentre già oggi possiamo, con tecnologia basilare, iniziare a ridurre fortemente l'impatto ambientale della filiera iniziando con il cambiare interamente l'approccio con cui impostiamo nuovi progetti. Progetti che devono diventare scientemente più costosi da eseguire, perché rispettosi di certe regole ecologiche che oggi ancora non vogliamo seguire, solo per guadagnare tempo e risparmiare, senza però renderci conto di quello che realmente potrebbe aspettarci in futuro, se non iniziamo a cambiare mentalità...da ieri.

⁸ per fare un esempio un semplice additivo per calcestruzzi che non sia contemplato come categoria nella EN 934 sottoposto ad ETA europeo oggi necessita di anni per essere soltanto omologabile