

LA SFIDA DELLA DECARBONIZZAZIONE nei settori *hard-to-abate*

di R. Pascolo¹, E. Franzoni¹, M.C. Bignozzi², A. Catalano³, A. Allegrì³, S. Albonetti³, R. Scaccabarozzi⁴, L. Cretarola⁵

Progetto CCS4CER: prospettive e risultati nella valorizzazione della circolarità in ceramica

L'inizio del 2026 segna l'entrata in vigore della fase definitiva del CBAM (*Carbon Border Adjustment Mechanism*), che estende ai beni importati la logica del prezzo del carbonio già alla base dell'EU *Emissions Trading System*, tutt'ora limitato all'ambito europeo. Tale linea di gestione delle emissioni, in particolare dei GHG (*Greenhouse Gas Emissions*), pone l'accento sull'importanza per i settori *hard-to-abate* di trovare soluzioni nuove volte alla decarbonizzazione. Contemporaneamente, in quest'ottica, assumono radicale importanza soluzioni che valorizzino i rifiuti dell'industria stessa, riutilizzandoli opportunamente

come materia prima. Nel settore dell'industria ceramica, dove sono già stati compiuti enormi sforzi per la riduzione delle emissioni e la sostenibilità, acquisiscono necessariamente sempre più importanza soluzioni innovative per la decarbonizzazione del sistema produttivo attuale e l'ulteriore valorizzazione, già pregevole, della circolarità del settore.

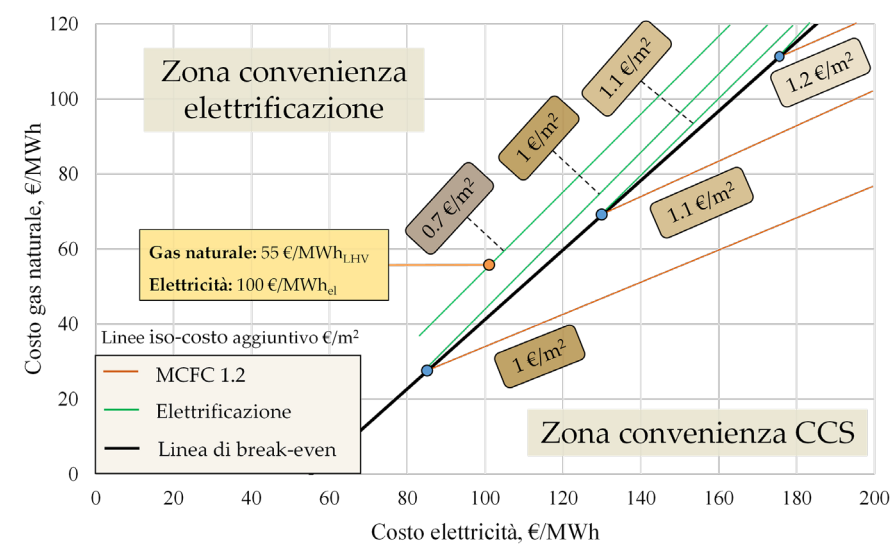
In tale ottica è nato il progetto CCS4CER: *Carbon Capture storage and CO₂ mineralization for Ceramic Industry*, finanziato con i fondi Europei della Regione Emilia-Romagna, PR-FESR 2021/2027, Asse 1 Ricerca, Innovazione e Competitività, Azione 1.1.2 (<https://www.ccs4cer.it/>). CCS4CER si trova nel vivo del terzo anno di attività con risultati concreti sia nello studio di soluzioni impiantistiche volte alla cat-

tura dell'anidride carbonica, sia nella valorizzazione del principale rifiuto industriale ad oggi caratterizzante il settore ceramico ed altri settori energivori: la calce esausta derivante dai filtri a maniche usati per la deacidificazione dei fumi di cottura provenienti dai forni. Il progetto, coordinato dal Centro Ceramico, trae forza dalla collaborazione di laboratori altamente specializzati della Rete Alta Tecnologia della Regione Emilia-Romagna, cioè CIRI-FRAME (Università di Bologna), LEAP (Politecnico di Milano) e Romagna Tech, nonché dal coinvolgimento di aziende del comprensorio ceramico (Ascot Gruppo Ceramiche, Panariagroup Industrie Ceramiche S.p.A. e SACMI Cooperativa Meccanici Imola S.C.).

In primo luogo, è stata svolta una campagna di campionamento di calci esauste prelevate presso numerose aziende ceramiche e ne è stata fatta una completa caratterizzazione chimico-fisica. La capacità di sequestrare CO₂ con questi rifiuti è correlata alla quantità di Ca(OH)₂ non reagito nel campione, che risulta abbastanza variabile a seconda dei protocolli di abbattimento gas acidi utilizzati nelle diverse aziende. La variabilità osservata nei campioni analizzati mostra una capacità di sequestro di CO₂ piuttosto alta, che si attesta nel range 190-390 grammi di CO₂ per kg di rifiuto.

I materiali campionati, a diversa composizione, sono stati utilizzati per test di mineralizzazione di CO₂ in processi *wet* (solido-liquido-gas) di tipo *batch* e semicontinuo a diversa scala.

Nel corso dello studio sono state esplorate diverse condizioni di reazione,



Andamento del costo incrementale di produzione delle piastrelle ceramiche al variare del costo dell'energia elettrica (asse orizzontale) e del gas naturale (asse verticale) per le tecnologie di decarbonizzazione basate su MCFC (in basso a destra) e elettificazione (in alto a sinistra).

modificando la pressione operativa, il flusso e la composizione del gas contenente CO₂, nonché la concentrazione della sospensione e la tipologia di rifiuto specifico. I profili di reazione, raccolti mediante l'analisi in continuo del consumo di CO₂ nel tempo, hanno permesso di studiare la cinetica del processo dimostrando che i fattori che influenzano maggiormente l'efficienza del processo di mineralizzazione delle calci esauste in condizioni *wet* sono il rapporto liquido-solido, il flusso di CO₂ e il tempo. I dati ottenuti hanno inoltre dimostrato che la rimozione di CO₂ dal flusso di gas mineralizzando questa tipologia di rifiuti è molto efficiente anche in condizioni blande (bassa temperatura e pressione) e con contenuto diluito di CO₂.

Le prove effettuate sinora mostrano che la mineralizzazione riduce il rilascio di sostanze inquinanti delle calci esauste, che, nei test effettuati, passano da una classificazione come rifiuti speciali pericolosi a rifiuti non pericolosi, con notevoli benefici anche semplicemente per il conferimento in discarica. È poi stato studiato il riutilizzo della calce esausta sottoposta a processo di mineralizzazione all'interno di leganti cementizi, affinché il rifiuto di un comparto industriale possa diventare risorsa per un altro. Il settore dei cementi è da tempo, infatti, impegnato nella ricerca di soluzioni volte alla riduzione del contenuto di clinker e dell'impatto ambientale dei suoi prodotti. Si è stu-

diato l'impiego del materiale mineralizzato sia come *filler* in sostituzione del calcare naturale (cementi Portland al calcare), sia come componente di una nuova classe di cementi a ridotto impatto ambientale con calcare e argilla calcinata (LC3, *Limestone Calcined Clay Cement*). I risultati dei test mostrano come il comportamento del prodotto mineralizzato all'interno di malte cementizie sia del tutto comparabile al calcare puro, sia in termini di prestazioni meccaniche sia di caratteristiche chimico-fisiche, o addirittura comporti dei benefici in termini di *performance* nelle malte a base di LC3. Si conferma, nelle malte cementizie, come si riduca il rilascio in fase acquosa di eventuali metalli pesanti presenti nelle calci esauste originarie.

Inoltre, per valutare le tecnologie di cattura della CO₂ nei fumi dei processi ceramici, sono state condotte simulazioni utilizzando dati industriali e considerando un impianto che produce 10.000 m² di piastrelle al giorno (spessore 1 cm). Senza sistemi di cattura, lo stabilimento selezionato consuma 10,3 MWPCI di gas naturale ed emette 18 kt/anno di CO₂. La decarbonizzazione del processo produttivo avviene tramite celle a combustibile a carbonati fusi (MCFC), che consentono sia la rimozione della CO₂ dai fumi dell'impianto ceramico sia la produzione di energia elettrica decarbonizzata, utile per alimentare i sistemi di compressione della CO₂ catturata. Operando a

circa 600°C, le MCFC possono essere integrate nel processo, migliorando l'efficienza energetica ma aumentando la complessità impiantistica. Le prestazioni delle celle a combustibile sono state confrontate con un processo di assorbimento chimico a base di ammine e con l'elettificazione dei processi che sostituisce la combustione del gas naturale. L'analisi tecnico-economica mostra che la soluzione con solventi raggiunge un livello di cattura del 90%, ma mostra i costi di decarbonizzazione più elevati tra i casi analizzati a causa dei fattori di scala sfavorevoli. Il sistema con MCFC riduce la CO₂ dell'84% e porta il consumo di gas naturale a 9,4 MWPCI. L'elettificazione raggiunge una decarbonizzazione del 94%, emettendo solo la CO₂ delle reazioni di cottura, ma richiede rilevanti modifiche agli impianti e l'uso di 11,3 MWel. Entrambe le soluzioni aumentano il costo della piastrella ceramica di 0,7-1,2 €/m², pari a un incremento dei costi di produzione tra l'8% e il 22%, a seconda della qualità del prodotto e dei prezzi energetici.

¹Centro Ceramico, Sassuolo, Modena;

²Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Bologna;

³CIRI-FRAME, University of Bologna, Dipartimento di Chimica Industriale, Bologna.

⁴LEAP, Laboratorio Energia e Ambiente Piacenza;

⁵Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia, Milano