

## SINTESI DEGLI INTERVENTI AL CONVEGNO “LA RIMOZIONE DI CO<sub>2</sub> DALL’ATMOSFERA E IL PROGETTO DESARC-MARESANUS”

È in seguito pubblicata una sintesi di alcuni degli interventi del convegno “La rimozione di CO<sub>2</sub> dall’atmosfera e il progetto Desarc-Maresanus”, che si è svolto presso il Politecnico di Milano il 4 e 5 febbraio 2020. Il progetto “Desarc-Maresanus” ha studiato un processo di alcalinizzazione dei mari per contrastare allo stesso tempo due problemi ambientali di grandissima rilevanza: l’aumento delle concentrazioni di biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>) in atmosfera e la conseguente acidificazione degli oceani. Il processo consiste nello spargimento di idrossido di calcio sulla superficie del mare che, combinandosi in un processo spontaneo con acqua e CO<sub>2</sub> rimossa dall’atmosfera, aumenta la capacità tampone delle acque marine verso l’acidità e permette di contrastare la diminuzione del pH. In particolare, sono stati analizzati in dettaglio la fattibilità tecnica ed economica di questo processo, il suo bilancio ambientale, nonché i benefici per il comparto marino, con un focus sul Mediterraneo. Le presentazioni degli interventi sono disponibili al sito [www.desarc-maresanus.net/appuntamenti/](http://www.desarc-maresanus.net/appuntamenti/).

*Parole chiave:* CO<sub>2</sub>, rimozione, clima, conferenza.

### SUMMARY OF THE SPEECHES GIVEN AT THE CONFERENCE “THE REMOVAL OF CO<sub>2</sub> FROM THE ATMOSPHERE AND THE DESARC-MARESANUS PROJECT”

A summary of some of the interventions of the conference “The removal of CO<sub>2</sub> from the atmosphere and the Desarc-Maresanus project”, which took place at Politecnico di Milano on 4 and 5 February 2020, is reported in the following pages. The “Desarc-Maresanus” project studied an alkalization process to simultaneously address two environmental problems of enormous concern: the increase of the concentration of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in the atmosphere and the resulting acidification of the oceans. The process involves spreading calcium hydroxide on the surface of the sea, which would increase the seawater’s capacity to provide a buffer to the acidity, halting the dangerous decrease of pH. This, in turn, can foster an additional removal of CO<sub>2</sub> from the atmosphere, generating negative emissions. A detailed analysis was carried out of the technical and economic feasibility of the process, its environmental balance, and the benefits for the marine sector, focussing on the Mediterranean basin. The presentations of the speeches are available at: [www.desarc-maresanus.net/appuntamenti/](http://www.desarc-maresanus.net/appuntamenti/)

*Keywords:* CO<sub>2</sub>, removal, climate, conference.

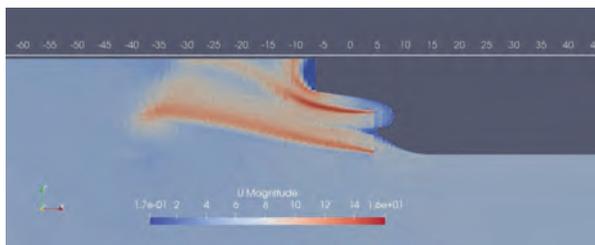
## MODELLIZZAZIONE FLUIDODINAMICA DELLO SPARGIMENTO DI Ca(OH)<sub>2</sub> NELLA SCIA DI UNA NAVE

Antonella Abbà, Maria Ludovica Dall’Aglia

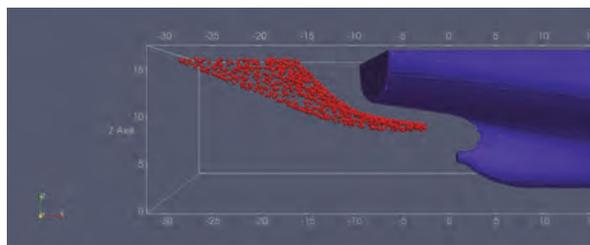
Politecnico di Milano, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Aerospaziali (abbaantonella222@gmail.com)

Nell’ambito del progetto Desarc-Maresanus è stato compiuto uno studio fluidodinamico finalizzato ad una migliore comprensione del processo di alcalinizzazione dell’acqua marina mediante lime. In particolare, è stato studiato il problema della dispersione di lime nella scia delle navi nella prospettiva futura di utilizzare a tal fine non solo navi dedicate allo scopo ma anche navi commerciali già operanti. L’obiettivo dello studio è da un lato di stimare quali debbano essere le quantità di carbonato di calcio da disperdere in mare affinché il processo sia efficace dal punto di vista della regolarizzazione dell’acidità dell’acqua e dell’assorbimento di biossido di carbonio dall’atmosfera, e dall’altro che le concentrazioni di lime e le variazioni di acidità siano localmente contenute al fine di non danneggiare l’ambiente marino e le sue specie viventi. Lo studio è stato affrontato utilizzando gli strumenti del calcolo numerico applicato alla fluidodinamica.

È stata infatti simulata la corrente attorno ad una nave rappresentativa della categoria cargo utilizzando un codice di calcolo ai volumi finiti basato sulla libreria open-source OpenFOAM (disponibile da <https://doi.org/10.1007/BF02391175>). Grazie alla disponibilità di piattaforme di supercalcolo ad alte prestazioni è stato possibile svolgere simulazioni della corrente marina attorno all’intera chiglia. L’attenzione è stata focalizzata in particolare sullo studio della scia nella regione vicina alla poppa della nave dove la corrente è fortemente dipendente dalla geometria dello scafo e dalla presenza dell’elica e per la quale non è possibile quindi disporre di informazioni derivanti da studi teorici e analitici. In questa prima fase il lime disperso è trattato come uno scalare trasportato e diffuso dalla corrente. Le simulazioni preliminari sono state fondamentali nel determinare la zona in prossimità dell’elica come migliore punto di immissione di lime in acqua.



*Visualizzazione della corrente a valle dell'elica*

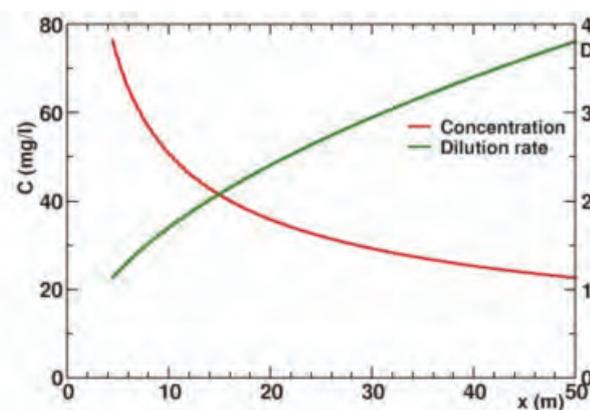


*Dispersione di particelle nella scia della nave*

Come si può vedere anche nelle figure seguenti, le particelle rappresentanti il carbonato di calcio immesse nella corrente appena a valle dell'elica vengono trasportate dalla corrente media.

Nell'ultima figura è rappresentata la stima della concentrazione di lime e del relativo tasso di diluizione in funzione della distanza dal punto di immissione. In base a tale stima risulta che ad una distanza pari a 15 metri la concentrazione risulta dimezzata rispetto alla concentrazione iniziale di 86.5 mg/l.

Ulteriori simulazioni numeriche in diverse condizioni e configurazioni saranno necessarie per verificare ulteriormente la generalità e i limiti di validità dei risultati ottenuti.



*Concentrazione e rateo di diluizione di lime in funzione della distanza dal punto di immissione*

## OCEAN LIMING IN PRATICA: SCENARI DI SPARGIMENTO DI $\text{Ca}(\text{OH})_2$ DALLE NAVI

**Dario Pagano, Stefano Caserini, Francesco Campo, Giovanni Cappello, Mario Grosso**  
 Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale (dario.pagano@polimi.it)

Molte ricerche indicano un grande potenziale di rimozione di  $\text{CO}_2$  tramite alcalinizzazione artificiale degli oceani, ma nessuna di queste ha valutato gli aspetti pratici dello scarico di grandi quantità di calce idrata dalle navi. La presentazione ha illustrato diversi scenari, studiati nell'ambito del progetto Desarc-Maresanus, con cui può essere effettuato lo scarico di calce idrata tramite navi esistenti o navi dedicate, sia nel Mar Mediterraneo che a livello globale.

Lo spargimento di calce spenta (nome comune con cui si indica l'idrossido di calcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) è ipotizzato in forma di dispersione (slurry), che può essere prodotta sulle navi aggiungendo acqua dolce alla calce polverizzata, caricata nella stiva delle navi. Si è ipotizzata una concentrazione di calce spenta nell'effluente scaricato pari a  $79\text{kg/m}^3$  a  $25^\circ\text{C}$ , più di 50 volte superiore il limite di solubilità ( $1,59\text{kg/m}^3$  a  $25^\circ\text{C}$ ). Questa scelta permette di massimizzare lo scarico in mare minimizzando i volumi d'acqua utilizzati.

Per quanto riguarda il Mar Mediterraneo, sono stati elaborati i dati della densità di traffico nava-

le relativi all'anno 2017, provenienti dal database di EMODnet (European Marine Observation and Data Network) limitatamente alle categorie "Cargo", "Passenger" e "Tanker". Altre categorie di imbarcazioni (es. pescherecci) sono state escluse per via del loro numero limitato o perché ritenute inadeguate, ad esempio perché di dimensioni limitate e con percorsi troppo vicini alla costa. I dati EMODnet sono stati elaborati al fine di eliminare i dati relativi al tempo trascorso dalle navi in rada, o nelle vicinanze della costa ( $< 5\text{km}$ ), stimando quindi per ogni tipologia il numero di ore di navigazione delle navi in circolazione nel Mar Mediterraneo effettivamente sfruttabili per lo spargimento di calce idrata, pari a 9 milioni di ore/anno. I dati relativi alle ore di navigazione delle categorie "Tanker" e "Cargo" sono stati utilizzati per le simulazioni modellistiche sull'efficacia dell'alcalinizzazione.

Per quanto concerne il traffico navale su scala globale, sono stati analizzati i dati relativi alle rotte delle navi portacontainer e delle portarinfuse (bulk

carriers), considerando l'intera flotta mondiale attualmente esistente.

Nel convegno sono stati illustrati i risultati del calcolo della potenzialità di spargimento di idrossido di calcio a scala globale mediante due scenari: utilizzando nuove navi dedicate (scenario 1) e utilizzando parte della capacità di carico delle navi esistenti (scenario 2). È stato valutato anche l'utilizzo dell'acqua di ballast delle navi esistenti come mezzo per trasportare e scaricare la calce spenta, ma accantonato a causa di difficoltà tecniche (pericoli di sedimentazione durante il trasporto) che non sembrano al momento superabili.

Nello scenario 1, sono state prese in considerazione 1000 nuove navi dedicate costruite ad hoc o acquistate con il solo scopo di scaricare la calce spenta in acqua di mare, con una stazza media di 75.000 dwt (navi Panamax). Assumendo un rateo di scarico di 100 kg/s, un decimo del rateo di scarico assunto in altri articoli scientifici riguardanti l'alcalinizzazione artificiale del mare, si stima uno spargimento di circa 2.5 Gt/anno a livello globale. In questo scenario la selezione delle rotte potrebbe essere effettuata in modo da massimizzare l'efficienza della rimozione di CO<sub>2</sub> e il contrasto all'acidificazione dell'oceano, considerando altresì la logistica della disponibilità della produzione dell'idrossido di calcio. Nello scenario 2 si ipotizza che parte (15%) della capacità di carico di due tipi di navi commerciali esistenti, portarinfuse e navi portacontainer, sia utilizzata per il trasporto di calce spenta. Questa scelta è il risultato di una valutazione di esperti che suggeriscono che il 10-20% della capacità di carico netto delle navi potrebbe essere destinato al trasporto della calce spenta senza interferire con le normali operazioni logistiche delle navi. Per lo scarico della cal-

ce possono essere utilizzate le pompe già esistenti nelle navi. Sono stati valutati due sotto-scenari: il primo (scenario 2A) considera il caricamento della calce spenta soltanto nel porto di partenza e scaricamento lungo l'intera rotta verso il porto di arrivo; il secondo (2B) prevede il caricamento anche durante le fermate intermedie, che vengono realmente effettuate dalle navi portacontainer, in particolar modo nelle rotte transcontinentali; per le portarinfuse, che effettuano lunghissimi viaggi senza soste (ad es. dall'Australia al Nord Europa), il numero di scali intermedi è stato ipotizzato sulla base della lunghezza delle tratte, considerando i porti disponibili lungo le rotte. Con tale scelta operativa non sono necessarie rilevanti modifiche strutturali delle navi; è necessaria tuttavia l'implementazione di impianti dedicati per il caricamento della calce spenta nei porti. Ipotizzando lo scarico durante l'intera rotta, il rateo di scarico della calce idrata dipende dalla stazza delle navi e dalla lunghezza della tratta e risulta essere, per entrambi i sottoscenari, inferiore ai 25 kg/s.

Si osserva inoltre che nonostante le navi portarinfuse e portacontainer siano il 17% della flotta commerciale globale, esse costituiscono il 56% del tonnellaggio totale. Lo spargimento di calce idrata ipotizzato nello scenario 2A è di circa 2.4 Gt/anno, che sale a 5,8 nello scenario 2B, considerando la disponibilità della calce spenta da caricare in tutti nei luoghi di fermata delle imbarcazioni.

Pur essendo necessari ulteriori approfondimenti sulla logistica dei porti e la gestione dei materiali, questa prima analisi mostra come l'utilizzo di quote rilevanti del traffico navale esistente possa fornire un contributo molto rilevante per lo spargimento di idrossido di calcio, con ratei di scarico per singola nave relativamente limitati.



Esempio di rotta transcontinentale con fermate intermedie (fonte: searoutes.com)

## SIMULAZIONE DI SCENARI DI ALCALINIZZAZIONE DEL MEDITERRANEO

Momme Butenschön, Tomas Lovato, Simona Masina

Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui cambiamenti climatici (momme.butenschon@cmcc.it)

La valutazione del potenziale contributo della tecnica di alcalinizzazione nella riduzione del trend di acidificazione, rimuovendo nel contempo CO<sub>2</sub> dall'atmosfera, è stata condotta tramite l'impiego di modelli numerici per descrivere le dinamiche fisiche e biogeochimiche nel Mar Mediterraneo. Tale potenziale è messo in relazione al cambiamento indotto dal processo sulla chimica dei carbonati in mare, con particolare attenzione alla variazione spaziotemporale dell'acidità (espressa tramite il pH) e alla capacità di assorbimento di CO<sub>2</sub> del sistema.

Il modello numerico sviluppato dal CMCC nell'ambito del progetto è in grado di risolvere la circolazione generale e l'evoluzione dei cicli biogeochimici dei livelli trofici primari dell'ecosistema. L'implementazione di questo sistema per il Mar Mediterraneo consiste nell'accoppiamento tra il modello oceanografico NEMO ([www.nemo-ocean.eu](http://www.nemo-ocean.eu)) con una risoluzione orizzontale regolare di 6.5 km ed il modello biogeochimico BFM ([www.bfm-community.eu](http://www.bfm-community.eu)) per descrivere l'interazione tra macronutrienti e specie planctoniche marine.

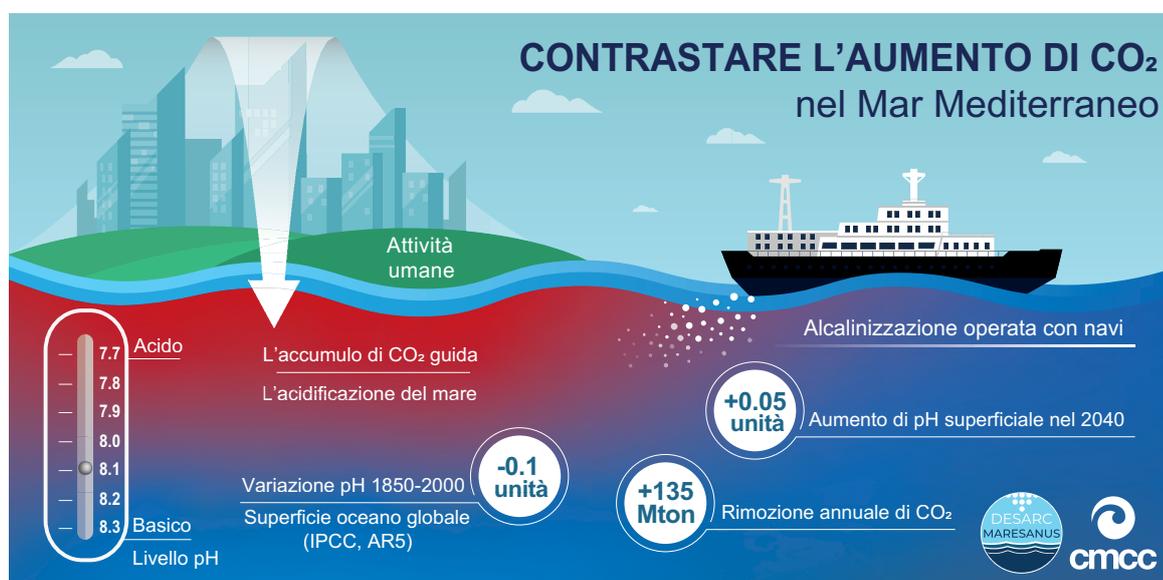
Le simulazioni numeriche del Mar Mediterraneo sono guidate dai dati climatici prodotti dal modello globale CMCC-CM ([www.cmcc.it/models/cmcc-cm](http://www.cmcc.it/models/cmcc-cm), Scoccimarro E., Gualdi S., Bellucci A., Sanna A., Fogli P.G., et al., 2011: Effects of Tropical Cyclones on Ocean Heat Transport in a High-Resolution Cou-

pled General Circulation Model. *J. Climate* 24, 4368-4384) a partire dal 2000 e seguono uno scenario futuro in cui la mitigazione è moderata, identificato come RCP4.5 nel quinto rapporto dell'IPCC.

Ai fini del progetto è stata effettuata una prima simulazione del sistema senza alcun tipo di intervento, che ha permesso di determinare l'attuale trend di acidificazione alla superficie del Mar Mediterraneo, pari a -0,01 unità di pH ogni 10 anni. Questo valore risulta in linea con le stime per l'oceano globale indicate nell'ultimo rapporto IPCC.

La tecnica di alcalinizzazione è stata utilizzata in una seconda simulazione assumendo che lo spargimento di calce in mare avvenga tramite l'attuale flotta di navi da trasporto (cargo e tanker) che insiste sul Mar Mediterraneo. In particolare, a partire dall'anno 2020 è stato applicato uno scarico complessivo di 200 Mton all'anno di calce, secondo le stime prodotte dalla Linea 2 del progetto.

Il confronto con lo scenario di riferimento ha permesso di quantificare il potenziale di rimozione della CO<sub>2</sub> atmosferica in ~135 Mton all'anno e di contrastare l'attuale tendenza dell'acidificazione dovuta all'aumento della CO<sub>2</sub> in atmosfera. Gli esperimenti numerici condotti indicherebbero la possibilità di riportare in tempi contenuti il valor medio del pH alla superficie del mare al livello degli anni 2000, mantenendo un incremento di 0,05 unità fino al 2040.



### Quadro sintetico dei risultati

## TECNOLOGIE ALTERNATIVE DI STOCCAGGIO CO<sub>2</sub>

Giovanni Cappello

CO2APPS srl (gcappello@co2apps.com)

Secondo l'IPCC, per mantenere la temperatura al di sotto dei 2°C per fine secolo sarà necessario rimuovere dall'atmosfera svariati miliardi di tonnellate all'anno di CO<sub>2</sub>, generando le cosiddette "emissioni negative di CO<sub>2</sub>".

Il principale ostacolo per la generazione di emissioni negative mediante le tecnologie potenzialmente sviluppabili su scala globale come BECCS (Bio Energy with Carbon Capture and Storage), DACCS (Direct Air Capture and Storage) e quella studiata nel processo Desarc-Maresanus (Decreasing Seawater Acidification Removing Carbon) è la disponibilità di uno stoccaggio permanente per la CO<sub>2</sub>.

La tecnologia più promettente per lo stoccaggio della CO<sub>2</sub> che è stata proposta è stata quella dello stoccaggio geologico: l'iniezione della CO<sub>2</sub> in condizioni supercritiche in formazioni geologiche profonde. Potenzialmente questo tipo di stoccaggio potrebbe risolvere il problema dello stoccaggio di CO<sub>2</sub> a livello mondiale, ma sono emersi nel tempo diverse problematiche che ne hanno impedito lo sviluppo:

- distribuzione geografica non omogenea delle formazioni geologiche potenzialmente adatte;
- lunghi e costosi studi geologici per verificare l'idoneità della formazione geologica;
- disponibilità dello stoccaggio geologico nelle vicinanze dei punti di emissione;
- necessità di grandi progetti per abbattere i costi, con evidenti problemi finanziari;
- opposizione della popolazione per siti di stoccaggio sulla terraferma.

Pur essendoci situazioni particolarmente favorevoli per lo stoccaggio geologico della CO<sub>2</sub>, come per esempio il Mare del Nord, è necessario studiare tecnologie alternative allo stoccaggio geologico, applicabili in forma diffusa, modulari, facilmente industrializzabili e che non richiedano lunghi tempi di studio per essere implementate.

Alcune di queste tecnologie sono state studiate nel progetto Desarc-Maresanus:

- stoccaggio sottomarino in capsule vetroceramiche (SCS, Submarine Carbon Storage);
- stoccaggio della CO<sub>2</sub> in acquiferi salini profondi mediante iniezione di acqua carbonata (CWI, Carbonated Water Injection);

- stoccaggio sottomarino di acqua ricca in bicarbonati di calcio (BIPR, Bicarbonate Increasing Pressure Reactor).

### SCS – Submarine Carbon Storage

Questa originale tecnologia nasce dall'idea di "imbottigliare" fisicamente la CO<sub>2</sub> in capsule di vetro ed immagazzinarle sul fondale marino tra 1500 e 3000 m di profondità.

Le considerazioni alla base di questa tecnologia sono:

- la fabbricazione delle capsule di vetro è una tecnologia matura;
- i materiali necessari per la costruzione del vetro sono disponibili ovunque;
- il vetro è un materiale atossico ed inerte per l'ambiente, nonché impermeabile alla CO<sub>2</sub>;
- il vetro è un materiale che nel mare ha durata geologica, molte migliaia di anni;
- non c'è contatto tra CO<sub>2</sub> ed acqua del mare;
- è una tecnologia industrializzabile e modulare;
- la vicinanza a mare con profondità adeguate è comune a molti paesi del mondo.

Gli studi preliminari realizzati, presentati in Caserini et al., 2017 (Evaluation of a new technology for carbon dioxide submarine storage in glass capsules. International Journal of Greenhouse Gas Control, 60, 140–155), e proseguiti nell'ambito del progetto Desarc-Maresanus, dimostrano la validità generale dell'idea e la reale possibilità di stoccare la CO<sub>2</sub> a costi comparabili rispetto allo stoccaggio geologico. Esistono tuttavia ancora problematiche tecniche da studiare, come il sistema di riempimento in pressione delle capsule, il sistema di lancio sequenziale, il rilascio delle capsule sul fondo marino. La tecnologia è un'opzione disponibile e non sono stati identificati problemi tecnici irrisolvibili, pur richiedendo a monte la struttura industriale di una vetreria.

### CWI – Carbonated Water Injection

È una tecnologia di stoccaggio proposta da vari autori e già conosciuta nel settore Oil&Gas, consistente nell'iniettare in un acquifero salino profondo una miscela di acqua e CO<sub>2</sub>, nelle proporzioni di circa 25:1 (in peso). In questo modo non è più necessario disporre, come nello stoccaggio geolo-

gico tradizionale, di uno strato di roccia integro ed impermeabile che isola la zona di iniezione della  $\text{CO}_2$  dagli strati superiori impedendo di fatto la fuoriuscita della  $\text{CO}_2$  in superficie. L'iniezione di acqua carbonata nell'acquifero salino profondo elimina inoltre il rischio della possibile fuoriuscita incontrollata della  $\text{CO}_2$  dal deposito, elimina il rischio di sismologia indotta, semplifica gli studi geologici necessari sull'acquifero e amplia notevolmente l'area geografica dove si può immagazzinare  $\text{CO}_2$ . Questa tecnologia è particolarmente interessante soprattutto per l'Italia del Nord, dove sembrerebbe esserci un diffuso acquifero salino profondo e non esiste altra opzione di stoccaggio  $\text{CO}_2$  disponibile.

### **BIPR – Bicarbonate Increasing Pressure Reactor**

Questa proposta tecnologica, sviluppata nell'ambito del progetto Desarc-Maresanus, nasce come ottimizzazione della tecnologia proposta da G. Rau e K. Caldeira negli anni 1999-2000 (Enhanced carbonate dissolution: a means of sequestering waste  $\text{CO}_2$  as ocean bicarbonate. Energy Convers. Manag. 1999, 40, 1803-1813), e consiste nell'accelerare la naturale reazione di dilavamento delle rocce carbonatiche da parte delle precipitazioni: il

contatto delle rocce calcaree con l'acqua in presenza di  $\text{CO}_2$  porta ad una soluzione di acqua e bicarbonati, che sono convogliati dai fiumi nel mare. La tecnologia proposta da Rau e Caldeira propone di accelerare in un reattore dette reazioni, e di disporre nel mare profondo la soluzione di acqua e bicarbonati. La disposizione della soluzione di bicarbonati di calcio in mare rappresenta uno stoccaggio a lungo termine della  $\text{CO}_2$ , ed ha inoltre effetti benefici sull'alcalinità dell'oceano contrastandone l'acidificazione. La tecnologia BIPR, valorizzando i concetti di fondo della tecnologia proposta da Rau e Caldeira, ne ottimizza il consumo di acqua con un reattore di concezione differente che sfrutta la pressione del mare profondo per accelerare le reazioni tra il carbonato, la  $\text{CO}_2$  e l'acqua per la formazione di bicarbonati.

Tale tecnologia ha il pregio di essere modulare, di poter essere applicata in molti paesi del mondo che hanno la disponibilità di un mare profondo più di 2000 m ad una distanza di 10 km – 150 km dalla costa, e soprattutto di utilizzare come “ingredienti” solo acqua di mare e roccia carbonatica, quest'ultima una delle rocce più disponibili e economiche sulla crosta terrestre.

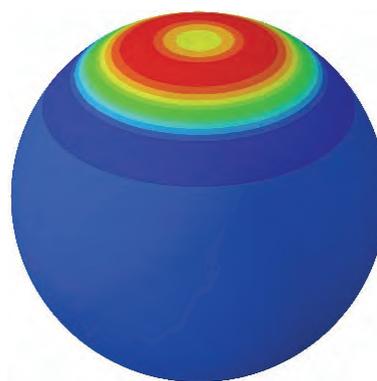
Tale tecnologia sarà ulteriormente studiata nell'ambito del progetto Desarc-Maresanus.

## **ANALISI STRUTTURALE DI CAPSULE IN VETRO PER LO STOCCAGGIO SOTTOMARINO DI $\text{CO}_2$**

Massimiliano Cremonesi, Cheng Fu, Nicola Cefis, Martina Colombo, Alberto Corigliano, Umberto Perego  
Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale (massimiliano.cremonesi@polimi.it)

Lo stoccaggio sottomarino di  $\text{CO}_2$  in capsule di vetro è una tecnologia innovativa studiata per permettere lo stoccaggio di  $\text{CO}_2$  laddove altre tipologie di stoccaggio non sono disponibili. La  $\text{CO}_2$  catturata da sorgenti industriali è iniettata in forma liquida in capsule di vetro, che vengono poi depositate sul fondo del mare, ad una profondità variabile tra i 1000 e i 2000 metri.

Nel nostro lavoro ci siamo occupati della fattibilità di questo tipo di processo dal punto di vista della resistenza strutturale delle capsule. In particolare, ci siamo occupati dello studio della miglior forma possibile delle capsule e del loro spessore ottimale per evitare la rottura e la conseguente fuoriuscita di  $\text{CO}_2$ , minimizzando al contempo il consumo di vetro. Dalle nostre analisi abbiamo determinato che la forma ottimale per la capsula è quella sferica, con uno spessore variabile che va dai 10mm nella zona del tappo ai 2mm



*Esempio di distribuzione di sforzi sulla capsula sferica*

nel resto della sfera. La configurazione così ottenuta è stata testata nelle situazioni considerate più critiche: la fase di riempimento e la fase di deposizione sul fondo del mare. In entrambi i casi, le sollecitazioni calcolate hanno rispettato i criteri

di resistenza del materiale utilizzato, confermando quindi l'adeguatezza strutturale della soluzione proposta.

Successivamente ci siamo occupati della fase di caduta delle capsule dal tubo di lancio fino al fondo del mare. Sono stati considerati quattro scenari: (i)

caduta su suolo roccioso; (ii) caduta su suolo sabbioso; (iii) caduta su di un'altra sfera; (iv) caduta su un gruppo di sfere. In tutti i casi considerati, i calcoli svolti hanno mostrato che il picco di sforzo dovuto all'impatto non compromette la sicurezza strutturale delle capsule.

## BENEFICI E IMPATTI PER L'AMBIENTE MARINO DALLA VARIAZIONE DEL pH

Caterina Lanfredi, Valentina De Santis, Arianna Azzellino

Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale (caterina.lanfredi@polimi.it)

Fino ad oggi, i potenziali effetti dell'alcalinizzazione dell'oceano sull'ambiente marino, sono stati poco studiati, principalmente attraverso esercizi teorici e di modellizzazione, e sono stati testati solo in pochi casi, in laboratorio o in-situ, assumendo tempi di esposizione differenti. Bach e colleghi (2019) hanno recentemente pubblicato una esaustiva panoramica sui potenziali impatti dell'alcalinizzazione dell'oceano sull'ecosistema marino. Gli autori hanno ipotizzato che gli organismi marini calcificatori, come i coralli (Albright et al., 2016), i crostacei e le alghe (Gore et al., 2019), che dipendono fortemente dalle variazioni di carbonio e derivati, potrebbero avere alcuni benefici (ad es. l'aumento dei tassi di calcificazione) dall'alcalinità indotta. Tuttavia, la variabilità della risposta a questi effetti è specie-specifica (Langer et al., 2006) e differisce tra le diverse fasi della vita. Quindi, questi "benefici" potrebbero anche portare a dei cambiamenti nella composizione delle specie (ad es. nella struttura della comunità del plancton), a favore di alcune specie e a scapito di altre (Hansen, 2002; Hinga 2002; Langer et al., 2006; 2009). Gli effetti dell'alcalinizzazione sulla catena alimentare sono complessi e difficili da prevedere. La biomassa e struttura dimensionale degli organismi zooplanctonici (es. copepodi) potrebbero esserne influenzate negativamente (Cripps et al., 2014; Taucher et al., 2017); essendo questi organismi probabilmente quelli più fortemente impattati dallo sversamento in mare di calce idrata. Tuttavia, ad oggi le conoscenze sugli specifici impatti che le variazioni di pH possono causare alle comunità planctoniche sono scarse. Alcuni autori (es. Langer et al., 2006) hanno riportato alternazioni nel tasso di crescita di alcune specie fitoplanktoniche dovute a variazioni della concentrazione di ioni carbonato. Più noti sono gli effetti fisiologici su specie bentoniche. D'altro canto, l'aumento dell'alcalinità potrebbe portare benefici contribuendo a ripristinare le strutture degli ecosistemi che hanno subito cambiamenti a causa della continua

acidificazione dell'ambiente marino (es. coralligeno), andando a compensare l'acidificazione che il Mediterraneo potrebbe continuare a subire nei prossimi decenni. Rispetto quindi al potenziale effetto sull'ambiente marino dovuto all'introduzione di calce idrata in mare, è necessario considerare sia gli impatti sul breve che sul lungo periodo. Nel breve periodo l'effetto tossico e potenzialmente letale (Gim 2018, Byeong-Mo et al., 2018) sulle specie planctoniche esposte dipenderà fortemente dalla vulnerabilità delle specie presenti, dalla concentrazione di picco di calce idrata sversata nonché dalla durata dell'esposizione (cinetica di dissoluzione della calce idrata nell'area di scarico). La mancanza di conoscenze scientifiche sugli impatti o benefici ambientali dell'alcalinizzazione degli oceani rimane un gap conoscitivo che sarà necessario colmare attraverso ulteriori studi e sperimentazioni in-situ.

### Riferimenti

- Albright Rebecca, Lilian Caldeira, Jessica Hosfelt, Lester Kwiatkowski, Jana K. Maclaren, Benjamin M. Mason, Yana Nebuchina, et al. (2016). "Reversal of Ocean Acidification Enhances Net Coral Reef Calcification." *Nature* 531 (7594): 362-65.
- Cripps Gemma, Penelope Lindeque, and Kevin J. Flynn. (2014). "Have We Been Underestimating the Effects of Ocean Acidification in Zooplankton?" *Global Change Biology* 20 (11): 3377-85.
- Cripps Gemma, Stephen Widdicombe, John I. Spicer, and Helen S. Findlay (2013). "Biological Impacts of Enhanced Alkalinity in *Carcinus Maenas*." Supplement to: Cripps, G et al. (2013): Biological Impacts of Enhanced Alkalinity in *Carcinus Maenas*. *Marine Pollution Bulletin*, 71(1-2), 190-198, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.03.015> <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.829880>.
- Gim B.M., Hong S., Lee J.S. Kim, N.H., Kwon E.M., Gil J.W., ... & Khim J.S. (2018). Potential ecotoxicological effects of elevated bicarbonate ion concentrations on marine organisms. *Environmental Pollution*, 241, 194-199.
- Gore S., Renforth P., & Perkins R. (2019). The potential environmental response to increasing ocean alkalinity for negative emissions. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24(7), 1191-1211.

- Hansen P.J. (2002). Effect of high pH on the growth and survival of marine phytoplankton: implications for species succession. *Aquatic microbial ecology*, 28(3), 279-288.
- Hinga K.R. (2002). Effects of pH on coastal marine phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 238, 281-300.
- Langer G., Markus Geisen, Karl-Heinz Baumann, Jessica Kläs, Ulf Riebesell, Silke Thoms, and Jeremy R. Young. 2006. "Species-Specific Responses of Calcifying Algae to Changing Seawater Carbonate Chemistry." *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 7 (9). <https://doi.org/10.1029/2005GC001227>.
- Langer G., G. Nehrke, I. Probert, J. Ly, and P. Ziveri. 2009. "Strain-Specific Responses of *Emiliania Huxleyi* to Changing Seawater Carbonate Chemistry." *Biogeosciences* 6 (11): 2637-46. <https://doi.org/10.5194/bg-6-2637-2009>.
- Taucher Jan, Mathias Haunost, Tim Boxhammer, Lennart T. Bach, María Algueró-Muñiz, and Ulf Riebesell. 2017. "Influence of Ocean Acidification on Plankton Community Structure during a Winter-to-Summer Succession: An Imaging Approach Indicates That Copepods Can Benefit from Elevated CO<sub>2</sub> via Indirect Food Web Effects." *PLOS ONE* 12 (2): e0169737. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169737>.

## IL PROGETTO "CLEANKER": CATTURA CO<sub>2</sub> NELL'INDUSTRIA DEL CEMENTO

Martina Fantini

Laboratorio Energia e Ambiente Piacenza (LEAP s.c.a r.l.) ([martina.fantini@polimi.it](mailto:martina.fantini@polimi.it))

Il progetto di ricerca europeo per la cattura della CO<sub>2</sub> (CCS/U – Carbon Capture and Storage/Utilization), finanziato nell'ambito del programma quadro Horizon 2020, vede il LEAP come coordinatore ed è stato ufficialmente avviato il 1° ottobre 2017 presso la sede piacentina del Politecnico di Milano e durerà quattro anni.

Si tratta del progetto CLEANKER (Clean clinker production by calcium looping process – Produzione di clinker con cattura della CO<sub>2</sub> attraverso la tecnologia del calcium looping), una iniziativa ambiziosa e affascinante che, se le aspettative saranno confermate, potrebbe rappresentare un'importante innovazione per il settore del cemento verso una ancora maggiore sostenibilità ambientale del processo produttivo. Obiettivo della ricerca è verificare la possibilità di "catturare" l'anidride carbonica generata durante il ciclo produttivo del cemento evitandone il rilascio in atmosfera, perseguendo dunque il fine ultimo di contribuire a contenere l'effetto serra.

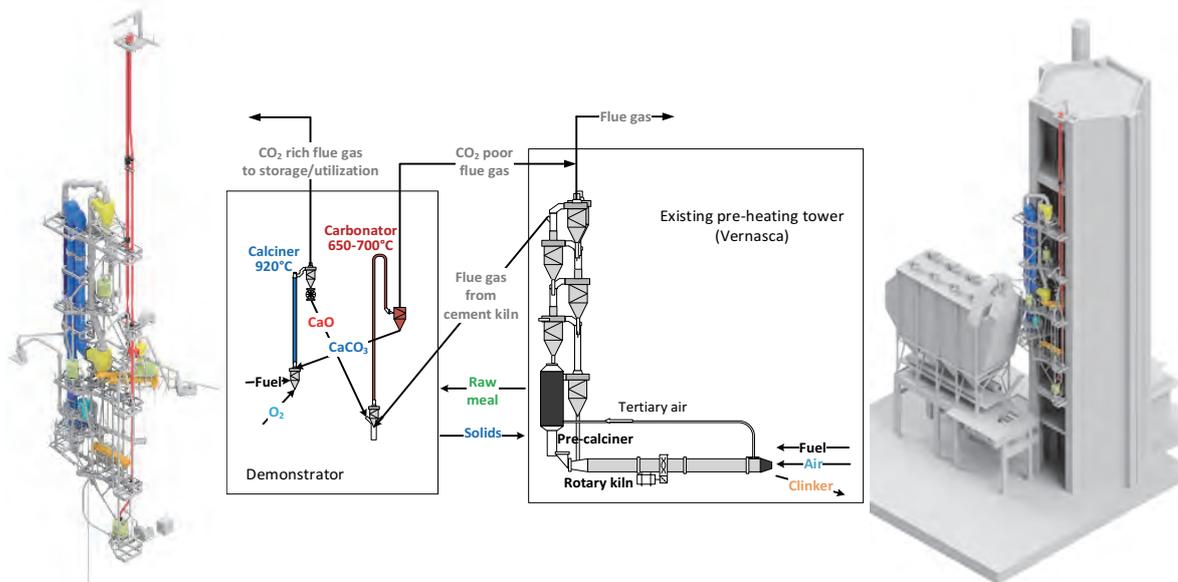
La cattura della CO<sub>2</sub>, associata alla successiva fase di stoccaggio, è un processo chiave per le strategie dell'Unione Europea in tema di contenimento delle emissioni di gas serra. Una volta catturata infatti, ovvero opportunamente isolata come flusso a sé stante a valle del processo produttivo, l'anidride carbonica può essere stoccata in opportuni siti geologici o utilizzata come "materia prima" per la sintesi di prodotti chimici di base o di combustibili.

La tecnologia studiata nell'ambito del progetto CLEANKER, volta a ridurre le emissioni di gas ad effetto serra in ambito industriale cementiero, utilizzerà il principio del "Calcium looping", ad oggi una delle soluzioni più promettenti per questo settore. Questa tecnologia, fino ad ora sperimentata solo in laboratorio, per la prima volta al mondo viene integrata su scala pilota in un impianto produttivo industriale messo a disposizione dal Gruppo

Buzzi Unicem (stabilimento di Vernasca), partner del progetto.

La ricerca è finanziata all'interno di Horizon 2020 (H2020), il Programma Quadro settennale (2014-2020) con cui la Commissione Europea finanzia le più promettenti attività di ricerca, innovazione e trasferimento tecnologico in Europa. La decarbonizzazione dell'industria del cemento è prioritaria per l'Unione Europea in quanto gran parte dell'anidride carbonica presente nella corrente gassosa in uscita dal processo di produzione del cemento è ascrivibile alla materia prima utilizzata, il calcare, e non può essere evitata se non evitandone la produzione, soluzione evidentemente impraticabile. Il cemento è prodotto a partire dal cosiddetto "clinker", materiale ottenuto per cottura ad elevata temperatura di una miscela di materie prime costituite principalmente da calcare (carbonato di calcio), che scaldato ad elevate temperature, si scinde naturalmente in ossido di calcio e anidride carbonica (decarbonatazione). Con la tecnologia del Calcium Looping è in teoria possibile produrre cemento catturando oltre il 90% dell'anidride carbonica prodotta: grazie al progetto CLEANKER si potrà giungere ad una stima delle modifiche e degli investimenti necessari per i cementifici esistenti e dei costi operativi, per arrivare a valutare la sostenibilità economica della tecnologia di cattura della CO<sub>2</sub>.

La durata prevista delle attività è di quattro anni. Il primo anno e mezzo è stato dedicato all'ingegneria dell'impianto pilota, il secondo ha visto l'inizio della sua costruzione che verrà ultimata in primavera 2020 e l'ultimo anno e mezzo sarà dedicato alle campagne sperimentali e all'analisi dei risultati. Nei prossimi mesi, si ultimeranno le fasi di installazione degli impianti, di durata complessiva di più di un semestre, che prevedono lavori in quota sulla torre dello stabilimento, necessari per i montag-



Rendering del dimostratore e schema d'impianto semplificato

gi dei componenti principali dell'impianto pilota, nonché delle macchine accessorie e degli allacciamenti elettrici. L'attuale flow sheet dell'impianto, inizialmente abbastanza semplice, è il frutto di oltre 693 disegni e numerose revisioni. La configurazione attuale, mostrata nel rendering di Figura 1, vede oltre 35 tubazioni principali, oltre 75 giunti di espansione per le compensazioni termiche e quasi 190 dispositivi di misura.

Il 15 e il 16 Maggio 2020 si terrà, presso lo stabilimento di Vernasca, l'inaugurazione del dimostratore che coinvolgerà sia gli stakeholder, a livello europeo, legati al mondo del cemento, che le comunità locali.

**Progetto CLEANKER in numeri:** data di avvio: 1 ottobre 2017; durata totale progetto: 48 mesi; budget totale: € 9.237.851,25; Contributo EU: € 8.972.201,25; 13 partner: LEAP (coordinatore), Buzzi Unicem, CSIC (Spagna), Italcementi, IKN (Germania), Università di Lappeenranta (Finlandia), Politecnico di Milano, Quantis (Svizzera), Università di Tallin (Estonia), Università di Tsinghua (Cina), Università di Stoccarda (Germania), ECRA – European Cement Research Academy/VDZ (Germania), Associazione Amici della Terra; per altre informazioni: [www.cleanker.eu](http://www.cleanker.eu).

**Contenuto innovativo del progetto:** dimostrare la fattibilità del processo integrato Calcium looping (CaL) ad un grado di maturità tecnologica avanzata (TRL 7: prototipo dimostrativo inserito in ambiente operativo) nei cementifici. Il dimostratore sarà realizzato presso il cementificio di Vernasca (Piacenza), gestito da BUZZI UNICEM.

**Contenuto strategico del progetto:** l'industria del cemento pesa per il 27% sulle emissioni globali di CO<sub>2</sub> nel settore industriale. Secondo la IEA (International Energy Agency) il settore del cemento, per contenere il riscaldamento globale entro i 2°C (IEA 2DS scenario), nel medio periodo dovrà garantire in Europa il maggior contributo in ambito industriale alla riduzione di emissioni di CO<sub>2</sub> attraverso tecnologie di cattura e stoccaggio (CCS). La dimostrazione su larga scala, inoltre, è indicata dalla Energy Roadmap 2050 della UE come un fattore chiave per il futuro delle tecnologie CCS.

**Obiettivi tecnico-economici dell'impianto dimostrativo:** fra i principali obiettivi dell'impianto dimostrativo CLEANKER vi è il raggiungimento di un'efficienza di cattura della CO<sub>2</sub> superiore al 90%, contenendo entro il 20% l'incremento dei consumi elettrici rispetto ad un impianto di riferimento senza cattura ed entro il valore di 25 €/t l'aumento del costo del cemento prodotto.

**LEAP:** LEAP – Laboratorio Energia e Ambiente Piacenza – è una società consortile partecipata dal Politecnico di Milano, dall'Università Cattolica del Sacro Cuore, da enti territoriali piacentini e da imprese. LEAP svolge attività di ricerca, consulenza e servizi nel settore dell'Energia e dell'Ambiente. LEAP è parte della Rete Alta Tecnologia dell'Emilia-Romagna e del Tecnopolo di Piacenza.

Altre informazioni sono reperibili al sito web: [www.leap.polimi.it](http://www.leap.polimi.it).



# INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2020 è sostenuta da:



better together



INGEGNERIA  
DELL'AMBIENTE



N. 1/2020

