

Seminario tecnico-scientifico

VALORIZZAZIONE DI RESIDUI INDUSTRIALI CON EVENTUALE UTILIZZO DI CO₂ DA FONTI EMISSIVE

10 marzo 2026 - 14.00-18.00

Sala Convegni – Università degli studi di Roma Tor Vergata
via del Politecnico, 1 - Roma

Questo seminario affronterà il tema delle strategie di valorizzazione di residui industriali come scorie di acciaieria, residui da termovalorizzazione di rifiuti, ceneri dalla combustione di biomasse e rifiuti di costruzione e demolizione, al fine di ottenere aggregati riciclati o artificiali e altre tipologie di materiali da costruzione. Verrà discussa non solo la compatibilità tecnica dei prodotti, ma anche come valutare la compatibilità ambientale del loro utilizzo e quindi definire criteri End of Waste specifici. Particolare attenzione verrà attribuita ai processi di trattamento che possono consentire non solo di ottenere prodotti valorizzabili ma anche di stoccare in forma solida e permanente le emissioni di CO₂ provenienti da fonti puntuali, come nel progetto di ricerca portato avanti nell'ambito del progetto Rome Technopole dall'unità di Tor Vergata. Verranno fornite le esperienze delle aziende che generano o trattano i residui.

REGISTRAZIONE
14.00 – 14.30

Moderano:

Francesco Lombardi – Paola Muraro – Andrea Eleuteri
Università degli Studi di Roma Tor Vergata – ATIA ISWA ITALIA -

SALUTI ISTITUZIONALI

14.30 – 15.00

Renato Baciocchi - Università degli Studi di Roma Tor Vergata – Prorettore al trasferimento Tecnologico
Massimiliano Caramia - Università degli Studi di Roma Tor Vergata – Coordinatore Macroarea di Ingegneria
Massimo Cerri – Presidente dell’Ordine degli ingegneri della Provincia di Roma
Paolo Massarini – Presidente ATIA ISWA ITALIA
Paolo Barberi – ANPAR

FOCUS
15.00- 16.15

Le norme comunitarie e nazionali per la gestione dei residui alcalini: situazione attuale e prospettive future

Mario Sunseri – ANPAR

Le autorizzazioni per gli impianti di recupero dei rifiuti con focus sui residui alcalini

Ferdinando Leone – Regione Lazio

La gestione dei residui alcalini e le tecniche innovative di valorizzazione

Giulia Costa – Università degli Studi di Roma Tor Vergata

Approcci risk-based per la definizione di criteri End of Waste

Iason Verginelli – Università degli Studi di Roma Tor Vergata

PROGETTI DI RICERCA

16.15 - 17.00

Progetto Rome Technopole: Valorizzazione di residui industriali con stoccaggio di anidride carbonica

Alessandra Masi – Università degli Studi di Roma Tor Vergata

Valutazione del comportamento ambientale e della ecotossicità degli aggregati di riciclo ed artificiali

Andrea Paina – ISPRA

ESPERIENZE APPLICATIVE

17.00 -18.00

RESILCO Srl – Alessia Motta; **Tapojarvi Italia Srl** – Floriana Marafioti; **WATRECO** – Alessandro Giardiello



Seminario tecnico-scientifico VALORIZZAZIONE DI RESIDUI INDUSTRIALI CON EVENTUALE UTILIZZO DI CO2 DA FONTI EMISSIVE

Le autorizzazioni per gli impianti di recupero dei rifiuti con focus sui residui alcalini
Ing. Ferdinando Maria Leone, Dirigente Area A.I.A. Regione Lazio

 Martedì 10 Marzo 2026

 14:00 - 18.00

 Sala Convegni – Università degli studi di Roma Tor Vergata

Le autorizzazioni per gli impianti di recupero dei rifiuti

L'autorizzazione per gli impianti di recupero di rifiuti, inclusi quelli che trattano **residui alcalini** (come scorie di incenerimento, polveri di abbattimento fumi o residui industriali chimici), segue il quadro normativo del **D.Lgs. 152/2006** (Codice dell'Ambiente)

A seconda della tipologia di impianto, della pericolosità del residuo e dei volumi trattati, le procedure principali sono:

1. Autorizzazione Unica (Art. 208 D.Lgs. 152/2006)

È il titolo autorizzativo standard per la realizzazione e l'esercizio di nuovi impianti di smaltimento e recupero rifiuti.

Caratteristiche: Sostituisce ogni altro visto, parere o autorizzazione (paesaggistica, ambientale, ecc.).

Durata: Ha una validità di 10 anni ed è rinnovabile presentando domanda 180 giorni prima della scadenza.

2. Autorizzazione di impianti di ricerca e di sperimentazione (Art. 211 D.Lgs. 152/2006)

È il titolo autorizzativo finalizzato a testare un procedimento innovativo (come può essere quello dei residui alcalini) finalizzato a verificare i dati di laboratorio su scala industriale.

La durata dell'autorizzazione è di due anni, salvo proroga che può essere concessa previa verifica annuale dei risultati raggiunti e non può comunque superare altri due anni. I termini del procedimento di cui ((all'articolo 208)) sono ridotti alla metà e si devono rispettare le seguenti condizioni/limitazioni:

- a) le attività di gestione degli impianti non comportino utile economico;
- b) gli impianti abbiano una potenzialità non superiore a 5 tonnellate al giorno, salvo deroghe giustificate dall'esigenza di effettuare prove di impianti caratterizzati da innovazioni, che devono però essere limitate alla durata di tali prove.

Le autorizzazioni per gli impianti di recupero dei rifiuti

L'autorizzazione per gli impianti di recupero di rifiuti, inclusi quelli che trattano **residui alcalini** (come scorie di incenerimento, polveri di abbattimento fumi o residui industriali chimici), segue il quadro normativo del **D.Lgs. 152/2006** (Codice dell'Ambiente)

A seconda della tipologia di impianto, della pericolosità del residuo e dei volumi trattati, le procedure principali sono:

3. Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA)

Necessaria per impianti con capacità produttive elevate o ad alto impatto ambientale, tipici della grande industria chimica o metallurgica che genera residui alcalini.

Gli impianti che ricadono in AIA sono indicati nell'allegato VIII alla parte seconda del D.Lgs. 152/2006 e s.m.i.

Funzione: L'AIA sostituisce l'autorizzazione unica ex art. 208 per la gestione dei rifiuti all'interno del complesso industriale.

Requisiti: Richiede l'adozione delle BAT (Best Available Techniques) per minimizzare l'impatto ambientale complessivo.

L'Autorizzazione dell'impianto deve essere riesaminata ogni qual volta vengono pubblicate nuove BAT per il settore industriale di riferimento entro 4 anni dalla loro pubblicazione.

All'Autorizzazione è associato obbligatoriamente un Piano di Monitoraggio e Controllo approvato da ISPRA o ARPA, che indica e dispone le modalità e frequenze di automonitoraggio e di monitoraggio degli stessi organi di controllo.

4. Procedure Semplificate (Art. 214-216 D.Lgs. 152/2006)

Applicabili solo se il recupero dei residui alcalini rispetta rigorosi requisiti tecnici e quantitativi prestabiliti da decreti ministeriali specifici. Consiste in una comunicazione di inizio attività alla Provincia o alla Città Metropolitana.

Focus sui Residui Alcalini e "End of Waste"

Il recupero di residui alcalini è spesso finalizzato alla loro trasformazione in materie prime seconde per l'edilizia (es. aggregati) o per processi di neutralizzazione acida. Molti residui alcalini sono classificati come rifiuti speciali (pericolosi o non). L'autorizzazione specifica le operazioni di recupero ammesse (es. R5 per il riciclo di sostanze inorganiche).

Cessazione della qualifica di rifiuto (End of Waste): Per essere commercializzati come prodotti, i residui devono soddisfare i criteri stabiliti da regolamenti specifici (es. DM 124/2024 per i rifiuti inerti).

La cessazione della qualifica di rifiuto è disciplinata dall'art.184ter del D.Lgs. 152/2006 e s.m.i.

Il comma 1 dell'art. 184ter definisce le condizioni che bisogna rispettare ai fini della cessazione di qualifica di rifiuto (tutte da rispettare contemporaneamente):

- a) *la sostanza o l'oggetto sono destinati a essere utilizzati per scopi specifici;*
- b) *esiste un mercato o una domanda per tale sostanza od oggetto;*
- c) *la sostanza o l'oggetto soddisfa i requisiti tecnici per gli scopi specifici e rispetta la normativa e gli standard esistenti applicabili ai prodotti;*
- d) *l'utilizzo della sostanza o dell'oggetto non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o sulla salute umana.*

In assenza di criteri specifici stabiliti da regolamenti già emanati il comma 3 dell'art. 184ter del D.Lgs. 152/2006 e s.m.i. prevede l'autorizzazione cosiddetta «caso per caso» indicando che *...le autorizzazioni di cui agli articoli 208, 209 e 211 e di cui al titolo III-bis della parte seconda del presente decreto, per lo svolgimento di operazioni di recupero ai sensi del presente articolo, sono rilasciate o rinnovate nel rispetto delle condizioni di cui all'articolo 6, paragrafo 1, della direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 19 novembre 2008, e sulla base di criteri dettagliati, definiti nell'ambito dei medesimi procedimenti autorizzatori previo parere obbligatorio e vincolante dell'ISPRA o dell'Agenzia regionale...*

Focus sui Residui Alcalini e "End of Waste"

Quadro Normativo (DM 127/2024): Dal 2025, il recupero dei rifiuti inerti (inclusi materiali con caratteristiche alcaline provenienti da processi industriali) è regolato dal DM 127/2024, che detta criteri specifici per la cessazione della qualifica di rifiuto, distinguendo tra casi autorizzabili tramite procedura semplificata e casi che richiedono autorizzazione ordinaria.

Linea Guida di Regione Lombardia: La Regione Lombardia sta allargando i possibili utilizzi dei materiali "End of Waste" derivati, cercando di facilitare il riutilizzo anche oltre i limiti previsti dal regolamento nazionale, con un forte focus sull'economia circolare per evitare il conferimento in discarica.

La Giunta della Regione Lombardia ha approvato, con la **Delibera n. 5224 del 13 settembre 2021**, le **Linee guida per la gestione delle scorie nere di acciaieria a forno elettrico (tipico residuo alcalino)**, per assicurarne un utilizzo sicuro e conforme alla normativa EoW.

Le Linee guida sono parte integrante della delibera e hanno l'obiettivo di fornire a tutti i soggetti coinvolti un quadro di riferimento tecnico/normativo chiaro e condiviso per la gestione circolare di alcuni dei principali residui delle attività siderurgiche/metallurgiche presenti sul territorio regionale. In particolare, forniscono:

- indicazioni alle Autorità competenti per l'autorizzazione "caso per caso", in procedura ordinaria o in AIA, della cessazione della qualifica del rifiuto delle scorie nere da acciaieria a forno elettrico;
- uno strumento di supporto ai produttori per la gestione come sottoprodotto, al fine di valutare e dimostrare il rispetto dei criteri dell'art. 184-bis del D. Lgs 152/2006.
- I criteri definiti nella linea guida tecnica, sia per la gestione del residuo come "sottoprodotto", sia per la gestione come "rifiuto che ha cessato di essere tale" (End of Waste), intendono quindi costituire un riferimento a livello regionale per tutti i soggetti coinvolti (produttori, recuperatori, Autorità competenti).

Focus sui Residui Alcalini e "End of Waste"

Le Linee Guida della Regione Lombardia prevedono l'impiego delle scorie nere di acciaieria in sostituzione degli inerti naturali per:

- rilevati e sottofondi stradali;
- manti di usura, binder e stabilizzato a bitume;
- opere di ingegneria civile;
- strato drenante di copertura ("capping") di discarica;
- strati portanti in misto cementato;
- confezionamento di calcestruzzi (ordinari e speciali);
- produzione di aggregati per miscele bituminose;
- trattamenti superficiali per strade, aeroporti e altre aree soggette a traffico.

Secondo dette Linee Guida i vantaggi non riguardano solo gli aspetti meramente ambientali (riduzione dello sfruttamento delle risorse naturali, riduzione dell'impatto paesaggistico, riduzione del consumo di suolo, ecc.), ma anche gli aspetti caratteristici dell'economia circolare (utilizzo di materiale altrimenti destinato in discarica) nonché tecnico-prestazionali.

La conformità ai disposti previsti dalle Linee Guida sostituisce, di fatto, il parere di ARPA previsto dall'art. 184-ter del D.Lgs. n. 152/2006 relativamente alla cessazione della qualifica di rifiuto delle scorie nere da acciaieria a forno elettrico.

Il documento, che attualmente ha valenza a livello regionale, è stato inviato al Ministero della Transizione Ecologica per un eventuale recepimento a livello statale, allo stato non avvenuto.

Focus sui Residui Alcalini e "End of Waste"

La Regione Lombardia ha evidenziato nelle Linee Guida (vedi Tabella 8) una serie di “vantaggi” derivanti dall’impiego della scoria nera siderurgica come sostituto degli aggregati di origine naturale:

Driver	Aggregati riciclati EAF-C	Aggregati di origine naturale	Note
Economia circolare	***	*	Il corretto riutilizzo delle scorie nere di acciaieria da forno elettrico consente di evitarne il collocamento improprio in discarica nell’ottica del principio fondante di economia circolare di riduzione delle discariche. A livello nazionale, la produzione media di scoria nera da forno elettrico (EAF-C) supera 1.800.000 ton/anno. Di queste, oltre 1.300.000 ton/anno sono prodotte in regione Lombardia.
Protezione delle risorse naturali	***	*	L’impiego delle scorie nere di acciaieria in sostituzione degli aggregati di origine naturale risponde appieno alla stringente esigenza globale di riduzione dello sfruttamento delle risorse naturali , consentendo di ridurre, in particolare in questo caso, i volumi di escavazione di ghiaia.
Tutela del territorio	**	*	L’impiego delle scorie nere di acciaieria in sostituzione degli aggregati di origine naturale consente intrinsecamente di ridurre gli impatti ambientali dovuti all’operatività di cava , per esempio riduzione del consumo del suolo e riduzione degli impatti paesaggistici.
Aspetti tecnici	***	***	La scoria nera di acciaieria ha un peso specifico maggiore dell’aggregato naturale, rappresentando questa caratteristica la principale differenza in termini tecnici e restringendone alquanto i campi di utilizzo. Tuttavia, in relazione ad altre proprietà e per alcuni specifici impieghi, è dimostrato che le scorie nere di acciaieria posseggono requisiti tecnico/prestazionali superiori ai materiali di origine naturale che vanno a sostituire (ad esempio nei manti stradali la maggiore aderenza allo pneumatico, la maggiore resistenza all’usura e alla frammentazione).

Tabella 8 – Principali vantaggi derivanti dall’utilizzo della scoria nera.

Esempi Virtuosi di recupero di rifiuti finalizzati all' End of Waste nella Regione Lazio

Il progetto proposto, denominato “LIFE 22-ENV-IT-INSPIREE”, ha previsto la realizzazione di un impianto per il recupero di Terre Rare ed altri metalli a partire da diverse tipologie di RAEE in ingresso, quali magneti permanenti, hard disk, lampade fluorescenti, batterie, ecc., attraverso un processo idrometallurgico sviluppato e brevettato dall'Università dell'Aquila, utilizzabile su tutte le tipologie di RAEE.

L'impianto sperimentale di recupero Terre Rare è stato localizzato all'interno dello dell'esistente Stabilimento Itelyum Regeneration S.p.A. di Ceccano (FR) dedicato alla rigenerazione di oli, in corrispondenza di aree



Figura 1 - Localizzazione del nuovo impianto di recupero di Terre Rare da RAEE

L'impianto sperimentale è stato autorizzato, ai sensi dell'art. 211 del D.Lgs. 152/2006 e degli artt. 15 e 16 della L.R. 27/1998, con Determinazione della Regione Lazio n. G12408 del 21 settembre 2023, per una durata di due anni a partire dalla data del rilascio della presa d'atto del certificato di collaudo e dell'autorizzazione all'esercizio, con possibilità di proroga per un massimo di ulteriori due anni.

Introduzione della Sperimentazione



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DELL'AQUILA



DIIE
Dipartimento di Ingegneria
Industriale e dell'Informazione
e di Economia

Gli elementi delle terre rare (REEs) sono classificati dall'Unione Europea come materie prime critiche a causa della loro importanza strategica e delle limitate fonti di approvvigionamento a livello globale. Tra le risorse secondarie, i magneti permanenti a terre rare (magnetite NdFeB) sono particolarmente interessanti. Questi magneti sono ampiamente utilizzati in computer portatili, veicoli elettrici, turbine eoliche e telefoni cellulari. La relativamente breve vita utile di tali dispositivi comporta un crescente accumulo di prodotti a fine vita, che rappresenta non solo una sfida ambientale, ma anche un'importante opportunità di recupero delle risorse.

Il recupero delle REEs da fonti secondarie offre un duplice vantaggio: riduce la dipendenza dell'Europa dalle importazioni dalla Cina, principale fornitore mondiale di REEs, e contribuisce alla sostenibilità ambientale, evitando che materiali di valore finiscano nei flussi di rifiuti. Negli ultimi dieci anni, ampie ricerche condotte su scala di laboratorio hanno dimostrato la fattibilità tecnica dei percorsi idrometallurgici per il recupero delle REEs dai magneti NdFeB. Questi risultati promettenti hanno aperto la strada ad applicazioni su scala più ampia, a livello pilota e industriale. Nell'ambito del progetto New-RE, è stato realizzato un impianto pilota dedicato per validare i risultati di laboratorio in condizioni operative realistiche. Le attività su scala pilota hanno permesso di identificare le sfide tecniche legate all'aumento di scala e di testare e perfezionare soluzioni pratiche.

Ciò ha rafforzato la base scientifica del processo e generato preziosa esperienza operativa. Sulla base di questi risultati, la transizione alla scala industriale rappresenta il passo logico successivo.

Il recupero idrometallurgico delle REEs costituisce un pilastro delle strategie di metallurgia sostenibile e di economia circolare. Il progetto INSPIREE, che prevede la realizzazione del primo impianto idrometallurgico europeo dedicato al recupero delle REEs, segna un passo decisivo verso l'autonomia europea nelle risorse e il sostegno alle tecnologie verdi.

Risultati della Sperimentazione



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DELL'AQUILA



DIIE
Dipartimento di Ingegneria
Industriale e dell'Informazione
e di Economia

Durante le operazioni su scala pilota sono state affrontate diverse sfide tecniche, tra cui l'ottenimento di una miscelazione efficiente delle fasi durante la lisciviazione, l'efficacia della filtrazione e l'ottimizzazione della precipitazione dei carbonati di REE. Attraverso regolazioni sistematiche e ottimizzazione, questi problemi sono stati risolti con successo.

Una volta stabilite condizioni operative stabili, sono state condotte più campagne di recupero. In media, circa l'80% delle REEs è stato disciolto con successo durante la fase di lisciviazione. Una delle limitazioni affrontate è stata la relativamente bassa quantità di magneti NdFeB a fine vita raccolti, che ha portato a un riempimento sub-ottimale del reattore di lisciviazione. Operare con basso contenuto solido non era fattibile poiché le basse concentrazioni di REE risultanti avrebbero compromesso l'efficienza della precipitazione. I risultati dimostrano un'elevata purezza del prodotto, con contaminazione di ferro limitata a circa lo 0.1%.

Tabella 1. Composizione (in peso) del prodotto carbonato di REEs su scala pilota

	B %	Fe %	Dy %	Nd %	Ni %	Pr %	Tb %	Y %
Average	0.00	0.07	0.65	29.47	0.01	9.52	0.03	0.01

Conclusioni della Sperimentazione



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DELL'AQUILA



DIIE
Dipartimento di Ingegneria
Industriale e dell'Informazione
e di Economia

Le attività su scala pilota del progetto New-RE hanno dimostrato con successo la fattibilità tecnica e l'affidabilità operativa del recupero idrometallurgico delle REEs da magneti NdFeB a fine vita.

Basandosi sulle approfondite ricerche di laboratorio, l'impianto pilota ha validato le principali fasi del processo, tra cui lisciviazione, estrazione con solvente e precipitazione, producendo carbonato di REE ad alta purezza e di qualità costante.

Sulla base dei risultati ottenuti in laboratorio e su scala pilota, il progetto INSPIREE è ora pronto a passare alla fase industriale. Le conoscenze e l'esperienza accumulate offrono solide basi per lo scaleup, assicurando robustezza del processo, sicurezza e qualità del prodotto. Questo prossimo passo rappresenta un avanzamento cruciale nella metallurgia sostenibile, sostiene l'autonomia europea nelle materie prime critiche e sancisce la realizzazione del primo impianto idrometallurgico europeo per il recupero delle REEs, un traguardo fondamentale per l'economia circolare e le strategie di efficienza delle risorse.



Figura 5 - Interni del capannone industriale; sullo sfondo a destra le diverse sezioni dell'impianto sperimentale

Impianto di recupero Terre Rare da RAEE su scala Industriale

L'iniziativa progettuale che prevede la realizzazione dell'impianto industriale di recupero delle Terre Rare e caratterizzata da una rilevanza strategica a livello europeo, nazionale e locale in quanto:

il 23 maggio 2024 è entrato in vigore il Regolamento (UE) 2024/1252 del Parlamento Europeo e del Consiglio dell'11 aprile 2024 che istituisce un quadro atto a garantire un approvvigionamento sicuro e sostenibile di materie prime critiche e che modifica i regolamenti (UE) n. 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724 e (UE) 2019/1020, pubblicato sulla Gazzetta europea del 3 maggio 2024; gli elementi delle Terre Rare per magneti permanenti (Nd, Pr, Tb, Dy, Gd, Sm, e Ce) sono indicati nell'elenco delle **Materie Prime Strategiche** (MPS) riportato nell'Allegato I al Regolamento (UE) 2024/1252 e gli elementi delle terre rare pesanti e leggere sono indicati nell'elenco delle **Materie Prime Critiche** (MPC) riportato nell'Allegato II al Regolamento (UE) 2024/1252; tra le varie misure introdotte è previsto che i progetti relativi alle MPC siano riconosciuti di rilevanza strategica e che la procedura di rilascio delle autorizzazioni, ivi inclusa la VIA e l'AIA, non superi i 15 mesi per i progetti strategici che prevedono esclusivamente la trasformazione o il riciclaggio;

il nuovo impianto per il recupero delle Terre Rare da RAEE è cofinanziato dall'Unione europea attraverso il progetto LIFE22-ENV-IT-INSPIREE della durata di 42 mesi, che porterà alla progettazione e messa in funzione presso lo Stabilimento di Ceccano del **primo impianto su scala industriale in Europa per il riciclo di elementi di Terre Rare** (neodimio - Nd, praseodimio - Pr, disprosio - Dy) da magneti permanenti esausti provenienti da RAEE, definendo un modello per la gestione dei RAEE (raccolta, riciclo, smaltimento) da replicare in altri paesi dell'Unione europea;

il nuovo impianto contribuirà a creare un nuovo modello di filiera dell'**economia circolare**,

D.L. 84 del 25/06/2024

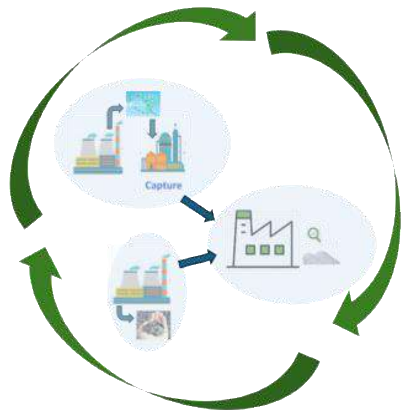
“Disposizioni urgenti sulle materie prime Critiche di interesse strategico”

Con il DL 25 giugno 2024, n. 84 recante *“Disposizioni urgenti sulle materie prime Critiche di interesse strategico”*, convertito con modificazioni dalla Legge 8 agosto 2024, n.115, è stata data attuazione nell’ordinamento nazionale alle disposizioni del Regolamento (UE) 2024/1252.

In linea con quanto previsto dall’articolo 9 del Regolamento (UE) 2024/1252 sono stati istituiti presso il MASE e presso il MIMIT tre Punti di Contatto per il rilascio dell'autorizzazione alla realizzazione di progetti strategici di estrazione, trasformazione e riciclaggio delle materie prime critiche strategiche.

Tale progetto rientra nei 47 progetti riconosciuti strategici dalla Commissione europea in data 25 marzo 2025.

In data 16 luglio 2025 la società Itelyum Regeneration S.p.a. ha presentato al Punto unico di contatto per il riciclaggio delle materie prime critiche, istituito ai sensi dell’art. 2 del DM del 12-06-2025 n. 146 presso la Direzione generale Economia Circolare e Bonifiche del Ministero dell’ambiente e della sicurezza energetica, l’istanza per l’avvio del procedimento per il rilascio dell’autorizzazione alla realizzazione del progetto strategico di riciclaggio delle materie prime critiche denominato *“Impianto di recupero delle terre rare provenienti dal trattamento dei magneti permanenti provenienti da apparecchiature elettriche ed elettroniche. Progetto LIFE 22ENV-IT-INSPIREE”*. Dopo l’esclusione dalla VIA per tale progetto è in corso la modifica sostanziale dell’AIA come endoprocedimento dell’autorizzazione ministeriale, giusto alla sua definizione prevista per il prossimo maggio 2026.



Seminario tecnico-scientifico

VALORIZZAZIONE DI RESIDUI INDUSTRIALI CON EVENTUALE UTILIZZO DI CO₂ DA FONTI EMISSIVE

10 marzo 2026 - 14.00-18.00

Sala Convegni – Università degli studi di Roma Tor Vergata

La gestione dei residui alcalini e le tecniche innovative di valorizzazione

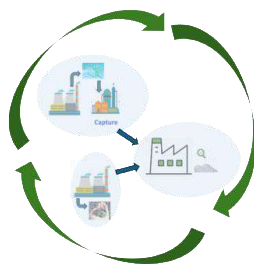
Giulia Costa, Alessandra Masi e Francesco Lombardi

Dip. Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica



TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

Residui alcalini - inquadramento



Rifiuti speciali non pericolosi (o pericolosi) derivanti da diverse tipologie di attività industriali o minerarie contenenti ossidi/idrossidi e/o silicati/alluminati/alluminosilicati e/o carbonati di Ca, Mg e Na e K che conferiscono loro un comportamento basico



Scarti da operazioni minerarie



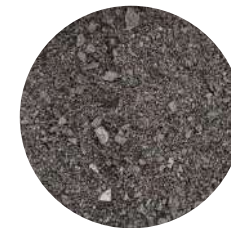
Scorie d'acciaieria



Scarti da produzione di cemento



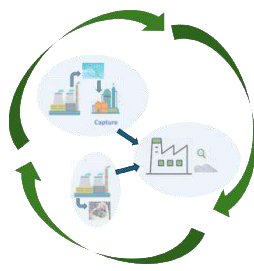
Rifiuti da Costruzione e demolizione



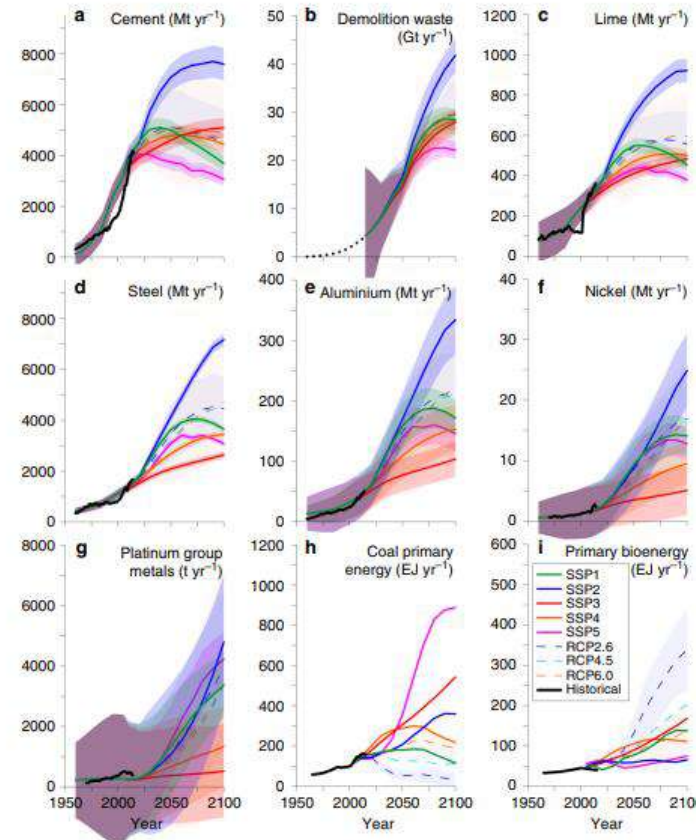
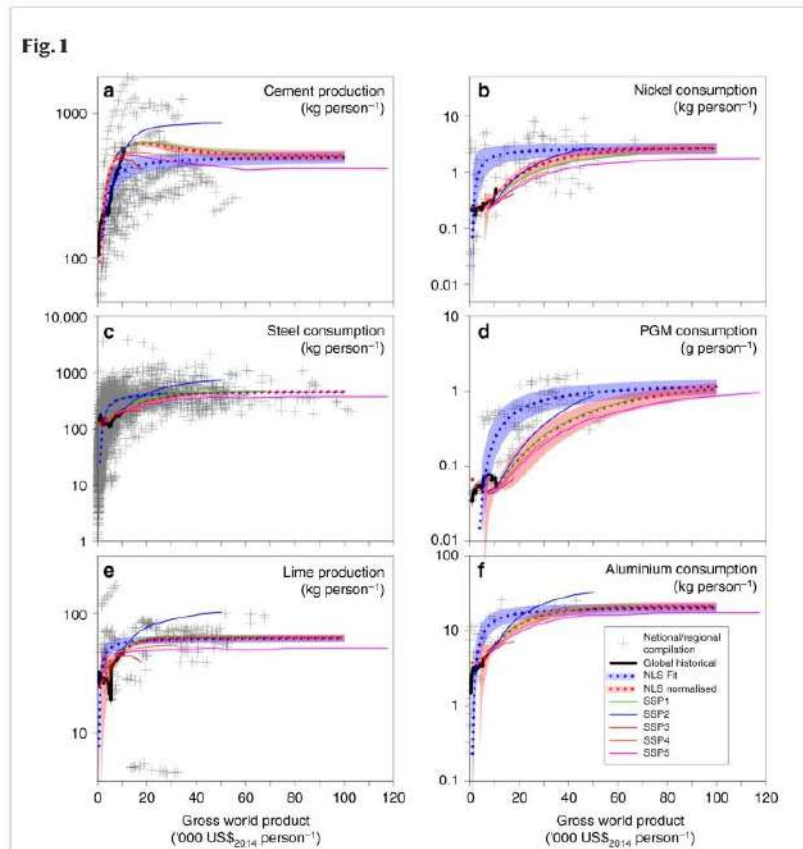
Residui da impianti di termovalorizzazione di rifiuti o da impianti a biomasse



Residui alcalini - inquadramento



Studio del 2019: Andamenti globali del consumo di risorse e produzione di residui

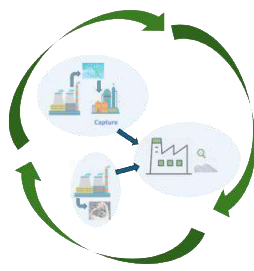


7 miliardi di tonnellate di residui alcalini generati annualmente attualmente a livello globale come da attività industriali.

Oltre ingenti quantità di residui “stoccati” in discarica, cave o impiegati in ripristini ambientali

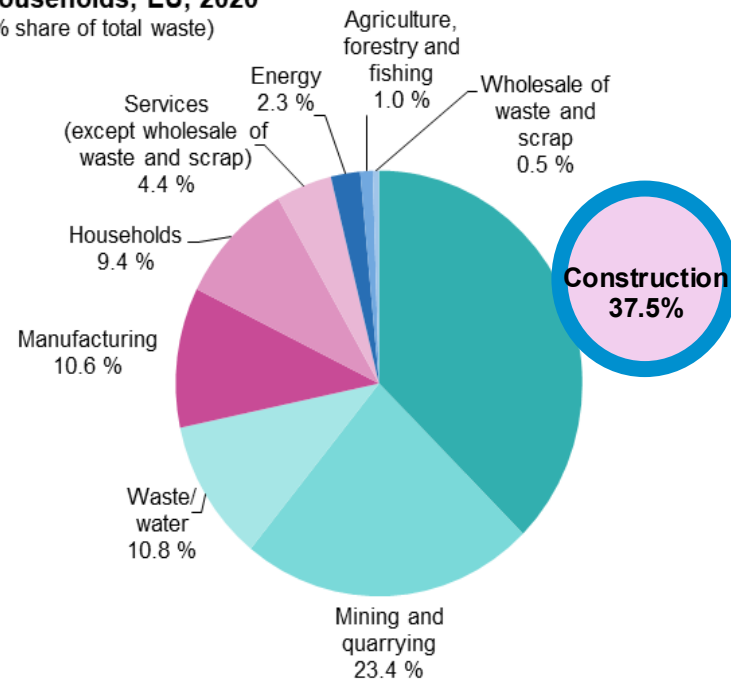
Renforth 2019, Nature Communications

Residui alcalini – Rifiuti da costruzione e demolizione



nell'UE

Waste generation by economic activities and households, EU, 2020
(% share of total waste)



in Italia

Report ISPRA Rifiuti speciali 2025

Tabella 3.5.1 – Produzione dei rifiuti da operazioni di costruzione e demolizione secondo la codifica del Regolamento (CE) n. 2150/2002 relativo alle statistiche sui rifiuti, anni 2019 – 2023

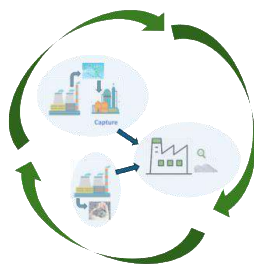
Aggregazione delle categorie dei rifiuti di cui all'allegato 1, sezione 2 del Regolamento (CE) n. 2150/2002		Aggregazione delle attività economiche secondo la classificazione NACE Rev. 2 di cui al Regolamento (CE) n. 1893/2006				
		F: Costruzioni				
		2019	2020	2021	2022	2023
Voce	Descrizione	(tonnellate)				
6.1	Rifiuti metallici ferrosi	4.293.323	3.843.886	4.952.316	4.622.820	4.593.989
6.2	Rifiuti metallici non ferrosi	367.526	290.664	423.660	454.329	445.558
6.3	Rifiuti metallici misti, ferrosi e non ferrosi	191.218	207.723	228.023	244.943	308.141
7.1	Rifiuti in vetro	87.833	82.287	104.216	99.552	107.825
7.4	Rifiuti in plastica	43.252	43.736	53.985	62.965	71.479
7.5	Rifiuti in legno	219.550	207.086	293.117	309.955	352.462
12.1	Rifiuti minerali della costruzione e della demolizione	46.880.379	45.506.917	53.340.326	54.755.527	55.747.784
Totale nazionale		52.083.081	50.182.299	59.395.643	60.550.091	61.627.238

Fonte: ISPRA

Source: Eurostat (online data code: env_wasgen)



Residui alcalini - Rifiuti da costruzione e demolizione



Gestione in Italia

Materiale da costruzione e demolizione	% in peso
Calcestruzzo (CLS) non armato	10
Calcestruzzo (CLS) armato	20
Laterizio	50
Asfalti	5
Scavi	6
Legno, carta, plastica	2,5
Metallo	3
Varie	3,5

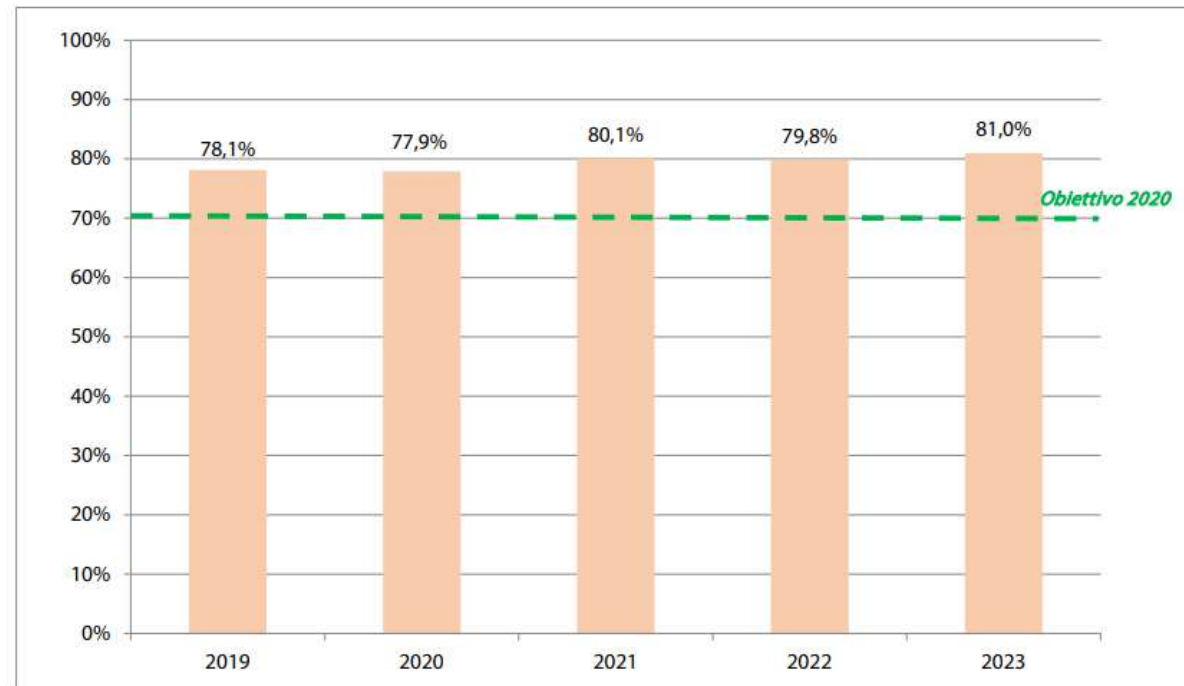
Composizione media in Italia (ARPA Veneto)



Recupero come aggregati riciclati

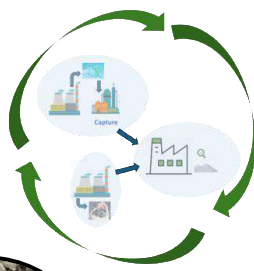
Report ISPRA Rifiuti speciali 2025

Figura 3.5.1 – Andamento della percentuale di preparazione per il riutilizzo, riciclaggio e delle altre forme di recupero di materia dei rifiuti da costruzione e demolizione, escluso il *backfilling*, anni 2019 – 2023



Fonte: ISPRA

Residui alcalini - Rifiuti da costruzione e demolizione



Gestione in Italia

Impianti di trattamento

Principalmente: Selezione, frantumazione e vagliatura



Impiego aggregati riciclati (DM 127/2024):

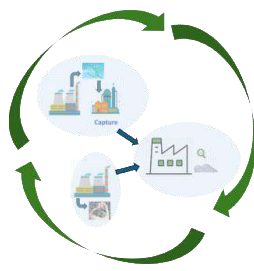
- Recuperi ambientali, colmate e riempimenti.
- Costruzione di rilevati per opere in terra dell'ingegneria civile.
- Miscele bituminose, sottofondi stradali, ecc.
- Strati di fondazione per infrastrutture di trasporto e piazzali.
- Strati accessori con funzione drenante, antigelo o anticapillare.
- Miscele legate con leganti idraulici, come misti cementati e miscele betonabili.
- Produzione di calcestruzzi.
- Produzione di clinker per cemento.
- Produzione di cemento.



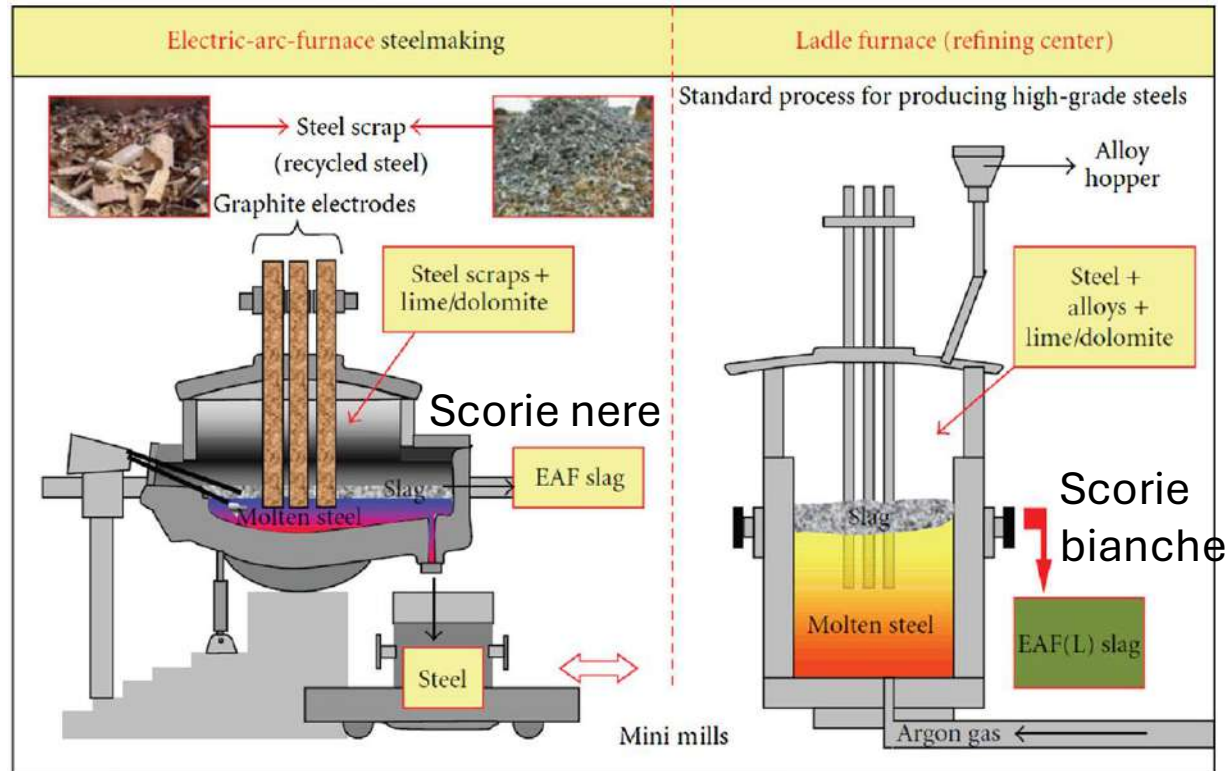
I materiali recuperati devono rispettare sia norme tecnico-prestazionali legate alla tipologia di utilizzo che valori limiti relativi alla lisciviazione di contaminanti mediante test standard (EN 12457-2) a parte nel caso dell'uso per cementi



Residui alcalini – Scorie d'acciaieria



L'Italia produce circa **20 Mt di acciaio l'anno** (dato 2024), principalmente tramite forno ad arco elettrico EAF (80% contro il 40% medio UE) generando -> 15-20% in peso di scorie



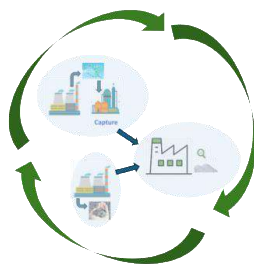
Tipicamente trattate per recuperare metalli ferrosi e acciaio da riutilizzare nel processo

Recente evoluzione: sistemi avanzati per massimizzare il recupero metallico e ottenere materiali inerti riutilizzabili tramite processi fisici e magnetici, spesso integrati con tecnologie di frantumazione e vagliatura a secco o a umido

Report ISPRA 2025: 629 mila ton di scorie non trattate provenienti dall'industria siderurgica + 299 mila ton di rifiuti del trattamento delle scorie generati dall'industria del ferro e dell'acciaio conferite in discarica nel 2023

➔ Scorie nere in particolare recuperate come aggregati artificiali per usi edili e stradali

Residui alcalini – Scorie d'acciaieria



Regione Lombardia ha approvato linee guida per la gestione e il recupero delle scorie nere (DGR n. XI/5224 del 13/09/2021) da forno elettrico (EAF-C), promuovendone l'uso come sottoprodotto o la cessazione della qualifica di rifiuto (End of Waste) mediante marcatura CE per garantire requisiti tecnici.



e recentemente anche criteri **End of Waste per scorie bianche** da metallurgia secondaria (DGR n. XII/3041 del 16/09/2024). Usi: Recupero ambientale, ripristino morfologico, colmata e come materiali da costruzione. Stabilizzazione e solidificazione per garantirne l'inertizzazione. Il materiale deve risultare conforme alle normative tecniche (es. marcature CE) e superare i test di cessione ed ecotossicità.

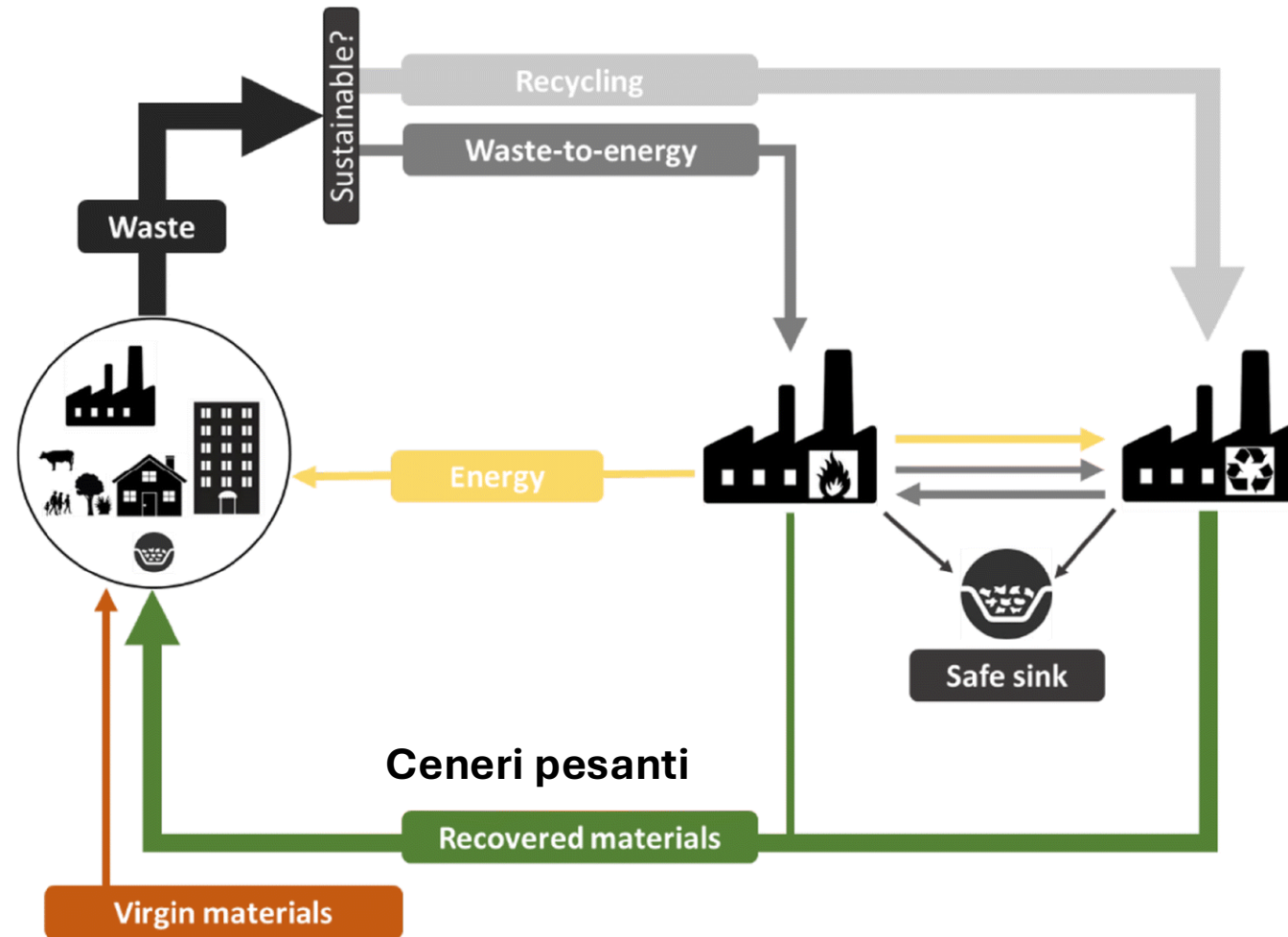
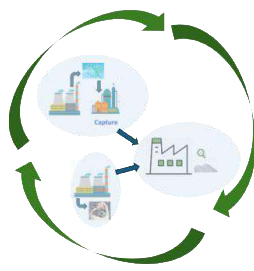
Vari progetti di ricerca per valorizzare le scorie di acciaieria, ad esempio:

Progetto SLAG2BUILD

Il progetto SLAG2BUILD si propone di dimostrare la fattibilità di una tecnologia innovativa di granulazione a secco per la valorizzazione delle scorie di affinazione, da forno siviera, prodotte nel processo siderurgico.



Residui alcalini – Residui da incenerimento rifiuti



Produzione (EU28, 2018): 19 Mton

Frazione minerale: 80-85%

Metalli ferrosi: 10-12%

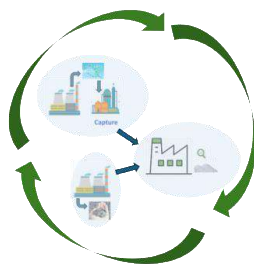
Metalli non ferrosi : 2-5%

(CEWEP 2018)



(Van Caneghem et al. 2019, Clean Technol. Environ. Policy)

Residui alcalini – Residui da incenerimento rifiuti



Le tecnologie per il recupero di metalli dalle ceneri pesanti sono evolute significativamente negli ultimi anni (Šyc et al., 2020 JHM)

A livello Europeo e mondiale, ci sono diversi impianti di trattamento delle ceneri pesanti che recuperano materiali – soprattutto metalli

Esempi di materiali recuperati nell'impianto di Heros Sluiskil B.V. (Paesi Bassi) che tratta 600000 ton/y di IBA



Ferrous fraction medium 40-80 mm



Stainless steel fraction medium >40 mm



Non-Ferrous fraction 12-40 mm

+ diverse frazioni di aggregati dalla frazione minerale



<https://www.heros.nl/en/downloads/>

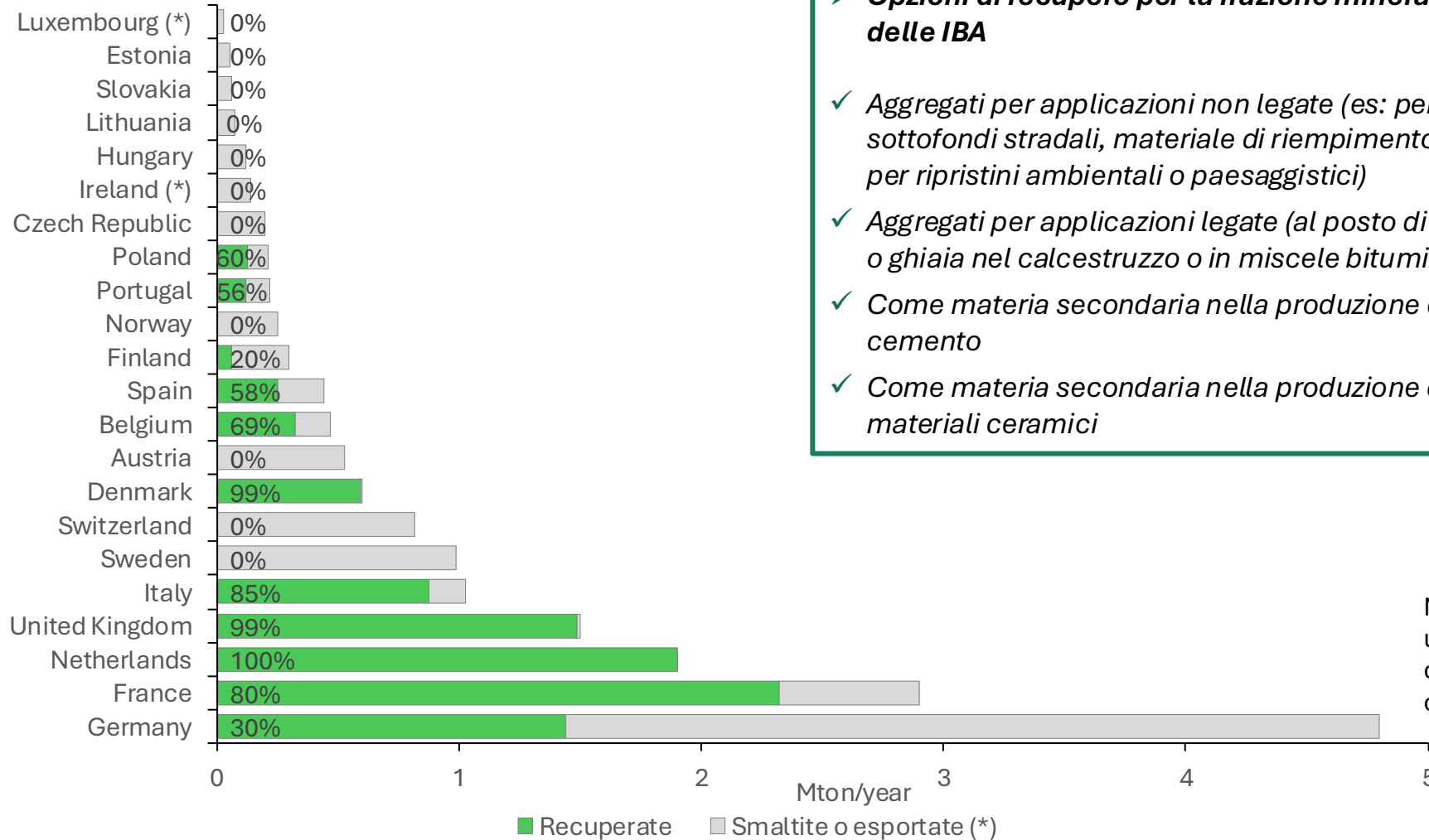
Residui alcalini – Residui da incenerimento rifiuti



Nel Regno Unito sono state utilizzate 30.000 ton di ceneri pesanti nel villaggio olimpico di Stratford 2012

Opzioni di recupero per la frazione minerale delle IBA

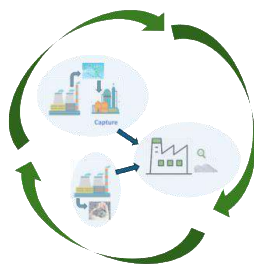
- ✓ *Aggregati per applicazioni non legate (es: per sottofondi stradali, materiale di riempimento (filler) per ripristini ambientali o paesaggistici)*
- ✓ *Aggregati per applicazioni legate (al posto di sabbia o ghiaia nel calcestruzzo o in miscele bituminose)*
- ✓ *Come materia secondaria nella produzione di cemento*
- ✓ *Come materia secondaria nella produzione di materiali ceramici*



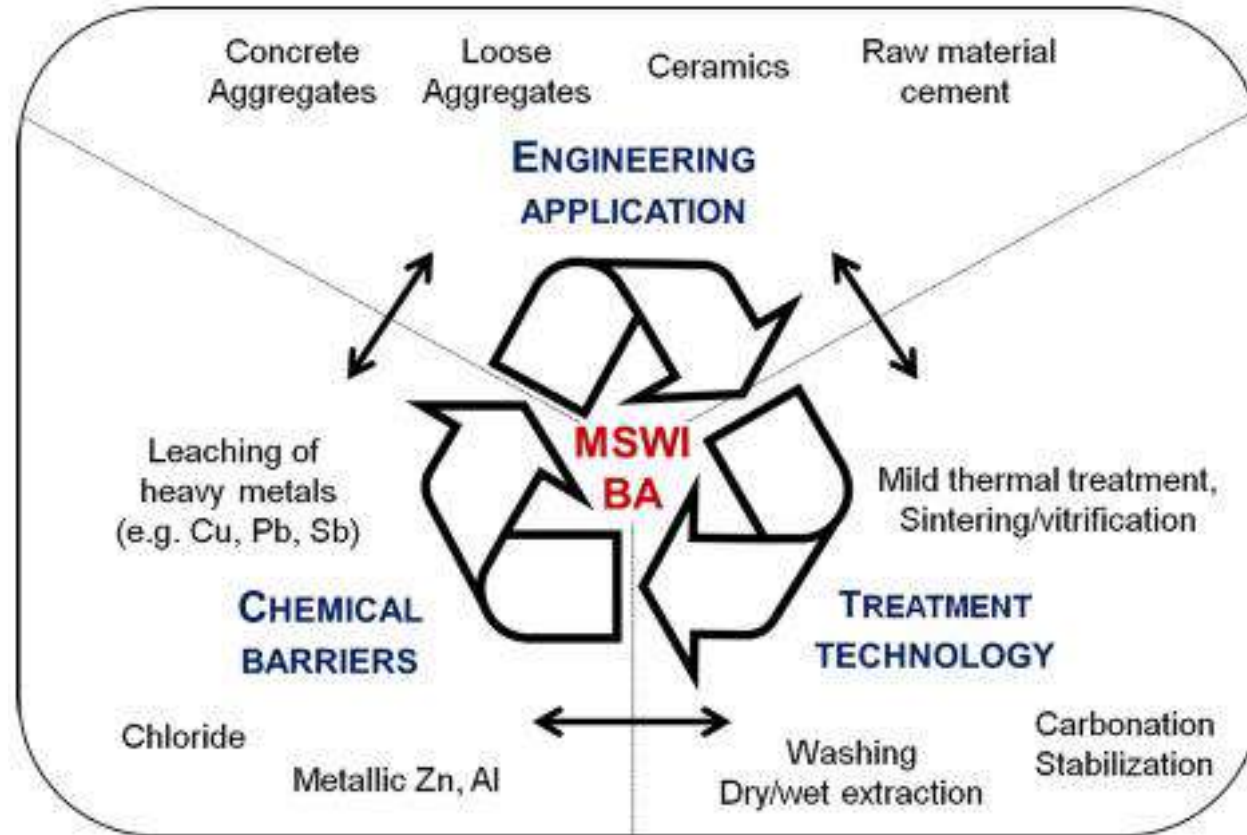
(Elaborazione CEWEP basata su Blasenbauer et al., 2020 WM)

(*) **Luxembourg: full export; Ireland: partial export**

Residui alcalini – Residui da incenerimento rifiuti

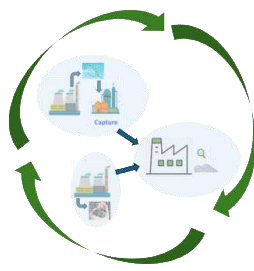


Criticità e potenziali trattamenti



(Verbinnen et al., 2017, Waste and Biomass Valor.)

Residui alcalini – Residui da incenerimento rifiuti



I valori limite e le metodologie di valutazione variano da Paese a Paese generalmente basati sul contenuto totale + lisciviazione di metalli/metalloidi e sali

Leaching test	Test setup	Liquid to solid ratio	Particle size	Test duration	Applying Countries
	[-]	[l/kg]	[mm]	[-]	[-]
EN 12457-1 ^a	batch test	2	<4	24 h	Denmark, Poland
EN 12457-2 ^a	batch test	10	<4	24 h	France, Italy, Lithuania, Portugal ^b
EN 12457-3 ^a	batch test	2 & 8 (two-stage test)	<4	24 h	Finland
EN 12457-4 ^a	batch test	10	<10	24 h	Austria, Belgium (Wallonia – regular quality assurance test), Germany, Spain (Catalonia)
CEN/TS 14405	percolation test	0.1–10	not specified	not specified	Finland, Sweden
CMA2/II/A.9.1.	percolation test	0.1–10	<4	not specified	Belgium (Flanders),
NEN 7343:1995	percolation test	0.1–10	<4	not specified	Belgium (Wallonia – certification test)
NEN 7383:2004	percolation test	1–10	<4	not specified	Netherlands
NEN 7375:2004	monolith in water containment	depending on surface area of monolith	not specified	64 days	Netherlands

^a Note: Most countries translated the standard into national versions, e.g. Austria: ÖNORM EN 12457-4, Finland: SFS-EN 12457-3.

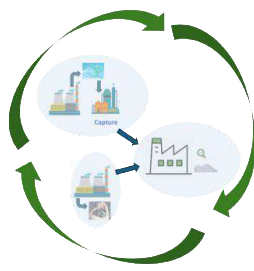
^b Based on special permit from LNEC.

(Blasenbauer et al., 2020 WM)

In questo caso non sono previsti criteri End of waste a livello Europeo o Nazionale

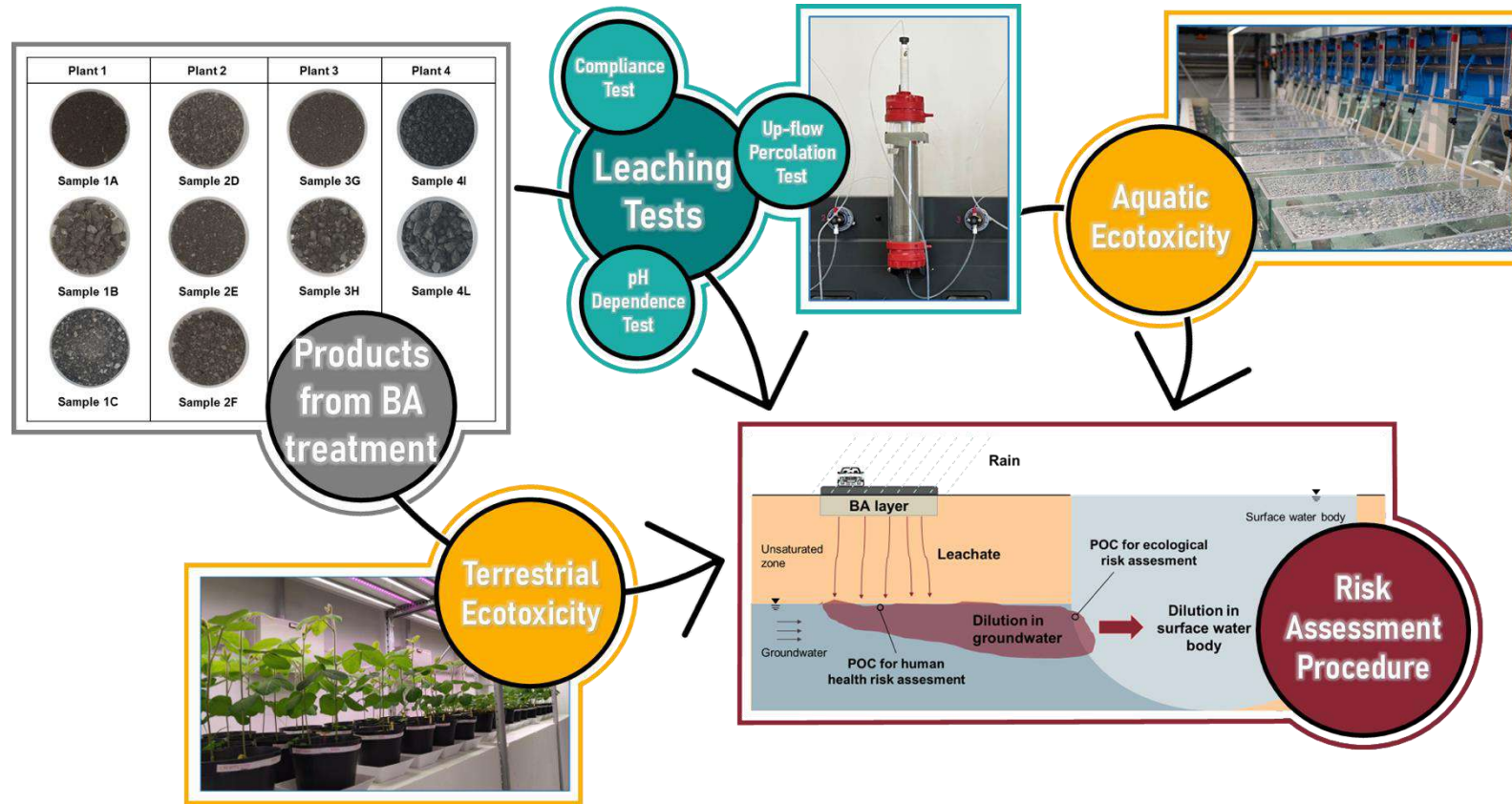
➔ Approccio caso per caso con incertezze per produttori, impianti di trattamento e utilizzatori

Residui alcalini – Residui da incenerimento rifiuti



Proposta di approcci combinati di valutazione che tengano conto dello scenario di utilizzo

Esempio: studio di filiera



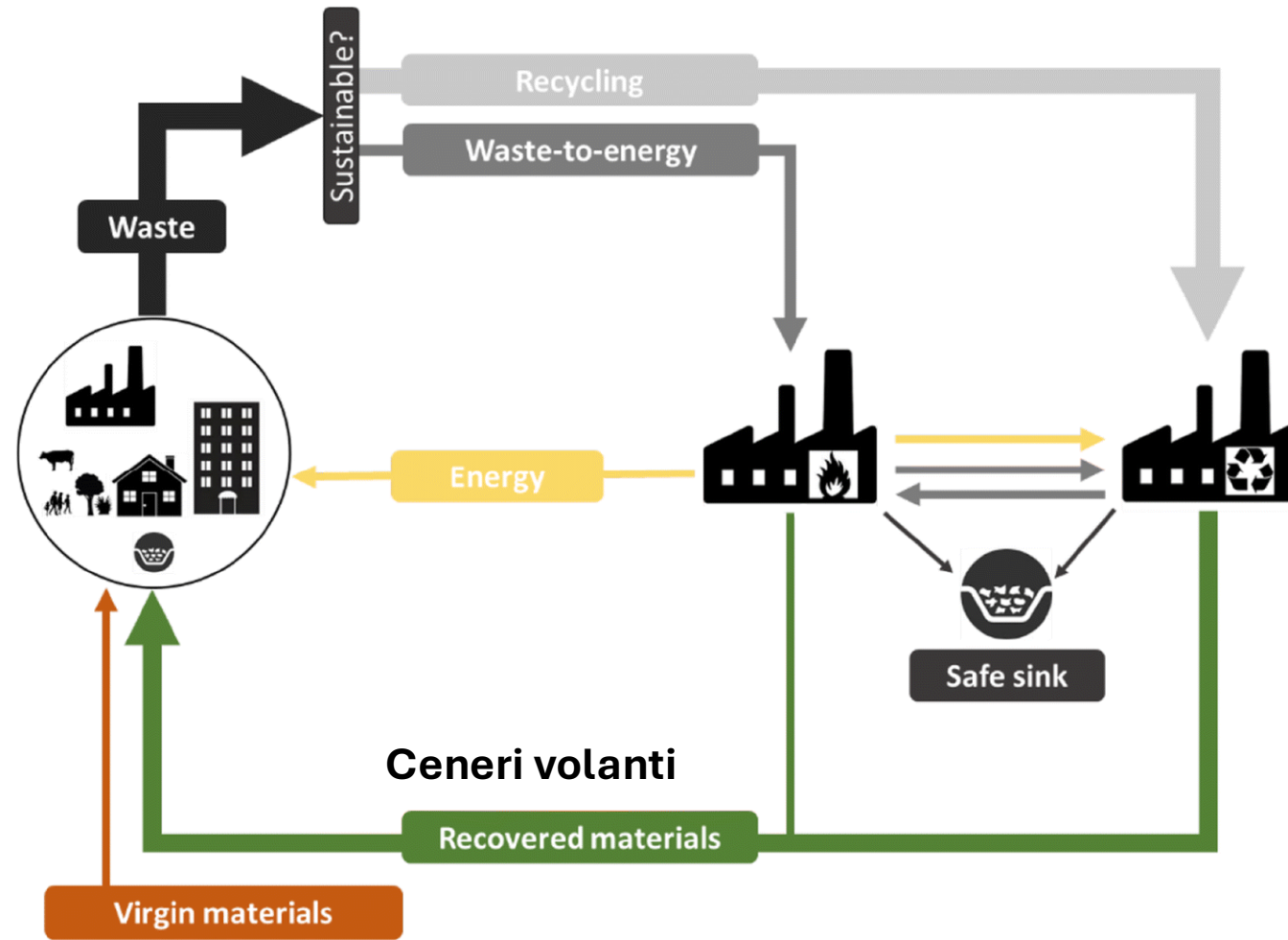
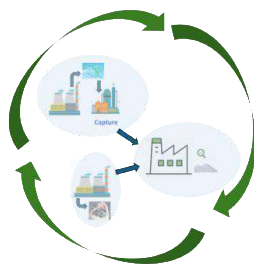
TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA



(Costa et al., sottomesso a WM)



Residui alcalini – Residui da incenerimento rifiuti

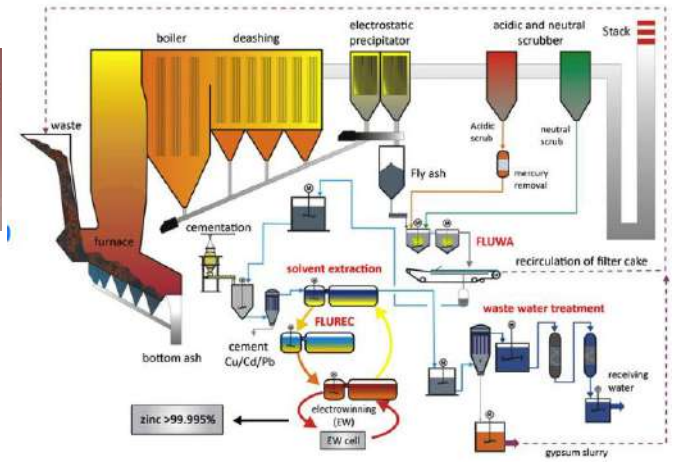


Ash2Salt™

Air Pollution Control Residue (APCR)	Treated fly ash residue	• Landfill for non-hazardous waste
	Potassium chloride (KCl)	• Use as fertilizer
	Sodium chloride (NaCl)	• Feedstock for industrial usage • Salt for deicing of roads
	Calcium chloride (CaCl ₂)	• Salt for deicing and dust control of roads

AIK
TECHNIK AG

The FLUREC process
Zinc recovery from the fly ash

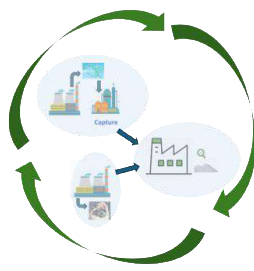


Process diagram of waste incineration, fly ash leaching (FLUWA) and recovery of recyclable materials (FLUREC).

https://www.aiktechnik.ch/wp-content/uploads/Whitepaper_Flurec_EN.pdf

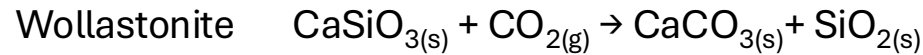
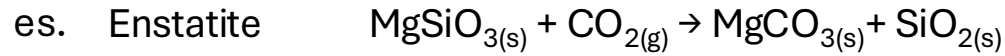
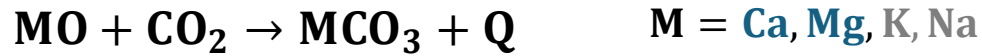
(Van Caneghem et al. 2019, Clean Technol. Environ. Policy)

Residui alcalini – Trattamenti innovativi



Trattamenti con l'utilizzo di flussi di anidride carbonica: Carbonatazione

Processo **naturale e spontaneo** a cui sono sottoposte le rocce silicatiche



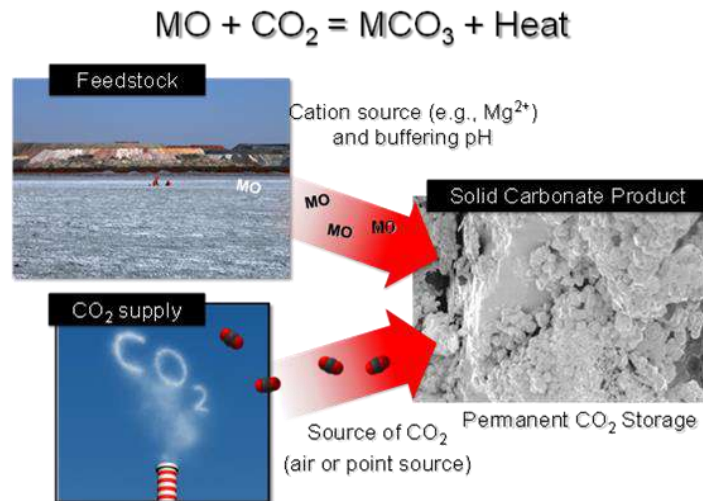
Roccia originaria:
Serpentino (roccia silicatica)



Magnesite
 $MgCO_3$

Dolomite
 $CaCO_3 \cdot MgCO_3$

Processo accelerato

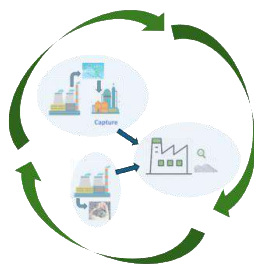


(Gunning et al. 2010)

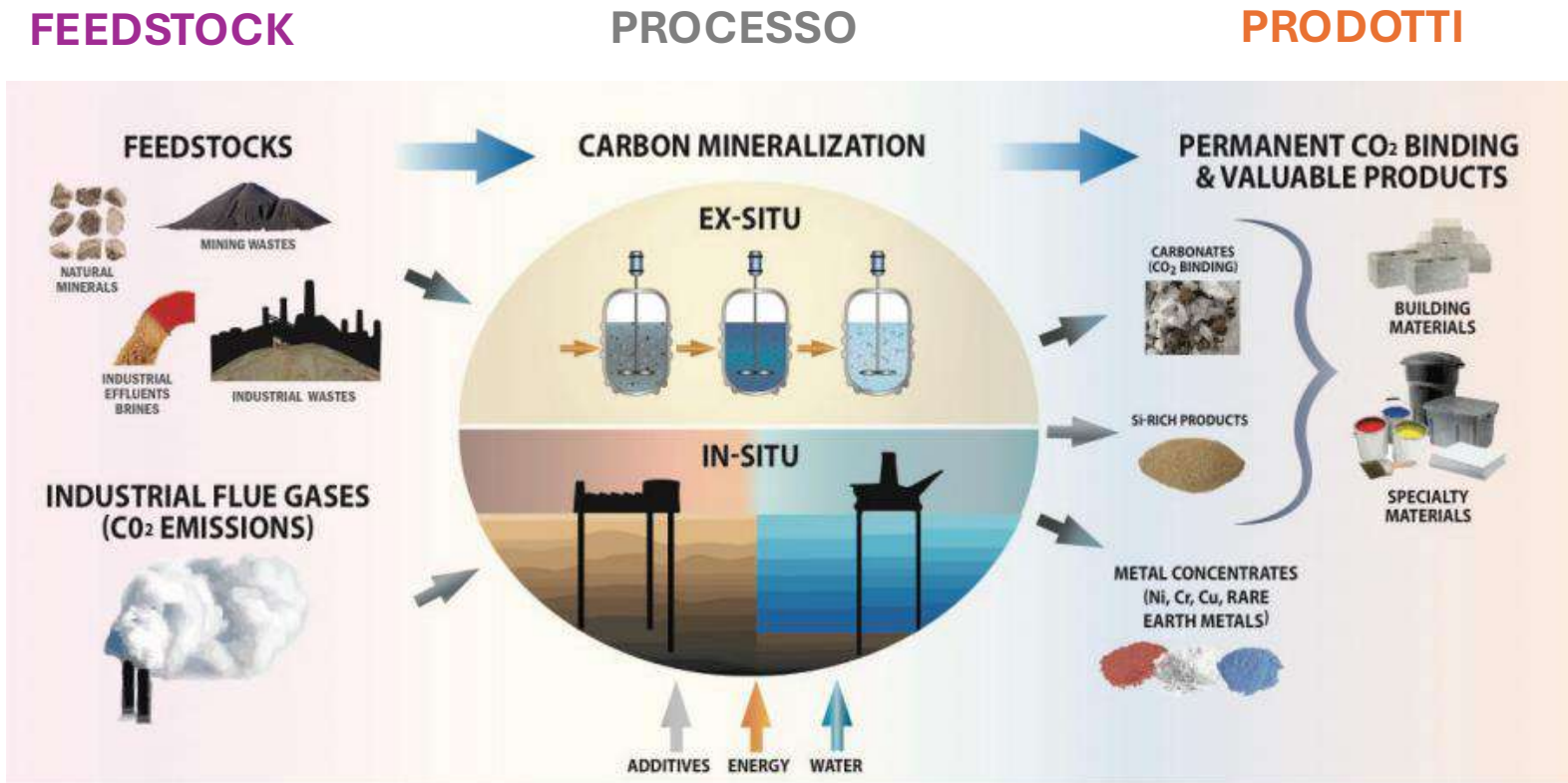


(Carbstone-innovation)

Residui alcalini – Trattamenti innovativi

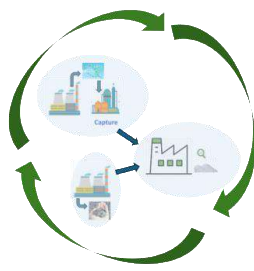


Trattamenti con l'utilizzo di flussi di anidride carbonica: Carbonatazione Accelerata



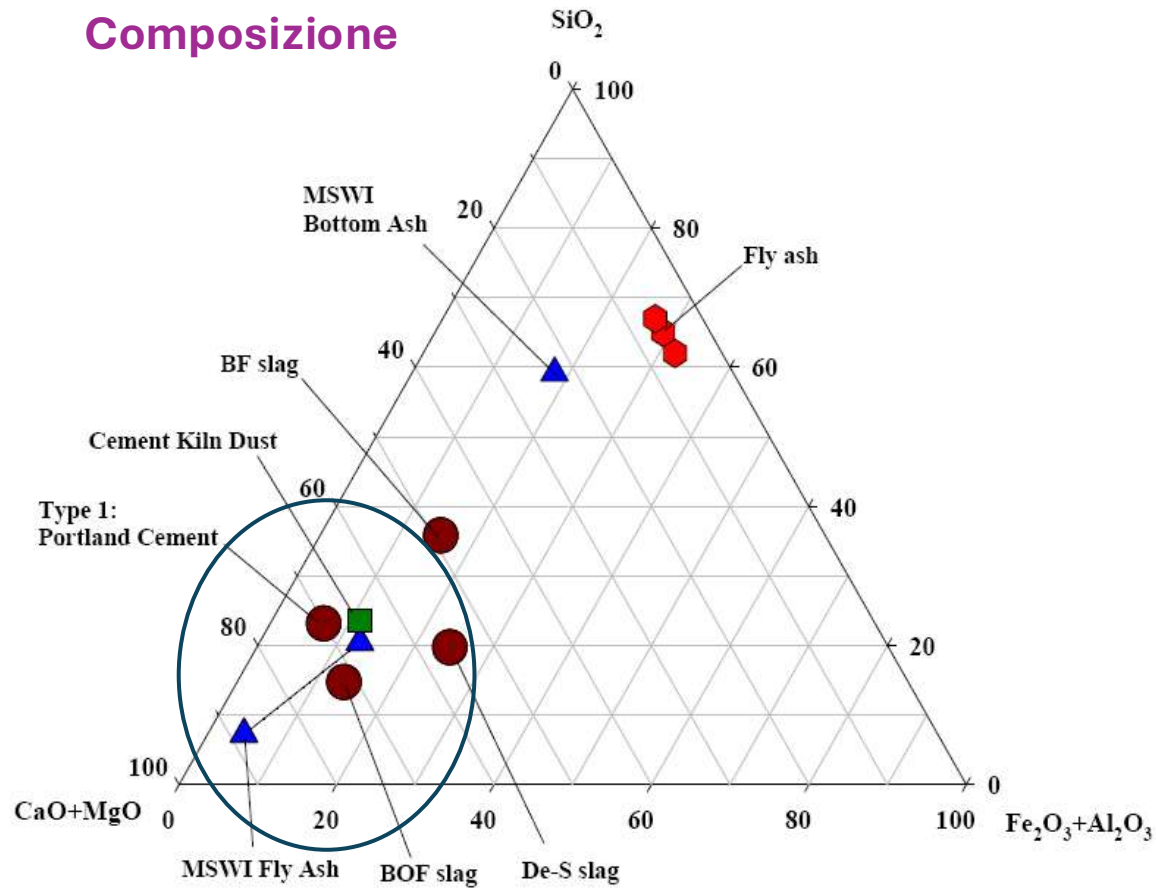
MI Expert workshop on CCUS report, 2017

Residui alcalini – Trattamenti innovativi

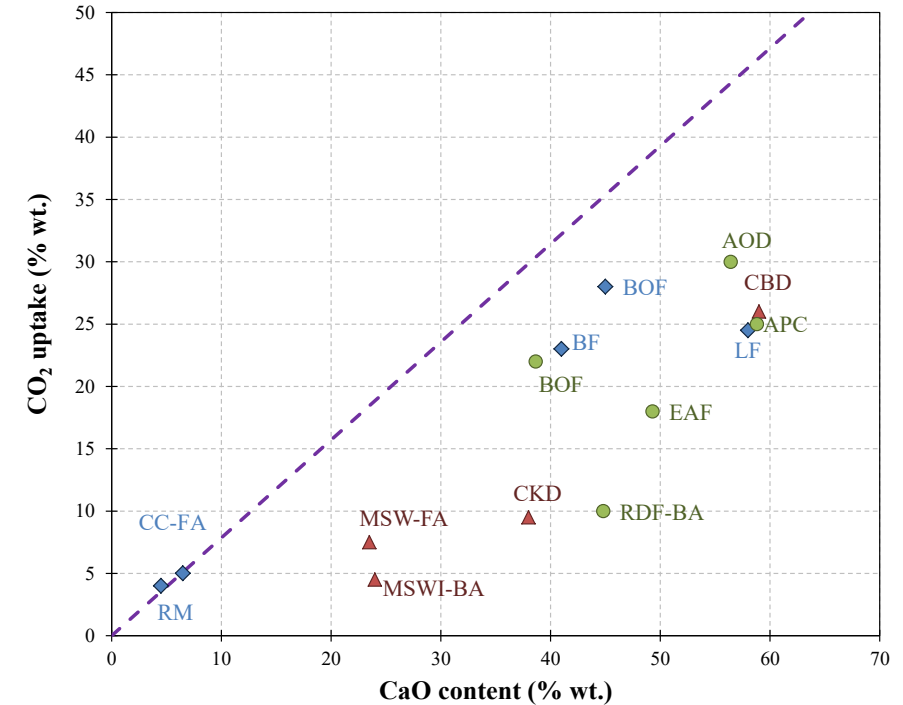


FEEDSTOCK

Composizione

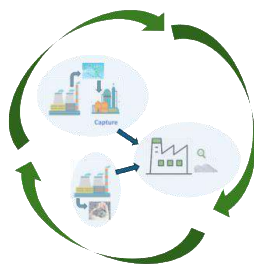


Pan et al, 2012



Bacocchi et al, 2014

Residui alcalini – Trattamenti innovativi

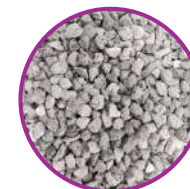
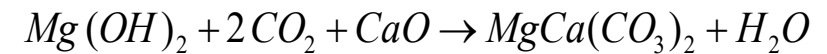
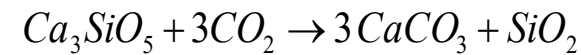
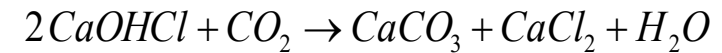
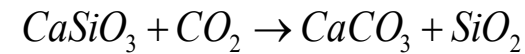
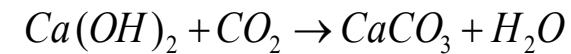
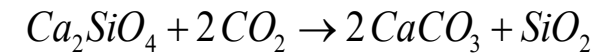


FEEDSTOCK

Mineralogia

	AOD1	EAF1	APC1	BOF1	BOF2	BOF3
Ca ₂ SiO ₄	92.6%	75.5%	---	30.9%	---	12.1%
MgO	2.7%	4.2%	---	---	---	7.9%
CaCO ₃	4.6%	3.6%	10.8%	5.9%	7.7%	4.0%
Fe ₃ O ₄	0.1%	4.6%	---	19.6%	---	22.1%
CaF ₂	0.0%	0.0%	---	---	---	---
SiO ₂	---	2.9%	---	---	---	---
Ca(OH) ₂	---	---	24.4%	26.6%	---	17.1%
Mg(OH) ₂	---	---	---	17.0%	---	---
CaSiO ₃	---	---	---	---	56.8%	---
FeO	---	---	---	---	35.5%	---
NaCl	---	---	13.8%	---	---	---
CaOHCl	---	---	51.0%	---	---	---
Ca ₃ SiO ₅	---	---	---	---	---	32.1%
Cr ₂ O ₃	0.1%	5.1%	---	---	---	---
MnO	---	---	---	---	---	4.6%
Al ₂ O ₃	---	4.0%	---	---	---	---

Zingaretti et al, 2014



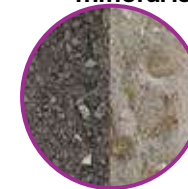
Scorie d'acciaieria



Scarti da operazioni
minerarie

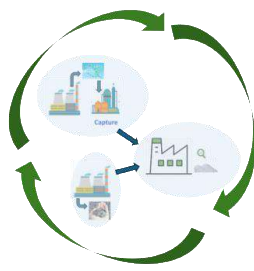


Rifiuti da C&D

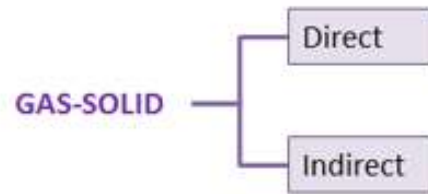


Residui da
termovalorizzazione
+ altri

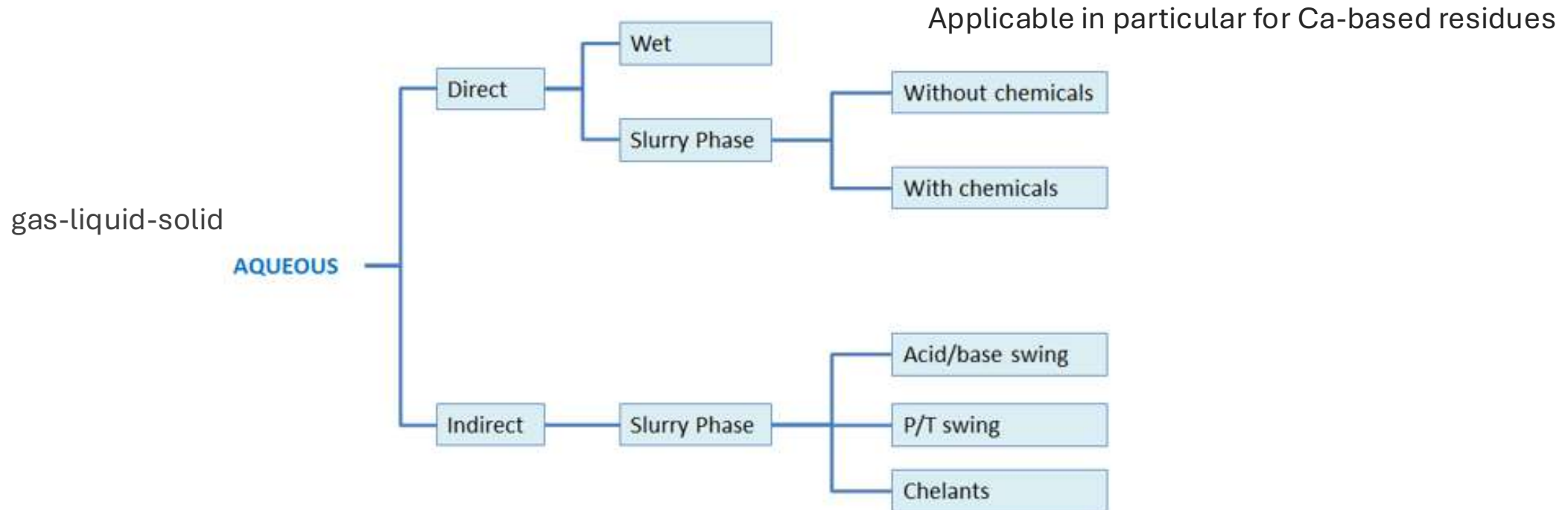
Residui alcalini – Trattamenti innovativi



PROCESSO

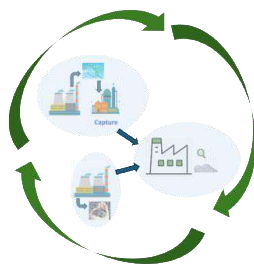


Applicable only for Ca and Mg oxides and hydroxides



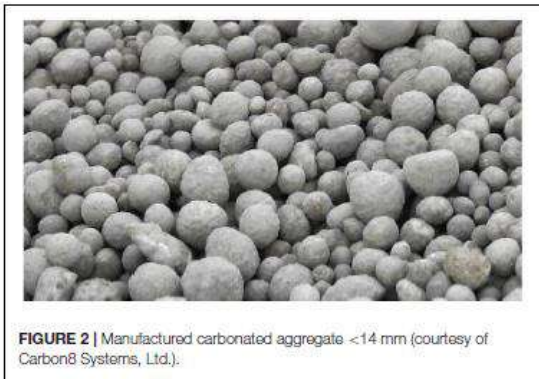
Bacocchi et al, 2014

Residui alcalini – Trattamenti innovativi



PRODOTTI

Funzione della route di processo applicata



Aggregates (Carbon8)

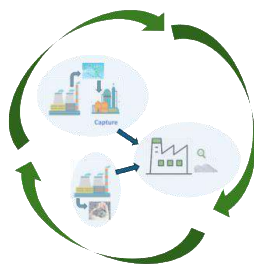


Blocks (Carbstone-innovation)



Precipitated calcium carbonate for paper coating applications as well as mineral fillers for plastics

Residui alcalini – Trattamenti innovativi



PRODOTTI

Table 5. Emission and market information on conventional products to be replaced by MC products. ^{18,19,75,88,99,112-117}

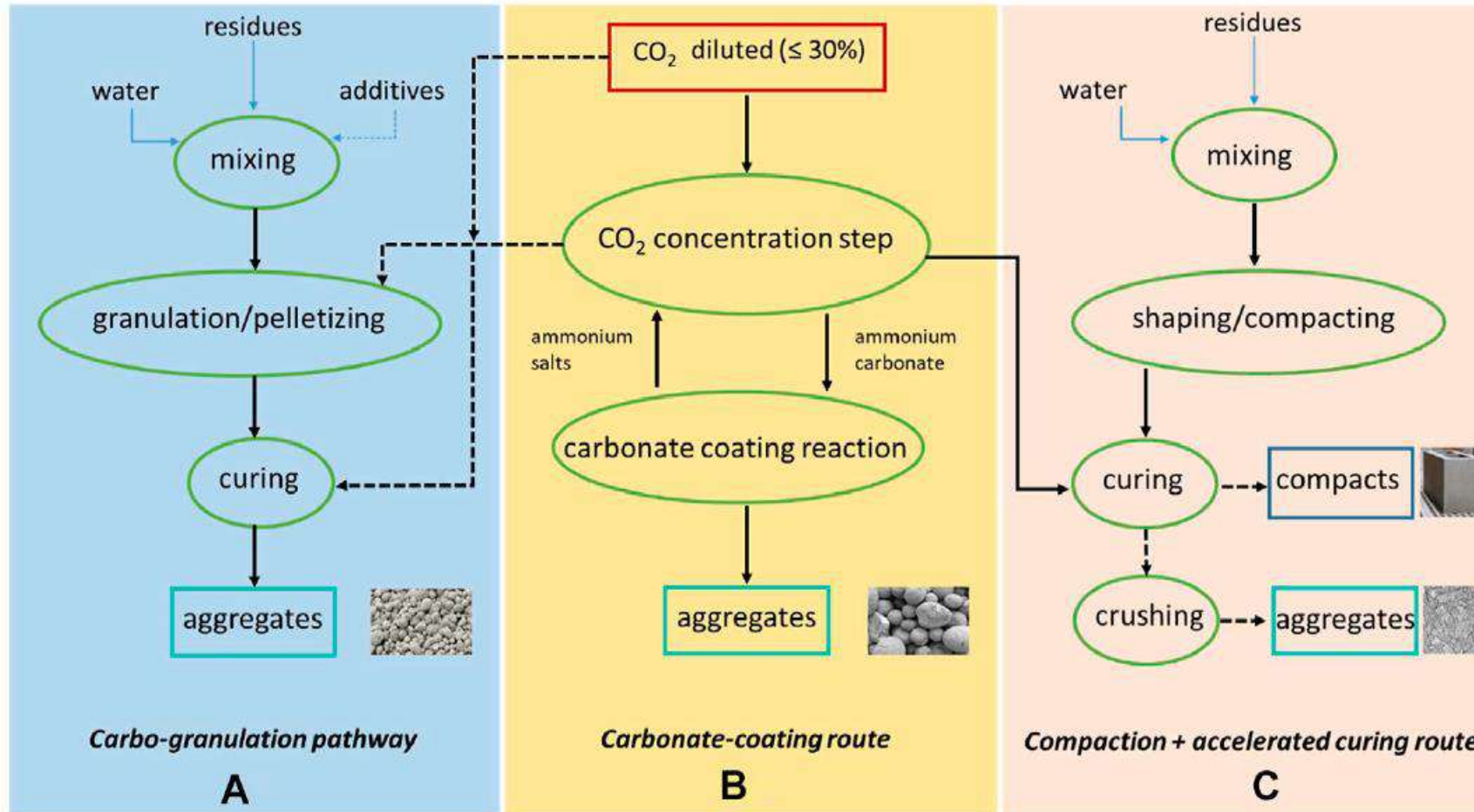
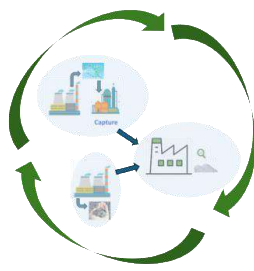
End use	Product unit [PU]	CO ₂ intensity tCO ₂ [PU] ⁻¹	Market use M[PU] year ⁻¹	CO ₂ emitted MtCO ₂ year ⁻¹	Value USD [PU] ⁻¹
Aggregate	t	0.0079	53 000	416	10
Bulk cement	t	0.9270	4100	3800	125
Bulk concrete	t	0.1391	27 333	3800	95
Precast concrete block ^a	Block	0.0024	6000	15	1
Precast cement board ^a	Board	0.0551	3000	165	30
Magnesite	t	0.0147	13	0.2	80
Gypsum board ^a	Board	0.0004	800	0.34	30

^aNorth American data.

(Woodall et al 2012, GHG science)

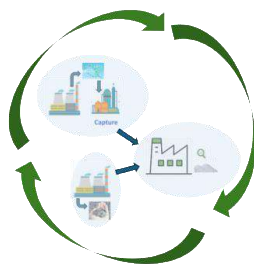
PCC: Market for mineral fillers and pigments is about 14 Mt/y with a high value of 375–550 \$/t, while the world’s ground calcium carbonate market is 75 Mt with a lower value of 26–185 \$/t depending on fineness.

Residui alcalini – Trattamenti innovativi



Bacocchi and Costa, Frontiers, 2021

Residui alcalini – Trattamenti innovativi



Alcuni esempi di processi commerciali

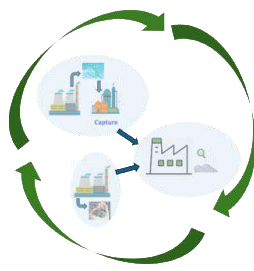
TABLE 3 | Selected mineralization processes yielding construction products.

Company	Technology	TRL	Product	References
Alcoa	Treatment of bauxite waste with CO ₂ (from an ammonia plant)	6	Construction fill, soil amendment	Global CCS Institute, 2011
Carbicrete	Carbonation activation of steel slag	6–7	Carbonated “concrete”	Savage, 2017; Carbicrete, 2020
Carbon8 Systems	Accelerated Carbonation Technology	9	Aggregates/fill, e.g., for blocks/concrete/screed	Carbon8, 2020b
Carbstone Innovation	Carbonation of steel slag	9	Construction materials including roofing tiles	Vito, 2020
Blue Planet	Carbonate coating over an alkaline substrate	6–7	Aggregate	Blue Planet, 2020
Carboclave	Nano-CaCO ₃ crystals producing a densification effect	7	Concrete blocks	Carboclave, 2020
Green minerals	Carbonation of olivine	3	Building materials	On-Site, 2020

TRL, technology readiness level.

(Hills et al 2019, Frontiers)

Residui alcalini – Trattamenti innovativi



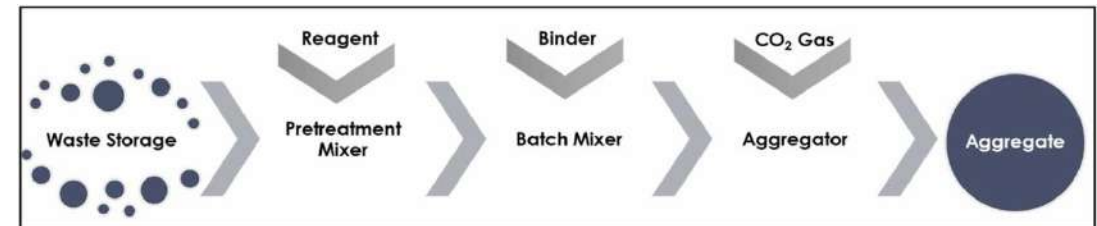
Esempi di processi ex-situ sui residui industriali alcalini: Carbon8



carbon8

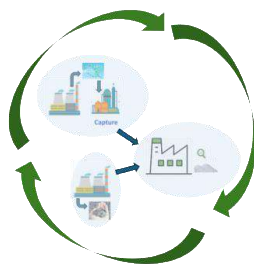


- Sistema modulare (CO₂ntainer) in cui i residui alcalini vengono fatti reagire con la CO₂ (concentrata o da fumi esausti) per ottenere aggregati;
- Il sistema modulare proposto è facilmente scalabile e integrabile all'interno di impianti industriali esistenti;
- Necessaria aggiunta di leganti e acqua

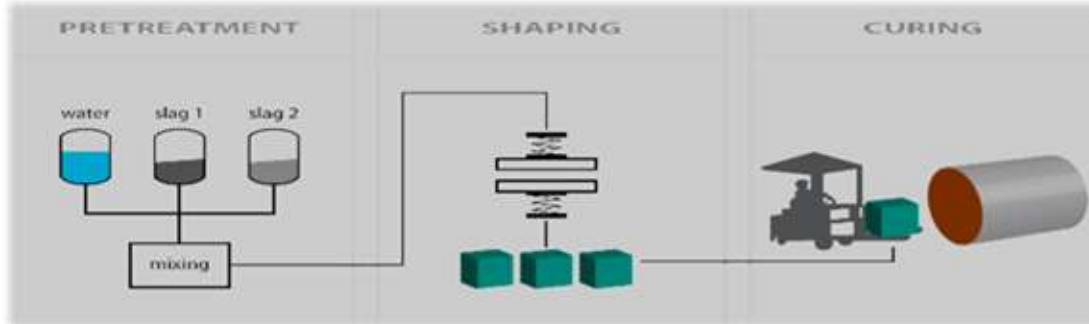


Fonti: <https://www.carbon8.co.uk>; doi: 10.1016/j.jcou.2022.102292

Residui alcalini – Trattamenti innovativi



Esempi di processi ex-situ sui residui industriali alcalini: Carbstone

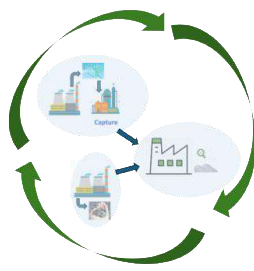


- Le scorie derivanti dalla produzione dell'acciaio vengono macinate finemente, mescolate con acqua e inserite in stampi per ottenere dei mattoni o altri elementi da costruzione;
- I mattoni vengono inseriti in autoclave, dove sono trattati con CO₂ (*curing*);
- 1 m³ mattoni = 350 kg CO₂ netta stoccata



Fonti: <https://vito.be/en/applications/carbstone>

Carbon mineralization products



Alcuni esempi di processi commerciali



1 Source

To source the CO₂, we work with wastewater facilities and biogas plants that separate CO₂ from methane through a process called biogas upgrading. With our technology installed on site, neustark captures and liquefies the vastly pure and biogenic CO₂ offgas.

Neustark stores around 10kg of CO₂ per tonne of demolished concrete. One site can do in one hour what 50 trees do in one year.

[Learn more about our impact](#)



2 Transport

We then transport it to nearby sites where we sink the CO₂. We partner with construction recyclers to harbor our mineralization technology at their plants, where we inject the CO₂ into finely crushed demolition aggregate.



4 Remove

Et voilà, the CO₂ is stored – permanently, i.e. the risk of reversal is slim to none. Since the CO₂ we capture and store is of biogenic nature, we create negative emissions. We remove CO₂ that would otherwise be released in the atmosphere.



3 Store

Through the accelerated mineralization process that our technology triggers, the CO₂ then turns into limestone and is bound to the granules' pores and surface. This happens alongside the recycler's existing value chain of processing demolition waste to re-use to build streets or produce recycled concrete.

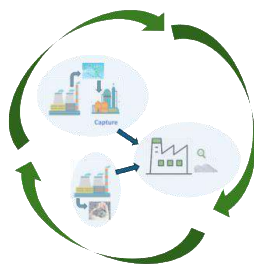


5 Certificate

We help businesses achieve their climate goals by removing their unavoidable CO₂ emissions. More and more organizations are embedding carbon removal, next to their reduction efforts, in their climate strategies. They partner with neustark to acquire local, highly permanent, measurable and certified carbon removal (CDR).

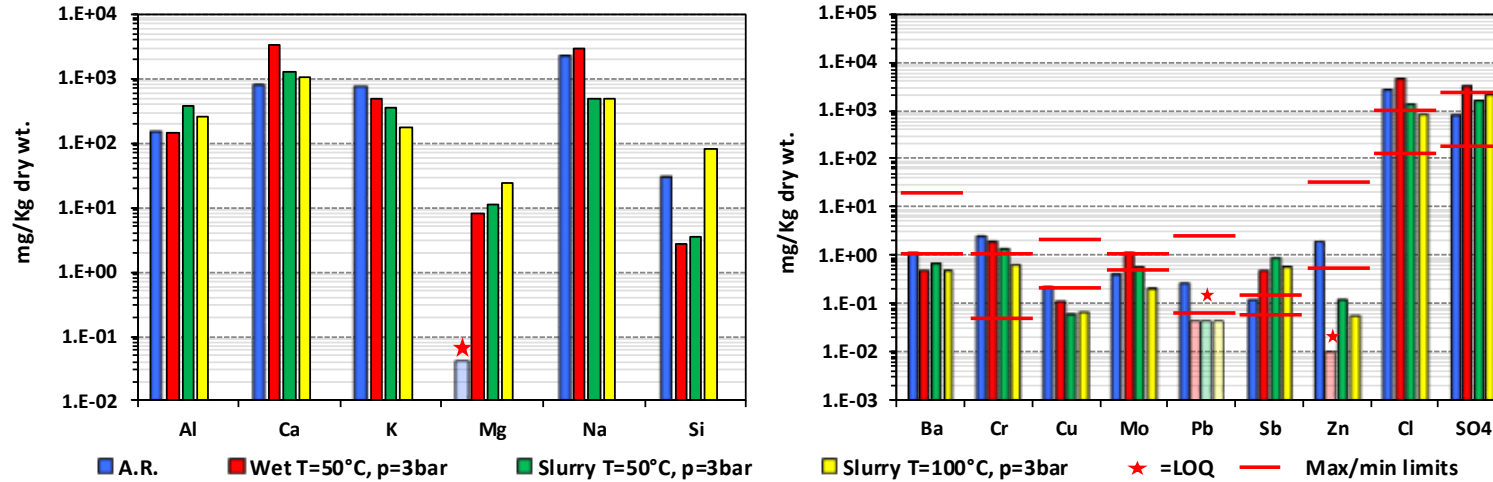
<https://www.neustark.com/en/our-solution-mineralization>

Carbon mineralization products

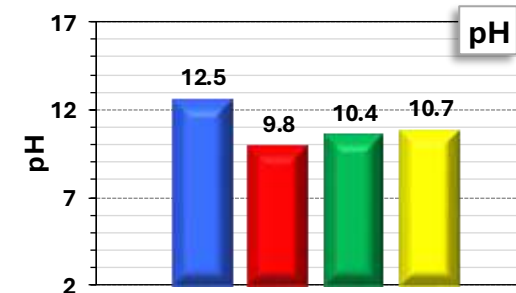


Effetti dei trattamenti di carbonatazione sul comportamento ambientale dei residui

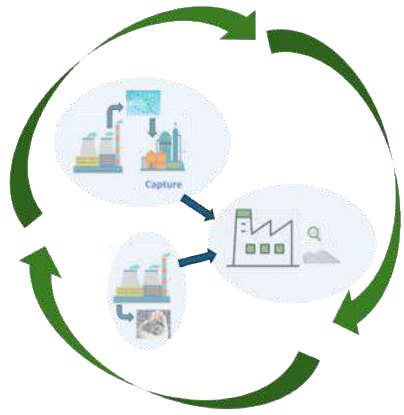
Esempio per trattamenti applicati a frazioni minerali di ceneri pesanti



Operating conditions	IC [%]	CaCO ₃ [%]	CO ₂ ,uptake [%]
As Received material	2.16	18.0	-
Wet T=50°C, p= 3bar	4.72	39.3	11.3
Slurry T=50°C, p= 3bar	4.44	36.9	9.9
Slurry T=100°C, p= 3bar	4.32	35.9	9.4



(Tesi di dottorato Riccardo Spagnuolo, 2018)



Seminario tecnico-scientifico

VALORIZZAZIONE DI RESIDUI INDUSTRIALI CON EVENTUALE UTILIZZO DI CO₂ DA FONTI EMISSIVE

10 marzo 2026 - 14.00-18.00

Sala Convegni – Università degli studi di Roma Tor Vergata

Grazie mille per l'attenzione e per la vostra partecipazione al seminario!

Giulia Costa

costa@ing.uniroma2.it



TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA



Seminario tecnico-scientifico

**VALORIZZAZIONE DI RESIDUI INDUSTRIALI CON EVENTUALE
UTILIZZO DI CO₂ DA FONTI EMISSIVE**

10 marzo 2026 - 14.00-18.00

Sala Convegni – Università degli studi di Roma Tor Vergata
via del Politecnico, 1 - Roma

Approcci Risk-based per la definizione di criteri End of Waste

10 Marzo 2026

Prof. Iason Verginelli



Laboratorio di Ingegneria Ambientale
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica



Premessa: Approccio tabellare vs Approccio Risk-Based

Approccio tabellare

(Es. Confronto con i limiti D.M. 5/2/1998)

Caso Peggior (Worst Case)

Confronto concentrazioni contaminanti presenti nei prodotti con limiti tabellari

Pro

- Facilità di applicazione
- Costi contenuti

Contro

- Scenario generico di riutilizzo senza restrizioni (estremamente vincolante nel caso di alcune applicazioni)

Cambio di paradigma

Approccio Risk-Based

(Es. Applicazione standard RBCA-ASTM)

Caso Ragionevolmente Peggior (Worst Case)

Verifica rischi accettabili per salute e ambiente in funzione dello scenario specifico di applicazione

Pro

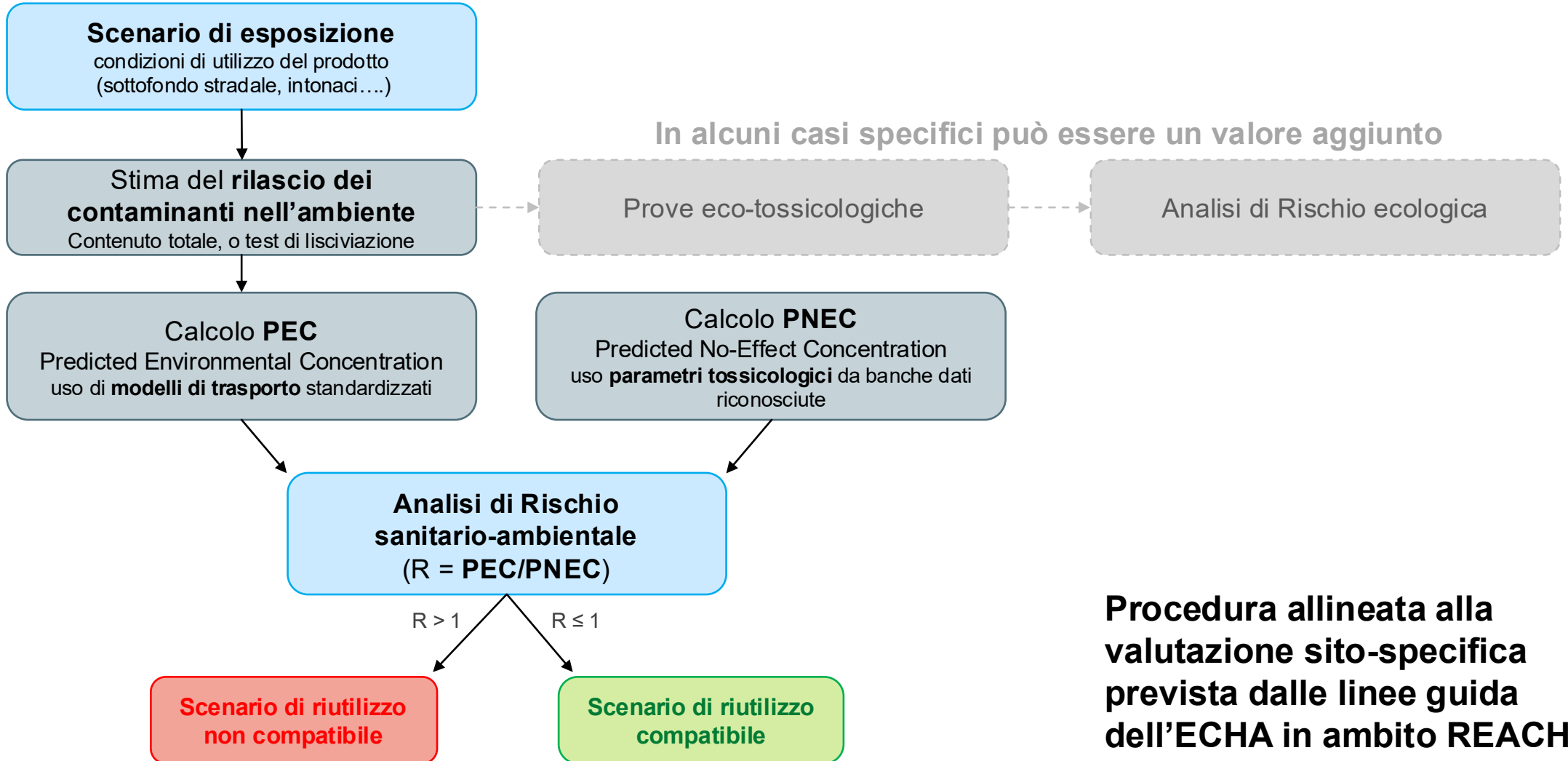
- Valutazione compatibilità ambientale in funzione degli specifici scenari di riutilizzo

Contro

- Richiede uno studio dedicato (ed eventualmente test integrativi)

Focus di questa presentazione

Procedura risk-based proposta



Procedura allineata alla valutazione sito-specifica prevista dalle linee guida dell'ECHA in ambito REACH

Esempi di utilizzo in ingegneria civile di residui industriali trattati



Riutilizzo in forma sciolta (non legata) dei prodotti (es Bottom Ash trattate) come sottofondo stradale



Riutilizzo in forma legata dei prodotti (es Bottom Ash trattate) come aggregati artificiali per conglomerati bituminosi



Riutilizzo in forma legata dei prodotti (es Fly Ash trattate) come filler minerale in intonaci o malte cementizie

In funzione del tipo di utilizzo possono essere identificati i principali meccanismi di rilascio e di conseguenza i potenziali percorsi di esposizione sanitario-ambientali

Identificazione dei meccanismi di rilascio e degli scenari di esposizione



Riutilizzo in forma sciolta (non legata) come sottofondi stradali

- **Meccanismi di rilascio:** potenziale cessione a contatto con acque meteoriche, volatilizzazione (se presenti sostanze volatili)
- **Potenziali percorsi di esposizione:** lisciviazione nelle acque sotterranee, inalazione di vapori (se presenti sostanze volatili)



Riutilizzo in forma legata come aggregati per conglomerati bituminosi

- **Meccanismi di rilascio:** potenziale cessione a contatto con acque meteoriche
- **Potenziali percorsi di esposizione:** lisciviazione nelle acque sotterranee



Riutilizzo in forma legata come filler in intonaci o malte cementizie

- **Meccanismi di rilascio:** potenziale emissione di polveri a seguito del deterioramento dell'intonaco
- **Potenziali percorsi di esposizione:** inalazione di polveri

Esempi indagini di caratterizzazione per stima del rilascio



Riutilizzo in forma sciolta (non legata) come sottofondi stradali

- Contenuto totale
- Test di lisciviazione in batch (es. EN 12457)
- Test di lisciviazione a pH variabile (es. EN 14429)
- Test di percolazione in colonna (es. EN 14405)
- ...



Riutilizzo in forma legata come aggregati per conglomerati bituminosi

- Contenuto totale
- Test di lisciviazione monolitici (es. EN 15863)
- ...



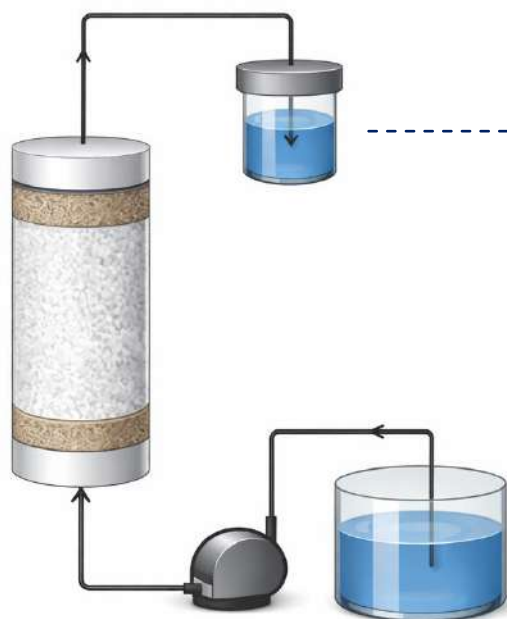
Riutilizzo in forma legata come filler in intonaci o malte cementizie

- Contenuto totale
- Test di lisciviazione in batch per applicazioni outdoor (es. EN 12457)
- ...

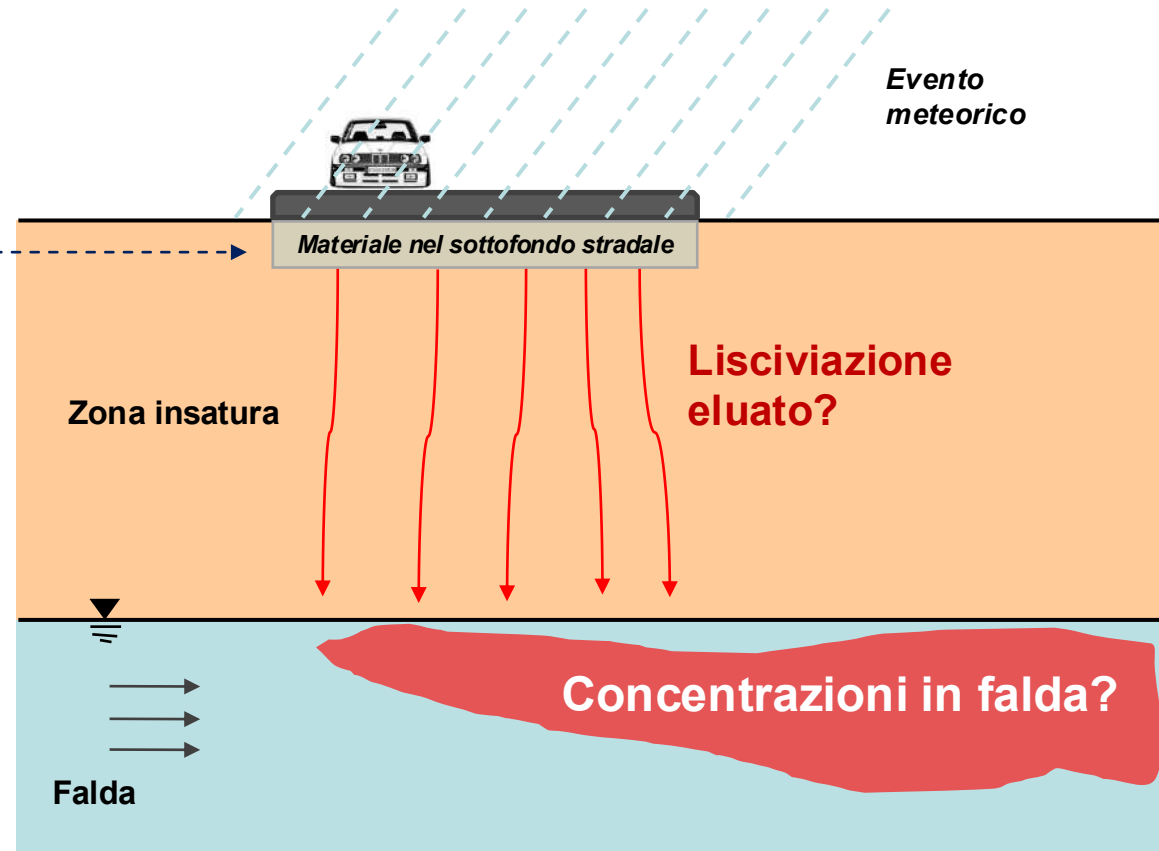


Esempio valutazione dispersione nell'ambiente nel caso di sottofondi

Esempio Percolation column test



Valutazione rilascio



I test di lisciviazione danno indicazioni sulle concentrazioni attese nell'eluato a contatto con il materiale. Per la compatibilità sanitario-ambientale è necessario tener conto del trasporto fino al punto di conformità (POC)

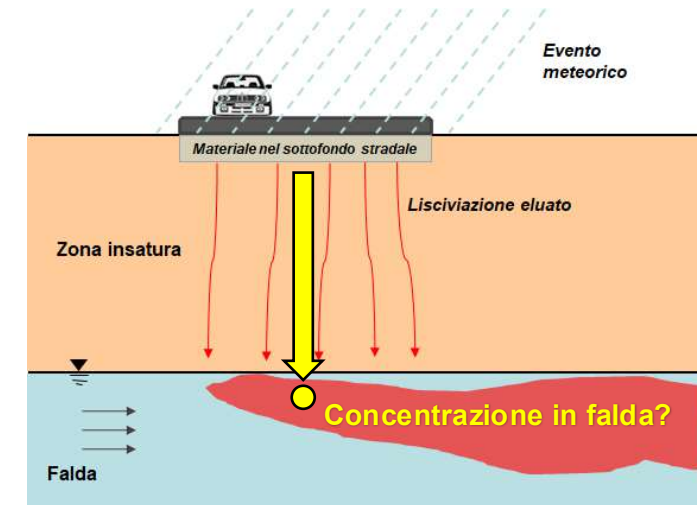
Procedura per stimare le concentrazioni attese in falda



Linee guida APAT (2008)

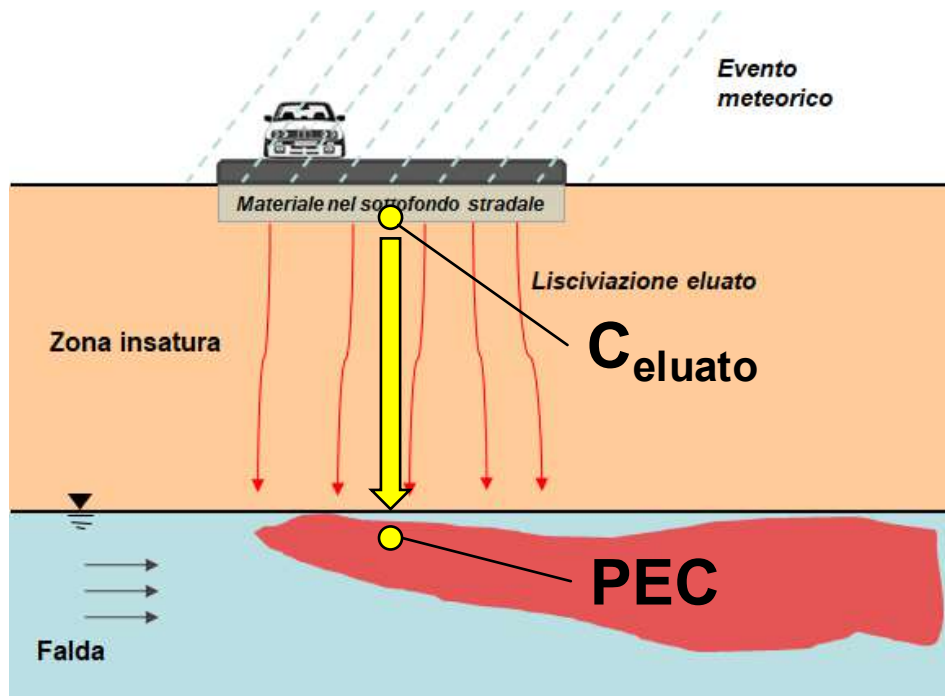


Standard ASTM E2081



Per stimare le concentrazioni attese in falda possono essere utilizzati i modelli conservativi previsti negli standard ASTM (E2081) e linee guida APAT-ISPRA (2008)

Valutazione del rischio



**Se $PEC < PNEC$ ovvero $PEC/PNEC < 1 \rightarrow$
Rischio accettabile**

Predicted Environmental Concentration (PEC)

$$PEC = C_{eluato} \cdot \frac{SAM}{LDF}$$

C_{eluato} = Concentrazioni rilevate nei leaching tests

SAM = Fattore di attenuazione durante la lisciviazione (Standard ASTM)

LDF = Fattore di diluzione in falda (Standard ASTM)

Predicted No-Effect Concentration (PNEC)

$$PNEC = \begin{cases} \frac{TR}{EM_{ing} \cdot SF} & \text{(cancerogeni)} \\ \frac{THI \cdot RfD}{EM_{ing}} & \text{(non cancerogeni)} \end{cases}$$

TR = Rischio accettabile (pari a 10^{-6} secondo D.Lgs 152/06)

THI = Indice di pericolo accettabile (pari a 1 secondo D.Lgs 152/06)

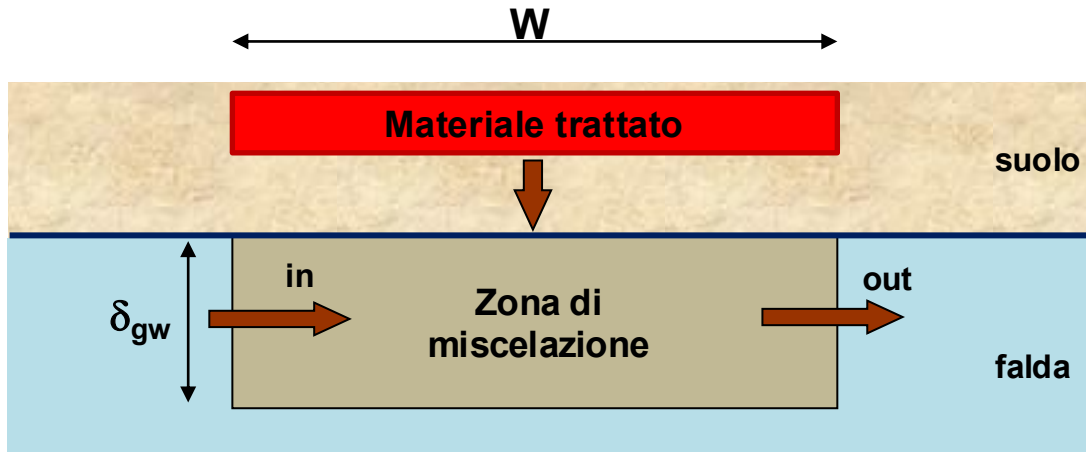
EM_{ing} = Fattore di esposizione di ingestione di acqua (Default ISPRA 2006)

RfD = Dose di riferimento per ingestione (Banca dati ISS-INAIL, 2018)

SF = Grado di cancerogenicità (Banca dati ISS-INAIL, 2018)

Fattore di diluizione (LDF)

Calcolato in funzione dello scenario di utilizzo ipotizzato



Nei fattori di trasporto ASTM la diluizione viene stimata utilizzando un «**box model**» in cui nella zona di miscelazione si assume un **rimescolamento del lisciviato completo ed istantaneo**.

Fattore di diluizione in falda (Leachate dilution factor – LDF)

$$\text{Fattore di Diluizione (LDF)} = 1 + \frac{v_{gw} \cdot \delta_{gw}}{I_{eff} \cdot W}$$

Infiltrazione efficace

$$I_{eff} = \eta \cdot \beta \cdot P^2$$

Nomenclatura:

v_{gw} = velocità di Darcy in falda

P = Piovosità

I_{eff} = Infiltrazione efficace

W = estensione del materiale nella direzione del flusso di falda

δ_{gw} = Spessore della zona di miscelazione in falda

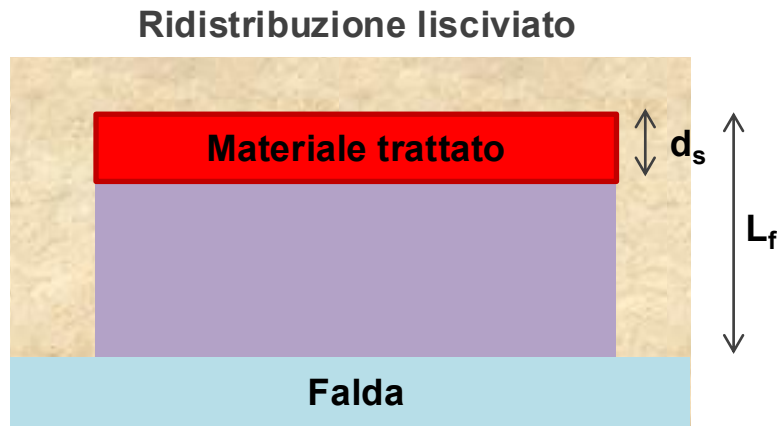
η = infiltrazione nell'asfalto

Terreni sabbiosi: $\beta = 0,0018$; Terreni limosi : $\beta = 0,0009$; Terreni argillosi:

$\beta = 0,00018$

Fattore di attenuazione (SAM)

Calcolato in funzione dello scenario di utilizzo ipotizzato



Assumendo che non ci sia dispersione laterale o degradazione si può assumere che la concentrazione dell'eluato subirà una **attenuazione legata alla ridistribuzione della massa** su un volume più ampio (colonna di suolo al di sotto della zona di riutilizzo)

Attenuazione durante il trasporto (Soil Attenuation Model – SAM)

$$SAM = \frac{C_{sol} \cdot V_{iniziale}}{C_{sol} \cdot V_{finale}} = \frac{C_{sol} \cdot (d_s \cdot W \cdot S_w)}{C_{sol} \cdot (L_f \cdot W \cdot S_w)} = \frac{d_s}{L_f}$$

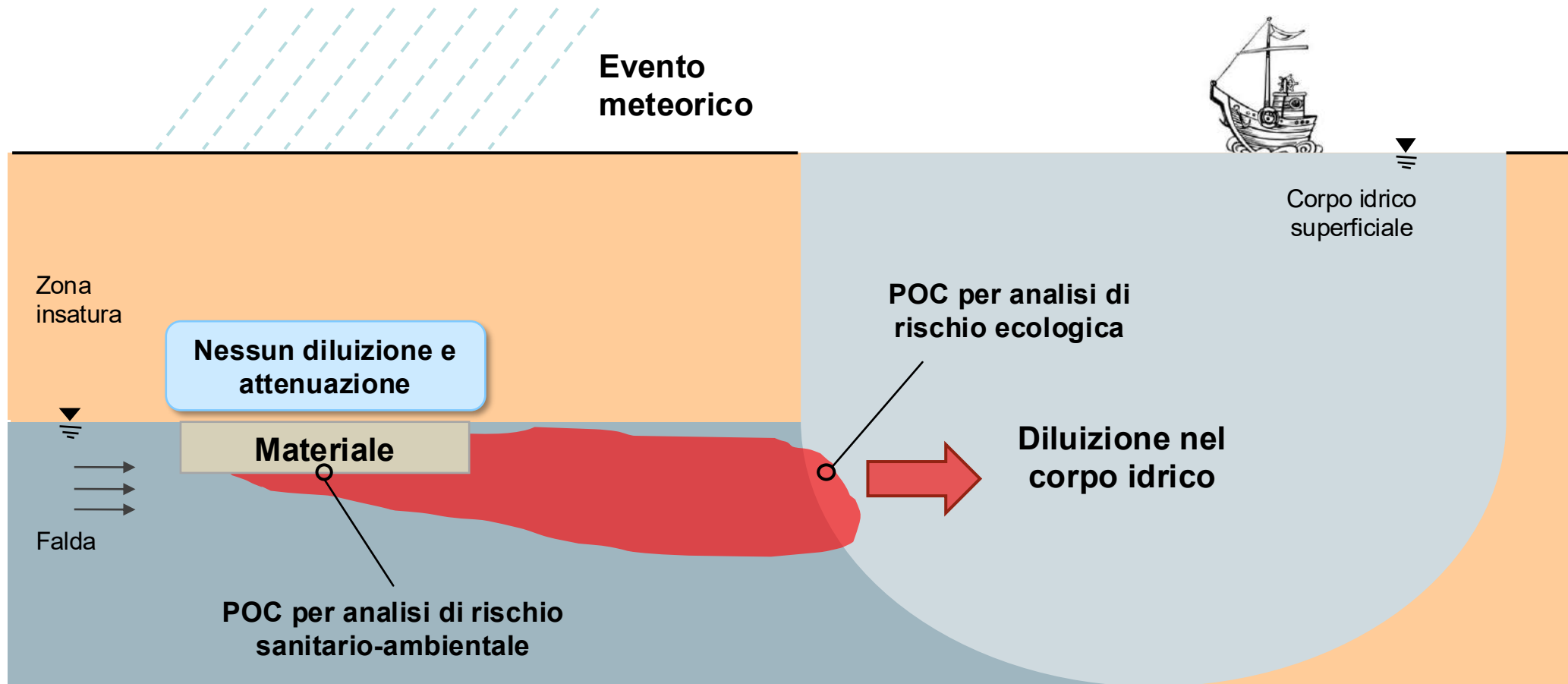
Nomenclatura

d_s = spessore del materiale nel suolo insaturo

L_f = soggiacenza della falda rispetto al top del materiale utilizzato nel suolo

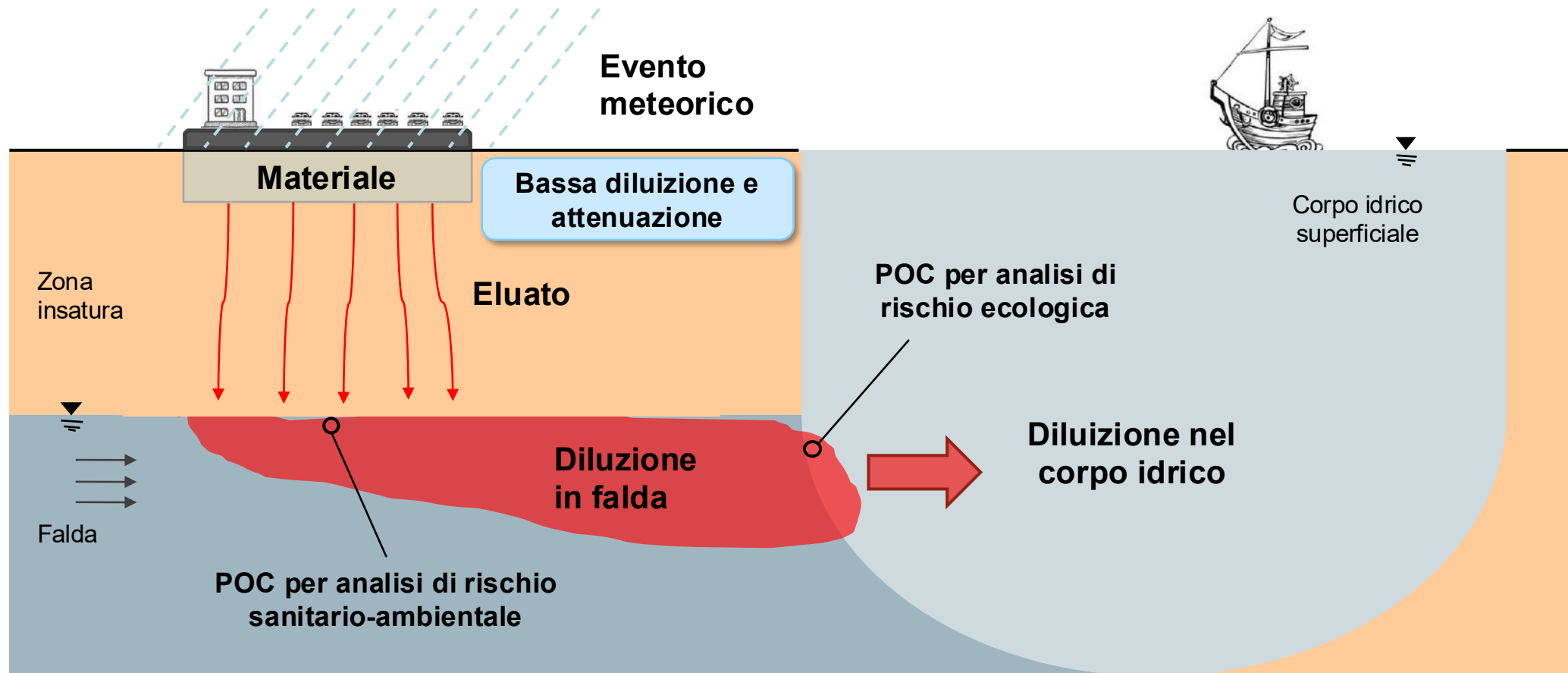
Esempio scenari di riutilizzo da considerare nell'analisi di rischio

Uso in falda ("No Restrictions")



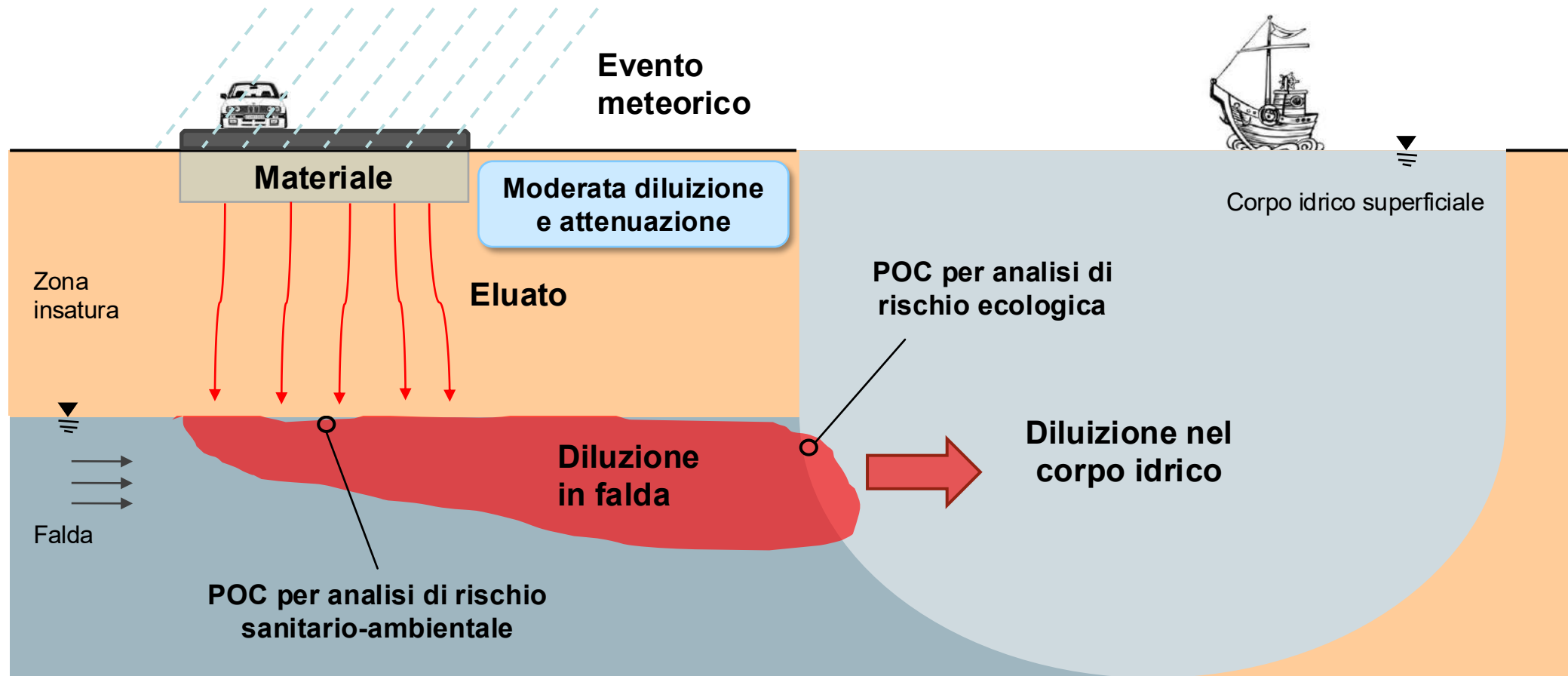
Esempio scenari di riutilizzo da considerare nell'analisi di rischio

Applicazioni su larga scala ("Worst Case")



Esempio scenari di riutilizzo da considerare nell'analisi di rischio

Tipiche applicazioni (“Worst Reasonable Case”)



Esempio valori limite (PNEC) per lo scenario «no restrictions»

Elemento	CSC	CSR	Valore limite nelle acque sotterranee (PNEC)	
	mg/L	mg/L	mg/L	Riferimento
Al	0.2	15.6	15.6	Risk-based (1)
As	0.01	0.0001	0.01	CSC (2)
B	1	3.13	3.13	Risk-based (1)
Ba*	-	3.13	3.13	Risk-based (1)
Be	0.004	0.031	0.031	Risk-based (1)
Cd	0.005	0.008	0.008	Risk-based (1)
Co	0.05	0.005	0.05	CSC (2)
Cr***	0.05	23.5	23.5	Risk-based (1)
Cu	1	0.63	1	CSC (2)
Mn	0.05	2.2	2.2	Risk-based (1)
Mo*	-	0.078	0.078	Risk-based (1)
Ni	0.02	0.31	0.31	Risk-based (1)
Pb	0.01	0.022	0.022	Risk-based (1)
Sb	0.005	0.006	0.006	Risk-based (1)
V	-	0.078	0.078	Risk-based (1)
Zn	3	4.7	4.7	Risk-based (1)
Cloruri**	250	-	250	CSC (3)
Solfati	250	-	250	CSC (3)
Fluoruri	1.5	-	1.5	CSC (3)
Nitrati**	50	-	50	CSC (3)

(1) Valori Risk-based calcolati con Risk-net 3.1.1 (Banca Dati ISS-INAIL, 2018) per il percorso di ingestione di acqua considerando un Bambino come recettore con i parametri di esposizione suggeriti nelle linee guida ISPRA (2005)

(2) Come suggerito dalle linee guida del MATTM (2014) in caso di valori risk-based inferiori alle CSC si prende come limite la CSC

(3) Viene presa la CSC in quanto non sono disponibili i parametri tossicologici

* Valori tossicologici da Database RSL USEPA (2020)

** Limiti D.Lgs. 31/01 relativo alla qualità delle acque destinate al consumo umano

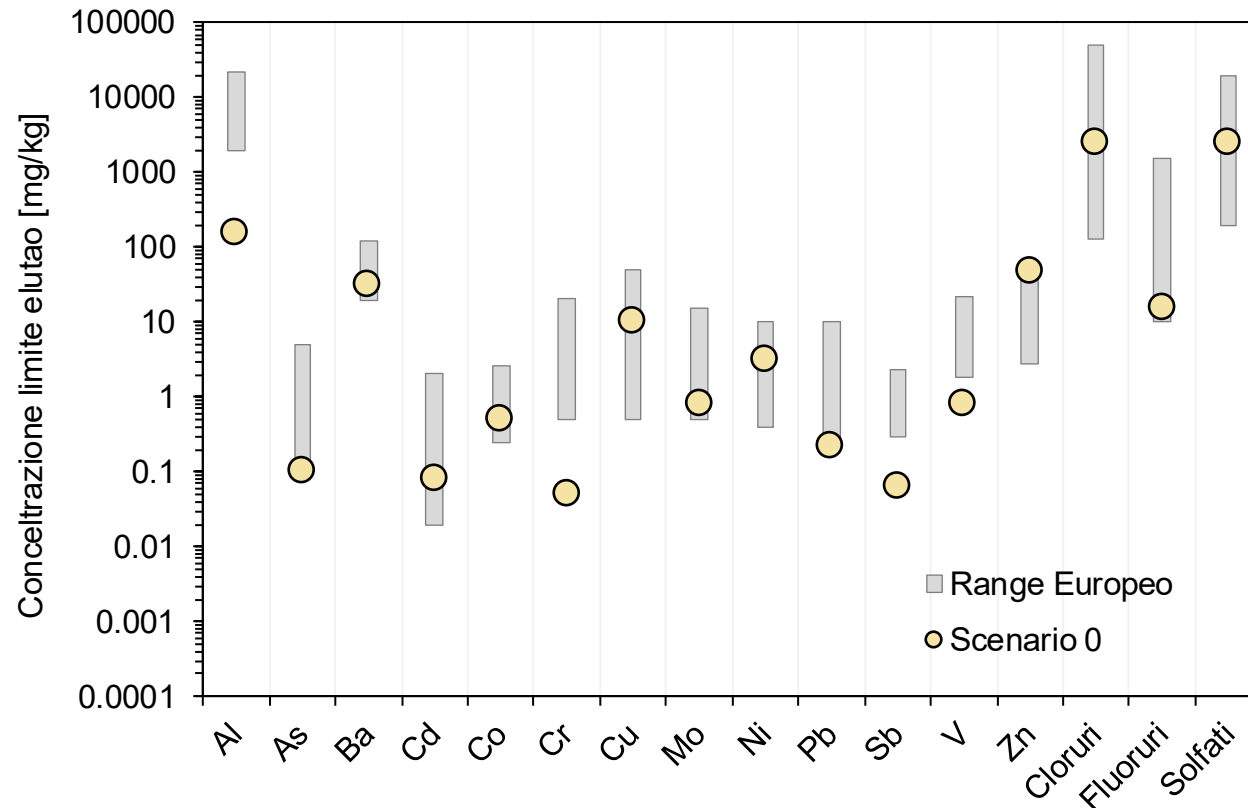
*** Valori limite per il Cr(VI), forma più solubile del Cr

*CSR calcolate con
il software*



Risk-net 3.2

Confronto PNEC per lo Scenario «no restrictions» con altri paesi europei



Confronto valori limite sull'eluato in termini di rilascio cumulato (mg/kg) con la procedura descritta in questo lavoro per lo scenario "no restrictions" ($C_{el,limite,cum} = C_{el,limite} \times 10 \text{ L/kg}$) con i limiti sul *leaching content* cumulati (mg/kg) fissati a livello europeo

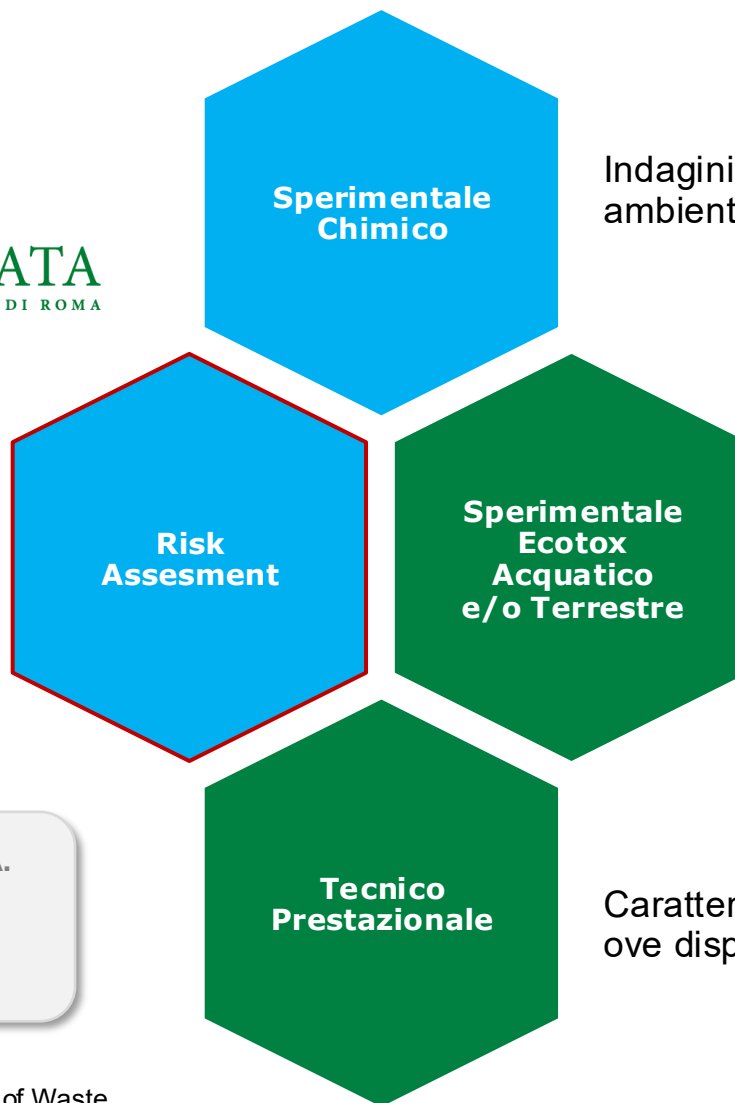
Valori limite europei presi da:
Blasenbauer et al. (2020, Waste Management)

I valori soglia per lo Scenario «no restrictions» relativo al riutilizzo dei materiali in falda risultano **in linea con quelli proposti nei diversi paesi europei**, e in alcuni casi (vedi Al, Cr, Sb e V) inferiori ai limiti più stringenti riscontrati.

Esempio di applicazione della procedura descritta (studio di filiera A2A)



Metodologia per la valutazione in funzione dello **specifico scenario di esposizione**
Focus di questa presentazione



Indagini eseguite sui prodotti per studio comportamento ambientale a seguito di **test di lisciviazione**













Test ecotossicologici terrestri ed acquatici con **esposizione** dei prodotti a **specifici organismi target**

Caratteristiche relative alle **norme tecniche dei prodotti** ove disponibili e/o concordate con primari utilizzatori finali

Gruppo di lavoro

Tor Vergata G. Costa, L. Acampora, I. Verginelli, A. Falsetti, F. Lombardi
A2A Ambiente C. Mensi
LabAnalysis E. Tediosi, L. Maggi, S. Messinetti

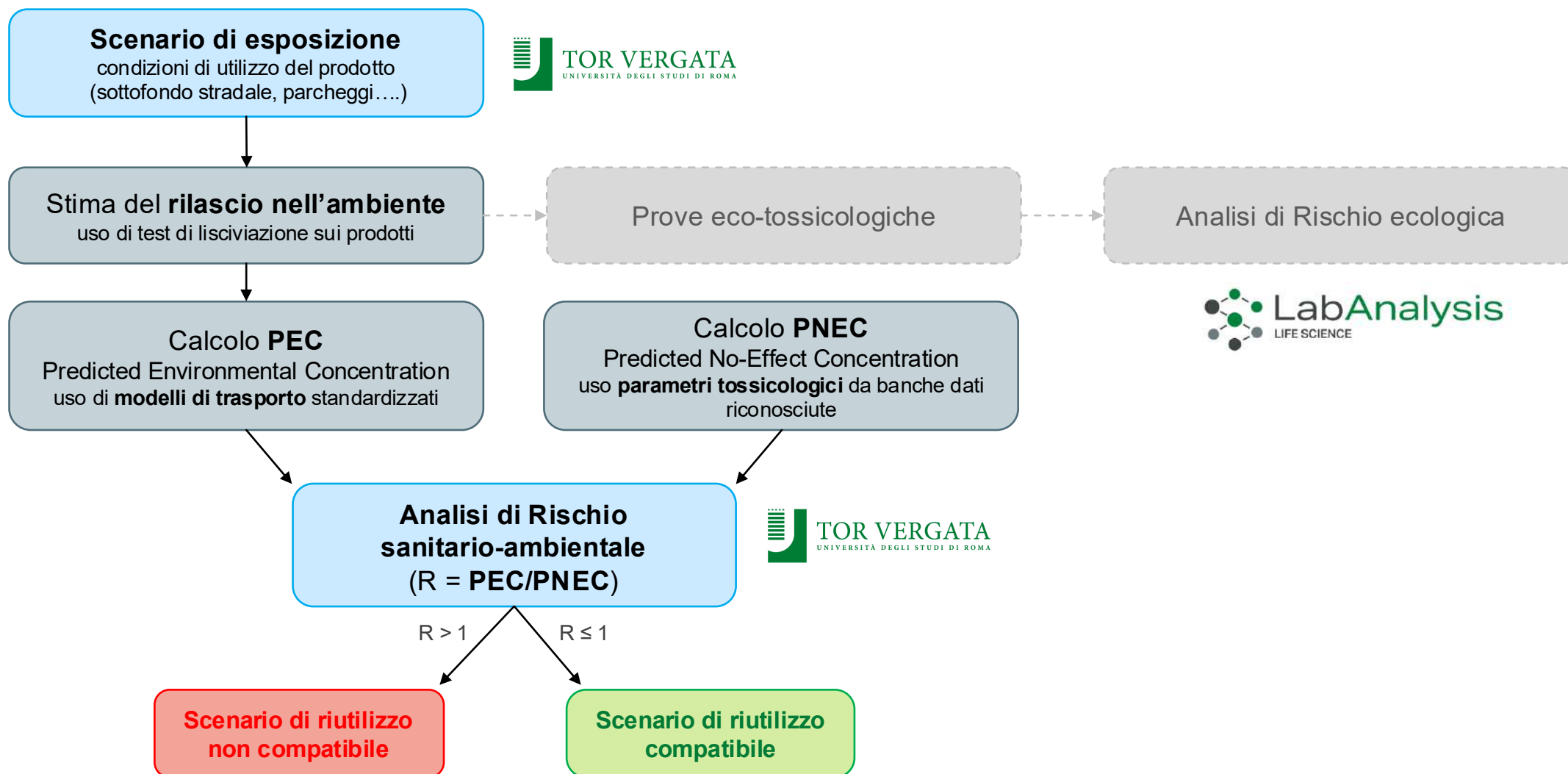
Campioni analizzati

Impianto 1	Impianto 2	Impianto 3	Impianto 4
 Campione 1A	 Campione 2D	 Campione 3G	 Campione 4I
 Campione 1B	 Campione 2E	 Campione 3H	 Campione 4L
 Campione 1C	 Campione 2F		

Fornitore	Campione	Processo di utilizzo
Impianto 1	1A	Ciclo a caldo
	1B	Ciclo a caldo e a freddo
	1C	Ciclo a caldo e a freddo
Impianto 2	2D	Ciclo a caldo
	2E	Ciclo a caldo e a freddo
	2F	Ciclo a caldo e a freddo
Impianto 3	3G	Ciclo a freddo
	3H	Ciclo a freddo
Impianto 4	4I	Ciclo a freddo
	4L	Ciclo a freddo

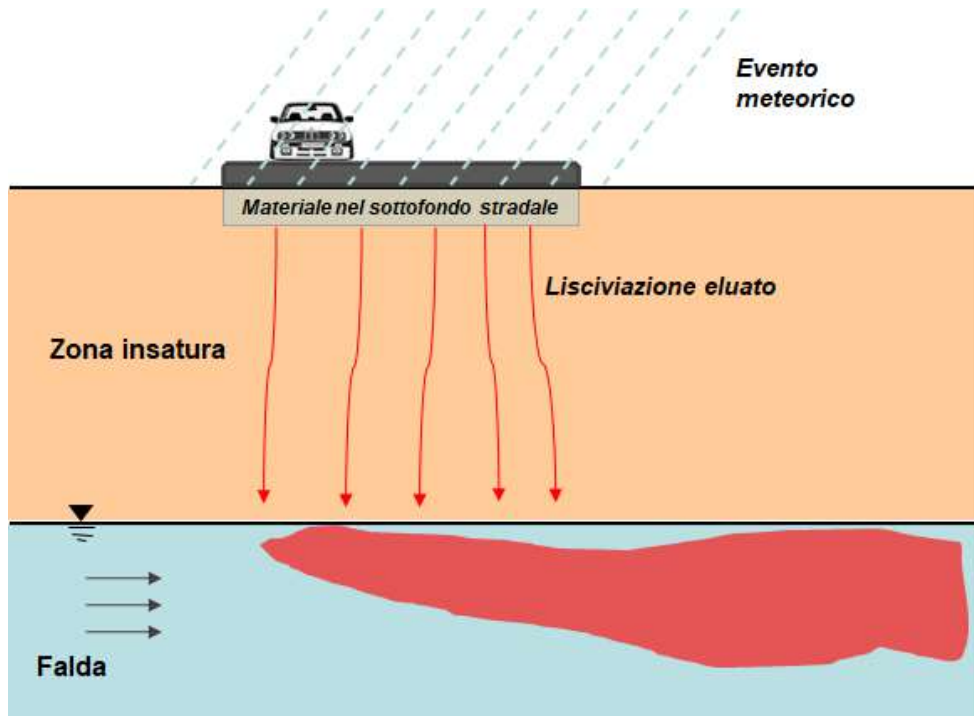
Valutazione di **10 diverse tipologie di prodotti** derivanti dal **trattamento di ceneri pesanti** provenienti da **4 impianti di trattamento italiani** in relazione al potenziale utilizzo come **materiale da costruzione**.

Procedura risk-based applicata



Scenario di utilizzo considerato

Scenario considerato: riutilizzo dei materiali come aggregati per sottofondi stradali



Percorso	Percorso attivo	Note
Contatti diretti (contatto dermico e ingestione)	No	L'utilizzo è previsto ad una certa profondità dal piano campagna
Risospensione di particolato	No	L'utilizzo è previsto ad una certa profondità dal piano campagna
Volatilizzazione in ambienti aperti e chiusi	No	Sostanze non volatili (metalli, metalloidi e anioni)
Lisciviazione in falda	Si	Da valutare impatti sulla risorsa idrica

Percorso da investigare per la valutazione della compatibilità ambientale: lisciviazione in falda

Test di lisciviazione condotti

Test di caratterizzazione:



Rilascio in funzione del L/S

Up-flow percolation test (EN 14405 - 2017) su campione < 4 mm (in triplo)



Rilascio in funzione del pH

pH dependence test (CEN14429 – su campioni < 1 mm (in doppio)



Test di conformità:



Eluizione al pH naturale e L/S=10 l/kg (EN 12457-2)

su campioni < 4 mm (in triplo)

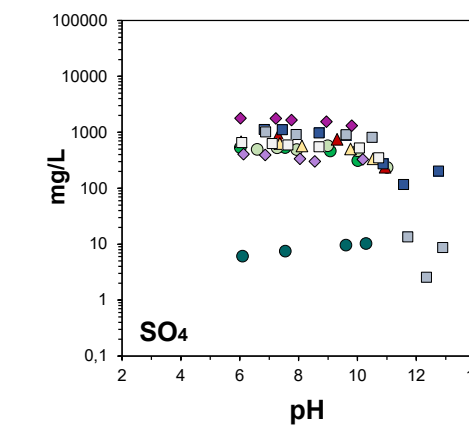
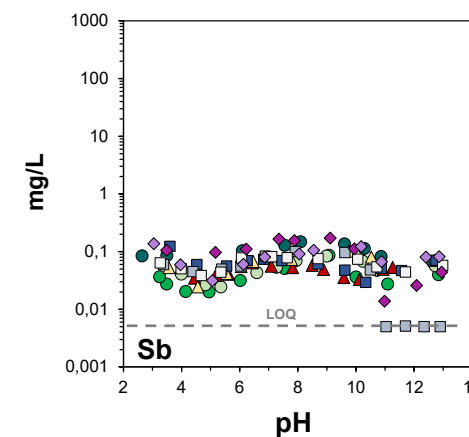
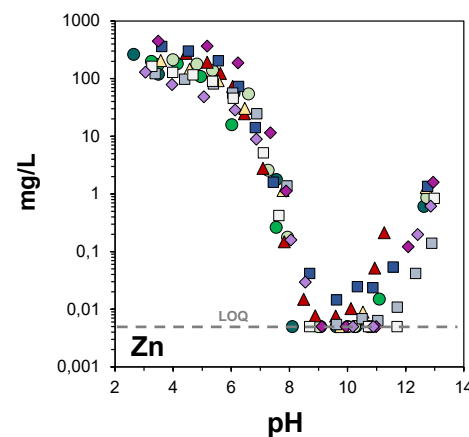
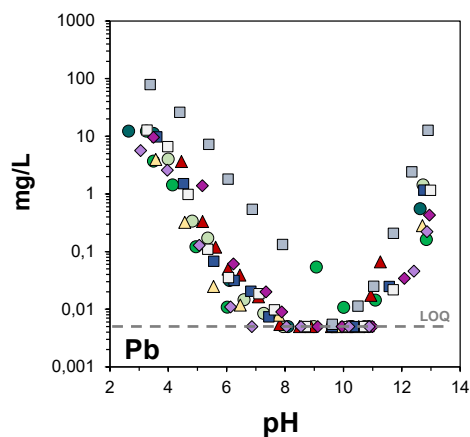
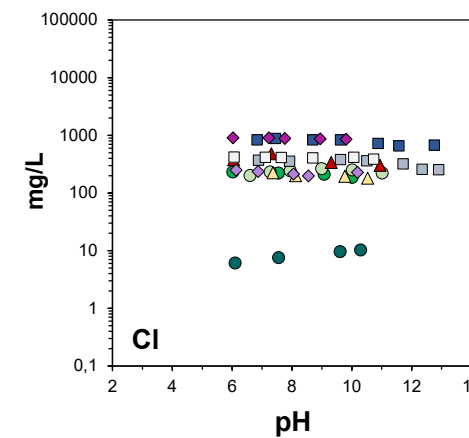
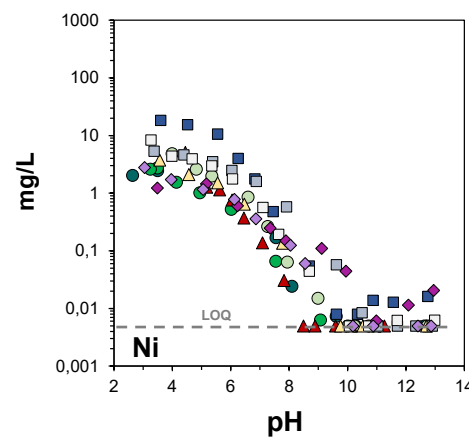
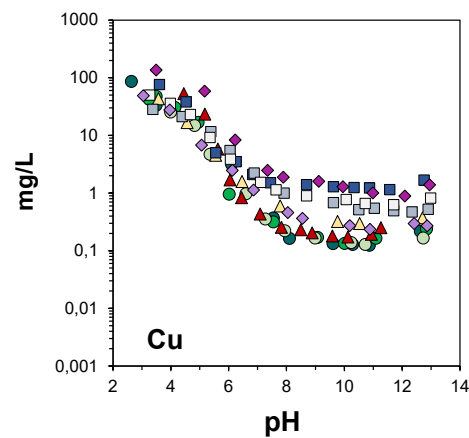
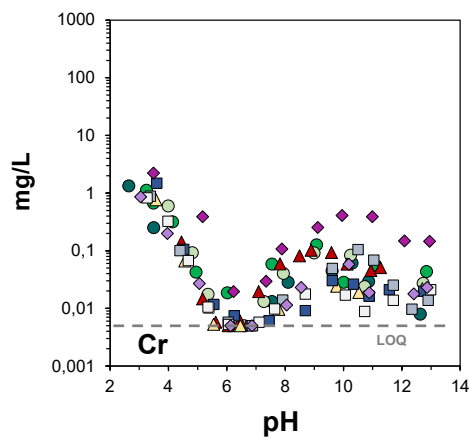
Parametri analizzati negli eluati:

Metalli, Metalloidi e Anioni

*Referente scientifico per la
parte sperimentale:
Prof.ssa Giulia Costa*

Esempio esiti test di lisciviazione (test a pH variabile)

Referente scientifico per la parte
sperimentale:
Prof.ssa Giulia Costa



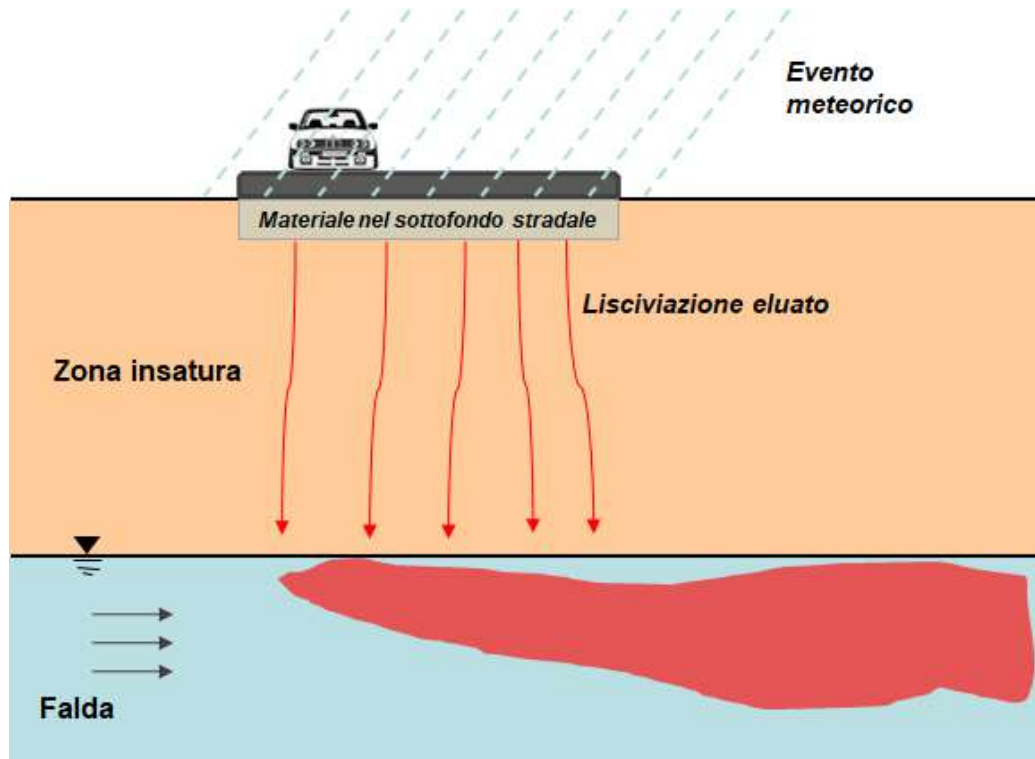
■ 1A □ 1B □ 1C ● 2D ● 2E ● 2F ▲ 3G ▲ 3H ◆ 4I ◆ 4L

Per i diversi campioni analizzati è stato studiato il comportamento ambientale in funzione del pH e del rapporto liquido/solido (L/S)

Assunzioni di base per l'applicazione dell'analisi di rischio

- Percorso di migrazione dei contaminanti: **lisciviazione in falda**.
- Riutilizzo dei materiali in **forma non legata** (hp conservativa).
- Riutilizzo del materiale **come aggregato tal quale** (hp conservativa → nella pratica da un punto di vista tecnico-prestazionale tali materiali si utilizzano tipicamente in contenuti percentuali inferiori al 100% e comunque in conformità alle norme UNI).
- Considerate le **concentrazioni massime nei test in colonna** ai diversi rapporti L/S (hp conservativa)
- Considerate le **concentrazioni massime nei pH-dependence test per pH 7-14** come da letteratura scientifica (hp conservativa → in tutte le prove del test di percolazione il pH sia sempre risultato superiore a 8,5).
- Ipotizzati **3 scenari di riutilizzo conservativi** (Scenario 0, 1 e 2) con parametri di default linee guida ISPRA (2008) su applicazione analisi di rischio ai siti contaminati

Assunzioni per i 3 scenari di utilizzo considerati



Ipotesi

Scenario 0 (uso in falda): no diluizione e attenuazione

Scenario 1 (sottofondo per applicazioni su larga scala):

- Larghezza sorgente: **500 m***
- Spessore sorgente: **0.5 m***

Scenario 2 (sottofondo stradale):

- Larghezza sorgente: **20 m** (circa 6 carreggiate)**
- Spessore sorgente: **0.3 m****

Scenario 1 e 2 (parametri comuni):

- Pioggia: 100 cm/anno (**Hp conservativa**)
- Infiltrazione nell'asfalto = 10% (**default ISPRA 2008**)
- Tipo di suolo = sabbia (**cautelativo**)
- Velocità della falda = 25 m/anno (**default ISPRA 2008**)
- Spessore acquifero = 2 m (**default ISPRA 2008**)
- Soggiacenza della falda = 3 m (**default ISPRA 2008**)

* Sono necessarie 312.500 ton di ceneri pesanti (densità = 2,5 ton/mc), quantitativo superiore a quello conferito in un anno da A2A agli impianti di trattamento/recupero (circa 250.000 ton).

** Se si utilizzasse il quantitativo annuo (250.000 ton) conferito da A2A agli impianti di trattamento/recupero si realizzerebbe una strada lunga circa 16 km.

Fattori di diluizione in falda calcolati per i 3 scenari di riutilizzo considerati

Scenario 1: Applicazioni su larga scala ("Worst Case")



Scenario 0: Uso in falda ("No Restrictions")

Fattore di diluizione (LDF)	Fattore di attenuazione (SAM)	Totale (LDF/SAM)
1	1	1

Scenario 0: Uso in falda ("No Restrictions")



Scenario 1: Applicazioni su larga scala ("Worst Case")

Fattore di diluizione (LDF)	Fattore di attenuazione (SAM)	Totale (LDF/SAM)
≈6,5	≈0,17	38

Scenario 2: Tipiche applicazioni ("Worst Reasonable Case")



Scenario 2: Tipiche applicazioni ("Worst Reasonable Case")

Fattore di diluizione (LDF)	Fattore di attenuazione (SAM)	Totale (LDF/SAM)
≈140	0,1	1400



Esiti valutazioni di Analisi di Rischio



Esiti valutazioni per test a pH variabile

Campione	Parametri con superamento dei valori limite		
	Scenario 0 (no restrictions)	Scenario 1 (worst case)	Scenario 2 (worst reasonable case)
1A	Al; B; Cd; Co; Cu; Cr; Mn; Mo; Ni; Pb; Sb; Cl; F; SO ₄	-	-
1B	B; Ba; Co; Cr; Mn; Mo; Ni; Pb; Sb; Cl; F; SO ₄	-	-
1C	Al; Cd; Co; Cr; Cu; Mn; Mo; Ni; Pb; Sb; Zn; Cl; F; SO ₄	-	-
2D	Al; Cd; Co; Cr; Mn; Sb; Cl; F; SO ₄	-	-
2E	As; Co; Cr; Mo; Pb; Sb; V; SO ₄	-	-
2F	Al; As; Co; Cr; Mn; Sb; F; SO ₄	-	-
3G	Al; As, B; Cd; Co; Cr; Mn; Mo; Pb; Sb; Cl; F; SO ₄	-	-
3H	Al; As; Cr; Mo; Sb; F; SO ₄	-	-
4I	B; Cd; Co; Cr; Cu; Mn; Mo; Sb; Zn; Cl; F; SO ₄	Cr	-
4L	Al; Cr; Sb; F; SO ₄	-	-

Scenario 0 = riutilizzo del materiale non legato direttamente in falda; Scenario 1 = riutilizzo del materiale non legato al di sotto di grandi parcheggi; Scenario 2 = riutilizzo del materiale non legato come sottofondo stradale.

Nessun superamento per lo Scenario 2 e un solo superamento per Scenario 1

Esiti valutazioni di Analisi di Rischio



Esiti valutazioni per test di percolazione in colonna

Campione	Parametri con superamento dei valori limite		
	Scenario 0 (no restrictions)	Scenario 1 (worst case)	Scenario 2 (worst reasonable case)
1A	Al; B; Cr; Cu; Mo; Pb; Sb; Cl; F	-	-
1B	Al; B; Cr; Cu; Mo; Pb; Sb; V; Cl; F	Pb	-
1C	Al; Cr; Cu; Mo; Pb; Sb; Cl; F	-	-
2D	Al; Cr; Cu; Mo; Pb; Sb; Cl; F	Cr	-
2E	Al; As; Cr; Cu; Mo; Pb; Sb; Cl; F; SO ₄	Cr	-
2F	Al; As; Cr; Cu; Mo; Sb; Cl; F	Cr; Cl	-
3G	Al; Cr; Cu; Mo; Pb; Sb; Cl; F; SO ₄	Cr	-
3H	Al; B; Cr; Cu; Mo; Sb; Cl; F; SO ₄	-	-
4I	Al; Cr; Cu; Mo; Pb; Sb; Cl; F	Cr; F	-
4L	Al; Cr; Cu; Mo; Sb; Cl; F	-	-

Scenario 0 = riutilizzo del materiale non legato direttamente in falda; Scenario 1 = riutilizzo del materiale non legato al di sotto di grandi parcheggi; Scenario 2 = riutilizzo del materiale non legato come sottofondo stradale.

Nessun superamento per lo Scenario 2 e superamenti isolati per Scenario 1

Esiti valutazioni di Analisi di Rischio



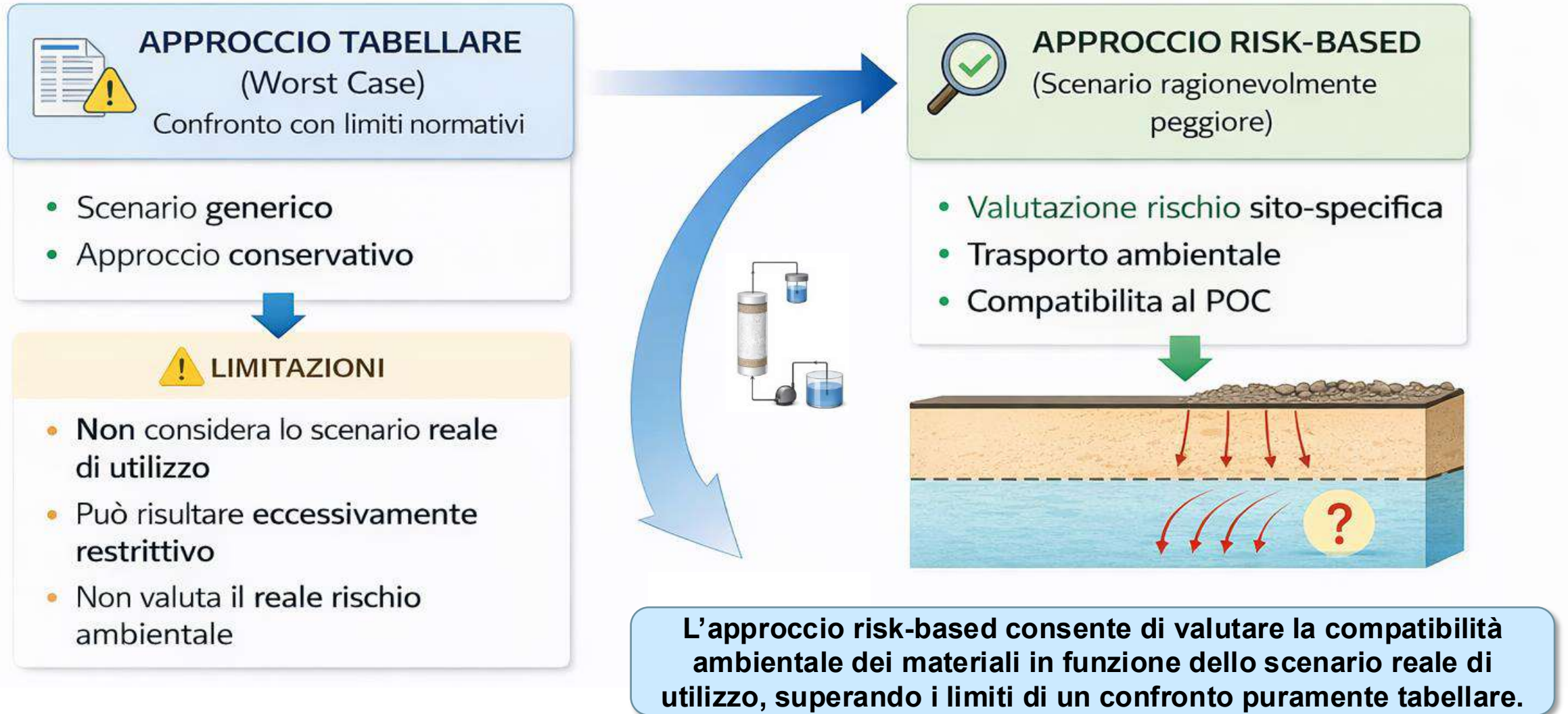
Esiti valutazioni per test a pH naturale (1° campagna di indagine)

Campione	Parametri con superamento dei valori limite		
	Scenario 0 (no restrictions)	Scenario 1 (worst case)	Scenario 2 (worst reasonable case)
1A	Al; Cr; Mo; Pb; Sb; Cl	-	-
1B	Cr; Pb	-	-
1C	Al; Cr; Mo; Sb	-	-
2D	Al; Cr; Sb; Cl	-	-
2E	Al; Cr; Sb; Cl	-	-
2F	Al; Cr; Sb	-	-
3G	Al; Cr; Sb; Cl	-	-
3H	Al; Cr; Sb	-	-
4I	Al; Cr; Mo; Pb; Sb; Cl; F	-	-
4L	Al; Cr; Sb	-	-

Scenario 0 = riutilizzo del materiale non legato direttamente in falda; Scenario 1 = riutilizzo del materiale non legato al di sotto di grandi parcheggi; Scenario 2 = riutilizzo del materiale non legato come sottofondo stradale.

Nessun superamento per lo Scenario 2 e per lo Scenario 1

Conclusioni





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



ECS 000034 – Rome Technopole

Spoke 1 – Research, technology development and innovation



Valorizzazione dei residui industriali con stoccaggio di CO₂ in forma solida

Alessandra Masi, Giulia Costa, Francesco Lombardi

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica



TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

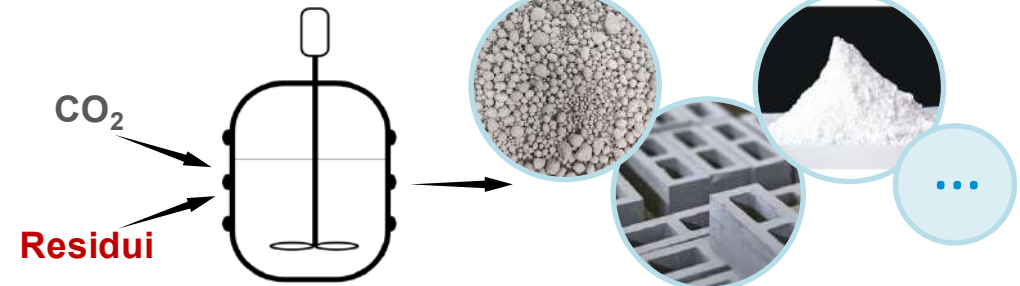


Obiettivo della ricerca e legame con il progetto Roma Tecnopolo

L'obiettivo generale della ricerca era quello di valutare la possibilità di implementare **processi basati sulla carbonatazione accelerata** per il **trattamento e la valorizzazione di residui industriali alcalini** (focus su **scorie d'acciaieria**) con lo scopo di ottenere **prodotti con un maggior valore aggiunto**



Flagship project 1.2:
Prodotti circolari e biologici



Prodotti

+CO₂ stoccata



Flagship project 1.1:
Decarbonizzazione dei processi

Mission 2:
*Rivoluzione verde e
Transizione ecologica*





Stato dell'arte e innovazioni proposte

- **Attualmente**, i prodotti di scarto derivanti dalla produzione dell'acciaio vengono principalmente impiegati come:



Materiale per sottofondo stradale



Copertura di discariche

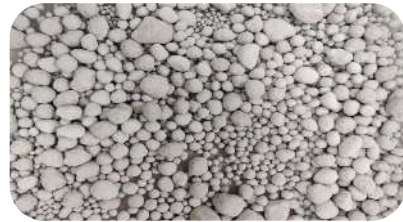


Aggregati per calcestruzzo e conglomerati bituminosi

- **Questo progetto di ricerca** propone strade di valorizzazione della scoria alternative in modo da ottenere prodotti con un maggior valore aggiunto

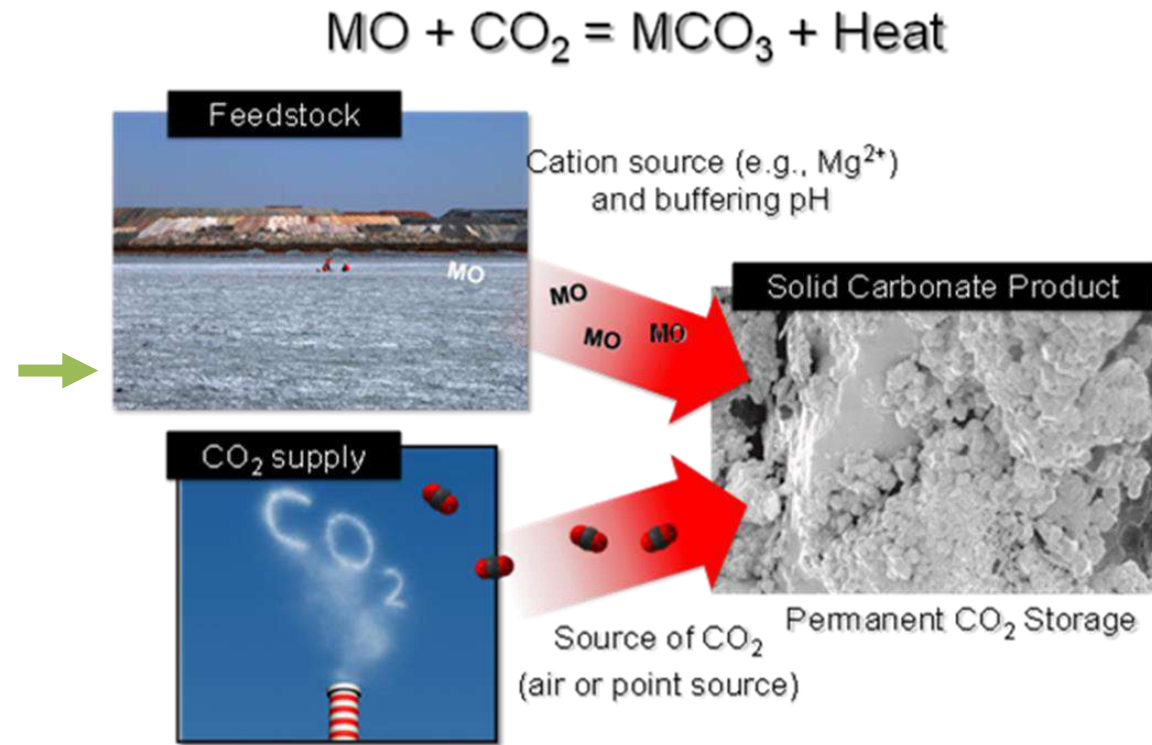


Carbonato di calcio precipitato (PCC)



Aggregati

+ CO₂ stoccata

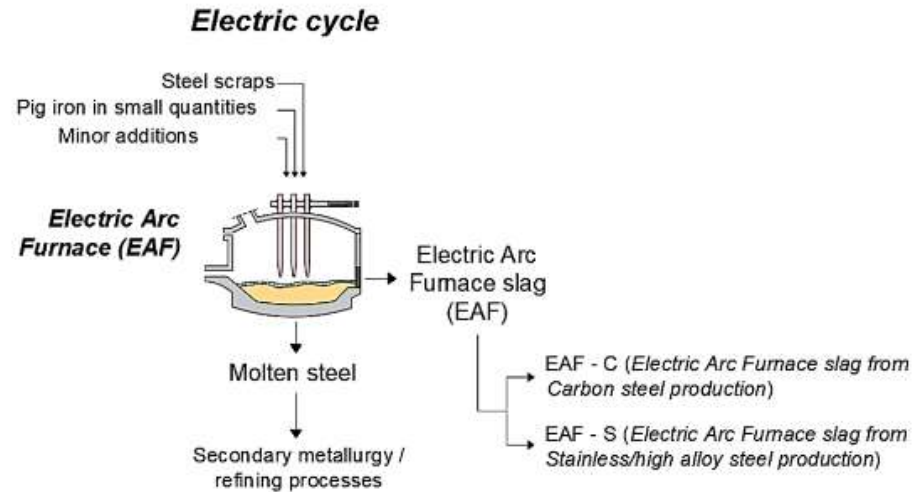




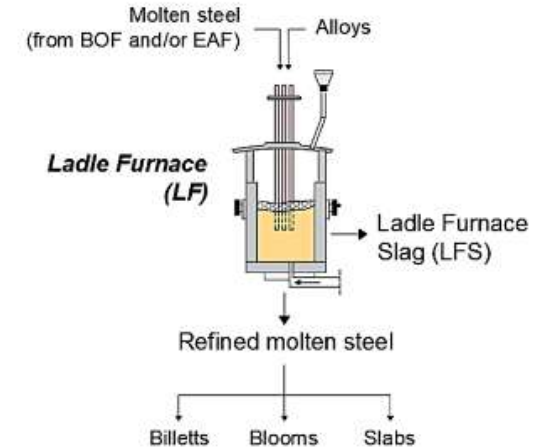
Residui considerati



Forno ad Arco Elettrico



Secondary metallurgy / refining processes



- L'Italia, con 20 Mton/y di acciaio prodotto, è il 12° produttore globale
- In Italia, quasi il 90% dell'acciaio è prodotto con tecnologia EAF
- Le emissioni di CO₂ associate al sistema EAF da scarti sono 0.7 ton/ton di acciaio grezzo



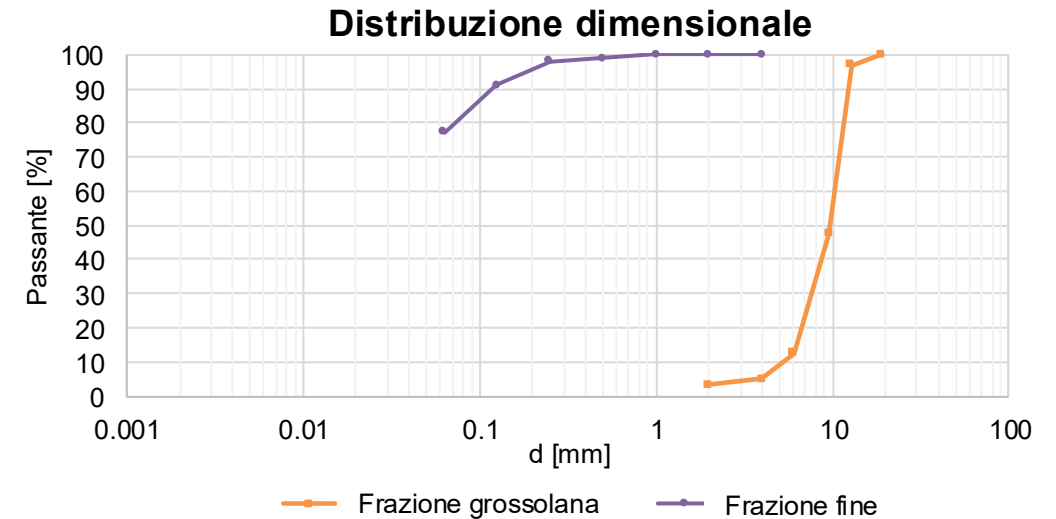
Residui considerati



COMPOSIZIONE ELEMENTALE		
Elemento	Frazione grossolana	Frazione fine
	Concentrazione [g/kg]	
Al	21.94	30.37
Ba	0.34	0.35
Ca	332.38	356.47
Cd	0.54	0.28
Cr	12.73	19.13
Cu	2.16	0.9
Fe	4.76	8.06
K	3.25	1.13
Mg	47.17	44.75
Mn	7.27	5.76
Mo	0.02	<0.05
Na	5.44	2.71
Ni	0.12	0.15
Pb	0.02	0.03
Sb	0.13	0.08
Si	130.43	112.44
V	0.20	0.39
Zn	0.32	0.29

CONTENUTO DI CARBONIO		
	Frazione grossolana	Frazione fine
	Concentrazione [% wt]	
TC	0.11	0.31
IC	0.01	0.05
TOC	0.10	0.26

FASI POTENZIALMENTE REATTIVE	
Frazione grossolana	Frazione fine
Ca Silicate [Ca_2SiO_4]; Bridgite [$\text{Ca}_7\text{Mg}(\text{SiO}_4)_4$]; Merwinite [$\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$]; Cuspidine [$\text{Ca}_8(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{F}_4$]; Ca-Al Oxide	Ca Silicate (Lamite) [Ca_2SiO_4]; Ca-Ti Oxide [CaTiO_3]; Ca-Mg Silicate (Akermanite) [$\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$]



Trattamenti proposti e risultati ottenuti

Materiale grossolano – Processi diretti

$$u_{CO_2} = \frac{CO_{2,fin}\% - CO_{2,in}\%}{100 - CO_{2,fin}\%} \cdot 100$$

CONDIZIONI OPERATIVE		
	ID test	
Campione tal quale	carb	L/S = 0.03 l/kg T = T _{amb} P = 1 bar CO ₂ 100% t = 2 h

- Viste le **dimensioni del materiale** e le **fasi mineralogiche non prontamente reattive**, l'**uptake di CO₂** è risultato **essere molto limitato (0.04%)**
- Vista la scarsa reattività, anche gli **effetti sul comportamento ambientale** del materiale sono stati **limitati** e presumibilmente legati alla variabilità del test e all'eterogeneità del campione
 - pH 11.59 → 11.41
 - Leggero miglioramento della lisciviazione di Ba, Cr e Cl⁻
 - Aumento del rilascio di V

Il campione tal quale ha dimostrato di non essere reattivo se sottoposto a trattamenti con CO₂ nelle condizioni descritte



1. RIDUZIONE DIMENSIONALE
2. CONDIZIONI OPERATIVE PIÙ SPINTE

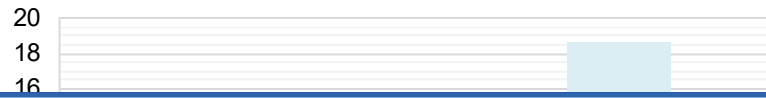


Trattamenti proposti e risultati ottenuti

Materiali grossolano – Processi diretti

$$u_{CO_2} = \frac{CO_{2,fin}\% - CO_{2,in}\%}{100 - CO_{2,fin}\%} \cdot 100$$

CO₂ uptake



CONDIZIONI OPERATIVE

ID test
WET 3bar
SLU 3bar
WET 10bar
SLU 10bar

Campione **macinato**

L/S = 5 l/kg
T = 50°C
P = 10 bar, CO₂ 100%
 t = 2 h

Conclusioni

- Il materiale tal quale è risultato essere poco reattivo quando sottoposto a trattamento con CO₂ → **MACINAZIONE NECESSARIA**
- Il produttore era intenzionato ad utilizzare il materiale come sostituto dell'aggregato naturale → **NO MACINAZIONE**

LA CARBONATAZIONE NON È RISULTATA ESSERE IL TRATTAMENTO ADATTO PER LA VALORIZZAZIONE DI QUESTO MATERIALE

- Miglioramento della lisciviazione di Ba
- Aumento del rilascio di Cr, Mo e V

macinazione e le condizioni operative più spinte hanno consentito di raggiungere uptake superiori

risparmio ambientale e il rilascio di

(WET 10bar), 10.19 (SLU 10bar)



Trattamenti proposti e risultati ottenuti

Materiale fine – Processi diretti

CONDIZIONI OPERATIVE		
	ID test	
Campione tal quale	GCp	L/S _i = 0.25 l/kg T = T amb. P = 1 bar 100% CO ₂ t _g = 30 min; t _c = 2 h
	GCc	L/S = 0.25 l/kg T = T amb. P = 1 bar 100% CO ₂ t _{cg} = 2 h
	G ref	L/S _i = 0.25 l/kg T = T amb. t _g = 30 min

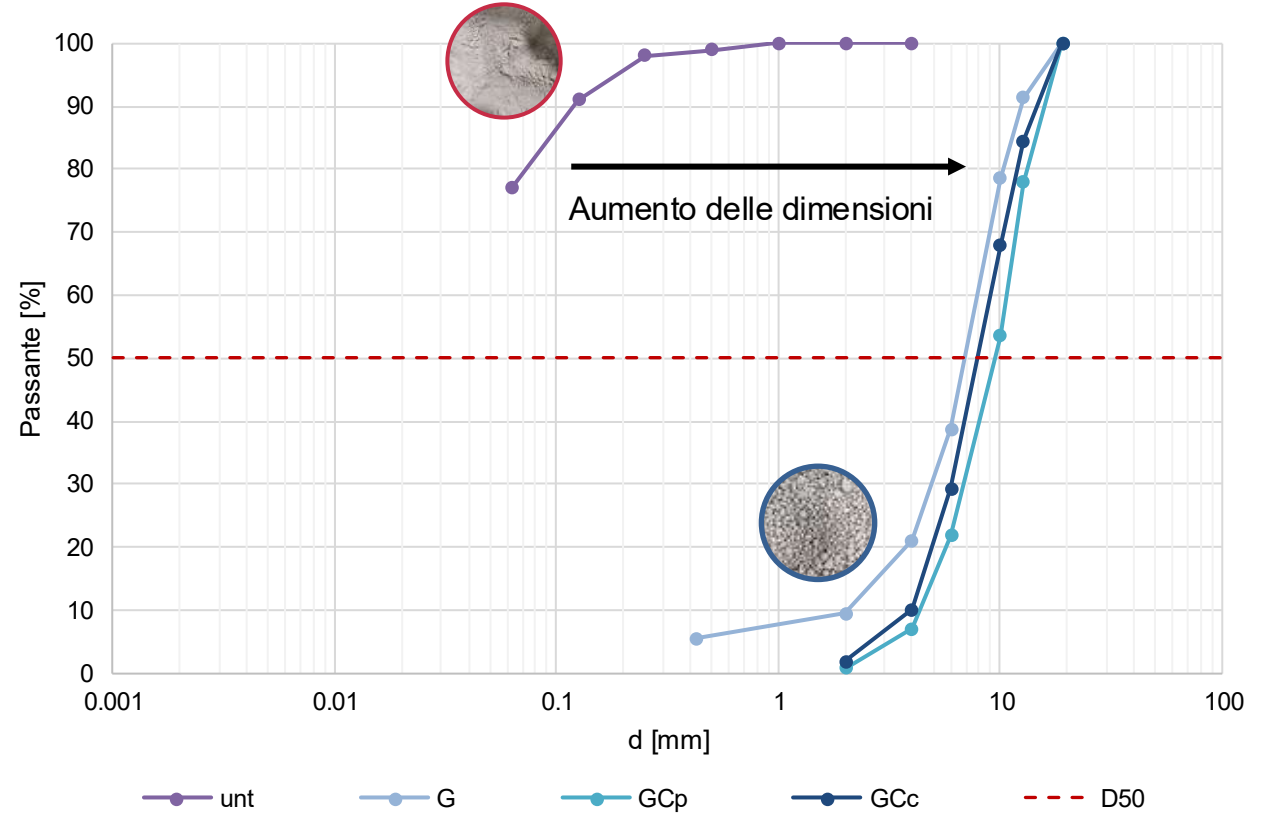
+28 giorni di curing



Aggregati



Curve granulometriche

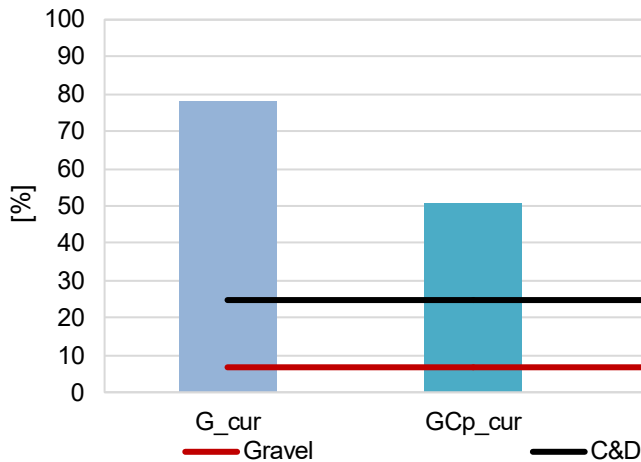




Trattamenti proposti e risultati ottenuti

Materiale fine – Processi diretti

ACV

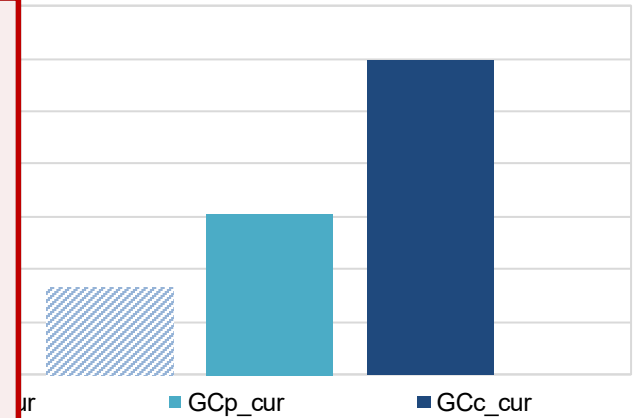


Criticità

- Capacità di stoccaggio contenuta
- Effetti non sempre positivi sul comportamento ambientale
- Resistenza meccanica limitata

È POSSIBILE PENSARE DI APPLICARE ALTRI PROCESSI PER VALORIZZARE AL MEGLIO IL MATERIALE?

CO₂ uptake



- Anche per il materiale fine, gli eff

- pH 11.94 → 11.6 (G_cur), 11.53 (GCp_cur), 11.63 (GCc_cur)
- Miglioramento della lisciviazione di Ba
- Aumento del rilascio di Cr e Mo

no stati sempre positivi:



Trattamenti proposti e risultati ottenuti

Materiale fine – Processi indiretti

Studio sull'efficienza di estrazione del calcio



CONDIZIONI OPERATIVE				
	T = T _{amb} t = 60 min			
	Effetto di L/S		Effetto di M	
Reagenti	M [mol/l]	L/S [l/kg]	M [mol/l]	L/S [l/kg]
NH ₄ NO ₃	1	20, 50, 100, 200	1, 1.5, 2	100
HNO ₃	1	20, 50, 100, 200	0.25, 0.5, 0.75, 1	100
HCl	1	20, 50, 100, 200	0.25, 0.5, 0.75, 1	100
Acido citrico	0.33	20, 50, 100, 200	0.08, 0.17, 0.25, 0.33	100



$$\eta_{extr} = \frac{Ca_{estratto}}{Ca_{tot}} \cdot 100$$

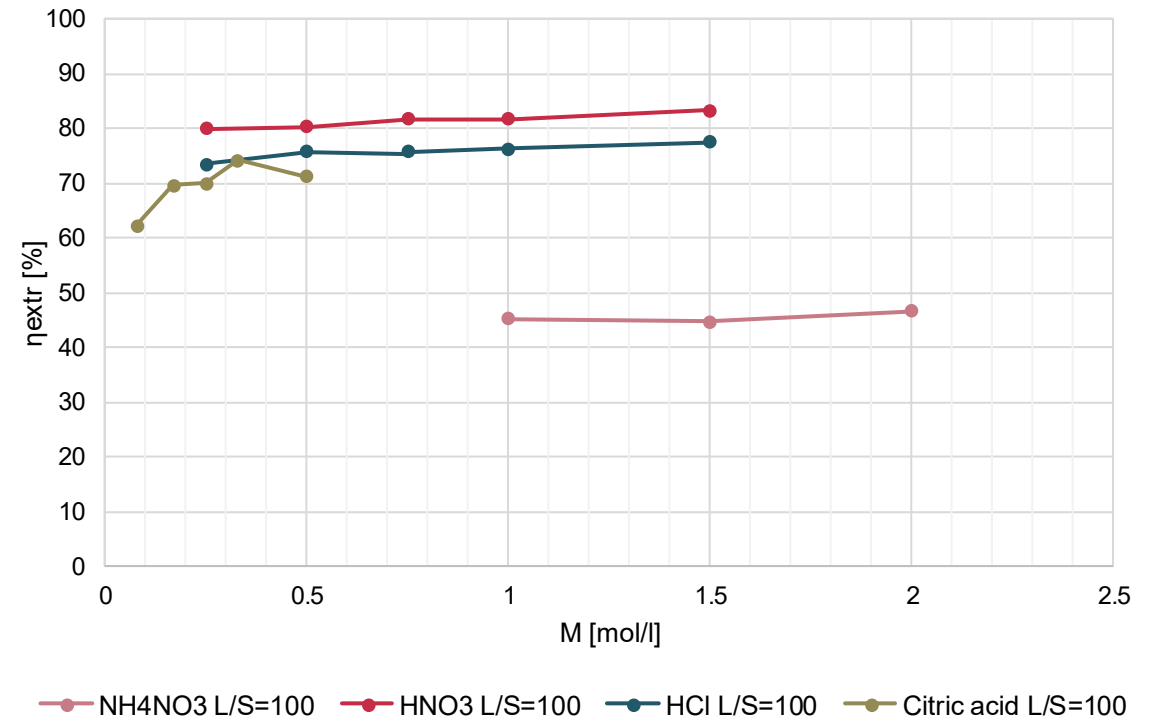
Quanto Ca viene estratto dalla matrice solida?



Trattamenti proposti e risultati ottenuti

Materiale fine – Processi indiretti

Studio sull'efficienza di estrazione del calcio





Trattamenti proposti e risultati ottenuti

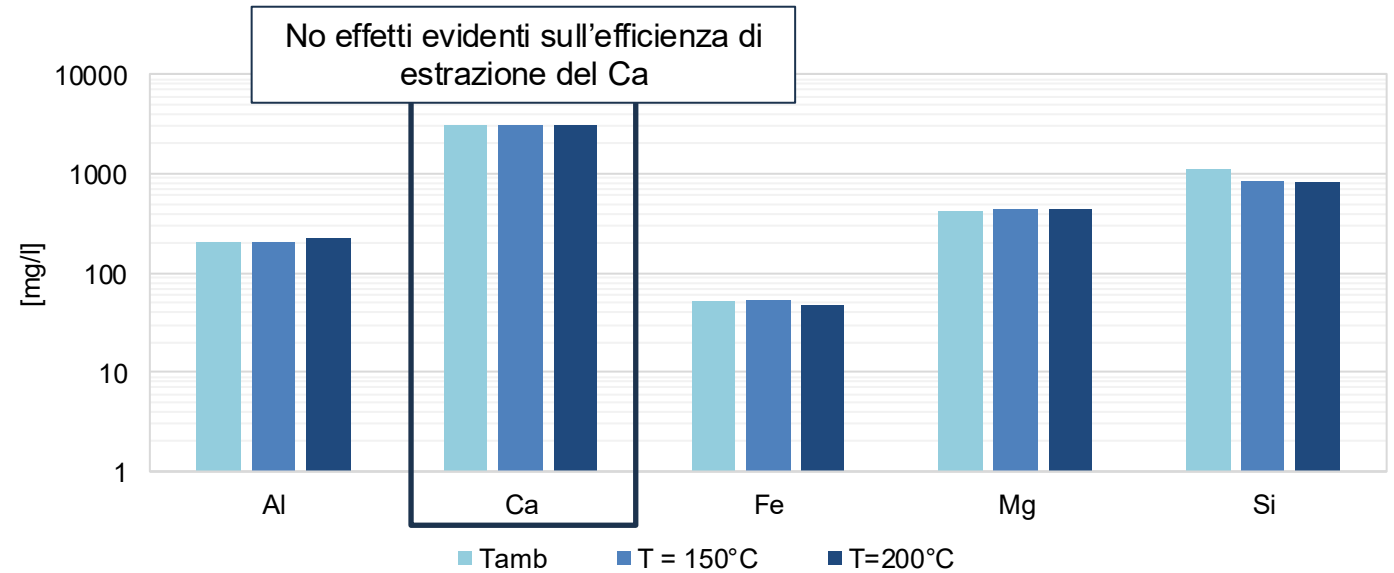
Materiale fine – Processi indiretti

Studio sull'efficienza di estrazione del calcio

HNO_3 0.5M, L/S = 100 l/kg, t = 1h



Effetto della Temperatura sull'estrazione di diverse specie chimiche dalla matrice solida



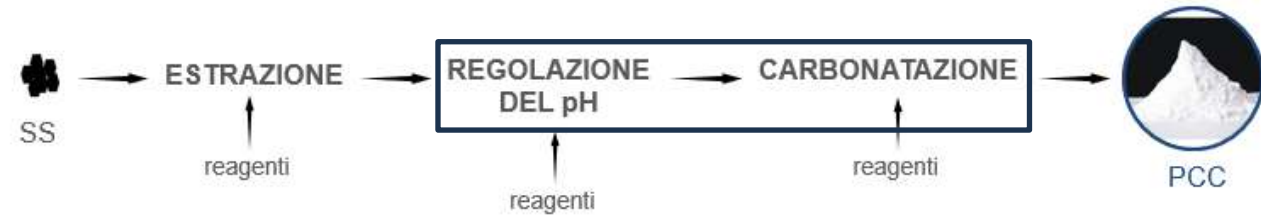


Trattamenti proposti e risultati ottenuti

Materiale fine – Processi indiretti

Studio sull'efficienza di carbonatazione

Processo pH-swing tradizionale



CONDIZIONI OPERATIVE					
Estrazione			Regolazione del pH	Carbonatazione	
T = T _{amb} ; t = 60 min			pH _{fin} = 10-11; T = T _{amb}	100% CO ₂ gorgogliata; T = T _{amb}	
Reagente	M [mol/l]	L/S [l/kg]	Reagente	t [min]	Reagente
NH ₄ NO ₃	1	100	NaOH 5M	5, 10, 15, 30	NaOH 5M
HNO ₃	0.5	100	NaOH 5M	5, 10, 15, 30	NaOH 5M
HCl	0.5	100	NaOH 5M	5, 10, 15, 30	NaOH 5M
Acido citrico	0.33	100	NaOH 5M	5, 10, 15, 30	NaOH 5M



$$\eta_{carb} = \frac{Ca_{estratto} - Ca_{post carb}}{Ca_{estratto}} \cdot 100$$

Quanto Ca è precipitato sotto forma di carbonato reagendo con la CO₂?

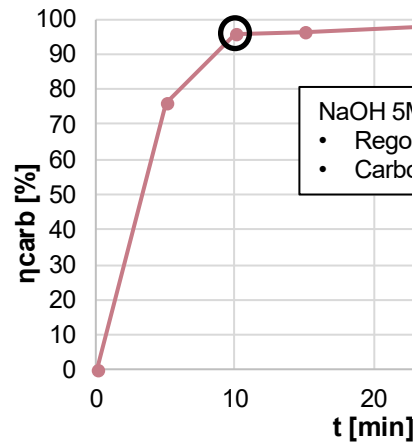
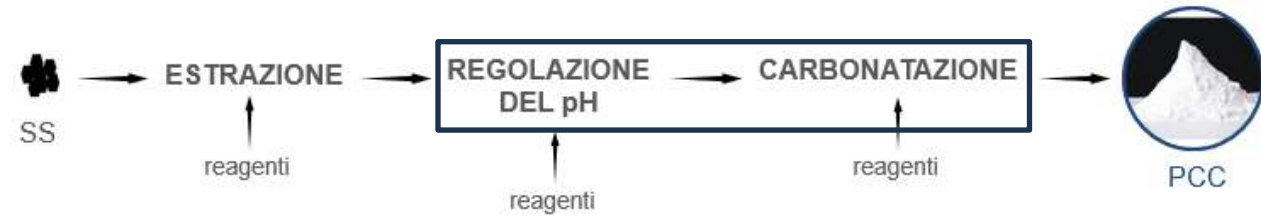


Trattamenti proposti e risultati ottenuti

Materiale fine – Processi indiretti

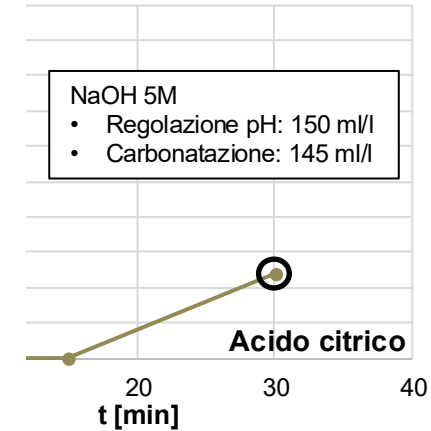
Studio sull'efficienza di carbonatazione

Processo pH-swing tradizionale



PCC prodotto [g/kg _{res}]			
NH ₄ NO ₃	HNO ₃	HCl	Acido citrico
396	666	666	161

CO ₂ stoccata [g/kg _{res}]			
NH ₄ NO ₃	HNO ₃	HCl	Acido citrico
174	293	293	71



Analisi XRD dei precipitati

Calcite

Calcite + Vaterite

Calcite

Calcite + Citrato di sodio anidro

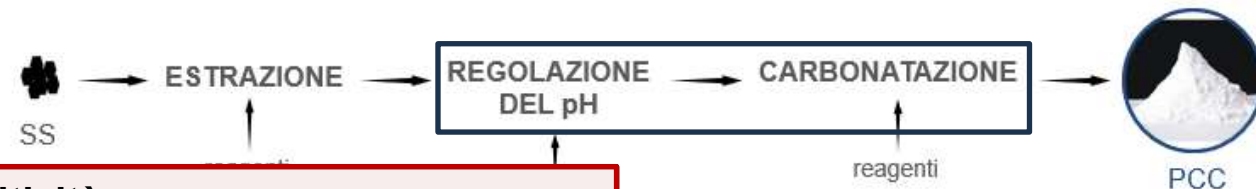


Trattamenti proposti e risultati ottenuti

Materiale fine – Processi indiretti

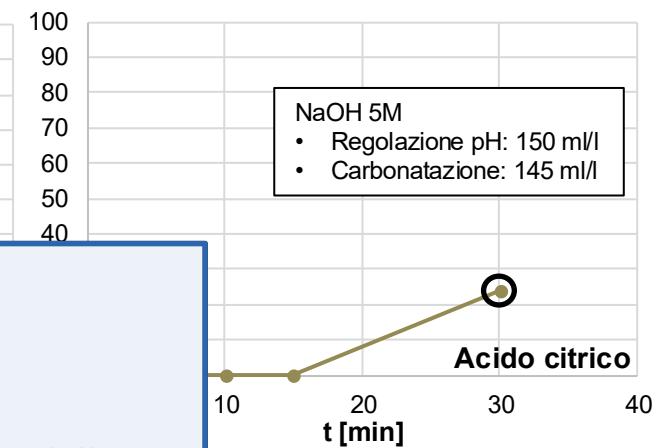
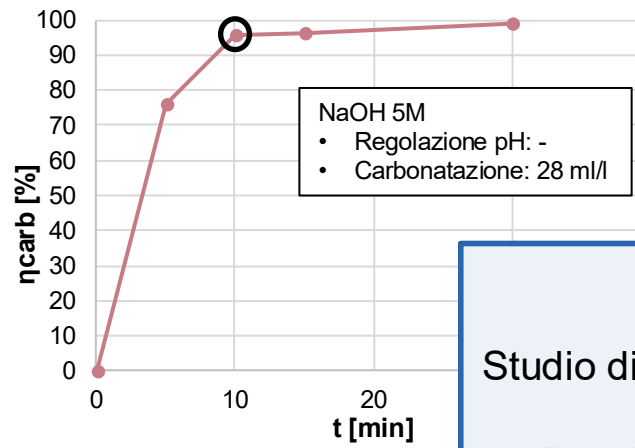
Studio sull'efficienza di carbonatazione

Processo pH-swing tradizionale



Criticità

- Il processo richiede l'utilizzo di più reagenti in quantità non trascurabile → **IMPATTO NEGATIVO SULLA SOSTENIBILITÀ DEI TRATTAMENTI**



Sviluppi

Studio di processi che possano garantire:

- Possibilità di **recuperare altro materiale solido** durante la fase di estrazione delle specie reattive e regolazione del pH
- Riduzione del consumo di reagenti**, anche considerando gli step a monte di quello di carbonatazione (e.g. cattura della CO₂) e loro **recupero**

Analisi XRD dei precipitati

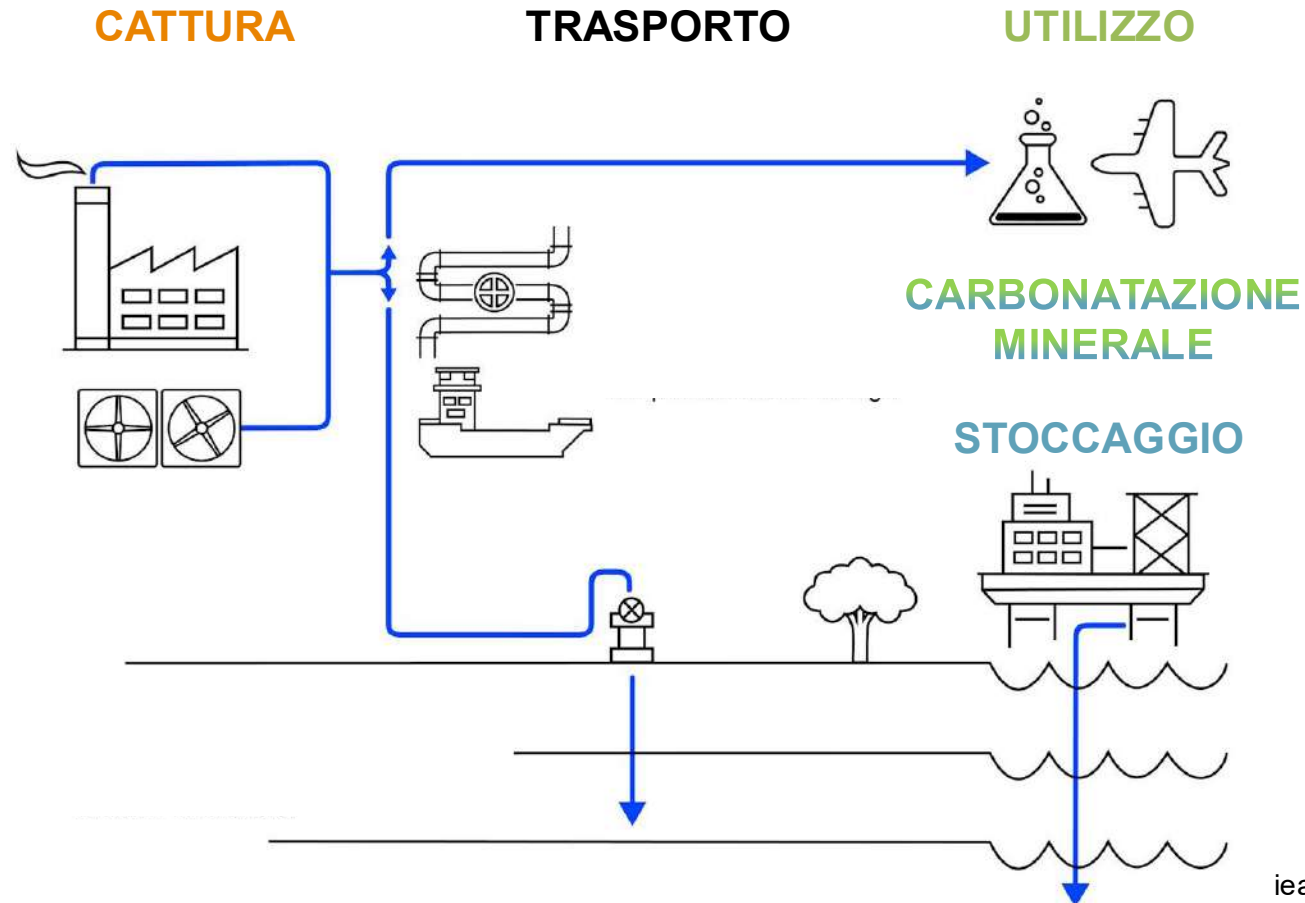
Calcite

Calcite + Citrato di sodio anidro



Trattamenti proposti e risultati ottenuti

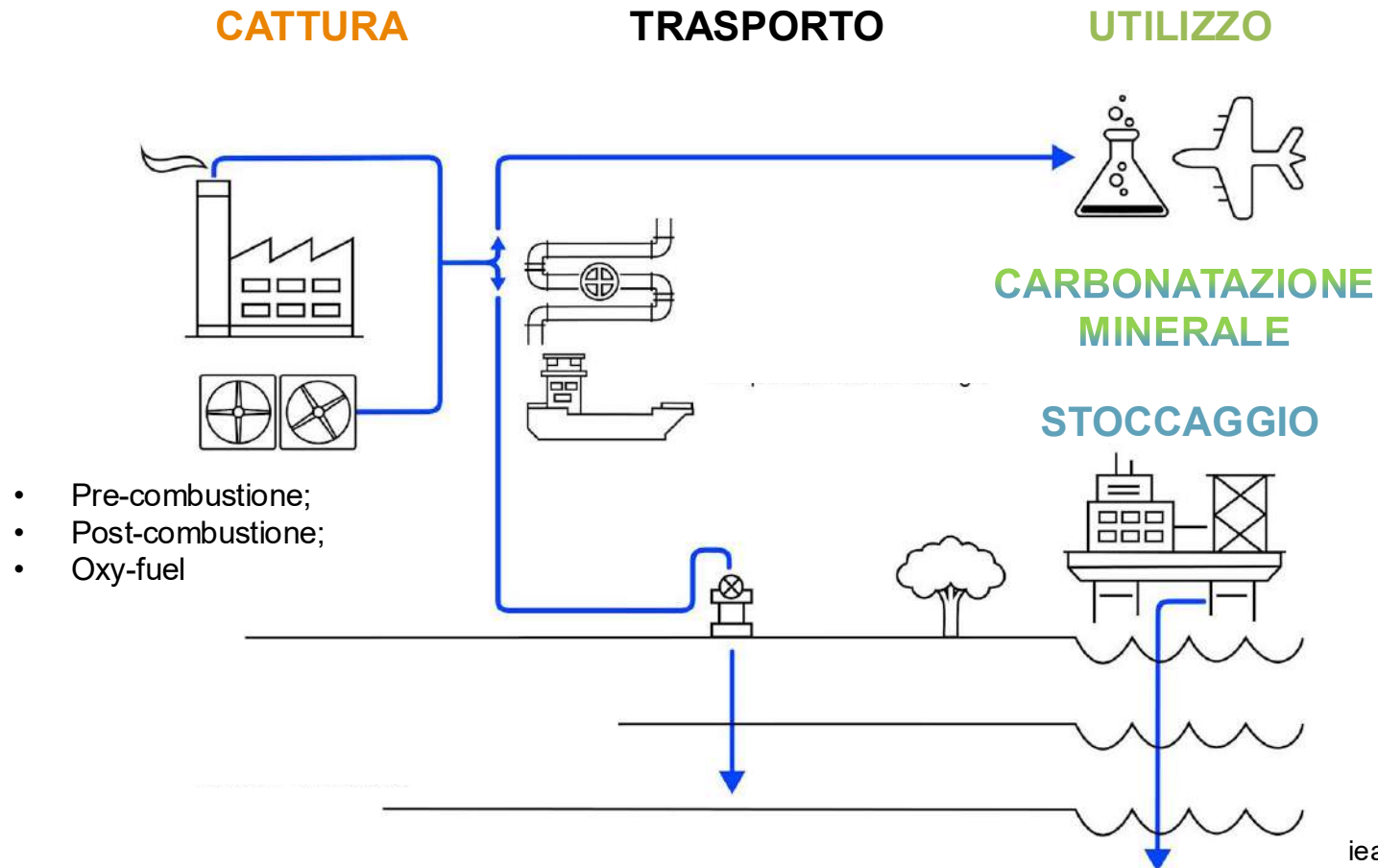
CCUS – Carbon Capture Utilisation and Storage





Trattamenti proposti e risultati ottenuti

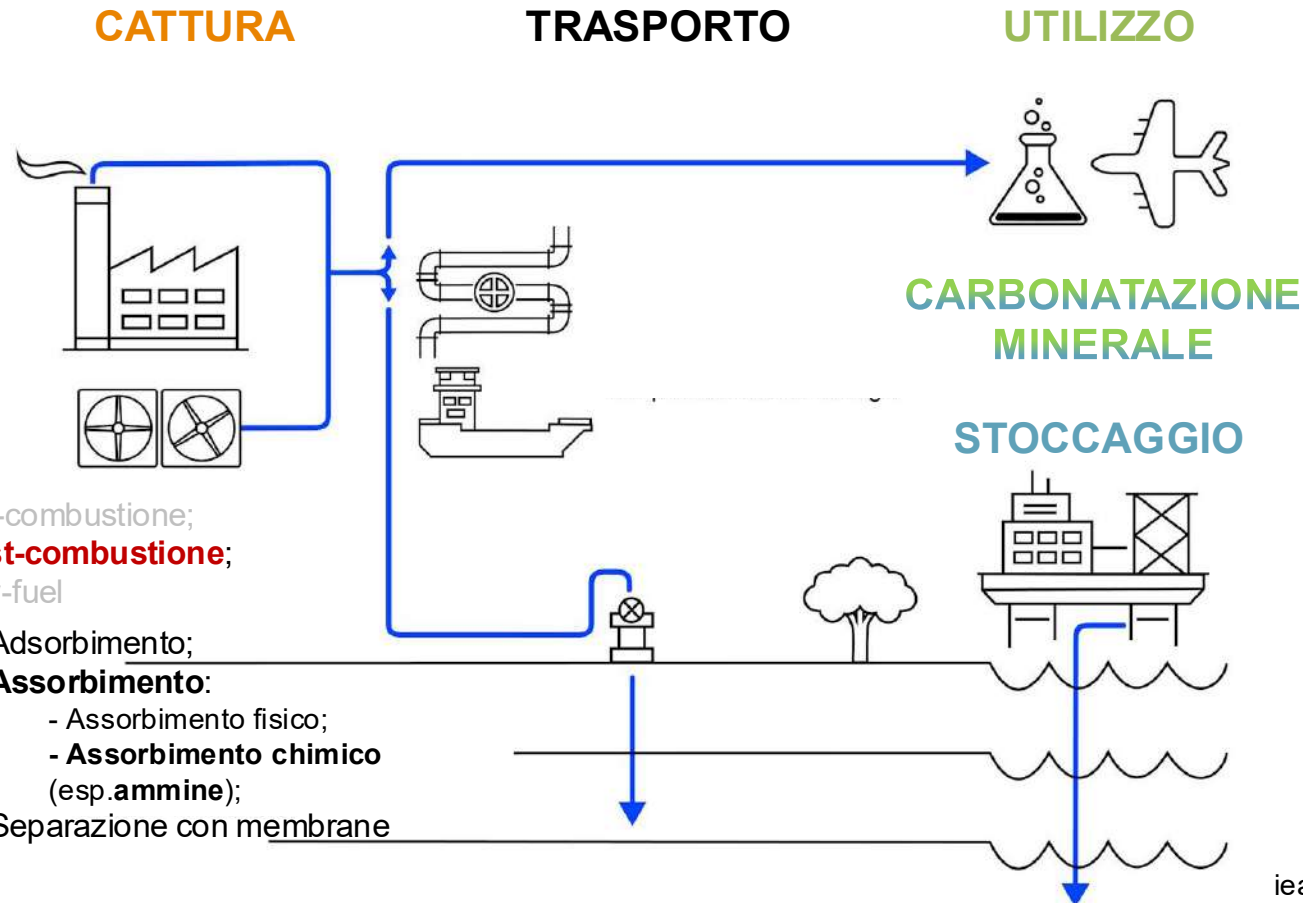
CCUS – Carbon Capture Utilisation and Storage





Trattamenti proposti e risultati ottenuti

CCUS – Carbon Capture Utilisation and Storage



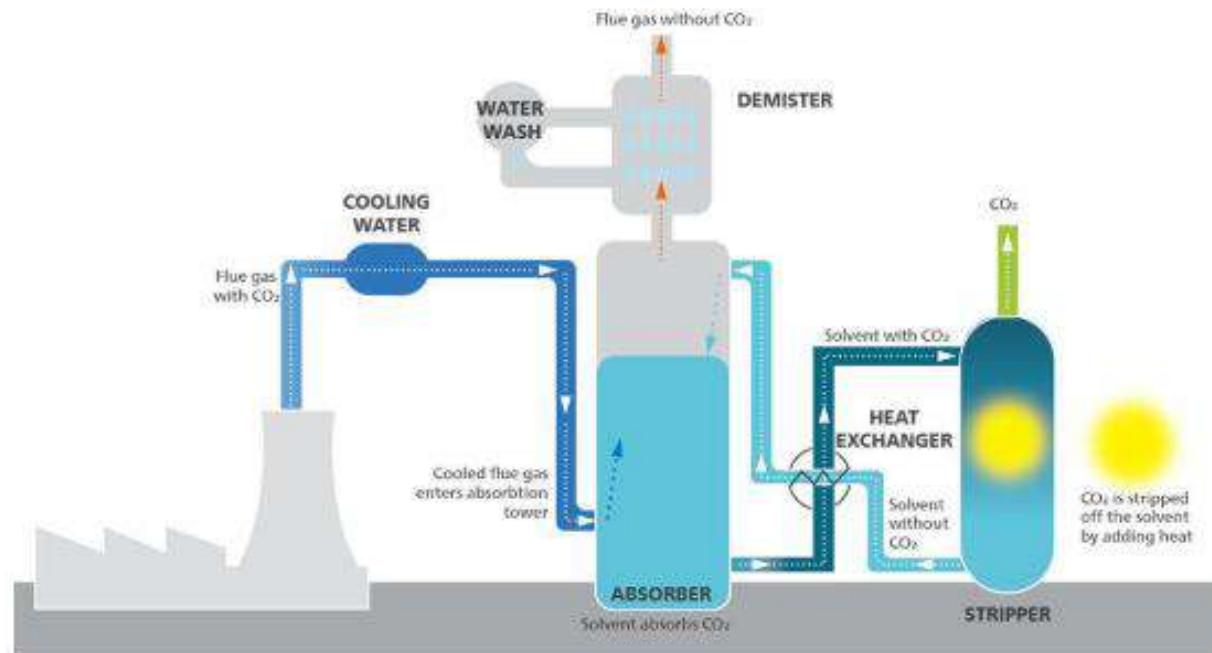


Trattamenti proposti e risultati ottenuti

CCUS – Carbon Capture Utilisation and Storage

CATTURA

- Pre-combustione;
- **Post-combustione;**
- Oxy-fuel
 - Adsorbimento;
 - **Assorbimento:**
 - Assorbimento fisico;
 - **Assorbimento chimico** (esp. **ammine**);
 - Separazione con membrane





Trattamenti proposti e risultati ottenuti

Materiale fine – Processi indiretti

Studio sull'efficienza di carbonatazione

Amine looping

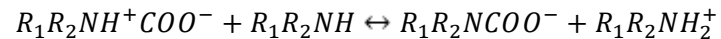
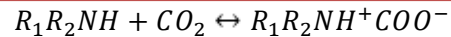
- Le ammine sono tra i reagenti più comunemente usati per la cattura della CO₂ in post combustione
- Visto l'elevato dispendio energetico, la rigenerazione delle ammine (amine scrubbing) è uno step critico del processo di cattura

Rigenerazione Termica

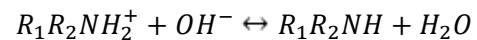
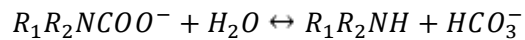
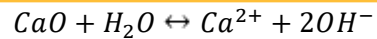


Rigenerazione chimica attraverso la Carbonatazione minerale

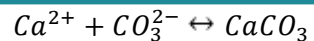
Esempio:



loading



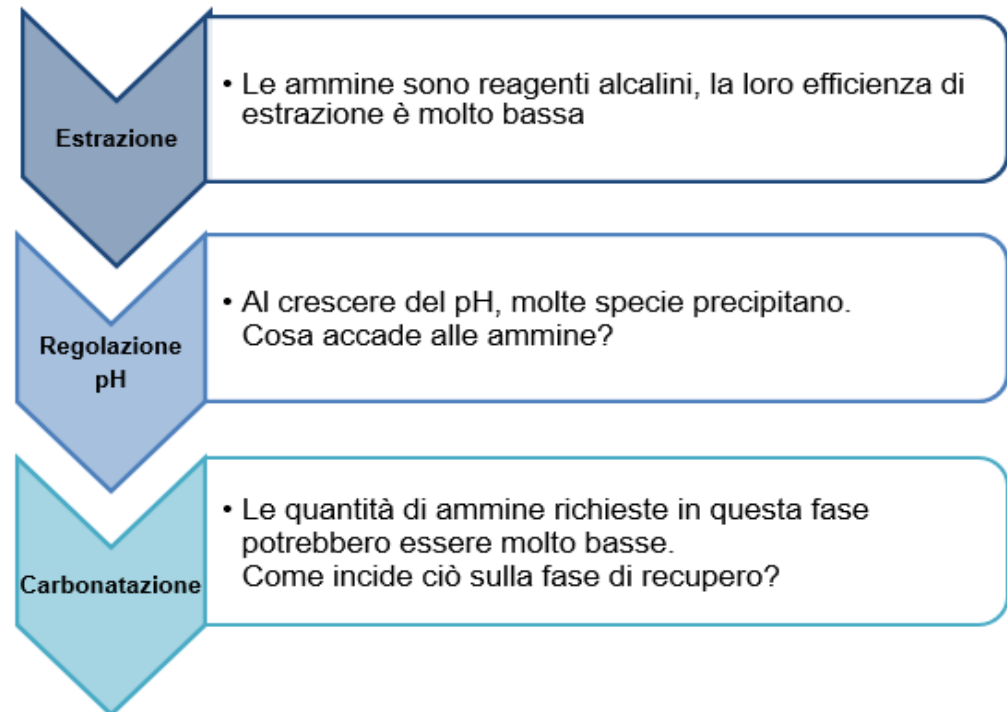
rigenerazione



carbonatazione



Possibili criticità legate all'utilizzo delle ammine



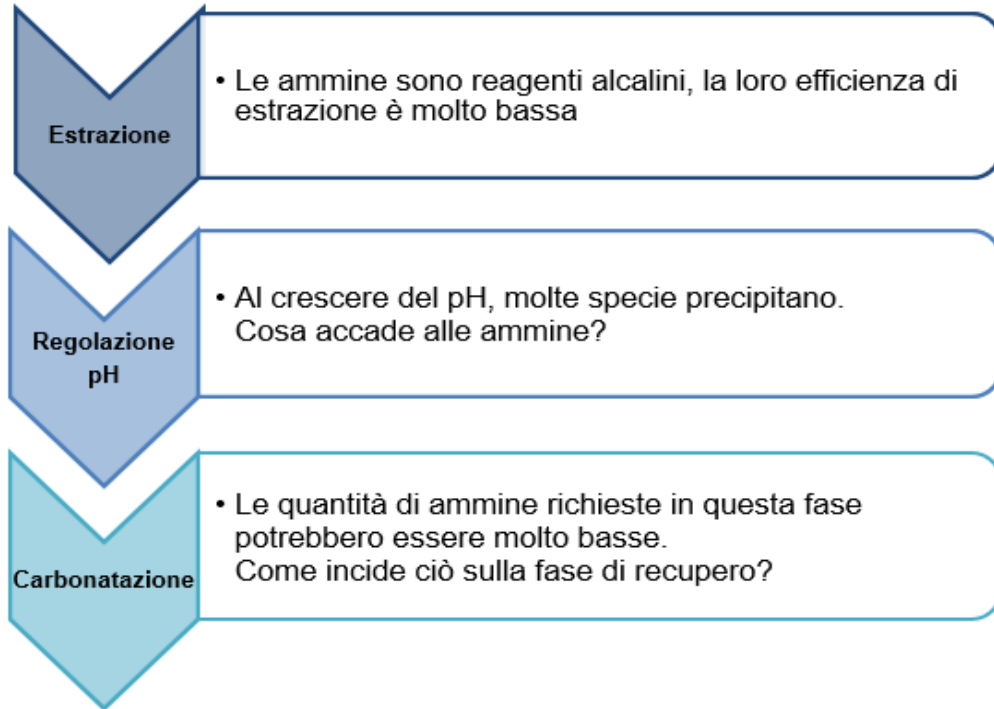


Trattamenti proposti e risultati ottenuti

Materiale fine – Processi indiretti

Studio sull'efficienza di carbonatazione

Amine looping



CONDIZIONI OPERATIVE							
	Estrazione	Regolazione pH + Carbonatazione (100%, 40%, 10% CO ₂)			Carbonatazione (100%, 40%, 10% CO ₂)		
	T = T _{amb} t = 60 min	Estrazione: HCl 0.5M L/S = 100 l/kg T = T _{amb} t _{extr} = 60 min T = T _{amb}					
					NaOH 5M per regolazione pH		
	M [mol/l]	t _{carb} [min]	M [mol/l]	Condizioni di pH	t _{carb} [min]	M [mol/l]	Condizioni di pH
MEA	1	10	5	Reg pH: 10-11 + Carb: 9-10	10	5	Carb: 9-10
DEA	1	10	5		10	5	
DEAE	1	10	5		10	5	

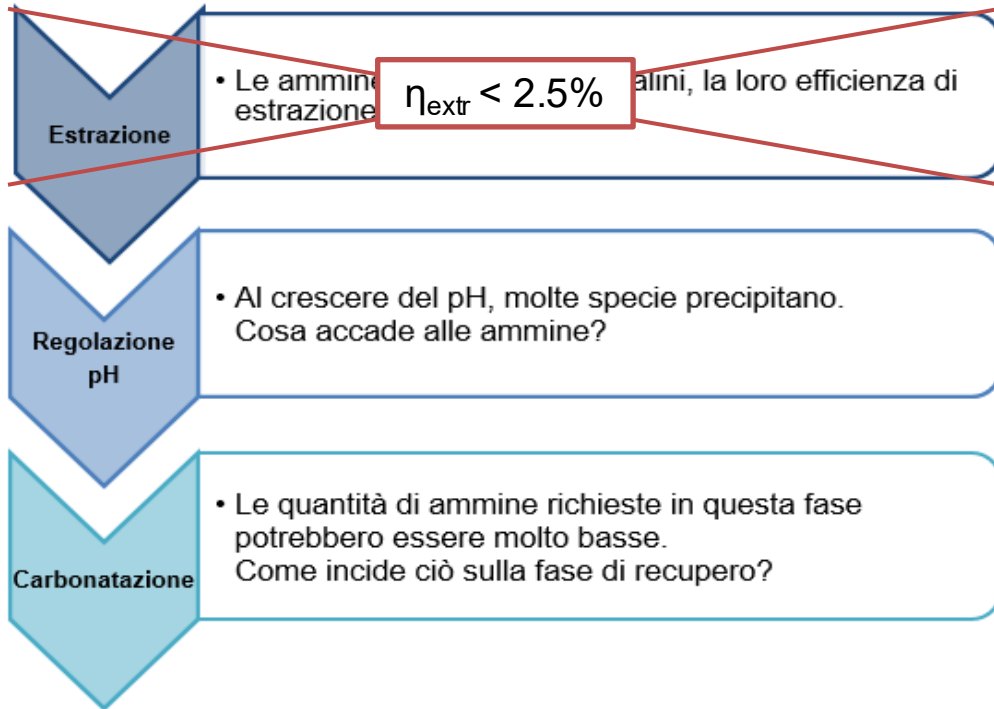


Trattamenti proposti e risultati ottenuti

Materiale fine – Processi indiretti

Studio sull'efficienza di carbonatazione

Amine looping



CONDIZIONI OPERATIVE							
	Estrazione	Regolazione pH + Carbonatazione (100%, 40%, 10% CO ₂)			Carbonatazione (100%, 40%, 10% CO ₂)		
	T = T _{amb} t = 60 min	Estrazione: HCl 0.5M L/S = 100 l/kg T = T _{amb} t _{extr} = 60 min T = T _{amb}					
					NaOH 5M per regolazione pH		
	M [mol/l]	t _{carb} [min]	M [mol/l]	Condizioni di pH	t _{carb} [min]	M [mol/l]	Condizioni di pH
MEA	1	10	5	Reg pH: 10-11 + Carb: 9-10	10	5	Carb: 9-10
DEA	1	10	5		10	5	
DEAE	1	10	5		10	5	



Trattamenti proposti e risultati ottenuti

Materiale fine – Processi indiretti

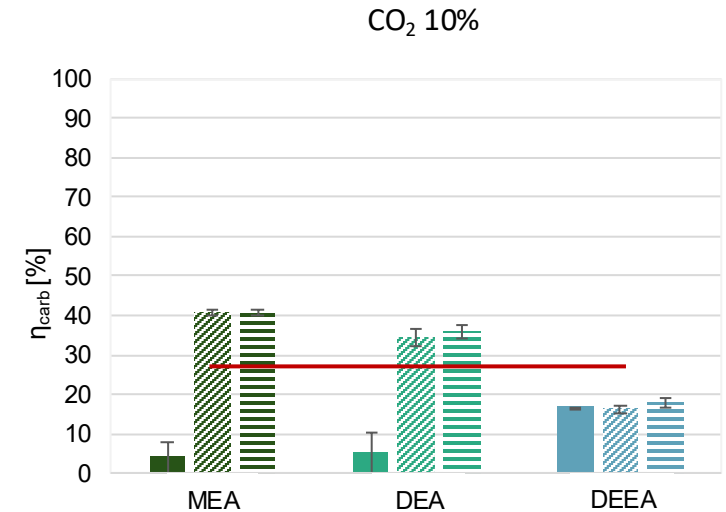
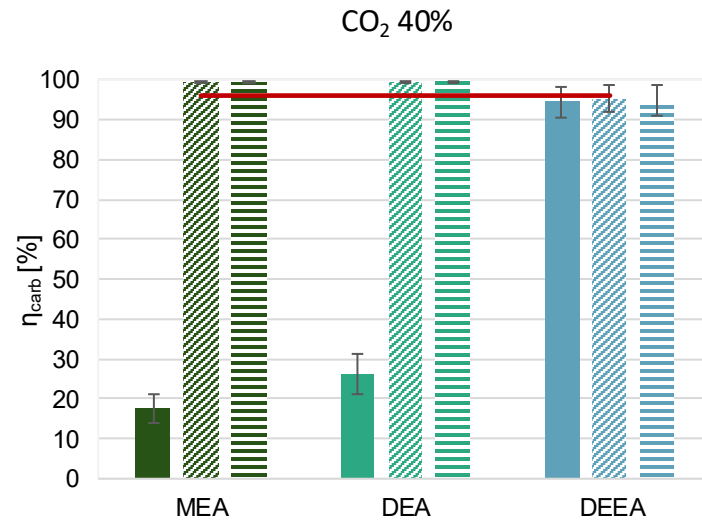
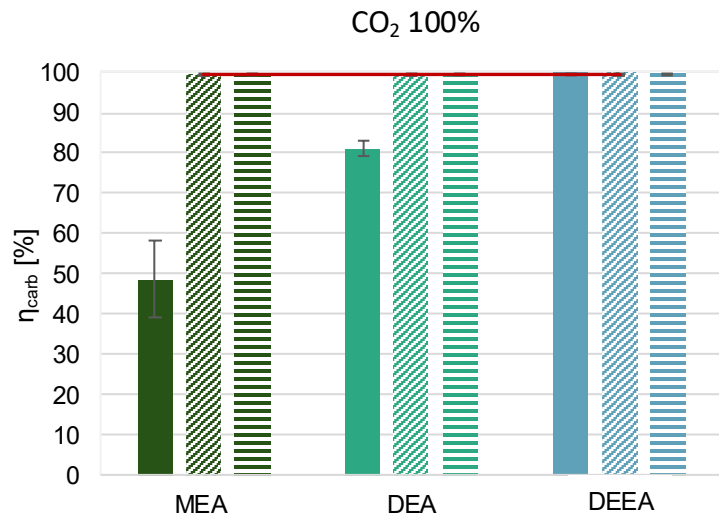
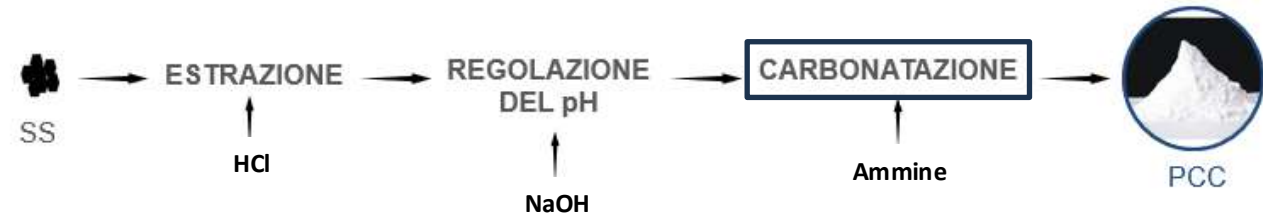
Studio sull'efficienza di carbonatazione

Amine looping – Ammine in carbonatazione

Estrazione: HCl 0.5M

Regoazione pH: NaOH 5M

tc = 10 min



■ filtr 1 ▨ 24h ▤ 48h — NaOH



Trattamenti proposti e risultati ottenuti

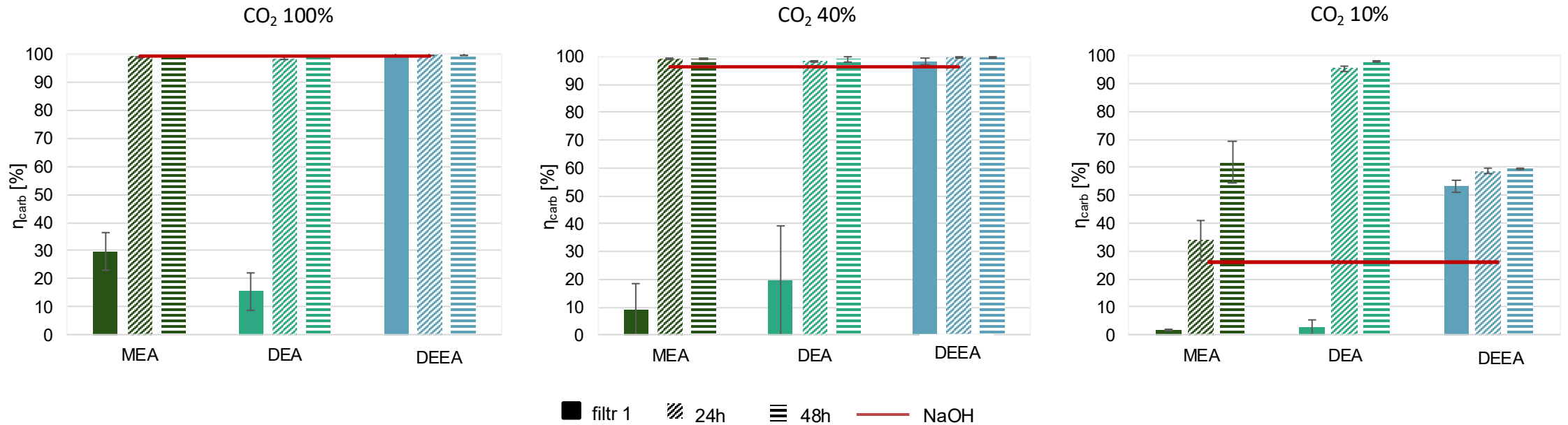
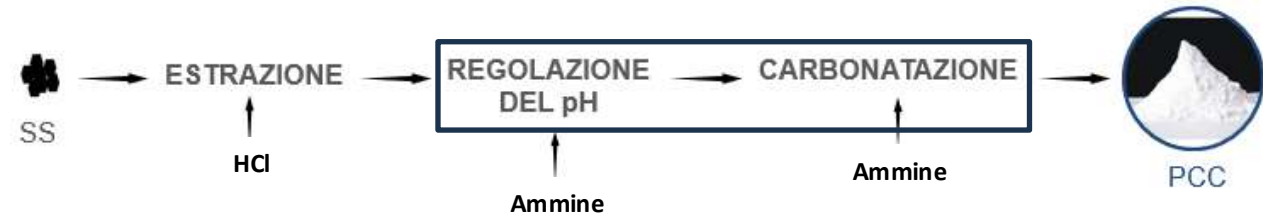
Materiale fine – Processi indiretti

Studio sull'efficienza di carbonatazione

Amine looping – Ammine in regolazione del pH e carbonatazione

Estrazione: HCl 0.5M

$t_c = 10$ min

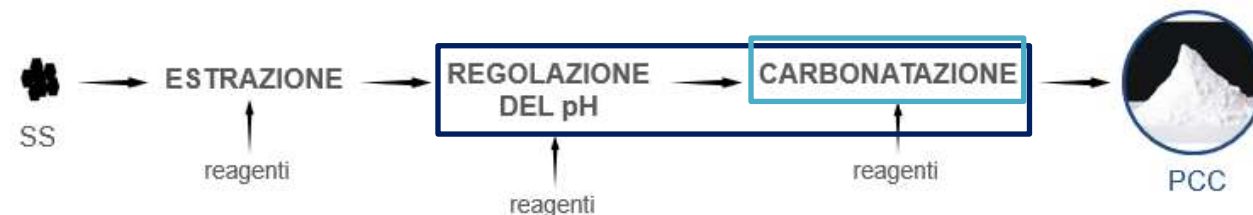


Trattamenti proposti e risultati ottenuti

Materiale fine – Processi indiretti

PCC prodotto e CO₂ stoccata

Amine looping – Confronto tra configurazioni



Ammine in carbonatazione

Reagente → Concentrazione CO ₂ ↓	PCC prodotto [g/kg _{res.}]			CO ₂ stoccata [g/kg _{res.}]		
	MEA	DEA	DEEA	MEA	DEA	DEEA
100% CO ₂	670	670	671	295	295	295
40% CO ₂	669	670	637	294	295	280
10% CO ₂	274	241	119	120	106	52

Ammine in regolazione pH e carbonatazione

Reagente → Concentrazione CO ₂ ↓	PCC prodotto [g/kg _{res.}]			CO ₂ stoccata [g/kg _{res.}]		
	MEA	DEA	DEEA	MEA	DEA	DEEA
100% CO ₂	669	668	670	294	294	295
40% CO ₂	669	666	671	294	293	295
10% CO ₂	417	660	402	183	290	177

Considerando le efficienze di carbonatazione ottenute a 48h dal termine della prova di carbonatazione



Sviluppi futuri

Approfondimento dello studio relativo al processo di amine looping

- Studio dell'effettiva possibilità di rigenerare e recuperare le ammine al termine del processo
- Analisi sulla qualità e sulla purezza del PCC ottenuto
- Valutazioni sulla possibilità di recuperare ulteriori prodotti solidi durante gli step di processo che precedono la carbonatazione



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



ECS 000034 – Rome Technopole

Spoke 1 – Research, technology development and innovation



Grazie per l'attenzione

Alessandra Masi, Giulia Costa, Francesco Lombardi

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica



TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

Valutazione del comportamento ambientale e della ecotossicità degli aggregati di riciclo ed artificiali

Andrea Paina, Fulvio Onorati, Antonella Vecchio, Andrea Tornambé, Chiara Maggi



Seminario tecnico-scientifico

VALORIZZAZIONE DI RESIDUI INDUSTRIALI CON EVENTUALE UTILIZZO DI CO₂ DA FONTI EMISSIVE

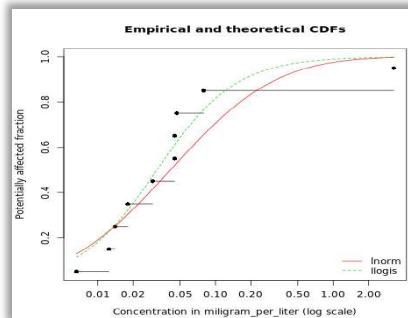
10 marzo 2026 - Sala Convegni - Università degli studi di Roma Tor Vergata - via del Politecnico, 1 - Roma

Struttura degli studi

Fase 1 Definizione quadro chimico-ecotossicologico di riferimento

Costruzione database e
definizione delle
NOEC per gruppi
tassonomici

Stima delle PNEC
specifiche per gli
ecosistemi acquatici
italiani per sostanze
organiche e inorganiche
tramite approcci
deterministici e
probabilistici (SSD)



Fase 2 Caratterizzazione chimica ed ecotossicologica degli aggregati

Determinazione del
contenuto totale dei
contaminanti inorganici ed
organici

Prove di lisciviazione:
UNI EN 1744-3
UNI EN 12457-2
UNI EN 14429
UNI EN 14405

Caratterizzazione chimica
dei lisciviati

Caratterizzazione
ecotossicologica:

- *Alivibrio fischeri*
- *Raphidocelis subcapitata*
- *Daphnia magna*
- *Spirodela polirhyza*
- Piante superiori

Fase 3 Caratterizzazione del pericolo ambientale

Selezione contaminanti
inorganici e organici di
interesse ambientale per
la specifica applicazione

Adattamento indici di
pericolo (HQ)
ecotossicologico e chimico
alla specifica matrice

Stima del pericolo (HQ)
ecotossicologico e chimico
dei campioni

Fase 4 Valutazione dell'esposizione

Definizione degli
scenari con condizioni
cautelative

Stima delle PEC nei
vari scenari tramite
modelli matematici

Fase 5 Caratterizzazione del rischio

Confronto PEC vs. PNEC
(RCR)

Confronto PEC vs. CSC
(Tabella 2, Allegato 5 al
Titolo V, parte IV del
D.Lgs. 152/06)

Fase 1

Definizione quadro chimico-ecotossicologico di riferimento: analisi del pericolo e del rischio

Caratterizzazione del rischio (stima dell'incidenza e della gravità degli effetti che si potrebbero verificare in un comparto ambientale a causa dell'esposizione effettiva o prevista ad una sostanza o miscela di sostanze chimiche):

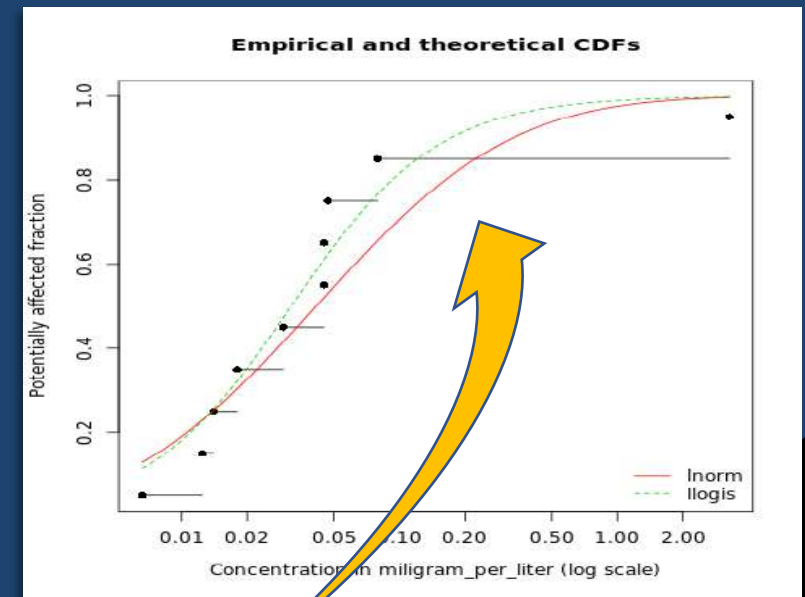
$$RCR = PEC/PNEC$$

STIMA DELLE PNEC SPECIFICHE PER ECOSISTEMI ACQUATICI ITALIANI:

1. Consultazione database internazionali (USEPA ECOTOX, ECHA, EnviroTox);
2. Selezione specie italiane;
3. Selezione prioritaria NOEC/LOEC;
4. Media geometria da dati analoghi



5. Applicazione modello probabilistico SSD (Specie Sensitivity Distribution)



Derivation of sustainable reference chemical levels for Italian freshwater ecosystems

Fulvio Onorati ^{1,*}, Andrea Tornambè ¹, Andrea Paina ¹, Micol Bellucci ², Gianluca Chiaretti ², Barbara Catalano ¹

¹ Institute for Environmental Protection and Research (ISPRA) fulvio.onorati@isprambiente.it

² Research and Science Department, Italian Space Agency (ASI) micol.bellucci@asi.it

* Correspondence: fulvio.onorati@isprambiente.it; Tel: +39-0603074448

Abstract: The current Environmental Quality Standard (EQS) for freshwater ecosystems have been established in relation to the Priority Substances covered by Directive 2013/39/EU. The procedure for deriving EQS that relies on the selection of the most sensitive toxicological data, with the possible application of arbitrary safety factors, is probably unrealistic and overcautious for the Italian freshwater ecosystem. In this work a procedure for the derivation of protective chemical reference values specifically for the Italian biological communities was developed. Toxicological raw data of species spending at least one phase of their life cycle in Italian freshwater ecosystems were downloaded from [Ecotox](https://ec.europa.eu/ippc/) and USEPA ECOTOX database, and then used as input for the probabilistic model called Species Sensitivity Distribution. The comparison of relative sensitivity factors allowed identifying amphibians as the most sensitive group towards metals and trace elements and pesticides, whereas crustaceans towards polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). The Predicted No Effect Concentrations (PNECs) estimated in the present work covers a much broader list of substances than those identified by 2013/39/EU Directive, they resulted higher than EQSs and could be considered more realistic and tailored for Italian freshwater ecosystems.

Keywords: Species Sensitivity Distribution model (SSD); toxicity test; Predicted No Effect Concentration (PNEC); taxonomic groups; Ecological Risk Assessment (ERA)

Citation: To be added by editorial staff during production.

Academic Editor: Eugenio Leoncini

Received: 2022-08-10

Accepted: 2022-08-10

Published: 2022-08-10

Copyright: © 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Fase 1 Definizione quadro chimico-ecotossicologico di riferimento: analisi del pericolo e del rischio



PNEC ecologiche per 62 sostanze derivate da dati di 93 organismi presenti negli ecosistemi acquatici italiani

PNEC specifiche per ecosistemi acquatici italiani: esempio dei metalli ed elementi in tracce

	Cyanobacteria	Chlorophyta	Ocrophyta	Angiospermae	Ciliophora	Euglenozoa	Rotifera	Platyhelminthes	Cnidaria	Mollusca	Crustacea	Anellida	Insecta	Pisces	Amphibia	PNEC	95% Confidence range
Metals and trace elements																	
Al	7014	999				1910	300				410			250	47	44	6.9-290
As	280	334					3190				105			271		110	71-210
Ba	4729						70800				7090	3360		37690		1200	190-8700
Cd	7.3	58.4			18		6.6	3268	14	79.2	13.5	45	264.4	45		2.4	0.47-12
CrIII		34.2									516	291		1185		32	6.9-310
CrVI	21	164.7			257		520	730			59.7	136.5		8099		5.3	0.72-72
Cu	8.1	70.2			91.5		23.6	208.2	4	26.6	12.7	1.2	70	73.4		2.2	0.67-9.3
Fe		14056				11.7E5	1104				3694	10184		260		78	2.7-2500
Hg	1.8	3.8			2.0		5.4			90	1.6	20.6	37.4	14.4		0.62	0.12-3.2
Mn		349					3870			4000	4355	17061		286	5000	260	43-1600
Ni		99.8					400	655		126	101	6675	7240	3805		27	2.9-250
Pb		508			226		400	16000			44	1462		707		38	5.4-290
Sb		200									712	10800		1522		90	8.2-1100
Se	588	136					1610				48.3	771	303	1666		56	29-290
Sn	144	56.8					3.7		0.2	480	1.39	4.9	0.2	16.3	0.17	0.028	0.014-0.56
Ti	0.5	3.2					949				122			2441		0.16	9.5E-4-34
V		1200									500			780		430	270-880
Zn	1.58	10,65			250		123	637	166	318	73.8	288	9430	1346		7.7	1.6-59

Fase 2: Caratterizzazione chimica ed ecotossicologica degli aggregati

Determinazione del contenuto totale dei
contaminanti inorganici ed organici



Prove di lisciviazione:
UNI EN 12457-2
UNI EN 1744-3
UNI EN 14405
UNI EN 14429



Caratterizzazione chimica dei
lisciviati



Caratterizzazione ecotossicologica:

- *Aliviibrio fischeri*
- *Raphydocolis subcapitata*
- *Daphnia magna*
- *Spirodela polirhyza*
- Piante superiori



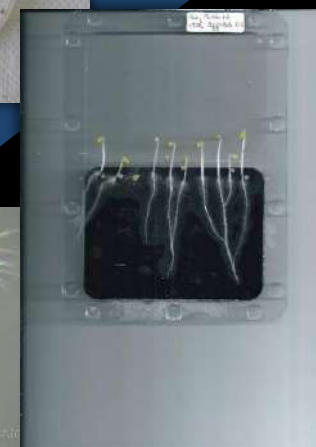
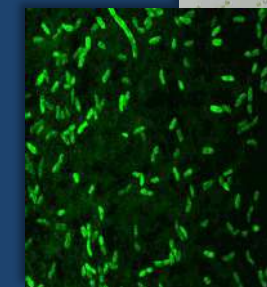
UNI EN 1744-3



UNI EN 12457-2



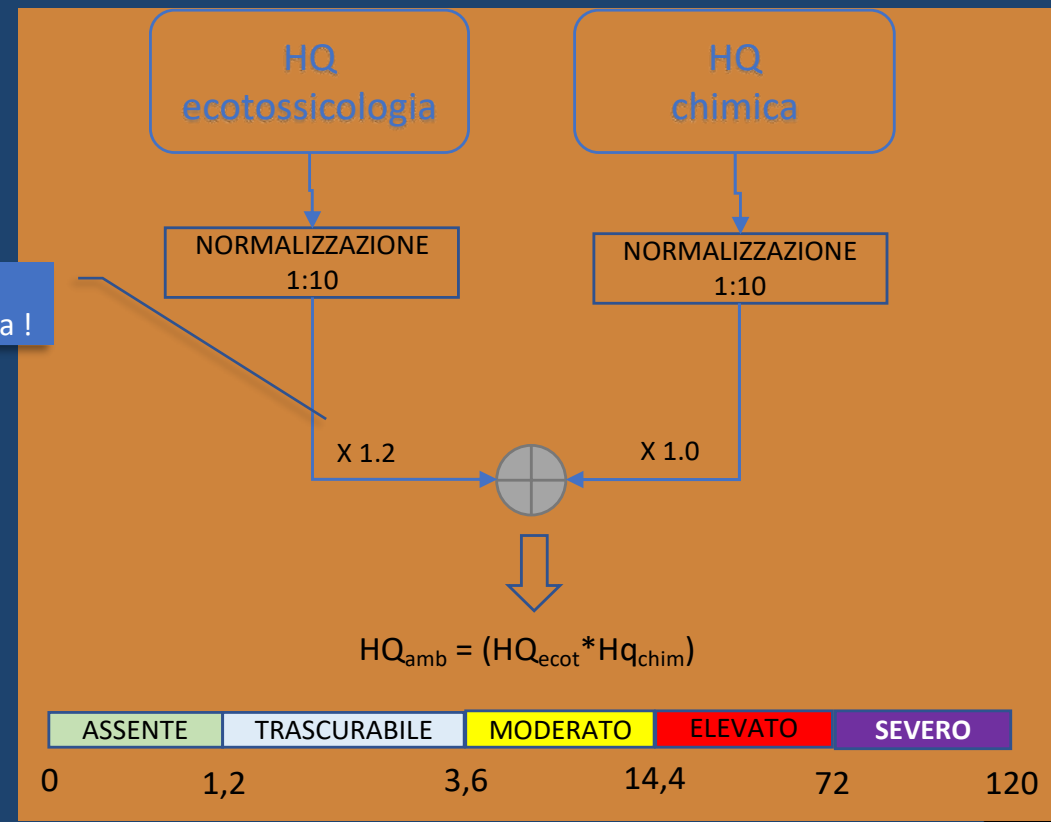
UNI EN 14405



Fase 3 Definizione quadro chimico-ecotossicologico di riferimento: analisi del pericolo e del rischio



+ peso
all'ecotossicologia !



1. Introduction

The Council Regulation (EU) 2017/997 regarding the hazardous property HP 14 'ecotoxic' defines the criteria for the assessment of the ecotoxicity in waste.

A waste is considered "ecotoxic" if it presents or may present immediate or delayed risks to one or more environmental compartments.

The main criterion for the chemical classification of wastes is the so-called "conventional method", that consists in a computation of the substance concentrations classified as ecotoxic, according to the European Regulation 1272/2008/CE (Classification, Labelling and Packaging of substances and mixtures - CLP -), using defined formulae by applying specific generic chemical cut-off values (summation method).

The HP14 property could be determined also by carrying out experimental toxicity tests, which procedures are reported in the European Regulation 490/2008/CE or in "other internationally recognized test methods and guidelines" (Council Regulation, 2017/997). In this case, priority is given to the ecotoxicological classification over the chemical one, but since the responses of the bioassays are strongly dependent on sample preparation, tested organisms, and toxic thresholds adopted (Part 4, Annex I, European Regulation 2008/1272/CE), the rigorous application of actual normative causes several issues related not only to the methodological procedures, but also to the interpretation of the data, making difficult the comparison of the results and classification, especially when complex waste and undefined matrices are tested (Pivoto and Gaspari, 2006; Pivoto et al., 2019; Siderström et al., 2016; Zhang et al., 2019).

Both conventional and experimental CLP-based methodologies are designed for the classification of hazardous substances and mixtures of known compounds, while the detailed chemical composition of waste is generally unknown. Thus, the combined environmental effects of the mixture of contaminants generally present in almost waste categories is underestimated. The classification is therefore based on the hazard codes of the components that are assumed to be present in their most toxic forms, following the principle of "worst-case assessment", leading to cautionary management practice, often unfeasible and/or not

* Corresponding author.
E-mail address: fulvio.onorati@isprambiente.it (F. Onorati).
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117206>
Received 20 October 2022; Received in revised form 21 December 2022; Accepted 21 December 2022
Available online 26 January 2023
0301-4797/© 2023 Elsevier Ltd. All rights reserved.

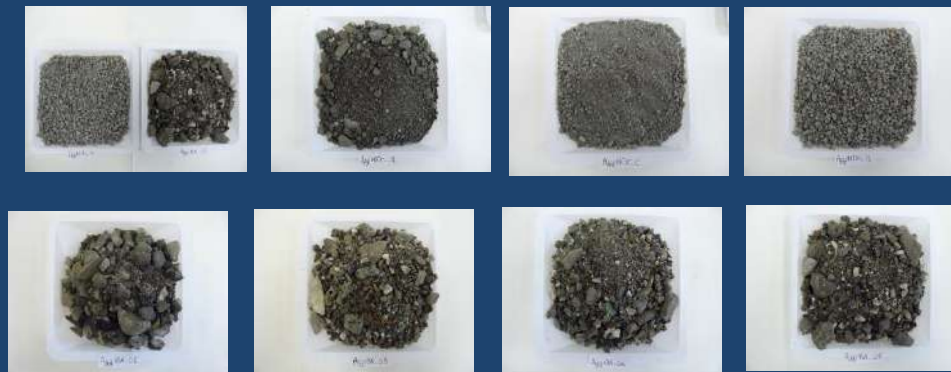
a)	AggIBA	AggIBA	AggIBA	AggIBA	AggIBA	AggMTX A	AggMTX B	AggMTX C
	1	2	3	4	5			
Metodo lisciviazione UNI EN 1744-3 e limiti DM 05.02.98								
HQ Chimica	6.12	2.52	2.65	2.63	3.96	1.37	4.27	2.98
HQ Ecotossicologia	65.93	64.17	44	32.39	43.75	30.37	21.69	45.09
HQ Chimica (1:10)	1.5	1.14	1.15	1.15	1.29	1.03	1.31	1.19
HQ Ecotoss. (1:10)	6.59	6.42	4.4	3.24	4.38	3.04	2.17	4.51
HQ ambientale	11.86	8.78	6.07	4.47	6.78	3.76	2.68	6.44

b)	AggIBA	AggIBA	AggIBA	AggIBA	AggIBA	AggMTX A	AggMTX B	AggMTX C
	01	02	03	04	05			
Metodo lisciviazione UNI EN 12457-2 e limiti DM 05.02.98								
HQ Chimica	5,83	3,48	2,80	3,88	3,57	3,35	3,54	2,88
HQ Ecotossicologia	59,37	45,14	42,40	44,79	45,38	52,47	22,24	42,86
HQ Chimica (1:10)	1,47	1,24	1,17	1,28	1,25	1,22	1,24	1,18
HQ Ecotoss. (1:10)	5,94	4,51	4,24	4,48	4,54	5,25	2,22	4,29
HQ ambientale	10,48	6,71	8,65	6,88	6,81	7,69	3,30	6,08

c)	AggIBA	AggIBA	AggIBA	AggIBA	AggIBA	AggMTX A	AggMTX B	AggMTX C
	01	02	03	04	05			
Metodo lisciviazione UNI EN 1744-3 e PNEC ISPRA								
HQ Chimica	34,22	28,12	25,43	26,28	30,54	10,54	17,83	11,65
HQ Ecotossicologia	65,93	64,17	44,00	32,39	43,75	30,37	21,69	45,09
HQ Chimica (1:10)	4,27	3,66	3,40	3,48	3,90	1,93	2,65	2,04
HQ Ecotoss. (1:10)	6,59	6,42	4,40	3,24	4,38	3,04	2,17	4,51
HQ ambientale	33,77	28,20	17,95	13,53	20,30	7,04	6,90	11,04

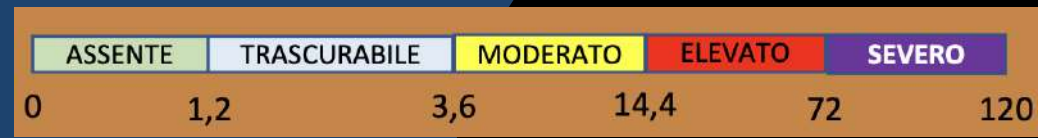
d)	AggIBA	AggIBA	AggIBA	AggIBA	AggIBA	AggMTX A	AggMTX B	AggMTX C
	01	02	03	04	05			
Metodo lisciviazione UNI EN 12457-2 e PNEC ISPRA								
HQ Chimica	52,27	50,49	36,45	47,94	44,29	26,27	19,62	14,52
HQ Ecotossicologia	59,37	45,14	42,40	44,79	45,38	52,47	22,24	42,86
HQ Chimica (1:10)	6,05	5,87	4,49	5,62	5,37	6,07	3,08	2,32
HQ Ecotoss. (1:10)	5,94	4,51	4,24	4,48	4,54	5,25	2,22	4,29
HQ ambientale	43,12	31,77	22,85	30,21	29,26	38,24	8,21	11,94

IBA



L'integrazione delle due linee di evidenza produce in tutti i casi la presenza di un pericolo ambientale, condizionato più dalle risposte ecotossicologiche che dalle caratteristiche chimiche dei lisciviati rispetto alla lista dei parametri/sostanze previste da ciascun riferimento.

Indici più elevati nel caso delle PNEC ISPRA per il comparto acquatico.



a)	AggC&D_01	AggC&D_02	AggC&D_03	AggC&D_04	AggC&D_05
Metodo lisciviazione UNI EN 1744-3 e limiti DM 152/2022					
HQ Chimica	0,10	0,10	0,07	0,01	4,31
HQ Ecotoxicologia	4,79	0,41	2,72	3,29	8,75
HQ Chimica (1:10)	0,90	0,90	0,89	0,89	1,34
HQ Ecoto ss. (1:10)	0,48	0,04	0,27	0,33	0,88
HQ_{ambientale}	0,518	0,043	0,288	0,352	1,41

b)	AggC&D_01	AggC&D_02	AggC&D_03	AggC&D_04	AggC&D_05
Metodo lisciviazione UNI EN 12457-2 e limiti DM 152/2022					
HQ Chimica	1,34	0,13	1,06	1,44	3,00
HQ Ecotoxicologia	6,17	0,41	2,72	3,29	8,75
HQ Chimica (1:10)	0,90	0,90	0,89	0,89	1,34
HQ Ecoto ss. (1:10)	4,79	0,41	2,72	3,29	8,75
HQ_{ambientale}	5,173	0,443	2,905	3,514	14,07

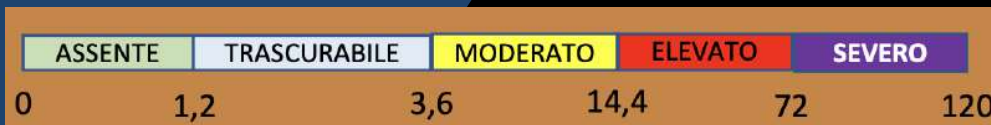
c)	AggC&D_01	AggC&D_02	AggC&D_03	AggC&D_04	AggC&D_05
Metodo lisciviazione UNI EN 1744-3 e PNEC ISPRA					
HQ Chimica	1,17	1,49	1,51	2,29	1,17
HQ Ecotoxicologia	4,79	0,41	2,72	3,29	8,75
HQ Chimica (1:10)	1,00	1,03	1,04	1,11	1,00
HQ Ecoto ss. (1:10)	0,48	0,04	0,27	0,33	0,88
HQ_{ambientale}	0,576	0,443	0,337	0,440	1,2

d)	AggC&D_01	AggC&D_02	AggC&D_03	AggC&D_04	AggC&D_05
Metodo lisciviazione UNI EN 12457-2 e PNEC ISPRA					
HQ Chimica	7,29	7,13	5,01	0,02	0,06
HQ Ecotoxicologia	6,17	0,41	2,72	3,29	8,75
HQ Chimica (1:10)	1,61	1,59	1,38	1,21	0,89
HQ Ecoto ss. (1:10)	0,48	0,04	0,27	0,33	0,88
HQ_{ambientale}	0,927	0,076	0,447	0,470	0,940

C&D

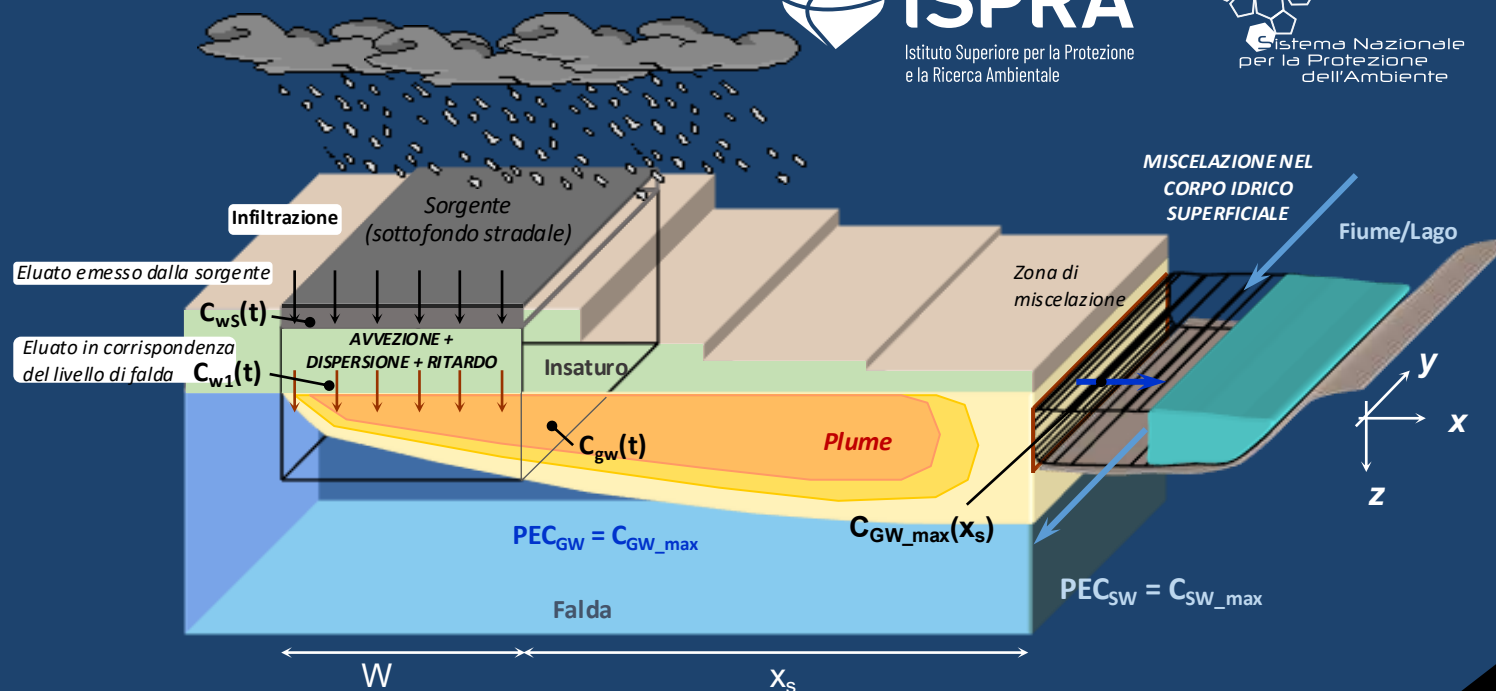


L'integrazione delle due linee di evidenza restituisce un pericolo ambientale integrato degli aggregati C&D che, considerando gli attuali limiti, determina livelli sostanzialmente assenti con la lisciviazione UNI EN 1744-3. Passando alla estrazione secondo il metodo UNI EN 12457-2, i valori dell'indice tendono ad aumentare rispetto ai limiti del dm 152/2022.



Fase 4: Valutazione dell'esposizione (modello concettuale)

- I modelli utilizzati in vari ambiti (sostanze chimiche o bonifiche) non sono direttamente adattabili alle matrici oggetto dello studio e alle finalità di utilizzo
- Lo sviluppo di una modellistica innovativa di lisciviazione e trasporto in falda/acque ha consentito di superare la criticità dei modelli disponibili
- I modelli selezionati si basano sulla simulazione in «transitorio» di emissioni limitate nel tempo (sorgente «finita»), sull'impostazione di caratteristiche differenti tra la sorgente (materiali riciclati) e il suolo sottostante e sull'ipotesi di una falda limitata inferiormente (in analogia con i modelli numerici della piattaforma FOCUS), ma sono di tipo analitico



La PEC rappresenta il valore massimo stimato nel tempo e nel punto di «picco»

La PEC nelle acque di falda è stata confrontata con le CSC (D.Lgs 152/06 Parte IV Titolo V- All.5, Tab.2)

La PEC nelle acque superficiali è stata confrontata con le PNEC acquatiche (ISPRA*)

Fase 4: Valutazione dell'esposizione (modello concettuale)

Rappresentatività degli scenari FOCUS relativamente al territorio italiano



Ministero per la Protezione
Ambientale



Cluster	Rappresentatività	Aree geografiche prevalenti	Tipologia suolo prevalente (orizzonte agrario)	Precipitazioni medie annue (mm)	Indice di similarità (Gower)	Scenario
Cluster 1	15,0%	Sud Italia e Isole: Sardegna, Puglia, Basilicata e Sicilia	argilloso (46%) e argilloso franco (46%)	640	> 0,9	Thiva
Cluster 2	13,0%	Sud Italia e Isole: zone interne e litorali di Sardegna e Sicilia. Zone interne di Puglia, Basilicata, Campania, Molise, Abruzzo e Lazio	argilloso franco (61%) e franco (27%), e in misura minore sabbioso franco (8%)	690	> 0,9	Thiva
Cluster 3	9,0%	Centro e Sud Italia: zone interne di Sardegna, Sicilia, e Calabria. Dorsale appenninica fino all'Emilia-Romagna	argilloso franco (75,8%) e franco (20%), e in misura molto minore argilloso (4,2%)	800	> 0,8	Thiva/Châteaudun
Cluster 4	1,7%	Zone montane di Valle d' Aosta, Piemonte, Lombardia e Trentino Alto-Adige	franco (47,8%) e sabbioso franco (46%), e in misura molto minore argilloso franco (6,2%)	>1200	> 0,8	Hamburg
Cluster 5	7,3%	Soprattutto Centro-Nord Italia: zone collinari appenniniche e	argilloso franco (47,1%) e franco (41,5%), e in misura minore	1190	> 0,7 (H) - > 0,9 (P)	Hamburg - Piacenza
Cluster 6	17,7%	Soprattutto Centro-Nord Italia: zone litoranee dal sud del delta	argilloso franco (75,8%) e franco (21,7%)	668	> 0,7 (C) - > 0,9 (T)	Châteaudun - Thiva
Cluster 7	6,7%	Soprattutto Centro Italia: fascia appenninica fino a Lazio e Abruzzo. Alcune aree interne di Lazio, Campania e Calabria. Tutta la fascia prealpina	argilloso franco (64,1%) e franco (34,5%)	895	> 0,8	Piacenza
Cluster 8	17,8%	Soprattutto Nord Italia: pianura Padana, alta Toscana e alcune aree della Liguria e delle Marche	franco (66,3%), argilloso franco (31,4%) con una piccola percentuale di suolo limoso franco (1,9%)	1000	> 0,8	Piacenza

Elaborazione dati dal documento *Prodotto fitosanitari - Criteri e scenari nazionali per la valutazione di rischio: acque superficiali e di falda. AAVV, 2009.*

Fase 4: Valutazione dell'esposizione (modello concettuale)

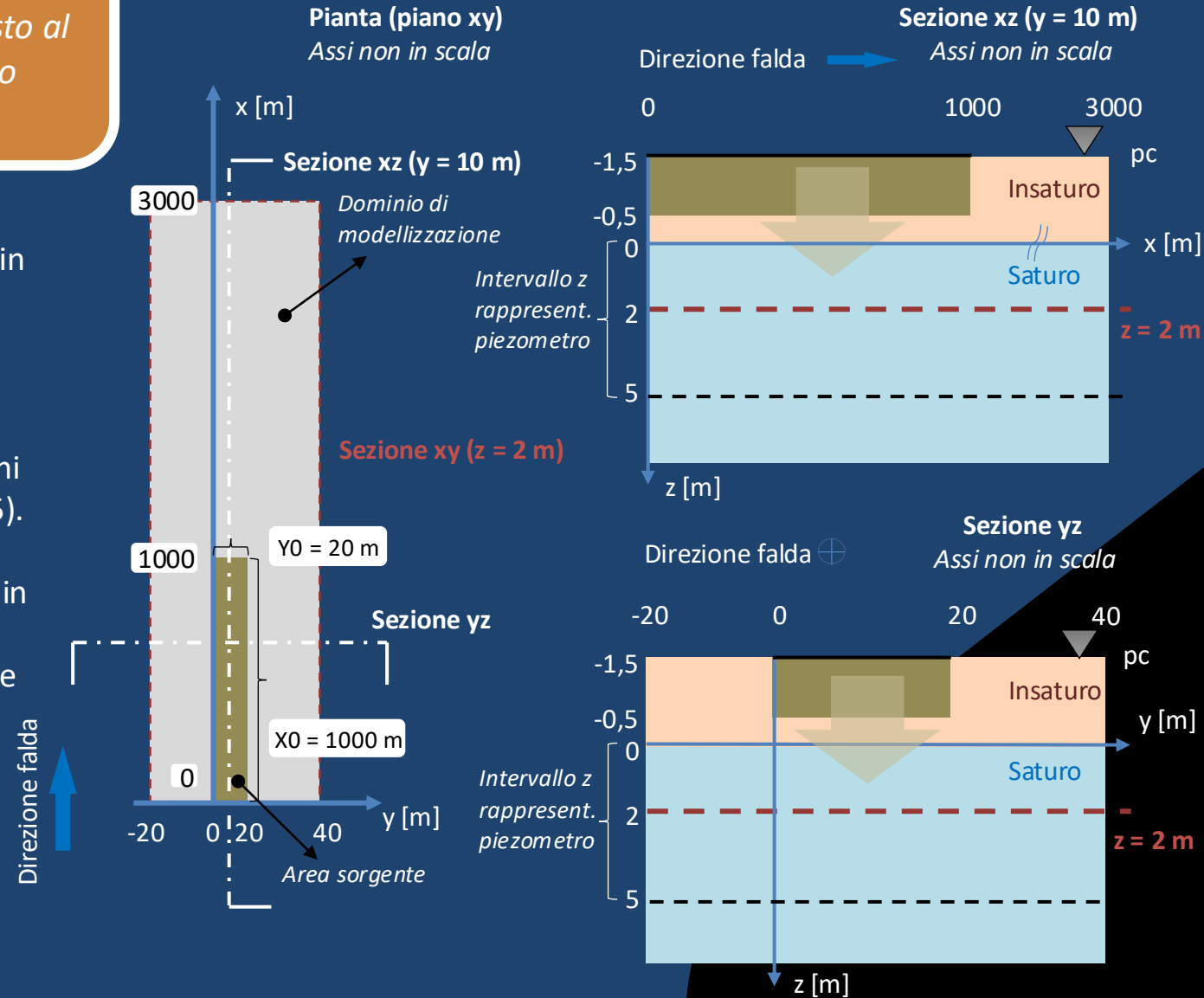
Confronto tra le classi tessiturali più conservative scenari FOCUS e le classi più simili nella classificazione USCS

Scenario	Orizzonte	Classe USDA	Proprietà fisiche e idrauliche					NOTE
			θ_s	θ_r	n	ρ_b [g/cm ³]	K_s (*) [m/s]	
<i>Insaturo</i>								
Piacenza	2C	Sand	0,310	0,015	1,606	1,5	2,83E-05	Gli scenari che presentano una maggiore coerenza delle proprietà fisiche con la classificazione tessiturale sono Piacenza e Hamburg. Lo scenario Châteaudun è più conservativo in termini di permeabilità, ma meno coerente con la classificazione tessiturale.
Hamburg	Bv-I	Sandy loam	0,370	0,030	1,565	1,6	3,17E-05	
Châteaudun	B2	Silt loam	0,440	0	1,045	1,41	5,0E-05	
Thiva	Ap1, Ap2	Loam	0,434	0,01	1,18	1,42	3,4E-06	
Classe USCS		Sabbie limose (SM)	0,4	0,08	1,24	1,5	3,0E-05	Classe più simile agli orizzonti più conservativi e più coerenti
<i>Saturo</i>								
Piacenza	2C	Sand	0,310	0,015	1,606	1,5	2,83E-05	Gli scenari più conservativi e maggiormente coerenti sono Piacenza e Hamburg.
Hamburg	Cv	Sand	0,31	0,015	1,606	1,6	2,83E-05	
Châteaudun	II C2	Limestone	0,49	0	1,28	1,41	9,06E-06	
Thiva	Nessun orizzonte di riferimento è in zona satura							
Classe USCS		Sabbie limose (SM)	0,4	0,08	1,24	1,5	3,0E-05	Classe più simile agli orizzonti più conservativi e più coerenti

Fase 4: Valutazione dell'esposizione (scenari e parametri utilizzati per la definizione delle PEC)

Realizzazione di un tratto di strada a due corsie per senso di marcia (larghezza complessiva della strada pari a 20 m) con l'intero pacchetto di sottofondo stradale di spessore pari ad 1 m e posto al di sotto del piano campagna realizzato con aggregati riciclati o artificiali

- **Caratteristiche degli aggregati riciclati:** da norme UNI per l'utilizzo in sottofondi stradali e da modelli in uso per i rifiuti
- **Caratteristiche insaturo e saturo:** parametri standard dei suoli in ambito europeo e rappresentativi del territorio italiano (scenari FOCUS valutazione di rischio fitosanitari)
- **Parametri meteorologici:** precipitazione media annua delle regioni del Nord Italia nel trentennio più piovoso (1951-1980) (ISPRA, 2015). Infiltrazione stimata per matrici grossolane (ghiaie)
- **Pavimentazione stradale:** il pacchetto superficiale (manto di usura in asfalto o altro materiale) è scarsamente permeabile. È stata cautelativamente considerata un'infiltrazione pari al 10 % del valore in assenza di copertura (valore massimo)
- **Parametri corpi idrici superficiali:** La diluizione nel corpo idrico dipende dalle dimensioni della zona di miscelazione tra i due flussi idrici e dall'entità dei flussi stessi. Sono stati simulati parametri cautelativi sia per un fiume sia per un lago



Fase 5: caratterizzazione del rischio

PEC stimate nello scenario di ragionevole cautela rispetto alla matrice solida (Ief_max: 0.25 m/anno. Assenza di pavimentazione)



Contaminante	PEC_falda			CSC [mg/L]	PEC_corpo idrico			PNEC [mg/L]
	C_max interfaccia (*) [mg/L]	C_media (0-5m) [mg/L]	C_mediana (0-5m) [mg/L]		Fiume C_max [mg/L]	Lago C_media [mg/L]	Lago C_mediana [mg/L]	
Diossine e furani (TE)	4.09E-07	3.51E-07	3.42E-07	4.00E-09	1.12E-08	1.57E-09	1.53E-09	-
Alifatici C19-C36	5.15E-01	4.93E-01	4.96E-01	3.50E-01	1.41E-02	2.21E-03	2.22E-03	-
Benzene	4.25E-04	3.91E-04	3.89E-04	1.00E-03	1.16E-05	1.75E-06	1.74E-06	1.50E+00
Toluene	1.73E-03	1.62E-03	1.62E-03	1.50E-02	4.74E-05	7.26E-06	7.25E-06	2.30E+00
PCB	2.46E-02	1.91E-02	1.81E-02	1.00E-05	6.72E-04	8.56E-05	8.11E-05	-
Naftalene	5.33E-05	5.06E-05	5.08E-05	5.00E-03	1.46E-06	2.27E-07	2.28E-07	1.20E-01
Acenaftene	1.68E-04	1.60E-04	1.61E-04	5.00E-03	4.58E-06	7.15E-07	7.19E-07	2.50E-02
Fluorene	1.60E-04	1.52E-04	1.53E-04	5.00E-03	4.37E-06	6.81E-07	6.84E-07	2.10E-02
Fenantrene	1.25E-04	1.19E-04	1.19E-04	5.00E-03	3.42E-06	5.32E-07	5.34E-07	4.50E-03
Antracene	1.68E-04	1.59E-04	1.60E-04	5.00E-03	4.60E-06	7.14E-07	7.17E-07	2.80E-03
Fluorantene	2.42E-04	2.26E-04	2.26E-04	5.00E-03	6.63E-06	1.01E-06	1.01E-06	4.60E-03
Pirene	1.27E-04	1.20E-04	1.20E-04	5.00E-02	3.48E-06	5.37E-07	5.39E-07	2.20E-02
Crisene	4.15E-04	3.82E-04	3.80E-04	5.00E-03	1.13E-05	1.71E-06	1.70E-06	-
Benzo(b)fluorantene	1.15E-04	1.06E-04	1.06E-04	1.00E-04	3.14E-06	4.77E-07	4.75E-07	-
Benzo(a)pirene	3.28E-04	3.03E-04	3.01E-04	1.00E-05	8.98E-06	1.36E-06	1.35E-06	2.20E-05
Benzo(g,h,i)perilene	5.63E-04	5.15E-04	5.12E-04	1.00E-05	1.54E-05	2.31E-06	2.29E-06	-
Indeno(1,2,3,c,d)pirene	5.10E-04	4.67E-04	4.64E-04	1.00E-04	1.39E-05	2.09E-06	2.08E-06	3.00E-05
Butil benzil ftalato	6.26E-03	5.96E-03	5.99E-03	3.70E+01	1.71E-04	2.67E-05	2.68E-05	-
Di (2-etilesil)ftalato (DHEP)	3.25E-01	2.88E-01	2.83E-01	3.70E+01	8.88E-03	1.29E-03	1.27E-03	-
Di-n-ottil ftalato	3.86E-02	3.20E-02	3.10E-02	3.70E+01	1.06E-03	1.43E-04	1.39E-04	-

PEC stimate nello scenario di ragionevole cautela rispetto alla matrice solida (Ief_ridotta: 0.025 m/anno. Presenza di pavimentazione)

Contaminante	PEC_falda			CSC [mg/L]	PEC_corpo idrico			PNEC [mg/L]
	C_max interfaccia (*) [mg/L]	C_media (0-5m) [mg/L]	C_mediana (0-5m) [mg/L]		Fiume C_max [mg/L]	Lago C_media [mg/L]	Lago C_mediana [mg/L]	
Diossine e furani (TE)	5.07E-07	1.04E-07	1.04E-07	4.00E-09	2.99E-09	4.65E-10	4.67E-10	-
Alifatici C19-C36	5.45E-02	5.24E-02	5.27E-02	3.50E-01	8.31E-02	2.35E-04	2.36E-04	-
Benzene	9.64E-05	9.19E-05	9.23E-05	1.00E-03	2.64E-06	4.12E-07	4.13E-07	1.50E+00
Toluene	3.50E-04	3.35E-04	3.37E-04	1.50E-02	9.59E-06	1.50E-06	1.51E-06	2.30E+00
PCB	6.65E-03	6.30E-03	6.32E-03	1.00E-05	1.82E-04	2.82E-05	2.83E-05	-
Naftalene	7.29E-06	7.02E-06	7.06E-06	5.00E-03	1.99E-07	3.14E-08	3.16E-08	1.20E-01
Acenaftene	2.01E-05	1.94E-05	1.95E-05	5.00E-03	5.49E-07	8.67E-08	8.72E-08	2.50E-02
Fluorene	2.07E-05	1.99E-05	2.00E-05	5.00E-03	5.65E-07	8.92E-08	8.97E-08	2.10E-02
Fenantrene	1.65E-05	1.59E-05	1.60E-05	5.00E-03	4.51E-07	7.12E-08	7.16E-08	4.50E-03
Antracene	2.48E-05	2.38E-05	2.39E-05	5.00E-03	6.78E-07	1.07E-07	1.07E-07	2.80E-03
Fluorantene	2.42E-04	2.26E-04	2.26E-04	5.00E-03	6.63E-06	1.01E-06	1.01E-06	4.60E-03
Pirene	2.24E-05	2.10E-05	2.10E-05	5.00E-02	6.14E-07	9.39E-08	9.39E-08	2.20E-02
Crisene	9.32E-05	8.89E-05	8.95E-05	5.00E-03	2.55E-06	3.98E-07	4.01E-07	-
Benzo(b)fluorantene	2.27E-05	2.05E-05	2.04E-05	1.00E-04	6.20E-07	9.19E-08	9.12E-08	-
Benzo(a)pirene	7.37E-05	7.03E-05	7.07E-05	1.00E-05	2.02E-06	3.15E-07	3.17E-07	2.70E-02
Benzo(g,h,i)perilene	1.31E-04	1.25E-04	1.25E-04	1.00E-05	3.58E-06	5.59E-07	5.62E-07	-
Indeno(1,2,3,c,d)pirene	1.18E-04	1.12E-04	1.13E-04	1.00E-04	3.21E-06	5.02E-07	5.05E-07	3.00E-05
Butil benzil ftalato	8.80E-04	8.46E-04	8.50E-04	3.70E+01	2.41E-05	3.79E-06	3.81E-06	-
Di(2-etilesil)ftalato (DHEP)	8.27E-02	7.87E-02	7.91E-02	3.70E+01	2.26E-03	3.53E-04	3.54E-04	-
Di-n-ottil ftalato	1.04E-02	9.89E-03	9.93E-03	3.70E+01	2.86E-04	4.43E-05	4.45E-05	-

Fase 5 caratterizzazione del rischio

IBA

PEC stimate nello scenario di ragionevole cautela rispetto all'eluato
(Ief max: 0.25 m/anno. Assenza di pavimentazione)

Contaminante	PEC_falda			PEC_corpo idrico				PNEC [mg/L]
	C _{max} interfaccia (*) [mg/L]	C _{media} (0-5m) [mg/L]	C _{mediana} (0-5m) [mg/L]	CSC	Fiume	Lago		
				[mg/L]	C _{max} [mg/L]	C _{media} [mg/L]	C _{mediana} [mg/L]	
As	7.91E-05	7.52E-05	7.57E-05	1.00E-02	2.16E-06	3.37E-07	3.39E-07	1.10E-01
Ba	1.12E-02	1.07E-02	1.08E-02	7.00E-01	3.07E-04	4.79E-05	4.82E-05	1.20E+00
Cd	3.22E-06	3.07E-06	3.09E-06	5.00E-03	8.82E-08	1.37E-08	1.38E-08	2.40E-03
Co	2.13E-05	2.02E-05	2.03E-05	5.00E-02	5.82E-07	9.06E-08	9.12E-08	-
Cr_tot	8.59E-03	8.17E-03	8.22E-03	5.00E-02	2.35E-04	3.66E-05	3.68E-05	1.30E-01
Cu	8.32E-03	7.91E-03	7.96E-03	1.00E+00	2.28E-04	3.55E-05	3.57E-05	2.10E-03
Mn	4.07E-05	3.87E-05	3.90E-05	5.00E-02	1.11E-06	1.74E-07	1.75E-07	2.60E-01
Mo	8.93E-03	8.49E-03	8.54E-03	-	2.44E-04	3.80E-05	3.83E-05	-
Ni	1.71E-04	1.62E-04	1.63E-04	2.00E-02	4.66E-06	7.26E-07	7.31E-07	2.70E-02
Pb	1.31E-03	1.25E-03	1.26E-03	1.00E-02	3.59E-05	5.59E-06	5.62E-06	3.80E-02
Sb	4.22E-03	4.01E-03	4.04E-03	5.00E-03	1.15E-04	1.80E-05	1.81E-05	9.00E-02
V	6.87E-04	6.54E-04	6.58E-04	5.00E-02	1.88E-05	2.93E-06	2.95E-06	4.30E-01
Zn	5.98E-03	5.68E-03	5.72E-03	3.00E+00	1.63E-04	2.55E-05	2.56E-05	6.70E-03
Cloruri	1.64E+01	1.56E+01	1.57E+01	-	4.48E-01	6.97E-02	7.02E-02	-
Nitrati	1.09E-01	1.04E-01	1.04E-01	-	2.98E-03	4.64E-04	3.78E-04	-
Solfati	1.69E+01	1.61E+01	1.62E+01	2.50E+02	4.63E-01	7.21E-02	7.26E-02	-

Fase 5 caratterizzazione del rischio

PEC stimate nello scenario di ragionevole cautela rispetto all'eluato
(Ief max: 0.25 m/anno. Assenza pavimentazione)

IBA



Contaminante	PEC_falda				PEC_corpo idrico			PNEC [mg/L]
	C _{max} interfaccia (*) [mg/L]	C _{media} (0-5m) [mg/L]	C _{mediana} (0-5m) [mg/L]	CSC [mg/L]	Fiume		Lago	
					C _{max} [mg/L]	C _{media} [mg/L]	C _{mediana} [mg/L]	
Naftalene	1.81E-03	1.72E-03	1.73E-03	5.00E-03	4.95E-05	7.70E-06	7.74E-06	1.20E-01
Acenaftene	1.19E-04	1.13E-04	1.14E-04	5.00E-03	3.25E-06	5.08E-07	5.11E-07	2.50E-02
Fluorene	4.59E-04	4.36E-04	4.38E-04	5.00E-03	1.25E-05	1.95E-06	1.96E-06	2.10E-02
Fenantrene	8.78E-04	8.34E-04	8.39E-04	5.00E-03	2.40E-05	3.74E-06	3.76E-06	4.50E-03
Antracene	1.12E-04	1.06E-04	1.07E-04	5.00E-03	3.07E-06	4.76E-07	4.78E-07	2.80E-03
Fluorantene	4.04E-04	3.77E-04	3.77E-04	5.00E-03	1.10E-05	1.69E-06	1.69E-06	4.60E-03
Pirene	2.49E-03	2.34E-03	2.35E-03	5.00E-02	6.80E-05	1.05E-05	1.05E-05	2.20E-02
Crisene	5.33E-05	4.91E-05	4.88E-05	5.00E-03	1.46E-06	2.20E-07	2.19E-07	-
Benzo(b)fluorantene	8.54E-05	7.93E-05	7.90E-05	1.00E-04	2.34E-06	3.55E-07	3.54E-07	-
Benzo(a)pirene	3.03E-05	2.80E-05	2.78E-05	1.00E-05	8.30E-07	1.25E-07	1.25E-07	2.70E-02
Benzo(g,h,i)perilene	5.44E-05	4.98E-05	4.95E-05	1.00E-05	1.49E-06	2.23E-07	2.22E-07	-
Indeno(1,2,3,c,d)pirene	5.13E-05	4.70E-05	4.66E-05	1.00E-04	1.40E-06	2.10E-07	2.09E-07	-

PEC stimate nello scenario di massima cautela rispetto all'eluato
(Ief ridotta: 0.025 m/anno. Presenza di pavimentazione)

Contaminante	PEC_falda				PEC_corpo idrico			PNEC [mg/L]
	C _{max} interfaccia (*) [mg/L]	C _{media} (0-5m) [mg/L]	C _{mediana} (0-5m) [mg/L]	CSC [mg/L]	Fiume		Lago	
					C _{max} [mg/L]	C _{media} [mg/L]	C _{mediana} [mg/L]	
Naftalene	2.48E-04	2.39E-04	2.40E-04	5.00E-03	6.78E-06	1.07E-06	1.08E-06	1.20E-01
Acenaftene	1.19E-04	1.37E-05	1.38E-05	5.00E-03	3.90E-07	6.16E-08	6.19E-08	2.50E-02
Fluorene	5.93E-05	5.71E-05	5.75E-05	5.00E-03	1.62E-06	2.56E-07	2.57E-07	2.10E-02
Fenantrene	1.16E-04	1.12E-04	1.12E-04	5.00E-03	3.17E-06	5.01E-07	5.03E-07	4.50E-03
Antracene	1.65E-05	1.59E-05	1.60E-05	5.00E-03	4.52E-07	7.11E-08	7.16E-08	2.80E-03
Fluorantene	8.16E-05	7.80E-05	7.85E-05	5.00E-03	2.23E-06	3.50E-07	3.52E-07	4.60E-03
Pirene	4.38E-04	4.09E-04	4.09E-04	5.00E-02	1.20E-05	1.83E-06	1.83E-06	2.20E-02
Crisene	1.20E-05	1.14E-05	1.15E-05	5.00E-03	3.28E-07	5.13E-08	5.15E-08	-
Benzo(b)fluorantene	1.69E-05	1.53E-05	1.52E-05	1.00E-04	4.62E-07	6.85E-08	6.80E-08	-
Benzo(a)pirene	6.81E-06	6.50E-06	6.53E-06	1.00E-05	1.86E-07	2.91E-08	2.93E-08	2.70E-02
Benzo(g,h,i)perilene	1.27E-05	1.21E-05	1.21E-05	1.00E-05	3.46E-07	5.40E-08	5.43E-08	-
Indeno(1,2,3,c,d)pirene	1.18E-05	1.13E-05	1.13E-05	1.00E-04	3.23E-07	5.05E-08	5.08E-08	-

Fase 5 caratterizzazione del rischio

IBA



Le potenziali criticità evidenziati dalle simulazioni a partire dalla matrice solida (in presenza di pavimentazione) non sono confermate dagli esiti delle valutazioni basate sui dati nell'eluato

Per le sostanze organiche per le quali è stato possibile stabilire una $PNEC_{acquatica}$, o per le quali è definito un SQA per le acque superficiali, si registra sempre l'accettabilità del rischio relativamente alla contaminazione riscontrata sia nella matrice solida sia nell'eluato e non vi sono criticità (anche nell'ipotesi cautelativa di assenza di pavimentazione).

Relativamente agli eluati, per il Benzo(g,h,i)perilene si stima una concentrazione in falda leggermente superiore al anche nell'ipotesi di infiltrazione ridotta. Tale potenziale criticità non determina però conseguenze significative per il corpo idrico superficiale (conformità della concentrazione massima attesa nelle acque superficiali rispetto allo SQA).

Fase 5 caratterizzazione del rischio PEC stimate a partire dalle caratteristiche della matrice solida:

scenario di ragionevole cautela (Ief_max = 0.25 m/anno - NO pavimentazione)

C&D



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale



Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente

Contaminante	PEC_falda			CSC [mg/L]	PEC_corpo idrico			PNEC [mg/L]
	Cmax interfaccia (*) [mg/L]	C_media (0-5m) [mg/L]	C_mediana (0-5m) [mg/L]		Fiume	Lago		
Diossine e furani (TE)	1,13E-07	8,85E-08	8,44E-08	4,00E-09	3,09E-09	3,96E-10	3,78E-10	-
Alifatici C19-C36	1,45E+00	1,39E+00	1,39E+00	3,50E-01	3,97E-02	6,21E-03	6,25E-03	-
2-Metilnaftalene	1,53E-04	1,45E-04	1,45E-04	5,00E-03	4,19E-06	6,47E-07	6,49E-07	-
Naftalene	3,82E-04	3,60E-04	3,61E-04	5,00E-03	1,05E-05	1,61E-06	1,62E-06	1,20E-01
Fenantrene	4,54E-03	4,29E-03	4,30E-03	5,00E-03	1,24E-04	1,92E-05	1,93E-05	4,50E-03
Antracene	2,01E-03	1,89E-03	1,89E-03	5,00E-03	5,50E-05	8,47E-06	8,48E-06	2,80E-03
Fluorantene	1,71E-02	1,57E-02	1,57E-02	5,00E-03	4,68E-04	7,05E-05	7,02E-05	4,60E-03
Benzo(a)antracene	1,96E-02	1,77E-02	1,75E-02	1,00E-04	5,36E-04	7,92E-05	7,85E-05	-
Pirene	7,83E-03	7,31E-03	7,31E-03	5,00E-02	2,14E-04	3,28E-05	3,27E-05	2,20E-02
Crisene	1,15E-02	1,04E-02	1,03E-02	5,00E-03	3,14E-04	4,64E-05	4,60E-05	-
Benzo(b)fluorantene	4,44E-03	4,06E-03	4,03E-03	1,00E-04	1,22E-04	1,82E-05	1,80E-05	-
Benzo(k)fluorantene	2,77E-03	2,50E-03	2,48E-03	5,00E-05	7,57E-05	1,12E-05	1,11E-05	-
Benzo(a)pirene	6,78E-03	6,11E-03	6,05E-03	1,00E-05	1,85E-04	2,74E-05	2,71E-05	-
Benzo(e)pirene	2,30E-02	2,03E-02	2,00E-02	1,00E-04	6,28E-04	9,10E-05	8,98E-05	-
Indeno(1,2,3,c,d)pirene	2,00E-02	1,79E-02	1,77E-02	1,00E-04	5,48E-04	8,03E-05	7,93E-05	3,00E-05
Dibenzo(ac)+(ah)antracene	7,53E-03	6,72E-03	6,63E-03	1,00E-05	2,06E-04	3,01E-05	2,97E-05	-
Benzo(g,h,i)perilene	1,57E-02	1,40E-02	1,38E-02	1,00E-05	4,29E-04	6,27E-05	6,18E-05	-

scenario di ragionevole cautela (Ief ridotta =0.025 m/anno - CON pavimentazione)

Contaminante	PEC_falda			CSC [mg/L]	PEC_corpo idrico			PNEC [mg/L]
	Cmax interfaccia (*) [mg/L]	C_media (0-5m) [mg/L]	C_mediana (0-5m) [mg/L]		Fiume	Lago		
Diossine e furani (TE)	3,06E-08	2,90E-08	2,91E-08	4,00E-09	8,38E-10	1,30E-10	1,30E-10	-
Alifatici C19-C36	1,58E-01	1,52E-01	1,53E-01	3,50E-01	4,33E-03	6,82E-04	6,86E-04	-
2-Metilnaftalene	2,73E-05	2,62E-05	2,64E-05	5,00E-03	7,46E-07	1,17E-07	1,18E-07	-
Naftalene	6,86E-05	6,61E-05	6,65E-05	5,00E-03	1,88E-06	2,96E-07	2,98E-07	1,20E-01
Fenantrene	7,66E-04	7,36E-04	7,40E-04	5,00E-03	2,10E-05	3,30E-06	3,32E-06	4,50E-03
Antracene	3,65E-04	3,50E-04	3,52E-04	5,00E-03	9,97E-06	1,57E-06	1,58E-06	2,80E-03
Fluorantene	3,86E-03	3,69E-03	3,71E-03	5,00E-03	1,06E-04	1,65E-05	1,66E-05	4,60E-03
Benzo(a)antracene	4,75E-03	4,53E-03	4,55E-03	1,00E-04	1,30E-04	2,03E-05	2,04E-05	-
Pirene	1,60E-03	1,52E-03	1,53E-03	5,00E-02	4,39E-05	6,83E-06	6,87E-06	2,20E-02
Crisene	2,81E-03	2,68E-03	2,69E-03	5,00E-03	7,69E-05	1,20E-05	1,21E-05	-
Benzo(b)fluorantene	9,72E-04	9,07E-04	9,11E-04	1,00E-04	2,66E-05	4,06E-06	4,08E-06	-
Benzo(k)fluorantene	6,70E-04	6,39E-04	6,43E-04	5,00E-05	1,83E-05	2,86E-06	2,88E-06	-
Benzo(a)pirene	1,65E-03	1,57E-03	1,58E-03	1,00E-05	4,51E-05	7,04E-06	7,08E-06	-
Benzo(e)pirene	5,85E-03	5,56E-03	5,59E-03	1,00E-04	1,60E-04	2,49E-05	2,50E-05	-
Indeno(1,2,3,c,d)pirene	5,00E-03	4,76E-03	4,78E-03	1,00E-04	1,37E-04	2,13E-05	2,14E-05	3,00E-05
Dibenzo(ac)+(ah)antracene	1,88E-03	1,79E-03	1,80E-03	1,00E-05	5,15E-05	8,04E-06	8,08E-06	-
Benzo(g,h,i)perilene	3,93E-03	3,75E-03	3,77E-03	1,00E-05	1,08E-04	1,68E-05	1,69E-05	-

Fase 5: caratterizzazione del rischio

PEC stimate a partire dalle caratteristiche dell'eluato:

scenario di massima cautela (Ief_max: 0,25 m/anno e NO pavimentazione)

C&D



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



Sistema Nazionale
per la Protezione
dell'Ambiente

Contaminante	PEC_falda			PEC_corpo idrico					PNEC [mg/L]
	C _{max} interfaccia (*) [mg/L]	C _{media} (0-5m) [mg/L]	C _{mediana} (0-5m) [mg/L]	VS [mg/L]	CSC [mg/L]	Fiume C _{max} [mg/L]	Lago C _{media} [mg/L]	Lago C _{mediana} [mg/L]	
As	2,17E-04	2,07E-04	2,08E-04	1,00E-02	1,00E-02	5,95E-06	9,26E-07	9,32E-07	1,10E-01
Ba	5,53E-02	5,26E-02	5,29E-02	-	7,00E-01	1,51E-03	2,36E-04	2,37E-04	1,20E+00
Cd	1,45E-06	1,38E-06	1,39E-06	5,00E-03	5,00E-03	3,98E-08	6,19E-09	6,23E-09	2,40E-03
Co	6,09E-05	5,79E-05	5,82E-05	-	5,00E-02	1,66E-06	2,59E-07	2,61E-07	-
Cr_tot	2,23E-03	2,12E-03	2,13E-03	5,00E-02	5,00E-02	6,09E-05	9,48E-06	9,54E-06	1,30E-01
Cu	3,81E-04	3,63E-04	3,65E-04	-	1,00E+00	1,04E-05	1,62E-06	1,63E-06	2,10E-03
Mn	1,89E-04	1,80E-04	1,81E-04	-	5,00E-02	5,17E-06	8,05E-07	8,10E-07	2,60E-01
Mo	3,96E-04	3,77E-04	3,79E-04	-	-	1,08E-05	1,69E-06	1,70E-06	-
Ni	6,25E-05	5,94E-05	5,98E-05	2,00E-02	2,00E-02	1,71E-06	2,66E-07	2,68E-07	2,70E-02
Pb	2,45E-05	2,33E-05	2,35E-05	1,00E-02	1,00E-02	6,71E-07	1,05E-07	1,05E-07	3,80E-02
Sb	3,48E-04	3,31E-04	3,33E-04	5,00E-03	5,00E-03	9,53E-06	1,48E-06	1,49E-06	9,00E-02
V	4,28E-03	4,07E-03	4,10E-03	5,00E-02	5,00E-02	1,17E-04	1,82E-05	1,84E-05	4,30E-01
Zn	3,06E-05	2,91E-05	2,92E-05	3,00E+00	3,00E+00	8,36E-07	1,30E-07	1,31E-07	6,70E-03
Cloruri	1,07E+00	1,01E+00	1,02E+00	2,50E+02	-	2,92E-02	4,54E-03	4,57E-03	-
Nitrati	2,00E+00	1,90E+00	1,91E+00	5,00E+01	-	5,46E-02	8,50E-03	8,56E-03	-
Solfati	7,23E+01	6,87E+01	6,91E+01	2,50E+02	2,50E+02	1,98E+00	3,08E-01	3,10E-01	-

Contaminante	PEC_falda			VS [mg/L]	CSC [mg/L]	PEC_corpo idrico			PNEC [mg/L]	SQA-CMA [mg/L]
	C _{max} interfaccia (*) [mg/L]	C _{media} (0-5m) [mg/L]	C _{mediana} (0-5m) [mg/L]			Fiume C _{max} [mg/L]	Lago C _{media} [mg/L]	Lago C _{mediana} [mg/L]		
Benzo(b)fluorantene	1,43E-06	1,30E-06	1,29E-06	1,00E-04	1,00E-04	3,90E-08	5,83E-09	5,79E-09	-	1,70E-05
Benzo(k)fluorantene	8,03E-07	7,26E-07	7,19E-07	-	5,00E-05	2,20E-08	3,25E-09	3,22E-09	-	1,70E-05
Benzo(a)pirene	1,43E-06	1,29E-06	1,28E-06	1,00E-05	1,00E-05	3,92E-08	5,78E-09	5,72E-09	-	2,70E-05
Benzo(g,h,i)perilene	1,37E-06	1,22E-06	1,21E-06	1,00E-05	1,00E-05	3,76E-08	5,48E-09	5,41E-09	-	8,20E-06
Indeno(1,2,3,c,d)pirene	1,59E-06	1,42E-06	1,41E-06	1,00E-04	1,00E-04	4,35E-08	6,37E-09	6,30E-09	3,00E-05	-

Fase 5: caratterizzazione del rischio

C&D



Per metalli e sostanze inorganiche i potenziali rischi ecologici ($PEC > PNEC$) associati alla matrice solida risultano non confermati dagli esiti sull'eluato. L'eluato è ritenuta la matrice maggiormente rappresentativa per la stima delle concentrazioni attese per i recettori ambientali (ecosistemi acquatici) e non determina criticità anche nell'ipotesi più cautelativa di assenza di pavimentazione. Fanno eccezione Ferro e Manganese per i quali non sono disponibili i dati nell'eluato.

Per le sostanze organiche per le quali è stato possibile stabilire una PNEC acquatica o per le quali è definito un SQA per le acque superficiali, si registra sempre l'accettabilità del rischio relativamente alla contaminazione riscontrata sia nella matrice solida sia nell'eluato e non vi sono criticità anche nell'ipotesi cautelativa di assenza di pavimentazione.

Per le sostanze organiche, il confronto con i VS/CSC nelle acque sotterranee evidenzia potenziali criticità per Diossine e alcuni IPA, considerando i dati misurati nella matrice solida anche in presenza della pavimentazione stradale. Per gli IPA, relativamente agli eluati, invece, non si registrano criticità.

Fase 5: caratterizzazione del rischio

C&D

PEC stimate a partire dall'eluato: valori massimi di concentrazione riscontrati (prove a flusso ascendente)

Contaminante	PEC falda					PEC corpo idrico			PNEC [mg/L]	SQA-CMA/VG [mg/L]
	C _{max} interfaccia [mg/L](*)	C _{media} (0-5m) [mg/L]	C _{mediana} (0-5m) [mg/L]	VS	CSC	Fiume	Lago			
						C _{max} [mg/L]	C _{media} [mg/L]	C _{mediana} [mg/L]		
Cloruri (L/S=0,5/1)	1,19E+02	1,13E+02	1,14E+02	2,50E+02	2,50E+02	3,26E+00	5,07E-01	5,11E-01	-	2,00E+02
Solfati (L/S=0,5/1)	1,75E+02	1,67E+02	1,68E+02	2,50E+02	2,50E+02	4,79E+00	7,46E-01	7,51E-01	7,10E+01	1,50E+02
Fluoruri (L/S=1/1)	1,34E+00	1,27E+00	1,28E+00	1,50E+00	1,50E+00	3,66E-02	5,70E-03	5,73E-03	-	7,00E-01
Nitrati (L/S=0,2/1)	6,86E+01	6,53E+01	6,57E+01	5,00E+01	-	1,88E+00	2,92E-01	2,94E-01	-	2,50E+01
Cr (L/S=0,2/1)	2,43E-02	2,31E-02	2,32E-02	5,00E-02	5,00E-02	6,64E-04	1,03E-04	1,04E-04	3,20E-02	5,00E-02
Cu (L/S=0,2/1)	1,28E-02	1,22E-02	1,22E-02	-	1,00E+00	3,50E-04	5,45E-05	5,48E-05	2,20E-03	2,00E-02
Ni (L/S=0,2/1)	1,31E-03	1,24E-03	1,25E-03	2,00E-02	2,00E-02	3,58E-05	5,57E-06	5,61E-06	2,70E-02	3,40E-02
Se (L/S=0,2/1)	5,92E-04	5,02E-04	4,78E-04	1,00E-02	1,00E-02	1,62E-05	2,25E-06	2,14E-06	5,80E-02	1,00E-01

Scenario di massima cautela
(Ief_{max}: 0,25 m/anno e
assenza di pavimentazione)

Contaminante	PEC falda					PEC corpo idrico			PNEC [mg/L]	SQA-CMA/VG [mg/L]
	C _{max} interfaccia [mg/L](*)	C _{media} (0-5m) [mg/L]	C _{mediana} (0-5m) [mg/L]	VS	CSC	Fiume	Lago			
						C _{max} [mg/L]	C _{media} [mg/L]	C _{mediana} [mg/L]		
Nitrati (L/S=0,2/1)	6,81E+00	6,47E+00	6,51E+00	5,00E+01	-	1,86E-01	2,90E-02	2,92E-02	-	2,50E+01

Scenario di massima cautela
(Ief_{ridotta}: 0,025 m/anno
e presenza di
pavimentazione)

Fase 5: caratterizzazione del rischio

C&D

- PEC stimate a partire dall'eluato: valori massimi di concentrazione riscontrati
- (eluato da prove a pH variabile)

Analita	PEC falda		VS [mg/L]	CSC [mg/L]	PEC corpo idrico			PNEC [mg/L]	SQA- CMA/VG [mg/L]
	C _{media} (0-5m) [mg/L]	C _{mediana} (0-5m) [mg/L]			Fiume	Lago			
					C _{max} [mg/L]	C _{media} [mg/L]	C _{mediana} [mg/L]		
As (pH 13,33)	4,01E-03	4,03E-03	1,00E-02	1,00E-02	1,15E-04	1,80E-05	1,81E-05	5,40E-02	1,00E-02
Ba (pH 4,49)	3,95E-01	3,97E-01		7,00E-01	1,14E-02	1,77E-03	1,78E-03	1,70E+00	1,00E-01
Cd (pH 4,45)	1,17E-03	1,18E-03	5,00E-03	5,00E-03	3,38E-05	5,26E-06	5,30E-06	2,40E-03	4,50E-04
Co (pH 3,45)	1,85E-02	1,86E-02		5,00E-02	5,31E-04	8,27E-05	8,32E-05	-	-
Cr (pH 3,36)	1,09E-02	1,10E-02	5,00E-02	5,00E-02	3,14E-04	4,89E-05	4,92E-05	3,20E-02	5,00E-02
Cu (pH 4,45)	1,20E-01	1,21E-01		1,00E+00	3,46E-03	5,39E-04	5,42E-04	2,20E-03	2,00E-02
Ni (pH 4,49)	3,20E-02	3,22E-02	2,00E-02	2,00E-02	9,21E-04	1,43E-04	1,44E-04	2,70E-02	3,40E-02
Pb (pH 3,45)	2,81E-02	2,82E-02	1,00E-02	1,00E-02	8,07E-04	1,26E-04	1,26E-04	3,80E-02	1,40E-02
Se (pH 3,45)	1,17E-03	1,18E-03	1,00E-02	1,00E-02	3,38E-05	5,26E-06	5,30E-06	5,80E-02	1,00E-01
V (pH 12,27)	2,68E-02	2,70E-02	5,00E-02	5,00E-02	7,72E-04	1,20E-04	1,21E-04	4,10E-01	-
Zn (pH 3,45)	2,29E-01	2,31E-01	3,00E+00	3,00E+00	6,60E-03	1,03E-03	1,03E-03	5,90E-03	5,00E-01
Solfati (pH 7,09)	9,73E+01	9,79E+01	2,50E+02	2,50E+02	2,80E+00	4,36E-01	4,39E-01	7,10E+01	1,50E+02
Fluoruri (pH 6,05)	3,94E+00	3,96E+00	1,50E+00	1,50E+00	1,13E-01	1,76E-02	1,77E-02	-	7,00E-01

Scenario di massima cautela (I_{ef_max}: 0,25 m/anno e assenza di pavimentazione)

Scenario di ragionevole cautela (I_{ef_max}: 0,025 m/anno presenza di pavimentazione)

Analita	PEC falda		VS [mg/L]	CSC [mg/L]	PEC corpo idrico			PNEC [mg/L]	SQA- CMA/VG [mg/L]
	C _{media} (0-5m) [mg/L]	C _{mediana} (0-5m) [mg/L]			Fiume	Lago			
					C _{max} [mg/L]	C _{media} [mg/L]	C _{mediana} [mg/L]		
Cu (pH 4,45)	1,19E-02	1,20E-02		1,00E+00	3,43E-04	5,34E-05	5,37E-05	2,20E-03	2,00E-02
Ni (pH 4,49)	3,17E-03	3,19E-03	2,00E-02	2,00E-02	9,13E-05	1,42E-05	1,43E-05	2,70E-02	3,40E-02
Pb (pH 3,45)	2,78E-03	2,80E-03	1,00E-02	1,00E-02	8,01E-05	1,25E-05	1,25E-05	3,80E-02	1,40E-02
Zn (pH 3,45)	2,27E-02	2,29E-02	3,00E+00	3,00E+00	6,55E-04	1,02E-04	1,03E-04	5,90E-03	5,00E-01
Fluoruri (pH 6,05)	3,90E-01	3,93E-01	1,50E+00	1,50E+00	1,12E-02	1,75E-03	1,76E-03	-	7,00E-01

Fase 5: caratterizzazione del rischio

C&D



Sia dalle prove batch sia da quelle a flusso ascendente a pH naturale si è riscontrato in generale che le concentrazioni di metalli e composti inorganici negli eluati decrescono al crescere del rapporto L/S

Le prove a pH variabile hanno evidenziato in generale concentrazioni più elevate di metalli a pH acidi (< 4,5) ad eccezione di As e V che presentano i valori massimi per pH molto basici (>12). Per gli inorganici (nitrati, solfati, cloruri, fluoruri) i valori più elevati si registrano a pH basici.

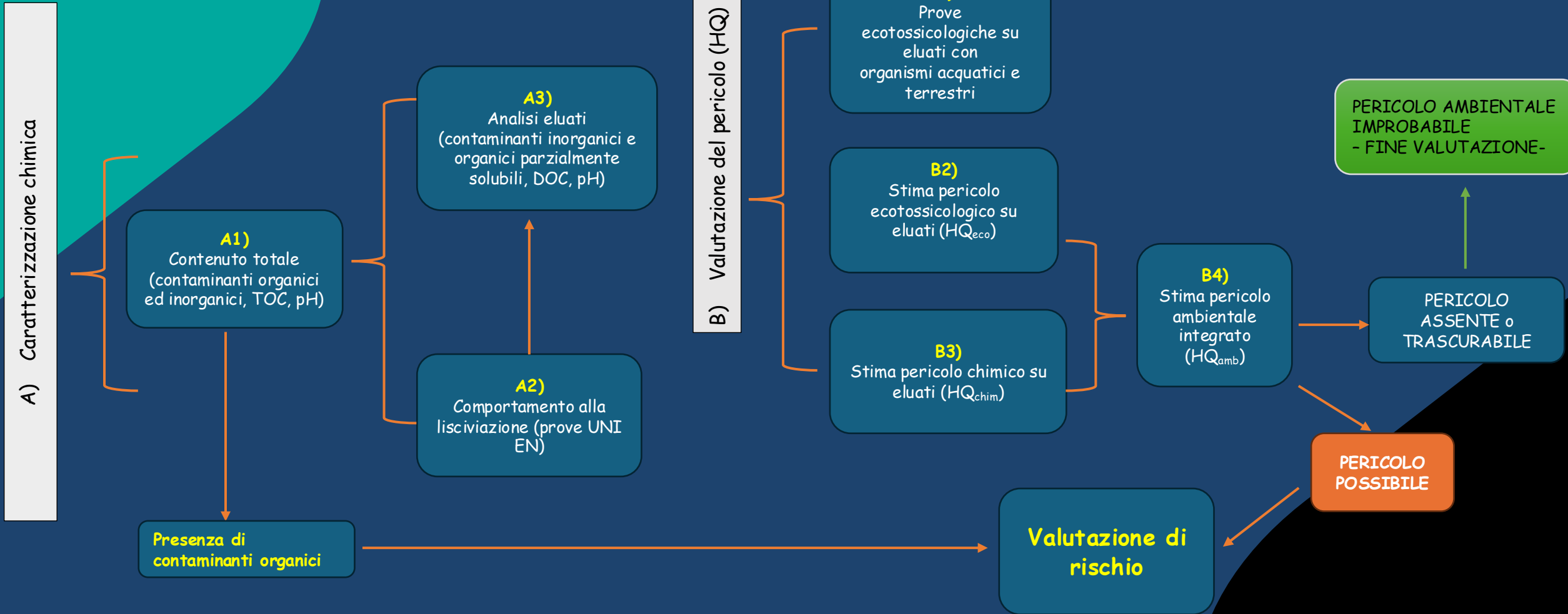
I comportamenti di rilascio alla lisciviazione sono risultati abbastanza differenti tra le due macro tipologie di campioni analizzati: per quelli con composizione prevalente in residui di laterizi il fattore che ha influenzato maggiormente la lisciviazione di Cr, Co, Cu, Mo e cloruri è stato il rapporto liquido/solido, mentre il pH ha influenzato maggiormente il rilascio di Al, Ba, Fe, Mn, V, Zn, solfati e fluoruri; per i campioni con prevalenza di calcestruzzo invece il fattore determinante il rilascio è stato il pH.

Gli esiti delle simulazioni modellistiche a partire dai dati degli eluati nelle prove a flusso ascendente e a pH variabile hanno mostrato che i parametri critici nello scenario di massima cautela (ovvero senza pavimentazione) sono risultati i nitrati, il nichel, il piombo e i fluoruri in falda, il rame e lo zinco nelle acque superficiali. Tuttavia, applicando lo scenario di ragionevole cautela (con pavimentazione) tutto è rientrato nel range di accettabilità.

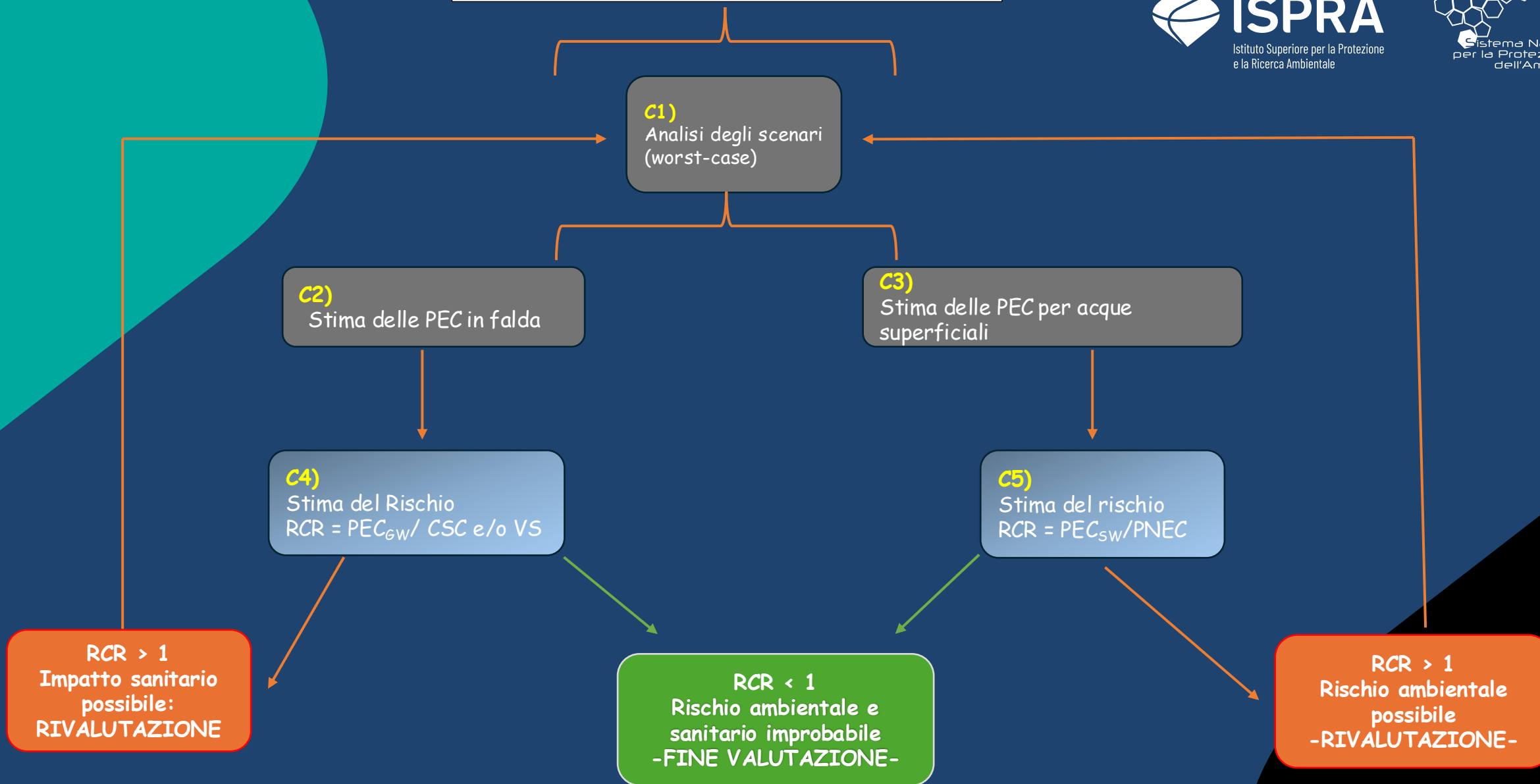
Nel caso di riutilizzo al suolo o nel suolo di aggregati da C&D, le condizioni del test di cessione usualmente applicato (UNI EN 12457-2: L/S = 10/1 e pH naturale) possono non essere rappresentative dei rapporti L/S reali e se i relativi risultati sono utilizzati nell'ambito di una valutazione di rischio potrebbero non essere sufficientemente cautelativi per alcuni contaminanti di interesse.

Approccio metodologico per la definizione della cessazione della qualifica di rifiuto per l'uso di gli aggregati al suolo.

Caratterizzazione del pericolo e del rischio ambientale



C) Valutazione di rischio



GRAZIE
per l'Attenzione

VALORIZATION OF INDUSTRIAL WASTE THROUGH ACCELERATED CARBONATION

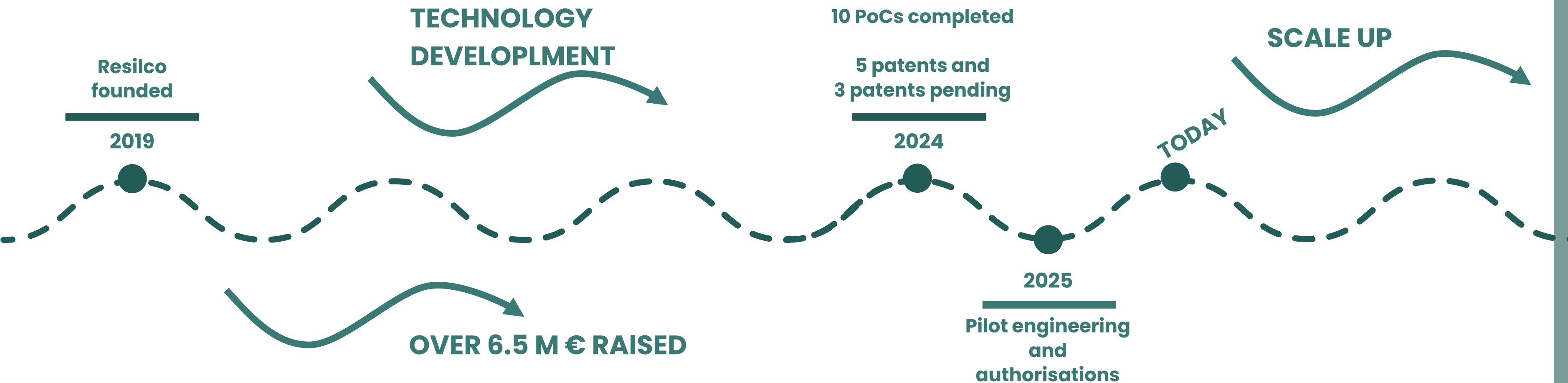
Resilco

Valorizzazione di residui industriali con eventuale utilizzo di CO₂ da fonti emissive, Roma 2026





ABOUT US

Founded in 2019, **Resilco** is an innovative SME providing **solutions to convert industrial residues** from hard-to-abate sectors **into sustainable resources**.

At Resilco, we are turning linear waste management into a truly **circular economy approach**.



MISSION

-  Creating **economic benefits** throughout the value chain
-  Reducing the volume of material sent to **landfill**
-  Promoting the **reuse** of materials
-  Promoting the permanent **storage of CO₂**



TECHNOLOGY OVERVIEW

Basic material requirements:

- ① Alkalinity
- ② Reactive **calcium compounds**



Industrial residues



examples of compatible materials

- > Steel slags from steel industry
- > Fly ash from waste-to-energy, biomass and paper industries
- > Fume abatement dusts

TECHNOLOGY OVERVIEW

Carbonation

A spontaneous occurring reaction involving minerals rich in calcium and oxygen reacting with CO₂ to create limestone (calcium carbonate).



Accelerated Carbonation

Speeds up the natural carbonation reaction through mechanical or thermal processing, reducing reaction times from years to just minutes.



advantages of accelerated carbonatation process

- > Permanent storage of CO₂
(potentially up to 15% by weight compared to the initial weight)
- > Possible utilization of CO₂ from BECCS and DAC
- > Immobilization of many heavy metals
- > Lowering of the material's pH



Carbonation process

TECHNOLOGY OVERVIEW



Industrial residues

- > Steel slags
- > Fly ashes
- > Fume abatement dusts



Carbonation process

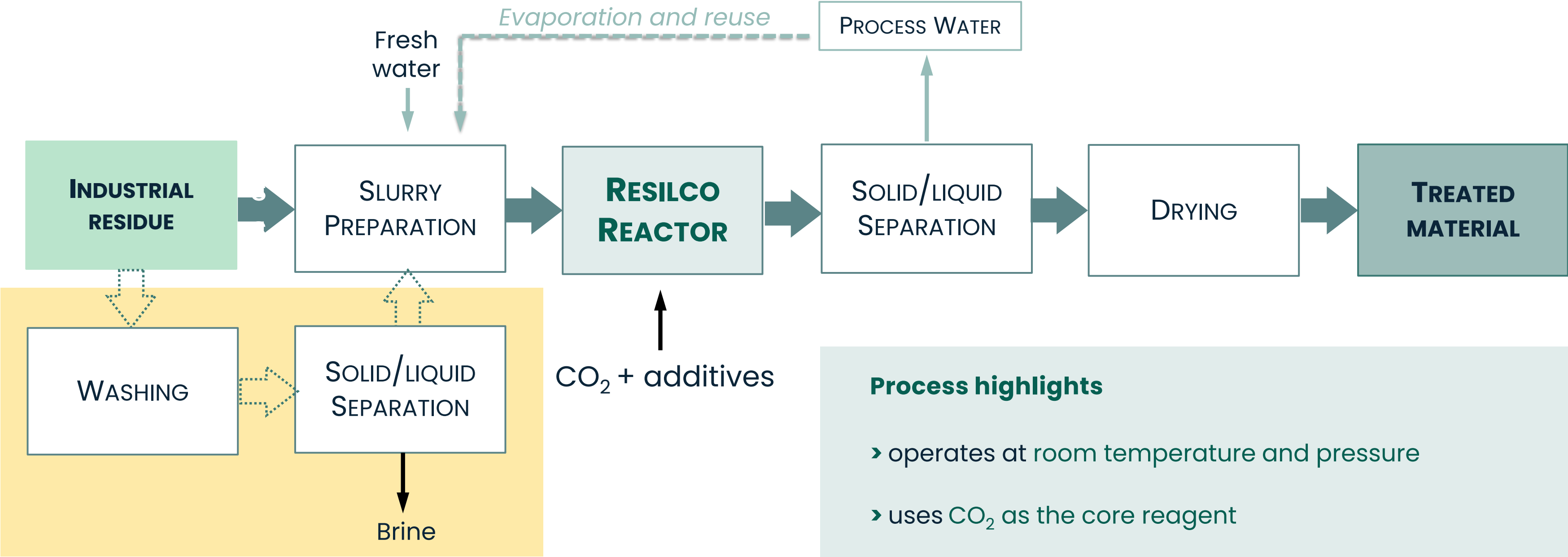
- > Permanent storage of CO₂
(potentially up to 15% by weight compared to the initial weight)
- > Possible utilization of CO₂ from BECCS and DAC
- > Immobilization of many heavy metals
- > Lowering of the material's pH



Applications as filler in

- > Construction
- > Bituminous conglomerate
- > Polymer compounds

THE RESILCO PROCESS



Pre-treatment for materials with high content of chlorine salt

Process highlights

- › operates at room temperature and pressure
- › uses CO₂ as the core reagent
- › recovers over 95% of process water
- › generates an output stream ready for the market

THE RESILCO FACILITY LAB

The pristine and treated materials is characterized using four procedures:

- › Chemical analysis using X-ray fluorescence spectroscopy (XRF);
- › Mineralogical analysis using X-ray diffraction (XRD);
- › Thermogravimetric analysis (TGA), including analysis of gas emissions using a CO₂ sensor;
- › Particle size and shape analysis.



XRF – Rigaku
Supermini200



XRD – Rigaku Miniflex 600



TGA – Mettler Toledo
TGA/DSC 3+ + CO₂ sensor

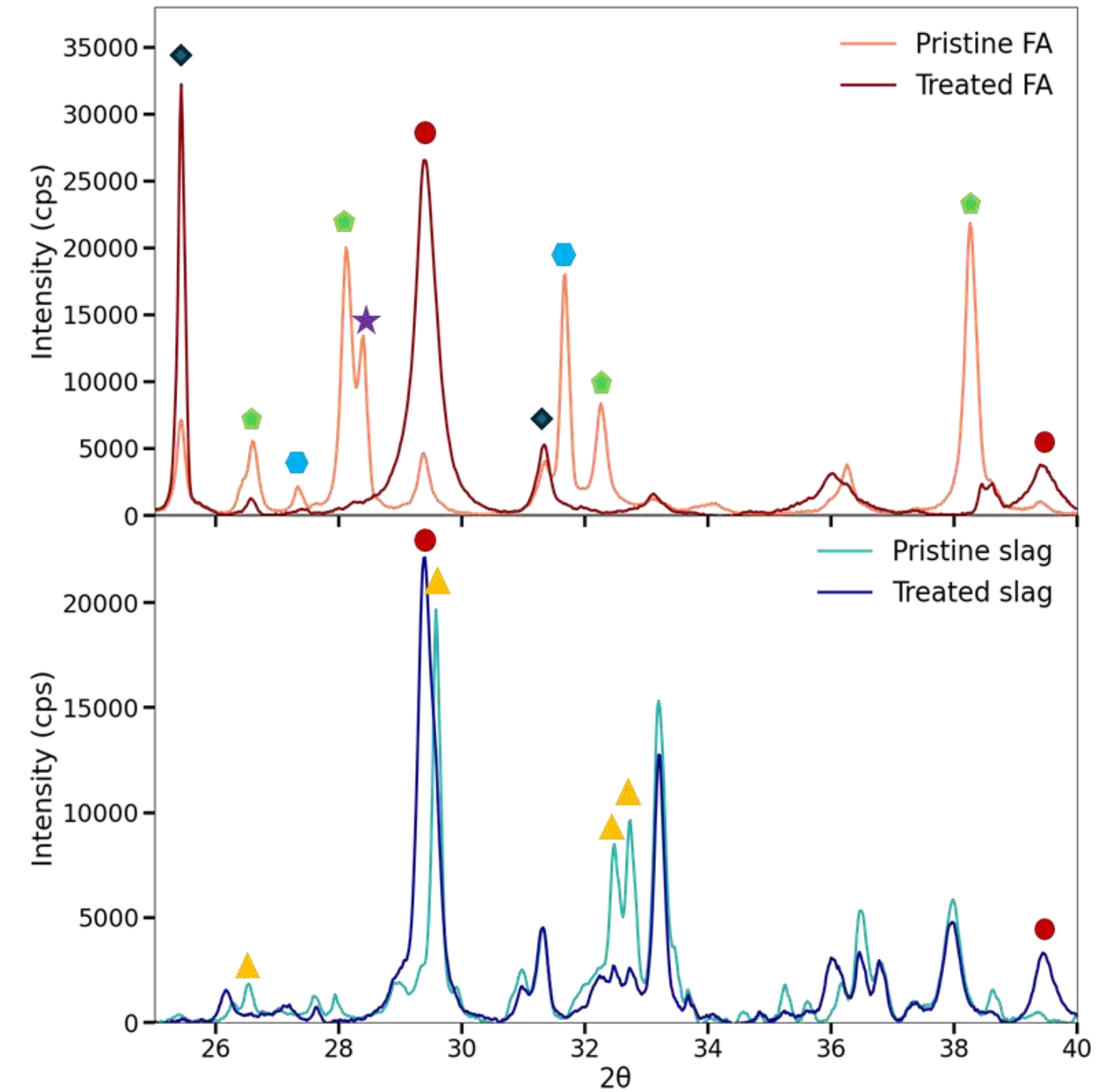


Laser granulometer –
Microtrac SYNC

EXPERIMENTAL RESULTS

XRD peaks of active tested materials

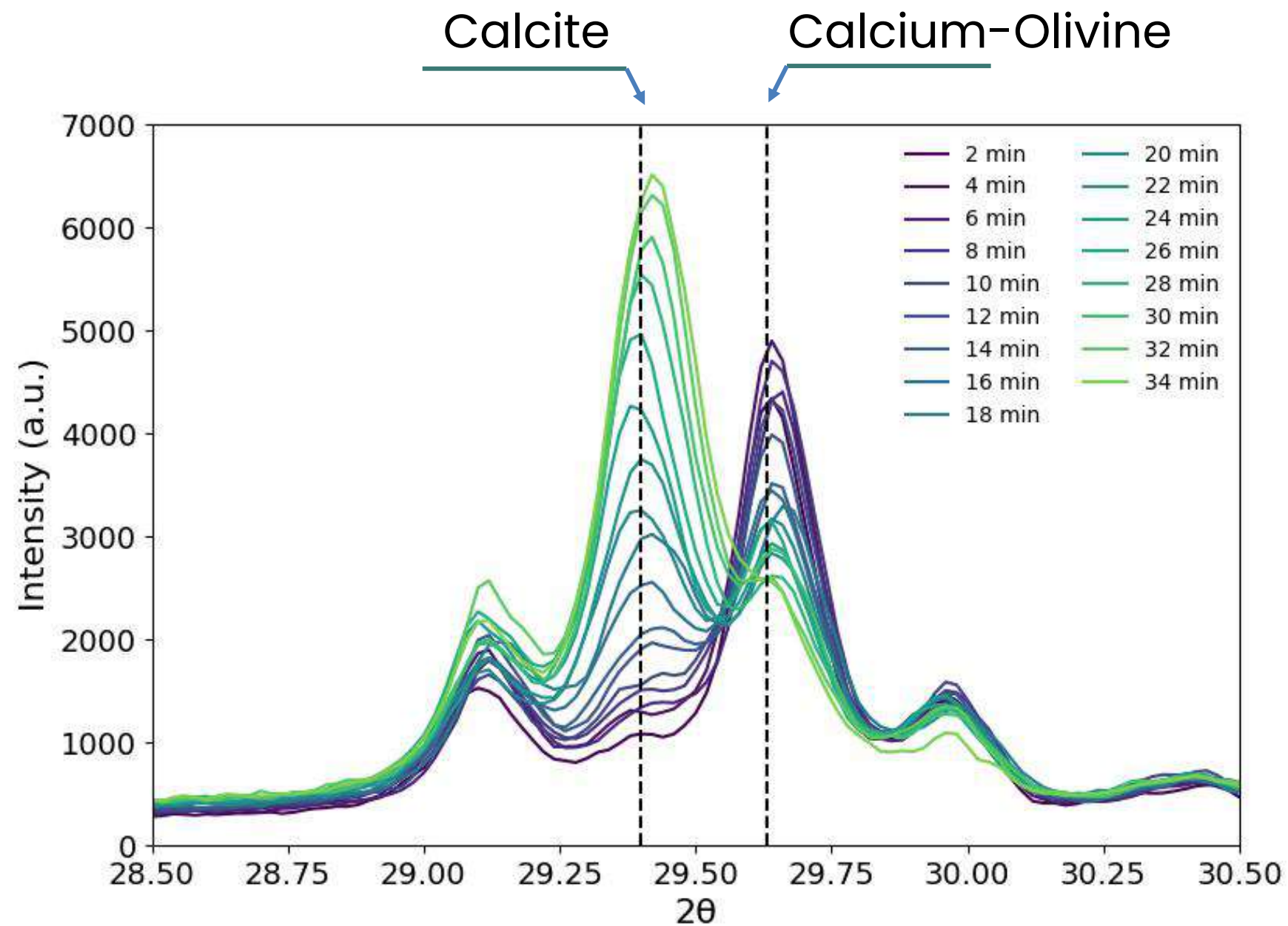
- > The chemical composition of compatible input materials is very varied
- > The final composition is generally dominated by calcium carbonate
- > Soluble fractions are eliminated during the process



- Calcite
- ▲ Calcio-Olivine
- ◆ Anhydrite
- ◊ Ca Cl OH
- Halite
- ★ Sylvine

EXPERIMENTAL RESULTS

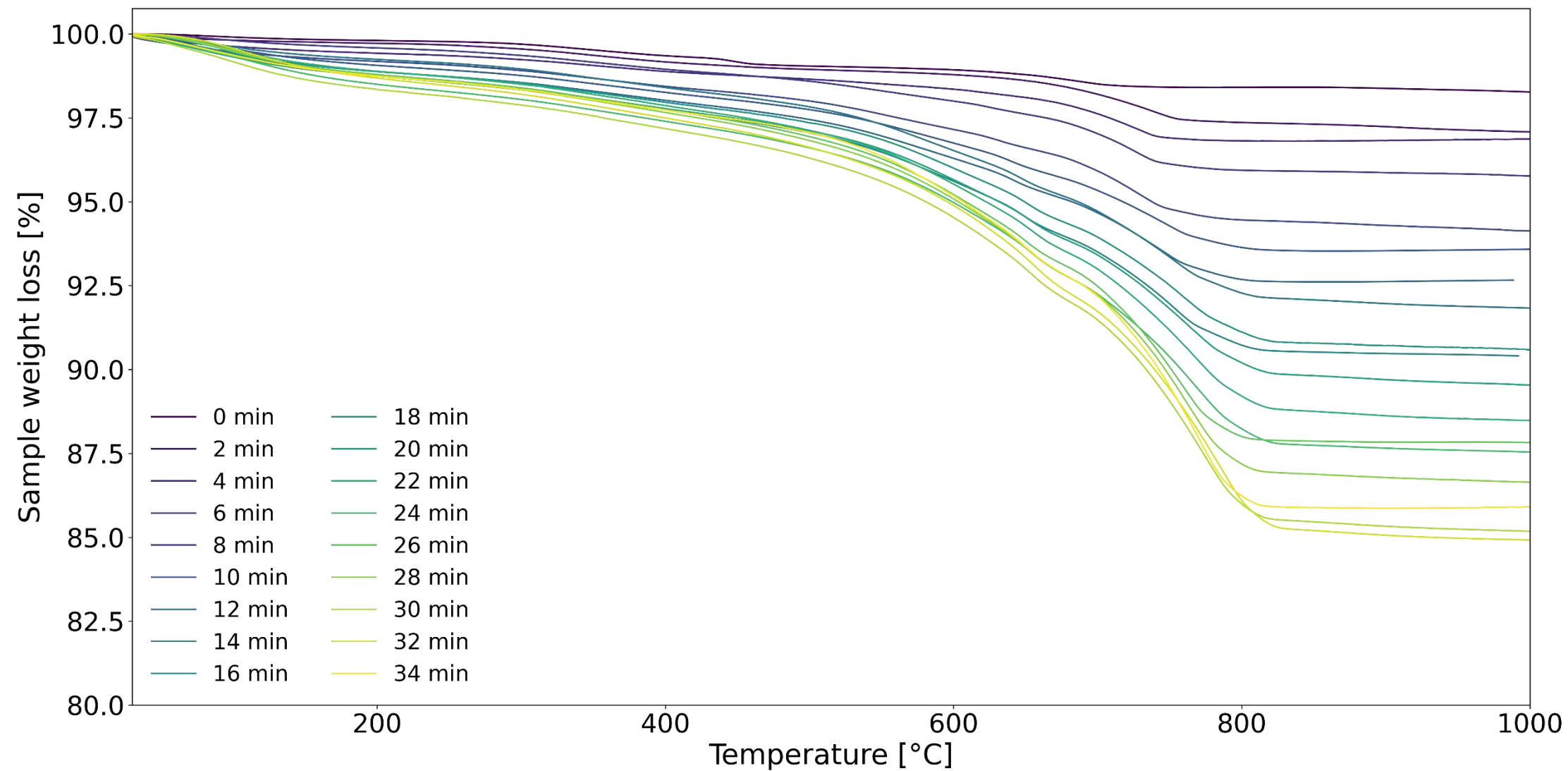
A case study: Accelerated Carbonatation process of ladle slag



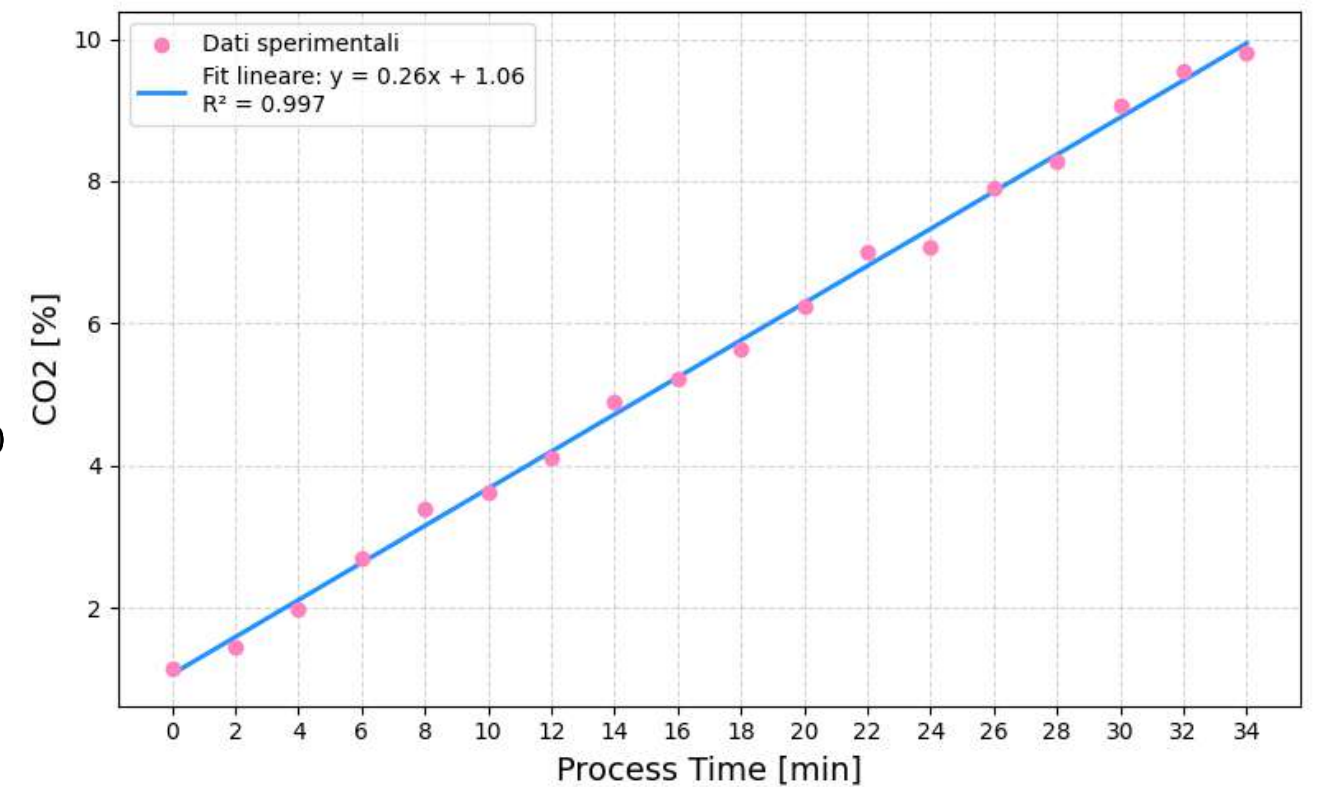
- › Evolution of Calcite and Calcium-olivine XRD peaks during process time
- › Decrease of Calcium-olivine peak intensity as increasing process time and concomitant increase of calcite peak intensity
 - Dissolution of Calcium-olivine and formation reaction between Ca^{2+} ion and CO_2 to form CaCO_3

EXPERIMENTAL RESULTS

A case study: Accelerated Carbonatation process of ladle slag



- > Dehydration of physically bonded H₂O (30 °C < T < 150°C)
- > Dissociation of carbonates associated with CO₂ release (500 °C < T < 850 °C)



PRELIMINARY PERFORMANCE TESTS

Carbonated ladle slag performance tests as filler in construction

- ① Carbonated ladle slag has been positively tested for use as a filler in concrete, in compliance with UNI EN 12620
- ② **Other applications:** use as **Supplementary Cementitious Material (SCM)**, according to tests performed by accredited laboratories in mortar specimens

PRELIMINARY PERFORMANCE TESTS

Carbonated ladle slag performance tests as filler in construction

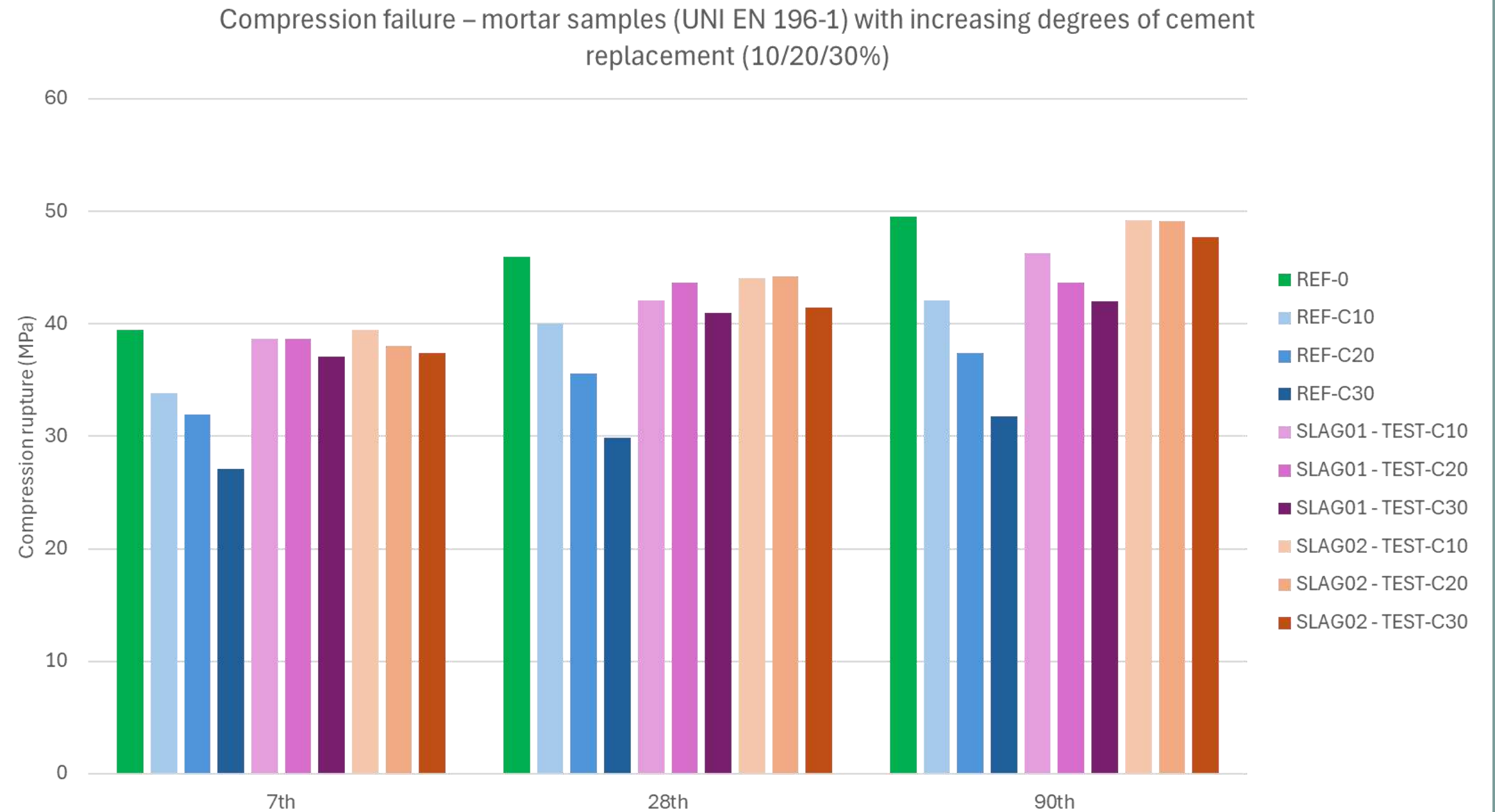
Carbonated ladle slag was tested in mortar samples prepared in accordance with UNI EN 196-1 testing different volumetric cement replacement (10, 20 and 30%).

Carbonated ladle slag performances have been compared to four reference samples:

- > Cement – prepared according to UNI EN 196-1 with 100% cement;
- > Filler 10/20/30% – samples with 10/20/30% volumetric cement replacement using a commercial carbonate filler;



- > **Latent hydraulic activity**
- > Positive results are obtained with the substitution of **up to 30% cement with Carbonated filler.**



OUR SOLUTION



Render of Resilco's pilot plant for residues recovery by accelerated carbonation, operational April 2026 close to Milan.

THE TEAM



David Callejo Muñoz
CEO and Founder



Alessandro Panza
Co-founder
Head of Engineering



Paolo Brazzo
Co-founder
Head of R&D



Marta Cecilia Pigazzini
Co-founder
Head of Business
Development



Emanuele Gallotti
CFO



Cristina Giliberti
IT & General Services



Gaia Bocchialini
R&D



Chiara Reami
Sales & Marketing
specialist



Fabiana Baduena
Senior accountant



Maryan Radulescu
Plant operator



Alessia Motta
R&D



Marco Bertani
Environmental
& Compliance
Manager

Investors



Partners



Green
Building
Council
Italia



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA



POLITECNICO
MILANO 1863



Ph.D. Students



POLITECNICO
MILANO 1863

Elifsu Balci

**Carbon Capture and Reuse of
Industrial Waste for Advanced
Cement-Based Materials**

Prof. Liberato Ferrara



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA

Starting 2026

**Carbonation of Alkaline
Waste for Heavy Metal
Stabilization**

Prof. Enza Bontempi

Resilco

info@resilco.it
Via delle Gerole 7/A
20867 Caponago Monza Brianza, IT



Tapojärvi Group



Tapojarvi Italia S.r.l – sito di Terni



PROBLEMA

Dalla produzione di acciaio inossidabile (AAS) si producono grandi quantità di sottoprodotti smaltiti come rifiuti da discarica.



SOLUZIONE GREEN

Tapojarvi riduce al minimo il volume dei rifiuti massimizzando la produzione di nuovi prodotti a base di scorie EoW. Questi prodotti possono sostituire quelli realizzati con risorse naturali vergini.



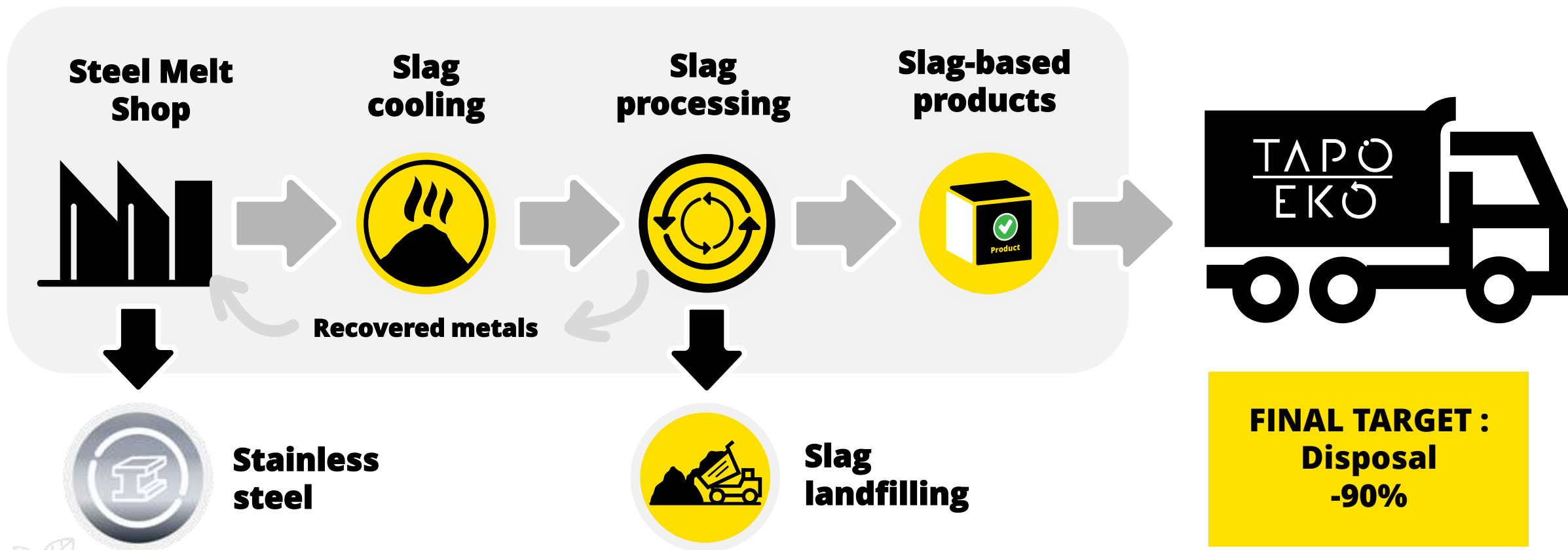
IMPATTO GREEN

Tapojärvi riduce l'impatto sul clima e preserva le risorse naturali vergini.





Trattamento delle scorie e trasformazione in prodotto





Trattamento delle scorie e trasformazione in prodotto

Il trattamento delle scorie all'interno dell'impianto New Metal Recovery (NMR) genera un rifiuto identificato con il codice **EER 10.02.01** - Rifiuti derivanti dal trattamento delle scorie (provenienti dall'industria siderurgica).

I **FILLER E GLI AGGREGATI** prodotti dal suddetto impianto NMR sono quindi **RIFIUTI** che saranno sottoposti a operazioni di recupero per diventare prodotti commerciabili.

Le **OPERAZIONI DI RECUPERO** di questi rifiuti sono elencate nell'Allegato C del Decreto Legislativo 152/06: i materiali in questione saranno sottoposti all'operazione "R5 - riciclaggio/recupero di altre sostanze inorganiche".

Nel nostro caso, il **RECUPERO** consiste nella verifica delle caratteristiche chimico-fisiche e prestazionali dei rifiuti.





Principali prodotti EoW

- Filler → Filler TapoEKO
- Aggregati → Aggregati TapoEKO
- Sono in corso studi e sperimentazioni per l'immissione sul mercato di un altro materiale, sempre prodotto dal trattamento della scoria da acciaio inox





Prodotti EoW : Filler TapoEKO

Filler

Prodotto EoW proveniente dal trattamento di scoria secca nel circuito del Dry Filler e tramite sistema di depolverazione all'interno dell'impianto di valorizzazione di Tapojarvi Italia.

Dimensione 0-1 mm

Autorizzazioni e certificazioni ottenute per la commercializzazione:

- ✓ Autorizzazione END OF WASTE (2022)
- ✓ Registrazione secondo il regolamento REACH (2023)
- ✓ Marcatura CE (2023) + UNI PdR 88:2020



Filler TapoEKO: applicazioni

Principali settori di applicazione nel mercato:

- ✓ Aggregati industriali per calcestruzzo (UNI EN 12620:2002+A1:2008)
- ✓ Aggregati industriali per miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade, aeroporti e altre aree soggette a traffico (UNI EN 13043:2002/AC:2004)
- ✓ Aggregati industriali per malta (UNI EN 13139:2002/AC:2004)





EoW Product: TapoEko Aggregates

Aggregati

Prodotto EoW proveniente dal trattamento di scoria secca da separazione jig e vagliatura all'interno dell'impianto di valorizzazione di Tapojarvi Italia.

Dimensione 0-20 mm

Autorizzazioni e certificazioni ottenute per la commercializzazione:

- ✓ Autorizzazione END OF WASTE (2022)
- ✓ Registrazione secondo il regolamento REACH (2023)
- ✓ Marcatura CE (2023) – UNI PdR 88:2020 in corso





TapoEKO Aggregates: applications

Principali settori di applicazione nel mercato:

- ✓ Aggregati industriali per calcestruzzo (UNI EN 12620:2002+A1:2008)
- ✓ Aggregati industriali per miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade, aeroporti e altre aree soggette a traffico (UNI EN 13043:2002/AC:2004)

Sono in corso studi e sperimentazioni per ulteriori applicazioni:

- strato di sottofondo stradale





Prossimo possibile prodotto: Sabbia da HC

Sabbia

Scoria umida proveniente dall'idro-ciclone dell'impianto di valorizzazione di Tapojarvi Italia.

Dimensione 0-1 mm



Possibile applicazione: Ha un potenziale di mercato interessante, soprattutto nei settori del calcestruzzo e dell'asfalto.





Tapojarvi Italia S.r.l

Floriana Marafioti

Environmental Responsible - Product development Engineer

+39 345 0709409


floriana.marafioti@tapojarvi.com

Tapojarvi Italia S.r.l.

Viale B. Brin 218, 05100 Terni, Italia

www.tapojarvi.com / www.tapoeko.com

Global forerunner of the circular economy



TAPOJÄRVİ

1955





Seminario tecnico-scientifico

**VALORIZZAZIONE DI RESIDUI INDUSTRIALI CON EVENTUALE
UTILIZZO DI CO₂ DA FONTI EMISSIVE**

10 marzo 2026 - 14.00-18.00

Sala Convegni – Università degli studi di Roma Tor Vergata
via del Politecnico, 1 - Roma



**Tecnologie di cattura e riuso della CO₂ nei rifiuti decadenti da
impianti di termovalorizzazione**

Ing. A. Giardiello

Wa.tre.co. S.r.l.



Chi è Wa.Tre.Co.

La **Wa.Tre.Co. S.r.l.** è una newco italiana che si occupa di progettazione e realizzazione di impianti per il trattamento di rifiuti solidi e liquidi.

La società è nata attorno allo sviluppo di due importanti brevetti per il trattamento di tutti i rifiuti (scorie e ceneri) prodotti da impianti industriali, centrando obiettivi ambientali di fondamentale importanza quali:

- ✓ **minimizzazione dei rifiuti prodotti** e massimizzazione dell'economia circolare
- ✓ **riduzione dei GHG (Green House Gases)** prodotti dalle industrie

Entrambe le tecnologie utilizzano come reagente “anidride carbonica”, diventando così tecnologie CCU (Carbon Capture and Utilisation) finalizzate a ridurre l'emissione di gas serra da impianti industriali

Gli impianti sviluppati rispondono ai moderni principi di Circular Economy perché consentono di ottenere dei prodotti riutilizzabili direttamente nel ciclo di provenienza – in particolare il bicarbonato di sodio - , sposando anche il principio del **recupero a km.0** (ovvero riutilizzare le sostanze recuperate nelle immediate vicinanze del sito di produzione).



I brevetti di Wa.Tre.Co.

La società Wa.tre.co. nasce dallo sviluppo di processi, poi brevettati per effettuare:

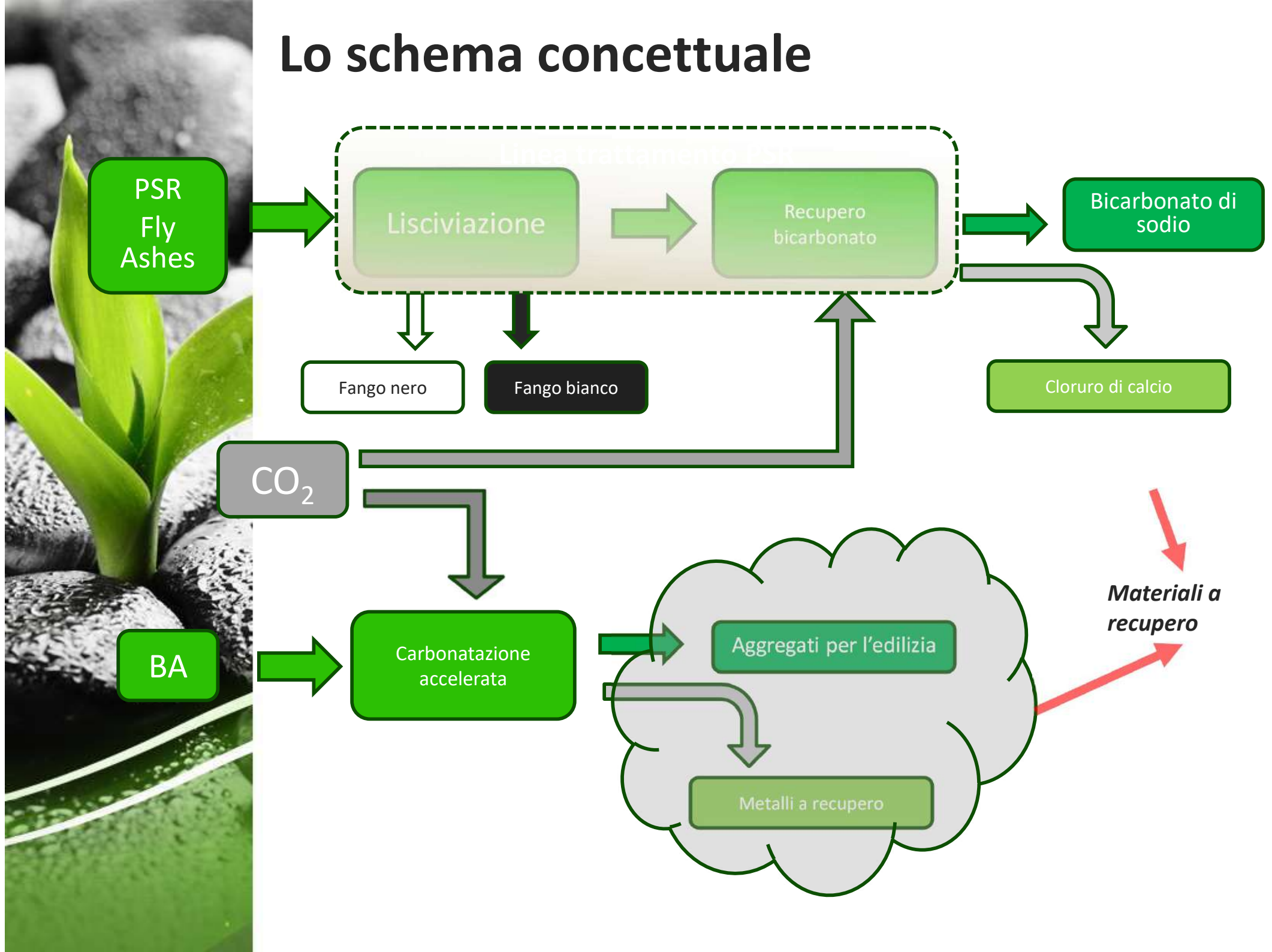
- ✓ Il trattamento di **carbonatazione delle polveri PSR e delle Fly ashes**; questo trattamento ha il principale scopo di ridurre la pericolosità e garantire il **recupero del bicarbonato** da reimmettere nel ciclo di trattamento dei termovalorizzatori.
- ✓ Il trattamento di **carbonatazione accelerata delle scorie** consente di diminuirne il pH e agevolarne la recuperabilità ottenendo delle matrici inerti;

Lo sviluppo dei processi ha seguito lo sviluppo di **modelli concettuali** con la collaborazione e validazione dell'Università di Pisa.

A seguire è stata eseguita la **progettazione** di impianti industriali con il fondamentale ausilio di studi di progettazione noti a livello internazionale.

La modellazione dei processi è stata affiancata da una prolungata e approfondita fase di **sperimentazione in campo** con l'ausilio di impianti pilota, che ha peraltro portato alla revisione dei brevetti consentendo di ottenerne dei nuovi secondo i processi ottimizzati.

Lo schema concettuale



A vertical photograph on the left side of the slide shows a small, vibrant green plant with several leaves growing out of a cluster of dark, wet, porous rocks. The background is blurred, showing more of the same rocks and a hint of green foliage at the bottom.

Cos'è il PSR

FOCUS POINT

- Il PSR è un rifiuto pericoloso molto particolare prodotto dal trattamento dei fumi con «bicarbonato di sodio»
- La sua peculiarità risiede nell'elevata percentuale di **Sali solubili**, che ne rende complicatissima ed estremamente onerosa la fase di smaltimento
- Ad oggi questi rifiuti possono essere avviate in discariche con deroghe (sempre più rare) sugli scarichi dei «cloruri» oppure nelle miniere di salgemma in Germania (anche questa opzione si sta restringendo)
- Nel prossimo futuro sono facilmente prevedibili difficoltà via via crescenti per una collocazione di tali tipologie di rifiuti

Il trattamento del PSR – l'impianto pilota



20.11.2012

Il trattamento del PSR – il bilancio di massa

ACRONIMO	OGGETTO	INPUT				OUTPUT			
		t/y		t/d		t/y		t/d	
PSRi	Quantità PSR input	t/y	7.500	t/d	25,00				
Wi2	Quantità H2O industriale input	t/y	4.734	t/d	15,78				
At2	Quantità additivi (solfuro di sodio, solfato ferroso, ecc..) input	t/y	173	t/d	0,58				
F1	Fango nero dopo FP1 al 40% di umidità					t/y	2.813	t/d	9,38
F1B	Fango bianco (CaSO4, CaCO3) dopo FP1 al 40% di umidità					t/y	1.403	t/d	4,68
WF1	Quantità H2O demineralizzata per lavaggio FP1	t/y	2.063	t/d	6,88				
C2	Quantità CO2 input colonna di assorbimento NH3	t/y	663	t/d	2,21				
C3	Quantità CO2 input colonna di carbonatazione	t/y	1.775	t/d	5,92				
WF2	Quantità H2O demineralizzata per lavaggio FP2	t/y	1.902	t/d	6,34				
B	Produzione di bicarbonato al 20% di umidità					t/y	4.047	t/d	13,49
CaO	Quantità CaO input reattore recupero NH3	t/y	2.351	t/d	7,84				
NHR	Reintegro NH3	t/y	71	t/d	0,24				
F3	Fango post strippaggio (CaCO3) umido					t/y	319	t/d	1,06
CaCl1	Soluzione CaCl2 concentrata a stoccaggio					t/y	5.380	t/d	17,93
NaCl	Recupero NaCl da precipitazione con CaCl2					t/y	1.963	t/d	6,54
W3	Quantità H2O distillata prodotta da evaporatore soluzione CaCl2					t/y	5.307	t/d	17,69
		t/y	21.232	t/d	71	t/y	21.232	t/d	71
BS	Produzione di bicarbonato al 0,1% di umidità					t/y	3.242	t/d	10,81
FS1	Fango nero dopo essiccazione al 20% di umidità					t/y	2.110	t/d	7,03
FS1B	Fango bianco dopo essiccazione al 20% di umidità					t/y	1.122	t/d	3,74



Cosa sono le ceneri pesanti (o scorie)

- Le ceneri pesanti (o scorie) nei termovalorizzatori moderni sono circa il 15-20% dei rifiuti solidi prodotti (nei forni a letto fluido le percentuali sono inferiori)
- Generalmente sono rifiuti non pericolosi, salvo rare eccezioni
- Esse hanno un grande potenziale di recupero dovuto alla presenza di materiale ferroso (6-10 %), metalli non ferrosi (in particolare alluminio ca. 1-2 %) e di silico-alluminati di calcio, magnesio e ferro.
- La matrice è molto simile a quella delle rocce eruttive come il basalto o i graniti ma con concentrazione superiore di metalli. Si evidenzia una fase scoriacea poco densa ed una vetrosa



Le criticità del recupero delle scorie

Le scorie, sebbene siano rifiuti non pericolosi, mantengono una serie di criticità residue che obbligano ad un loro trattamento per trasformarle in «end of waste»:

- La scoria tal quale ha valori di pH tra 11,5 e 13,0
- la presenza di sali solubili (Cloruri, Solfati) spesso ne impedisce la destinazione al recupero
- Sono presenti metalli pesanti che non consentono di superare i test di «cessione»



Il processo di carbonatazione accelerata

- Le scorie subiscono una “carbonatazione naturale” per esposizione all’aria in cumuli di opportuna geometria per un periodo variabile che si può spingere anche fino a 4 mesi fino all’ottenimento di un pH compreso tra 9,00 e 10,00.
- La CO_2 , presente naturalmente nell’aria, reagisce con gli ossidi e idrossidi presenti nella scoria dando origine a carbonati e acqua («**mineralizzazione**»)
- La “**carbonatazione accelerata**”, avviene con reazione tra CO_2 pura iniettata in una miscela scoria/acqua.
- La grande mole di lavoro sperimentale presa a riferimento nel presente progetto ha consentito di trovare le migliori condizioni di rapporto di miscelazione scoria/acqua, dosaggio di CO_2 e tempi di reazione.
- L’acqua può provenire sia dagli spurghi di caldaia (un refluo) sia dall’acqua di spegnimento delle scorie (in questo caso un rifiuto)
- Il processo sperimentato permette di **ottenere la carbonatazione pressoché completa della scorie in un tempo compreso tra 30 e 60 minuti.**





Gli obiettivi del processo

- Partiamo dalle reazioni:
- $(Me) O + CO_2 \rightarrow (Me) CO_3$
- $(Me) (OH)_2 + CO_2 \rightarrow (Me) CO_3 + H_2O$
- I metalli più comuni presenti nelle scorie generalmente sono Ca e Mg
- Gli obiettivi primari sono convergenti e riguardano:
- A) la massimizzazione della conversione della CO_2 (mineralizzazione)
- B) la massimizzazione della presenza dei carbonati nelle scorie (riduce il Ca libero che dà alcalinità ai cementi e aumenta il rischio di fessurazioni; i metalli carbonatati sono difficilmente lisciviabili)
- C) l'ottenimento del 95% di «end of waste» conformi alle seguenti norme UNI:
 - UNI EN 13319 Aggregati per malta
 - UNI EN 12620 Aggregati per calcestruzzo
 - UNI EN 13043 Aggregati per miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade, aeroporti e altre aree soggette a traffico
 - UNI EN 13242 Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l'impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade
 - (*) L'applicazione delle norme dipenderà dal taglio granulometrico e dalle condizioni di mercato

NB. Il processo consente il rispetto dei limiti al test di cessione imposti dal Decreto «End of Waste» per materiali da C & D (DM 28 giugno 2024 n. 12)

Il processo di carbonatazione accelerata – schema generale





I vantaggi della “carbonatazione accelerata”

- Processo veloce (circa 30 minuti)
- Condizioni di carbonatazione controllate (regolazione del dosaggio e dei parametri): standardizzazione del processo
- Minori movimentazioni rispetto alla carbonatazione lenta
- Minori necessità di utilizzare mulini, granulatori ecc
- Riduzioni degli spazi rispetto alla carbonatazione lenta
- L'applicazione all'interno di un impianto esistente consente di utilizzare le sue «facilities» e «commodities»
- Nascono ulteriori sinergie (utilizzo di acqua di recupero)



CCU della CO₂

Diversamente da tecnologie di CCS (Carbon Capture and **Storage**) quelle CCU (Carbon Capture and Utilisation) si differenziano nella fase finale, dopo la cattura da fonti di emissione. Ad oggi tecnologie consolidate di «utilisation» consentono di:

- ✓ Intercettare la CO₂ prima che venga rilasciata nell'atmosfera
- ✓ Sostituire processi ad alta emissione con alternative più sostenibili
- ✓ Fornire nuove fonti di energia e materiali a impatto ridotto
- ✓ Favorire l'economia circolare e la transizione verso un'industria più verde

Ma non riescono da sole ad avvicinarsi al «net zero emission» pertanto devono integrarsi con tecnologie CCS, meno nobili.

Le tecnologie Watreco consentono di applicare l' «assorbimento» della CO₂ a quelle industrie ad alte emissioni di GHG utilizzandone i prodotti di scarto

Grazie per l'attenzione!

**Tecnologie di cattura e riuso della CO₂ nei
rifiuti decadenti da impianti di
termovalorizzazione**

Roma, 10 marzo 2026

Ing. A. Giardiello

Wa.tre.co. S.r.l.

Mail: a.giardiello@watreco.it

Cell. +39 388 3621275

