

Economia Circolare e Simbiosi Industriale in una recente analisi dei progetti europei rilevanti relativi all'industria siderurgica

V. Colla , T. A. Branca , A. Morillon , D. Algermissen , H. Granbom, S. Rosendahl , U. Martini , R Pietruck , D. Snaet

Il settore siderurgico è fortemente impegnato nella gestione sostenibile dei suoi sottoprodotti, al fine di ridurre lo sfruttamento delle risorse naturali, il suo impatto ambientale e quindi raggiungere l'obiettivo "rifiuti zero" ("zero waste"). All'interno di un progetto di disseminazione finanziato dall'Unione Europea, è stata svolta una analisi dei risultati dei più rilevanti progetti europei incentrati sul riutilizzo e il riciclo dei sottoprodotti del settore siderurgico sia internamente che in altri settori industriali, secondo i principi dell'Economia Circolare e della Simbiosi Industriale. In questa memoria, che riassume una parte del lavoro svolto in tale progetto, viene fornita una visione globale dei principali risultati raggiunti dall'industria siderurgica europea su questo tema e le sinergie con altri settori industriali. In particolare, è stato analizzato l'impatto dei risultati delle ricerche innovative, tenendo conto di alcuni aspetti significativi, quali il livello raggiunto di applicazione pratica e di valore, inclusi gli aspetti economici e ambientali nonché le ragioni del totale o parziale raggiungimento degli obiettivi del progetto. Inoltre sono stati individuati i eventuali ostacoli al pieno sfruttamento dei risultati conseguiti nei progetti analizzati ed i possibili approfondimenti da sviluppare in futuro.

PAROLE CHIAVE: SETTORE SIDERURGICO, SOTTOPRODOTTI, RICICLO, RIUSO, ECONOMIA CIRCOLARE, SIMBIOSI INDUSTRIALE, RIFIUTI ZERO;

INTRODUZIONE

Nel 2018 in Europa (UE28) sono state prodotte 167,7 milioni di tonnellate di acciaio grezzo, di cui 98,6 milioni di tonnellate (58,2%) tramite il ciclo integrale e 69,1 milioni di tonnellate (41,8%) attraverso il ciclo del forno elettrico basato sul rottame [1].

A livello mondiale, circa il 32,9% della produzione delle acciaierie è costituita da sottoprodotti, che includono le scorie, le polveri e i fanghi, i gas e altri materiali, che possono essere utilizzati internamente o esternamente in diversi processi [2]. Nel contesto europeo, l'European Waste Framework Directive 2008/98/CE (2018) [3] si basa sul concetto di Economia Circolare (EC) con le seguenti priorità:

- la prevenzione della produzione di residui rispetto al recupero dei rifiuti;
- lo smaltimento come ultima alternativa.

Nell'Unione Europea (UE) nel 2018 sono state prodotte circa 46 milioni di tonnellate di scorie, polveri e fanghi, scaglia di laminazione e refrattari esauriti [4][5][6][7][8]. La maggior parte dei sottoprodotti è costituita dalle sco-

Valentina Colla, Teresa Annunziata Branca

TeCIP Institute, Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa, Italy

Agnieszka Morillon, David Algermissen

FhS Institut für Baustoff Forschung e.V., Germany

Hanna Granbom, Sara Rosendahl

Swerim, Sweden

Umberto Martini

RINA Consulting Centro Sviluppo Materiali S.p.A., Italy

Roland Pietruck

VDEh Betriebsforschungsinstitut GmbH, Germany

Delphine Snaet

European Steel Technology Platform, Belgium

rie (circa il 77%). Il rimanente 23% comprende le polveri e i fanghi provenienti da impianti di depurazione dei gas (15%), mentre la scaglia rappresenta il 2% e il materiale refrattario il 7%. L'esigenza industriale è quella di valorizzare i sottoprodotti e i residui sia nel processo di produzione dell'acciaio che come materie prime tramite attività di Simbiosi Industriale (SI) o uso interno a cascata, per diversi motivi [9]:

- l'inasprimento della legislazione ambientale, con l'obiettivo di ridurre ed evitare lo smaltimento in discarica;
- l'alto contenuto di ossidi di ferro e di metalli, che rende i residui pregiati come materia prima;
- le proprietà chimiche e fisiche, che consentono il riutilizzo di residui e sottoprodotti di acciaieria in altri settori o contesti.

Una migliore conoscenza della formazione, composizione e proprietà fisiche dei sottoprodotti è fondamentale per aumentare il loro riutilizzo sia all'interno che in altri settori. Ad esempio, la conoscenza delle composizioni di fase e, di conseguenza, l'applicazione di metodi di stabilizzazione ad hoc rendono le scorie idonee al loro riutilizzo e/o allo smaltimento degli inerti [10]. Per quanto riguarda il riciclo interno di alcuni sottoprodotti, un esempio è costituito dal loro utilizzo nel processo di pellettizzazione, che tiene conto del raggiungimento non solo di un'elevata qualità del pellet ma anche della riduzione degli impatti ambientali e dei costi operativi [11]. D'altro canto, impieghi innovativi di sottoprodotti in altri settori industriali sono oggetto di continua investigazione. Ad esempio, l'uso dei sottoprodotti come fertilizzanti in agricoltura rappresenta un mezzo efficace per migliorare la qualità del suolo, aumentare i raccolti e mitigare gli im-

patti ambientali, generando allo stesso tempo una nuova fonte di reddito [12]. Esperimenti condotti in diverse condizioni pedologiche e ambientali e in diversi sistemi colturali hanno anche rivelato che i metalli pesanti/metalloidi accumulati nel suolo e il loro assorbimento da parte delle piante non sono coerenti con l'applicazione di scorie e/o fertilizzanti a base di scorie, che si accumulano principalmente nelle radici ed hanno un livello molto basso di traslocazione nei cereali/frutti. Inoltre, l'utilizzo della scoria da convertitore ad ossigeno in terreni con un'elevata concentrazione di sodio è stato valutato in termini del suo effetto benefico sulla crescita del pomodoro, grazie agli ioni Ca forniti dalla scoria, portando ad una maggiore resa di pomodoro [13].

La presente memoria deriva da una parte del lavoro preliminare sviluppato nel progetto di REUSteel, co-finanziato dal Research Fund for Coal and Steel (RFCS). Lo scopo del progetto consiste nell'identificare, organizzare, combinare e integrare i risultati più rilevanti e promettenti di un gran numero di progetti finanziati dalla UE, sia precedenti che in corso, incentrati sul riutilizzo e il riciclo di sottoprodotti provenienti dal ciclo siderurgico, nonché sullo sfruttamento dei sottoprodotti provenienti da altri settori industriali nel settore siderurgico, come fonti alternative di carbonio (es. biomasse e plastica). La Figura 1 illustra le classi di sottoprodotti trattate nel progetto REUSteel ed il numero dei progetti ad essi inerenti oggetto della analisi critica integrata. La analisi è funzionale allo sviluppo di una roadmap per la ricerca futura, che promuova la valorizzazione dei risultati e rafforzi le sinergie con altri settori industriali, secondo i concetti di EC e SI [14].



Fig.1 - Sottoprodotti trattati nei progetti analizzati / by-products treated within the analysed projects.

METODOLOGIA

I progetti analizzati sono stati preliminarmente classificati per ricavarne le informazioni generali potenzialmente trasferibili e applicabili ad altri contesti industriali, evitando sovrapposizioni, duplicazioni e aspetti irrilevanti. È stato necessario aggregare una grande varietà di risultati provenienti dai vari progetti in un numero limitato di classi. I risultati considerati di interesse sono stati organizzati in sotto temi, ognuno dei quali rappresenta un argomento generale: il riciclo interno delle scorie, la valorizzazione delle scorie al di fuori del ciclo di produzione dell'acciaio, l'estrazione di materiale pregiato da rifiuti e acque reflue, riciclo interno ed esterno di sottoprodotti contenenti Fe diversi dalle scorie, nonché di sottoprodotti con altri contenuti pregiati come metalli, carbone e calce (ad es. fonti C alternative e /o generazione di materie prime secondarie per lo scambio in attività di SI e possibilità di EC), soluzioni di integrazione dei processi per la gestione, la modellazione e la simulazione dei sottoprodotti. Per ogni classe sono stati selezionati alcuni risultati significativi facilmente riconoscibili. Successivamente, sono stati valutati nel dettaglio i risultati dei progetti. Per la selezione i progetti precedenti e in corso da analizzare approfonditamente fra quelli disponibili, sono stati utilizzati i seguenti criteri:

- Rilevanza per il progetto REUSteel, ovvero contributo al riutilizzo e al riciclo dei sottoprodotti rilevanti per l'industria siderurgica:
 - o Riciclo interno delle scorie
 - o Valorizzazione delle scorie al di fuori del ciclo produttivo dell'acciaio
 - o Estrazione di materiale pregiato da rifiuti e acque reflue
 - o Riciclo interno ed esterno di sottoprodotti Fe-bearing diversi dalle scorie
 - o Riciclo interno ed esterno di sottoprodotti con altri contenuti utili e pregiati come metalli, carbone e calce
 - o Eliminazione degli elementi nocivi
 - o Minimizzazione della produzione di rifiuti e discariche
 - o Soluzioni di integrazione dei processi per la gestione dei sottoprodotti
 - o Modellazione e simulazione

La Fig.2 riassume i risultati di questa classificazione ed il corrispondente numero dei progetti disponibili.

- Tempo di completamento, cioè in relazione all'attualità e all'evoluzione delle normative, alle tematiche inerenti la sostenibilità, ecc.;
- Possibilità di reale attuazione dei risultati



Fig.2 - View of the control system including on-line solidification model coupled with relevant detections.

È stata inoltre effettuata una classificazione per tipo di sottoprodotti in scorie, fanghi e polveri, scaglie, refrattari, altri sottoprodotti (all'interno dell'acciaieria), materie prime secondarie (al di fuori dell'acciaieria).

In base al tipo di sottoprodotto indagato, sono stati presentati gli obiettivi e le idee investigate, per individuare analogie fra gli argomenti investigati. Per i progetti che trattano più di un sottoprodotto, gli obiettivi e le idee og-

getto di studio sono stati analizzati e presentati per ciascun sottoprodotto.

I progetti sono stati analizzati e sono state raccolte le informazioni rilevanti su:

- Tipo di sottoprodotto (es. scorie, polveri, fanghi)
- Durata del progetto
- Impiego (riguardante il riutilizzo dei materiali all'interno o all'esterno della produzione di acciaio. Sono stati considerati anche casi di simbiosi industriale).
- Obiettivo del progetto (es. scorie utilizzate come filtro o fertilizzante, Zinco ad elevata purezza per il riutilizzo da polveri siderurgiche, ecc.)
- Idee di base oggetto di investigazione (tecnologie, processi, nuove pratiche operative, ecc.)
- Test effettuati (attività sperimentale sviluppata)
- Principali risultati (include tecniche, processi, ecc.)
- Successi (risultati di maggior successo)
- Fallimenti (es. risultati attesi non completamente raggiunti).
- Technology readiness levels (TRL) raggiunto
- Eventuale proseguimento
- Argomenti non chiari
- Idee interessanti che potrebbero essere ulteriormente approfondite
- Valutazione economica
- Valutazione ambientale

RISULTATI PRELIMINARI

Al fine di preparare una roadmap per il riutilizzo e il riciclo dei sottoprodotti nel settore siderurgico (che esula dai contenuti di questo articolo), sono stati inizialmente identificati l'attuale produzione industriale e l'utilizzo di sottoprodotti e residui, quale base per future attività di ricerca. Sono state identificate le esigenze industriali dell'industria siderurgica nel lungo periodo, le principali tendenze tecnologiche (quali Carbon Direct Avoidance (CDA) Smart Carbon Usage (SCU)), le sfide e le barriere (barriere strutturali, quadro normativo europeo e nazionale), esigenze della ricerca (riutilizzo e riciclo dei sottoprodotti). L'analisi preliminare qui riportata riguarda alcuni esempi di sottoprodotti, quali scorie, polveri e fanghi, che sono quelli prodotti in maggiore quantità nei processi siderurgici. Tra le opportunità, viene considerata anche

l'applicazione di tecnologie di mitigazione della CO₂ e di strumenti di modellazione e simulazione nella gestione dei sottoprodotti.

Utilizzo industriale delle scorie

Nel 2018 in Europa sono state prodotte 19,2 milioni di tonnellate di scorie di altoforno e 15,7 milioni di tonnellate di scorie da forni per la produzione di acciaio [4]. Le scorie d'altoforno comprendono la scoria granulata e la scoria raffreddata ad aria. Le scorie di acciaieria comprendono le scorie di convertitore ad ossigeno, le scorie di forni ad arco elettrico e le scorie di metallurgia secondaria (comprese la scoria del forno a siviera, scoria da degasaggio sottovuoto, scoria da decarburazione con ossigeno argon e scoria da decarburazione con ossigeno sottovuoto).

Il tasso di utilizzo delle scorie può dipendere dal tipo di scoria, dal paese o dalla singola struttura siderurgica. Nel 2018 tutte le scorie di altoforno sono state utilizzate in Europa come additivo di cemento/calcestruzzo, nella costruzione di strade o in altre applicazioni. Circa il 73% delle scorie di acciaieria è stato utilizzato nell'aggiunta di cemento/calcestruzzo, nella costruzione di strade, nell'ingegneria idraulica, nei fertilizzanti, nell'uso metallurgico o in altre applicazioni. Sebbene alcune applicazioni siano già disponibili, ciò non significa che l'acciaieria sia in grado di utilizzare tutte le scorie. Questo dipende dalle proprietà chimiche e fisiche delle scorie, dalle applicazioni disponibili entro una distanza accettabile (costi di trasporto), dai costi di utilizzo rispetto ai costi di conferimento in discarica, dalla mancanza o presenza di limiti legislativi.

Per quanto riguarda l'identificazione delle sfide future per il riuso e il riciclo delle scorie, le principali barriere non tecniche per l'utilizzo delle scorie sono rappresentate dalle normative vigenti o dalla mancanza di normative nei diversi paesi che impediscono il loro utilizzo, ma anche dalla disomogeneità delle normative all'interno dell'Europa, che impediscono il trasferimento di determinate soluzioni da un paese all'altro. Inoltre, si prevede un aumento della disponibilità di rottame in futuro. Il previsto aumento della produzione di acciaio dal ciclo elettrico si tradurrà in una maggiore produzione di scorie di diverse qualità. Pertanto, sarà necessario investigare nuovi utilizzi

delle scorie del ciclo elettrico e nuove procedure di trattamento di queste scorie, al fine di ottenere la composizione e il comportamento di lisciviazione desiderati. In un prossimo futuro in Europa è prevista anche una crescente diffusione dell'utilizzo dell'idrogeno per ridurre il minerale di ferro, attraverso una riduzione diretta per alimentare il forno elettrico. Questo porterà alla produzione di scorie con caratteristiche potenzialmente diverse da quelle prodotte nei processi convenzionali. Quindi la ricerca futura dovrà investigare nuovi percorsi di utilizzo di questo tipo di scorie.

Utilizzo industriale di polveri, fanghi e scaglia di laminazione

Polveri e fanghi provengono principalmente dai sistemi di abbattimento dei gas e degli scarichi delle acque reflue presenti in vari processi di produzione di ghisa e acciaio. Negli ultimi anni sono stati realizzati notevoli miglioramenti riducendo il livello dei materiali conferiti in discarica, poiché tali residui vengono trattati internamente, durante il processo di produzione dell'acciaio.

Nel 2018 l'istituto FEhS (FEhS-Institut für Baustoff-Forschung e.V.) di Duisburg ha svolto un'indagine sulla presenza e l'utilizzo di polveri, fanghi e scaglie di laminazione dell'industria siderurgica. 27 impianti in Germania, Paesi Bassi e Austria hanno contribuito a questa raccolta di dati [5]. Mentre circa l'80% delle polveri e dei fanghi delle ac-

ciaierie viene inviato al riciclo interno o utilizzato per altri scopi, oltre il 18% all'anno viene ancora smaltito in discarica. Sulla base dei dati sulla produzione di polveri e fanghi dei 27 impianti di ciclo integrale ed elettrico e della produzione europea annua di acciaio grezzo nel 2018 (pari a 167,7 milioni di tonnellate), la quantità di fanghi e polveri è stata stimata in 6,8 M ton/anno in Europa [15].

La scaglia viene prodotta durante il riscaldamento delle bramme nei forni a spinta o nei forni a suola mobile (scaglia primaria). Alle alte temperature dei forni di riscaldamento (> 1.200°C), la superficie di ferro delle lastre di acciaio reagisce con l'ossigeno atmosferico formando ossido di ferro (II)/(III) (incrostazione). La scaglia risultante durante il processo di laminazione viene definita scala secondaria [16]. La quantità specifica di scaglia secondaria generata durante la produzione dell'acciaio è compresa tra 2 e 8 kg per tonnellata di acciaio grezzo, mentre la quantità totale è compresa tra 0,3 e 1,3 milioni di tonnellate all'anno.

La sfida tecnologica sul riutilizzo di polveri e fanghi deriva dalla loro composizione, che, come mostrato in Tabella 1, è molto eterogenea. Oltre alle polveri secche, vengono utilizzati fanghi fluidi. Ci sono anche forti differenze nel contenuto di carbonio. Il contenuto di zinco varia tra valori minori di 1% e valori a due cifre. I residui contengono elevate quantità di composti di zolfo e cloro, nonché di metalli come rame e cromo.

Tab.1 - Composizione di polveri, fanghi, scaglia / dusts, sludges and mill scale compositions.

Composizione di varie polveri, fanghi e scaglia									
	H2O	Fe	Zn	C	CaO	Cr	Cu	S	Cl
Polvere 1 (Convertitore)	7	61	1,5	1,3	6	0,03	0,02	0,2	0,3
Polvere 2 (Convertitore)	0	45	13	0,9	18	0,03	0,02	0,04	0,3
Fanghi (Altoforno)	40	21	3,7	41	3	n.b.	n.b.	1,5	0,2
Scaglia di laminazione	13	69	0,02	0,8	0,6	0,2	0,04	0,05	n.b.

Altri sottoprodotti considerati nel progetto

I refrattari vengono utilizzati negli impianti siderurgici per scopi diversi e includono classi ad alto tenore di allumina, magnesitiche, dolomitiche e silico-alluminose, a seconda dell'impianto in cui vengono impiegate.

La produzione globale annuale di refrattari è di circa 35-40

milioni di tonnellate, con fluttuazioni che dipendono dalla domanda del mercato dell'acciaio, che rappresenta il 60-70%. Nei paesi dell'UE l'industria dei refrattari ha fornito un totale di 4,3 milioni di tonnellate di prodotti e per l'industria siderurgica di 2,6 -3,0 milioni di tonnellate [17][18]. I refrattari esauriti vengono utilizzati come condizionatori

delle scorie siderurgica [19], aggiungendo calce metallurgica dolomitica, per ridurre la corrosione dei refrattari a base di MgO utilizzati per il rivestimento della parte interna del forno elettrico ad arco [20].

Nel progetto REUSteel sono stati considerati anche materiali di risulta provenienti da altre industrie e attività, che possono essere utilizzati come materie prime secondarie all'interno dell'acciaiera. Esempi di tali materiali sono le fonti di carbonio alternative (ad es. biomasse provenienti da diverse fonti, come la silvicoltura, l'agricoltura e le industrie del legno, e le plastiche) e il materiale residuo dall'industria dei metalli di base.

Tecnologie di mitigazione della CO₂

La riduzione dell'intensità di CO₂ delle industrie ad alta intensità energetica, compreso il settore siderurgico, è fondamentale per raggiungere gli obiettivi dell'accordo di Parigi [21] e gli obiettivi climatici dell'UE [22]. L'industria siderurgica europea ha già ridotto le emissioni del 26% dal 1990, grazie a miglioramenti dell'efficienza energetica e del riciclo. Nonostante l'impegno a ridurre le emissioni di CO₂ dalla produzione fino al 50% entro il 2030 rispetto al livello degli anni '90 tramite lo sviluppo ed il potenziamento tecnologico, il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050 richiederà cambiamenti radicali nei processi di produzione dell'acciaio. Esistono due principali percorsi tecnologici per la riduzione di CO₂: SCU e CDA. Entrambi mirano di ridurre sostanzialmente l'uso del carbone rispetto agli attuali processi di produzione dell'acciaio o di evitare del tutto le emissioni di carbonio [23].

Come elaborato nel progetto Greensteel [24], nel breve periodo (fino al 2030/35) è previsto che alcune tecnologie di integrazione dei processi e "Carbon Capture and Storage" (CCS), basate sul ciclo integrale convenzionale, raggiungano la diffusione industriale, così come alcune tecnologie su "Utilization of the Captured CO₂" (CCU) (ad es. Metanolo, produzione di etanolo). Inoltre, è previsto anche l'avvio della trasformazione della produzione siderurgica primaria verso il percorso basato sulla riduzione diretta con idrogeno (DR/EAF). Tuttavia, dal percorso DR/EAF si formeranno nuove polveri o fanghi dall'impianto DR, ad esempio, polveri con un basso contenuto di zinco a causa dell'assenza di materie prime contenenti zinco. Le scorie prodotte in questo processo differiranno molto dalle attuali scorie d'altoforno, per le quali l'utilizzo

nell'industria del cemento è ben consolidato. Per consentire un ulteriore utilizzo delle scorie nel settore cementizio o edile, sarà necessario un adeguamento delle scorie dei forni elettrici di nuova produzione.

Strumenti di modellazione, simulazione, monitoraggio ed ottimizzazione

Un monitoraggio e un controllo costante e accurato dei processi produttivi è fondamentale per migliorare la qualità e le caratteristiche sia dei prodotti che dei sottoprodotti, incrementare il riutilizzo e il riciclo di questi ultimi, e supportando una gestione ottimale dei flussi di materiale. In questo contesto, la modellazione e la simulazione possono supportare efficaci analisi di scenario, ai fini di una valutazione preliminare di soluzioni innovative per il pretrattamento e la valorizzazione dei materiali residui. È inoltre fondamentale integrare approcci fisici alla modellazione con tecniche di Intelligenza Artificiale (IA) e Machine Learning (ML), per sfruttare congiuntamente la conoscenza dei processi e il volume sempre crescente di dati raccolti nelle acciaierie. Ad esempio, le tecniche di IA e ML possono supportare la caratterizzazione dei materiali e dei sottoprodotti, mentre gli strumenti avanzati di modellazione, controllo e ottimizzazione dei processi possono consentire l'adattamento di singoli processi e dell'intera catena produttiva, nonché della gestione e della logistica.

Infine, nel settore siderurgico si osserva un'implementazione sempre crescente di sistemi digitali che mostrano un forte potenziale per migliorare la flessibilità e l'affidabilità dei processi. Il monitoraggio e il controllo avanzati consentono una migliore gestione delle risorse dell'impatto ambientale, della qualità e della produttività. In particolare, nel breve periodo, miglioramenti verranno acquisiti con strumenti innovativi di ottimizzazione multicriterio (supportati anche dall'IA), e, nel medio termine, attraverso la combinazione di strumenti di ottimizzazione con il controllo in tempo reale, per consentire una reazione immediata alle mutevoli condizioni dei processi e una maggiore flessibilità rispetto a fattori esterni variabili. Infine, nel lungo periodo, si prevede l'applicazione industriale e la dimostrazione dell'ottimizzazione in tempo reale dell'intero processo, considerando tutti i flussi di materiale.

CONCLUSIONI

I risultati preliminari del progetto REUSteel mostrano che, al fine di migliorare i tassi di riutilizzo e recupero in modo sostenibile, dal punto di vista ambientale e economico, è fondamentale sia aumentare la qualità dei sottoprodotti recuperati che sviluppare e implementare nuove soluzioni tecnologiche per ottenere tale qualità superiore. Questo consentirà di avvicinare il settore siderurgico verso l'obiettivo "rifiuti-zero". Per questo motivo il futuro dell'industria siderurgica è strettamente legato alla sua innovazione ed all'implementazione di nuove soluzioni tecnologiche, che contribuiranno alla riduzione degli impatti sull'ambiente.

Tra i vari strumenti tecnologici, la modellazione e la simulazione mostrano un potenziale rilevante per sostenere il miglioramento dell'efficienza energetica e dei materiali contribuendo alla sostenibilità ambientale ed economica del settore siderurgico e consentendo e rafforzando la cooperazione con altri settori industriali. Queste tecnologie permettono una gestione efficiente delle risorse consentendo un riutilizzo e un riciclo intensificato dei materiali di risulta, e possono fornire agli operatori strumenti di facile utilizzo per supportare le pratiche di EC e SI.

Inoltre, rispetto alle problematiche legate al riuso e riciclo dei sottoprodotti, è necessario condurre ricerche non solo su nuovi percorsi di utilizzo ma anche sulle loro quantità crescenti (ad esempio di scorie) per i percorsi di

utilizzo attualmente disponibili. Questo può intensificare la cooperazione intersettoriale per l'attuazione dei concetti di SI e EC in diversi settori industriali e alla creazione di una rete che faciliti lo scambio di sottoprodotti e flussi di energia non recuperati. Tutto ciò si tradurrà in una riduzione del materiale conferito in discarica e delle emissioni di CO₂, con passi progressivi verso la neutralità della CO₂ attraverso un uso più intelligente delle fonti di carbonio, e migliorando la conservazione delle risorse naturali salvaguardando i profitti e la competitività dell'industria siderurgica Europea.

RINGRAZIAMENTI

Il lavoro descritto nel presente lavoro è stato sviluppato nell'ambito del progetto intitolato "Dissemination of results of the European projects dealing with reuse and recycling of by-products in the steel sector," (Rif. REU-Steel, Grant Agreement No. 839227)", co-finanziato dal Research Fund for Coal and Steel (RFCS) dell'Unione Europea, a cui vanno i nostri ringraziamenti. La responsabilità dei temi trattati nel presente lavoro è unicamente degli autori; la Commissione non è responsabile dell'uso che potrà essere fatto delle informazioni qui contenute.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rieger J, Colla V, Matino I, Branca TA, Stubbe G, Panizza A, Brondi C, Falsafi M, Hage J, Wang X, Voraberger B, Fenzl T, Masaguer V, Faraci EL, di Sante L, Cirilli F, Loose F, Thaler C, Soto A, Frittella P, Foglio G, di Cecca C, Tellaroli M, Corbella M, Guzzon M, Malfa E, Morillon A, Algermissen D, Peters K, Snaet D. Residue Valorization in the Iron and Steel Industries: Sustainable Solutions for a Cleaner and More Competitive Future Europe. *Metals* 2021;11(8):1202. doi: 10.3390/met11081202.
- [2] World Steel in Figures 2021. Available from: <https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2021/world-steel-in-figures-2021-now-available/>
- [3] Directive 2008/98/EC of The European Parliament And of The Council on Waste and Repealing Certain Directives. *Official Journal of the European Union*, L312, pp. 3–30.
- [4] Euroslag. Euroslag Statistics 2018. Available from: <https://www.euroslag.com/products/statistics/statistics-2018/>
- [5] Drissen P. Aufkommen und Verbleib von Stuben, Schlemmen und Walzzunder der Eisen- und Stahlindustrie, Report. *Wissenschaftsprojekte des FEHS-Instituts* 2019;2: 13–17.
- [6] Rieger J, Schenk J. Residual Processing in the European Steel Industry: A Technological Overview. *Journal of Sustainable Metallurgy* 2019; 5: 1–15. doi: 10.1007/s40831-019-00220-2.
- [7] Jankovits E, Africa VP, Chetlapalli S, Cappel J. High Value added Refractories for high Quality Steelmaking. 2016:13.
- [8] Buhr A, Bruckhausen R, Fahndrich R. The steel industry in Germany—trends in clean steel technology and refractory engineering. *refractories WORLDFORUM*. 2016;8(1):57-63.
- [9] ESTEP. Strategic Research Agenda (SRA). Sep. 2017. Available from: <https://www.estep.eu/assets/SRA-Update-2017Final.pdf>
- [10] Branca TA, Colla V, Valentini R. A way to reduce environmental impact of ladle furnace slag. *Ironmaking & Steelmaking*. 2009 Nov 1;36(8):597-602.

- [11] Matino I, Colla V, Branca TA, Romaniello L. Optimization of by-products reuse in the steel industry: valorization of secondary resources with a particular attention on their pelletization. *Waste and Biomass Valorization*. 2017 Dec; 8(8):2569-81.ilmn
- [12] Das S, Galgo SJ, Alam MA, Lee JG, Hwang HY, Lee CH, Kim PJ. Recycling of ferrous slag in agriculture: Potentials and challenges. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2020 Nov 22:1-35.
- [13] Pistocchi C, Ragaglini G, Colla V, Branca TA, Tozzini C, Romaniello L. Exchangeable Sodium Percentage decrease in saline sodic soil after Basic Oxygen Furnace Slag application in a lysimeter trial. *Journal of environmental management*. 2017 Dec 1; 203:896-906.
- [14] Branca TA, Colla V, Algermissen D, Granbom H, Martini U, Morillon A, Pietruck R, Rosendahl S. Reuse and recycling of by-products in the steel sector: Recent achievements paving the way to circular economy and industrial symbiosis in Europe. *Metals*. 2020 Mar;10(3):345. <https://doi.org/10.3390/met10030345>
- [15] Worldsteel Association. Steel Statistical Yearbook 2019 Concise version 2019. Available from: <https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2019/2019-steel-statistical-yearbook-published/>
- [16] Thiel S, Thom -Kozmiensky E, Senk D, Wotruba H, Pretz T. Mineralische Nebenprodukte und Abfälle: Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen. 6. Neuruppin: TK Verlag, 2019.
- [17] Chetlapalli S, Cappel J. High Value added Refractories for high Quality Steelmaking.
- [18] Buhr A, Bruckhausen R, Fahndrich R. The steel industry in Germany-trends in clean steel technology and refractory engineering. *refractories WORLDFORUM*. 2016;8(1):57-63.
- [19] Horckmans L, Nielsen P, Dierckx P, Ducastel A. Recycling of refractory bricks used in basic steelmaking: A review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019 Jan 1;140:297-304.
- [20] Conejo AN, Lule RG, Lopéz F, Rodriguez R. Recycling MgO-C refractory in electric arc furnaces. *Resources, conservation and recycling*. 2006 Nov 1;49(1):14-31.
- [21] Paris Agreement. In Report of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (21st Session, 2015: Paris). Retrived December 2015 Dec (Vol. 4, p. 2017). HeinOnline.
- [22] The European Green Deal. 2019. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Available from: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf
- [23] EUROFER. Low Carbon Roadmap - Pathways to a CO₂-neutral European Steel Industry 2019.
- [24] Greensteel for Europe: Technology Assessment and Roadmapping (Deliverable 1.2) 2021: 89. Available from: <https://www.estep.eu/assets/Uploads/D1.2-Technology-Assessment-and-Roadmapping.pdf>

Circular Economy and Industrial Symbiosis in a recent analysis of the relevant European projects related to the steel industry

The steel sector is deeply committed to the sustainable management of its by-products, to reduce the natural resources exploitation, its environmental impact, and to achieve its "zero-waste" goal. Within a dissemination project funded by the European Union, an analysis was carried out of the results of the most important European projects focused on reuse and recycling of by-products of the steel sector, both internally and in other industrial sectors, according to the principles of 'Circular Economy and Industrial Symbiosis. In this paper, which summarizes part of the work carried out in this project, an overall view of the main results achieved by the European steel industry on this issue and the synergies with other industrial sectors is provided. In particular, the impact of the results of innovative research was analysed, taking into account some significant aspects, such as level of practical application and achieved value, including economic and environmental aspects as well as the reasons for total or partial achievement of project objectives. Furthermore, the eventual obstacles to the full exploitation of the results achieved in the analysed projects and the potential follow-up have been identified.

KEYWORDS: STEEL SECTOR, BY-PRODUCTS, RECYCLING, REUSE, CIRCULAR ECONOMY, INDUSTRIAL SYMBIOSIS, ZERO-WASTE;