



FASE 1– OR1: Analisi di letteratura e inquadramento tecnico-normativo

La Fase 1 ha avuto l'obiettivo di costruire una base tecnico-scientifica solida per orientare le attività sperimentali successive. Il focus è stato posto sul Plasmix, inteso come frazione residuale (plastiche miste non riciclabili meccanicamente con le tecnologie standard) generata dagli impianti di selezione della raccolta differenziata (RD). In termini operativi, il Plasmix include sia frazioni fini di vagliatura sia frazioni di termine linea (fine nastro) e/o frazioni 2D/3D non recuperate dai selettori ottici.

L'analisi ha evidenziato come, fattori di mercato e di regolazione (in particolare la crescita della RD) abbiano incrementato la disponibilità di Plasmix e la pressione sulle opzioni tradizionali di gestione. Ne deriva l'esigenza di sbocchi alternativi che privilegino il recupero di materia o l'integrazione in processi industriali esistenti, evitando la realizzazione di impianti dedicati complessi in tempi brevi. In tale quadro, oltre al recupero energetico attraverso la produzione di CSS e CSS C, la filiera siderurgica a ciclo integrale rappresenta un ambito applicativo di interesse: consente di utilizzare plastiche come fonte di carbonio e idrogeno in sostituzione parziale del coke/polverino di carbone, con potenziali benefici ambientali. La Fase 1 ha quindi investigato criteri di idoneità del materiale (composizione polimerica, tenore di cloro, presenza di metalli, granulometria e caratteristiche fisiche) e i principali vincoli operativi nei processi di cokefazione e altoforno. Gli obiettivi specifici della Fase 1 sono stati: (i) identificare le principali opzioni di gestione del Plasmix, (ii) selezionare le opzioni tecnologicamente mature e industrialmente realistiche, (iii) definire requisiti tecnici preliminari del prodotto per l'utilizzo in impianti siderurgici, (iv) impostare la cornice comparativa ambientale (carbon footprint e LCA) per valutare la convenienza complessiva.

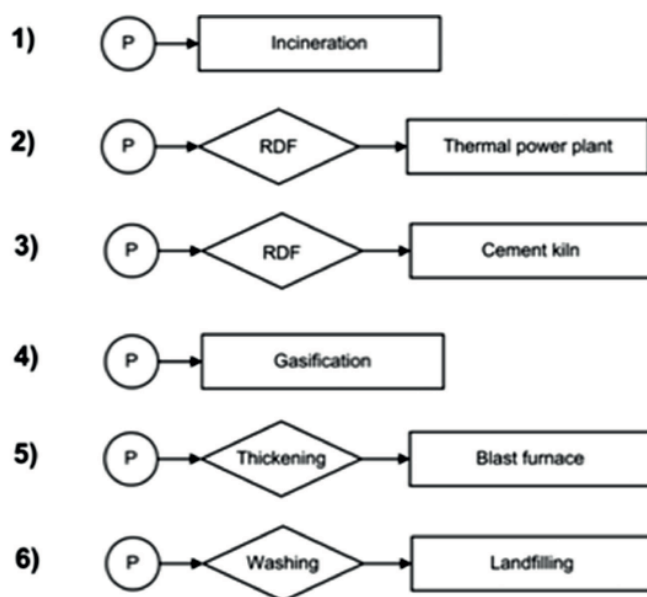
FASE 1- Review sulla gestione delle plastiche post-consumo

La review ha ricostruito il percorso di gestione delle plastiche post-consumo: raccolta, selezione, recupero dei polimeri a maggior valore (es. PET, HDPE, PP, film) e produzione dello scarto plastico eterogeneo. In condizioni ordinarie, il riciclo meccanico può valorizzare solo una quota delle frazioni raccolte; il complementare (a causa di contaminazioni, mix polimerici, multi-materiali, additivi e frazioni neutre) confluisce nel Plasmix.



Le opzioni gestionali considerate includono: termovalorizzazione, produzione di CSS e CSS C per co-combustione (cementerie o centrali), trattamenti termochimici finalizzati a riciclo chimico (pirolisi, cracking, gassificazione) e utilizzo in processi industriali come agente riducente (SRA). In termini di disponibilità e tempistiche, le opzioni che richiedono impianti dedicati (riciclo chimico in grandi scale) sono risultate più impegnative; viceversa, l'integrazione in impianti esistenti può offrire una traiettoria più rapida, a condizione di rispettare requisiti stringenti sul materiale.

Sul piano tecnico, le poliolefine (PE e PP) costituiscono spesso la frazione prevalente e più interessante per un impiego metallurgico in quanto ricche di carbonio e idrogeno e con bassa formazione di ceneri rispetto ad altre frazioni. Tuttavia, la presenza di PVC (fonte di cloro) e di frazioni estranee (cartaceo, metalli, inerti) può introdurre vincoli severi che richiedono fasi di raffinazione meccanica e controlli di qualità. Nella seguente figura si riportano le varie opzioni teoricamente percorribili per la gestione del Plasmix.



Opzioni gestione Plasmix in Italia

L'opzione 1 è quella della termovalorizzazione, mentre l'opzione 2 e 3 prevedono prima un trattamento meccanico del Plasmix per produrre CSS da utilizzare in co-combustione in centrali termoelettriche (opzione 2) o in cementerie (opzione 3). L'opzione 4 prevede un trattamento di gassificazione (o pirolisi) per la produzione di combustibile mentre l'opzione 5 prevede il trattamento del Plasmix per utilizzare il prodotto come agente riducente nei forni elettrici. L'opzione 6 prevede lo smaltimento in discarica con un pre-trattamento per diminuire le potenziali criticità connesse alla gestione del percolato.



Le opzioni 1, 2, 3, 6 (quest'ultima senza il pre-trattamento del Plasmix) sono state quelle correntemente ed esclusivamente utilizzate fino al 2017/2018: nel 2023, in particolare, il 90% del Plasmix viene utilizzato per produrre CSS utilizzato in cementerie (opzione 3) in Italia (42%) o all'estero (42%), mentre il 10% del Plasmix è avviato direttamente ai termovalorizzatori (opzione 1).

Con l'incremento delle raccolte differenziate, soprattutto in Sud Italia, il quantitativo di plastiche raccolte negli anni è aumentato: il contestuale incremento del quantitativo assoluto di plastica raccolta e della percentuale non riciclabile, hanno aumentato notevolmente e rapidamente il quantitativo di Plasmix che viene e che sarà immesso sul mercato.

A fronte di questo atteso incremento di produzione, la disponibilità impiantistica italiana per le opzioni 1,2,3,6 è rimasta immutata, anche in considerazione dell'avversione dell'opinione pubblica alla realizzazione di nuovi di impianto di trattamento, o di discariche, oltre che di mancato incremento del recupero energetico

Per tale ragione, le operazioni di recupero materia in processi non tradizionalmente sfruttati (5) o altre opzioni di trattamento termico finalizzate al riciclo chimico (4) sono progressivamente cresciute negli anni, dal 2019 al 2023 da 1,6% al 6%, sebbene ci sia ancora notevole margine di crescita.

Il presente Progetto sperimentale mira ed effettuare una valutazione delle tecnologie finalizzate a ridurre il quantitativo di Plasmix da avviare a settori tradizionali (recupero energetico o addirittura discarica) per orientare eventuali strategie di investimento da parte di Selectika per recuperare dal Plasmix frazioni utili agli utilizzi (4) e (5).

FASE 1- Utilizzo di plastiche miste in cokeria

L'impiego di plastiche nella cokefazione è stato analizzato in termini di: modalità di introduzione (percentuali in carica), effetti sulla fluidità del carbone, formazione di prodotti volatili e qualità del coke. Le plastiche si decompongono termicamente in intervalli di temperatura differenti rispetto al carbone; ciò può influire sulla microstruttura del coke e sugli indici di resistenza meccanica.

Gli studi riportano che l'aggiunta di polimeri può alterare la distribuzione dei pori e la coesione, con effetti che dipendono da dimensione delle particelle, tipologia polimerica (PE, PP, PS, PET) e tasso di aggiunta. In particolare, la superficie specifica e il diametro delle particelle risultano parametri critici: una maggiore superficie favorisce interazioni e volatilizzazione più rapida, potenzialmente influenzando i parametri meccanici del coke.



Un aspetto determinante è il cloro: in presenza di PVC o altre fonti di cloro, si può generare HCl nei gas di processo e si rendono necessarie strategie di controllo e neutralizzazione. Inoltre, la presenza di cloro può essere indesiderata per ragioni di corrosione e gestione dei sottoprodotti. Pertanto, per l'opzione cokeria, la Fase 1 ha posto attenzione ai limiti pratici di contaminazione e alla necessità di pre-trattamenti meccanici (rimozione di PVC, selezione polimerica, riduzione dimensionale).

Nel complesso, la cokeria è stata considerata un'opzione tecnicamente possibile ma con vincoli operativi significativi e potenzialmente più complessa dal punto di vista del controllo di qualità del coke. Per tale ragione, l'attenzione si è progressivamente spostata all'uso in altoforno come SRA, ritenuto più promettente per maturità tecnologica e gestione del materiale in ingresso.

FASE 1- Utilizzo di plastiche miste come SRA in altoforno

La letteratura sull'iniezione in altoforno considera le plastiche come sostituto parziale del polverino di carbone. Le plastiche, ricche di idrogeno e carbonio, possono generare specie riducenti (CO e H₂) utili al processo. Tuttavia, le reazioni di decomposizione e gassificazione sono endotermiche e possono influire sulla temperatura di fiamma nella raceway, limitando il tasso massimo di iniezione.

I principali vincoli riguardano: (i) combustibilità e grado di conversione nella raceway (funzione di granulometria, densità, forma e resistenza meccanica delle particelle), (ii) pressione e stabilità di iniezione, (iii) formazione di char e sua reattività, (iv) impatti sulle emissioni e sulla gestione dei gas. La letteratura evidenzia che polimeri diversi hanno comportamenti differenti: ad esempio, le poliolefine tendono a rilasciare idrogeno in misura significativa; il PS può avere comportamenti diversi in termini di volatilizzazione.

La preparazione del materiale assume un ruolo centrale: riduzione dimensionale, omogeneizzazione, rimozione di contaminanti e, in alcuni casi, trattamenti termici o criogenici per ottenere polveri o granuli con distribuzione granulometrica e proprietà di flusso adeguate.

La Fase 1 ha quindi definito requisiti preliminari del prodotto: basso cloro, contenuto controllato di metalli pesanti, limitata presenza di frazioni estranee, e una forma fisica compatibile con i sistemi di trasporto pneumatico e iniezione. Tali requisiti hanno guidato la progettazione delle prove sperimentali e la definizione dei treni di trattamento in Fase 3.



FASE 1- Aspetti ambientali e confronto scenari

La Fase 1 ha sintetizzato la letteratura ambientale relativa agli scenari di gestione del Plasmix. Il confronto è stato impostato sulle principali categorie: riscaldamento globale (GWP), acidificazione, eutrofizzazione, formazione fotochimica di ozono e categorie legate alla tossicità (umana ed ecotossicità).

Dal punto di vista del bilancio del carbonio, la sostituzione di combustibili fossili (coke e carbone) con plastiche post-consumo può ridurre le emissioni nette di CO₂ in funzione dell'approccio di contabilizzazione (allocazione del rifiuto, credito evitato per smaltimento, ecc.). In generale, l'impiego metallurgico risulta competitivo quando evita sia l'estrazione di carbonio fossile sia l'avvio del Plasmix a recupero energetico meno efficiente o a discarica.

Un tema rilevante è la presenza di metalli pesanti e additivi: la letteratura fornisce fattori di trasferimento verso scorie, ghisa e gas, e indica la necessità di controllare il contenuto di Cd, Pb, Hg e altri elementi. La Fase 1 ha quindi evidenziato che, oltre al beneficio climatico, la robustezza ambientale dipende da un controllo qualità del materiale e da condizioni operative che minimizzino emissioni e concentrazioni nei sottoprodotti.

FASE 1- Elementi salienti approfonditi in Fase 1

Tra i diversi scenari di utilizzo del Plasmix, sono stati valutati gli utilizzi in ambito siderurgico, ovvero cokerie ed altoforno.

Per quanto riguarda le cokerie, la letteratura indica che l'impiego di miscele plastiche opportunamente selezionate è tecnicamente fattibile senza compromettere il funzionamento dei forni né la qualità meccanica del coke. In particolare, è necessario limitare la quota di poliolefine (PE e PP), contenere il PVC per evitare la formazione di HCl e mantenere dimensioni e densità adeguate del materiale plastico. Esperienze industriali consolidate, soprattutto in Giappone, dimostrano che questa tecnologia è applicabile su larga scala, con impianti che trattano complessivamente centinaia di migliaia di tonnellate all'anno di plastiche.

L'utilizzo delle plastiche in altoforno si inserisce invece nel percorso di progressiva riduzione del coke e del polverino di carbone, avviato negli ultimi decenni per contenere le emissioni di CO₂. Le plastiche iniettate dalle tubiere, dopo la combustione e la volatilizzazione nella raceway, generano gas riducenti (CO e H₂) attraverso la gassificazione del char residuo. Per garantire un funzionamento stabile dell'altoforno è però essenziale un pre-trattamento delle plastiche, volto ad



aumentare la reattività sia in combustione sia in gassificazione ed evitare la formazione di residui carboniosi poco reattivi, che potrebbero causare problemi operativi.

Le esperienze industriali e di ricerca hanno permesso di definire condizioni di processo consolidate: selezione dei polimeri privilegiando le poliolefine ed eliminando PET e cloro, trattamenti termici o di estrusione per la riduzione del PVC, produzione di pellet e successiva polverizzazione, e tassi di utilizzo fino a circa 70 kg di plastiche per tonnellata di ghisa, con riduzione proporzionale del polverino di carbone. Su scala nazionale, i quantitativi potenzialmente assorbibili da un singolo altoforno di grande capacità risultano tali da poter intercettare una quota molto rilevante del Plasmix prodotto, arrivando teoricamente a risolvere l'intera problematica del suo smaltimento. Dal punto di vista ambientale, l'impiego delle plastiche in altoforno comporta significative riduzioni nette di CO₂ rispetto all'uso di coke e carbone fossile, con benefici dell'ordine di centinaia di migliaia di tonnellate di CO₂ all'anno per un grande impianto. Gli incrementi di alcuni metalli in traccia (come Cd e Hg) risultano gestibili, poiché prevalentemente confinati negli scarti solidi e non nelle emissioni.

Infine, le analisi di ciclo di vita mostrano che l'utilizzo del Plasmix selezionato come agente riducente in altoforno rappresenta lo scenario ambientale complessivamente migliore rispetto alle alternative di gestione, sia in termini di impatti climatici e ambientali tradizionali, sia per quanto riguarda gli indicatori di tossicità per l'uomo e per gli ecosistemi.