



INDICE

Introduzione	2
FASE 1– OR1: Analisi di letteratura e inquadramento tecnico-normativo	3
FASE 1 - Review sulla gestione delle plastiche post-consumo	3
FASE 1 - Utilizzo di plastiche miste in cokeria	5
FASE 1 - Utilizzo di plastiche miste come SRA in altoforno	6
FASE 1 - Aspetti ambientali e confronto scenari	7
FASE 1 - Elementi salienti approfonditi in Fase 1	7
FASE 2– OR2: Definizione delle caratteristiche chimico-fisiche e merceologiche del Plasmix.....	9
FASE 2 – Impianto Selectika e processo di selezione	9
FASE 2 – Produzione, rendimenti e dinamiche del Plasmix	10
FASE 2 – Caratteristiche sperimentali del Plasmix e idoneità come SRA	11
FASE 2 – Sintesi finale e indirizzi operativi	12
FASE 3– OR3: Sviluppo del processo di trattamento ottimale	14
FASE 3 - Caratteristiche Iniziali del Plasmix da Trattare e Caratteristiche Finali dei Prodotti da Utilizzare in Altoforno	14
FASE 3 - Descrizione delle Operazioni Unitarie di trattamento e relative rese di processo	15
FASE 3 - Sviluppo di un modello di simulazione per un impianto raffinazione plasmix per la produzione di polimeri da alimentare in altoforno	21
FASE 3 – Elementi salienti della Fase 3	25



Introduzione

Il progetto di sviluppo sperimentale svolto da Selectika nell'ambito del PIA Regione Puglia (Codice Pratica RXKR5W3 - CUP B39C22000020007) riguarda l'impianto di selezione e riciclo della plastica proveniente dalla raccolta differenziata dei rifiuti urbani e prevede un'innovazione tecnologica di processo, al fine di migliorare l'efficienza del processo stesso e la qualità dei prodotti in uscita dall'impianto in termini di purezza. Infatti, l'implementazione delle innovazioni tecnologiche proposte permetterebbe di ottenere prodotti riciclabili, che altrimenti sarebbero destinati allo smaltimento o al recupero energetico, trasformando quindi una parte dello scarto del processo (il Plasmix) in un prodotto da destinare al riciclo per l'ottenimento di una materia prima secondaria (End of Waste). Il progetto è articolato in 3 Obiettivi realizzativi (OR):

- OR1 Analisi dello stato dell'arte;
- OR2 Caratterizzazione chimico-fisica e merceologica del Plasmix;
- OR3 Sviluppo del processo ottimale.

Ciascun Obiettivo realizzativo è stato approfondito nelle Fasi del Progetto di ricerca che è stato avviato ad Ottobre 2024, in concomitanza con l'avvio dell'impianto Selectika, la cui funzionalità operativa era necessaria per lo svolgimento delle prove del progetto di Sviluppo Sperimentale. Le attività sono state avviate nel mese di ottobre 2024 e sono state completate entro dicembre 2025, secondo il Piano di attività come di seguito dettagliato:

- Fase 1: conclusa in 3 mesi (Ott 24-Dic 24);
- Fase 2: conclusa nei successivi 5 mesi (Gen 25-Mag 25);
- Fase 3: conclusa nei successivi 7 mesi (Giu 25- Dic 25);

Nella presente relazione si descrive la sintesi dei risultati delle attività per le tre Fasi del progetto.



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.

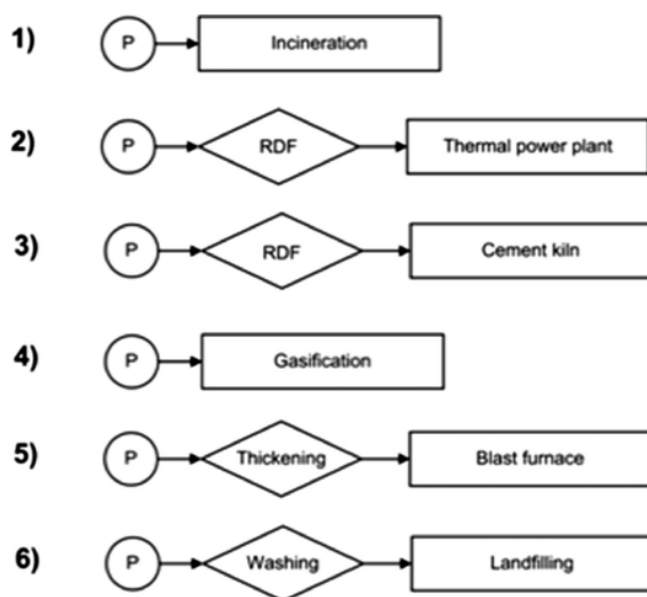
FASE 1- Review sulla gestione delle plastiche post-consumo

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.



FASE 2– OR2: Definizione delle caratteristiche chimico-fisiche e merceologiche del Plasmix

A seguito del completamento, durante la Fase 1, della review di letteratura e delle condizioni tecnico-normative inerenti all'attività oggetto di sperimentazione, la Fase 2 costituisce la prima attività sperimentale condotta sull'impianto Selectika, entrato in esercizio nell'ultimo trimestre 2024, focalizzata sull'individuazione delle caratteristiche diverse caratteristiche del Plasmix prodotto.

FASE 2 – Impianto Selectika e processo di selezione

Lo stabilimento Selectika è ubicato nell'area industriale di Modugno (BA) e rappresenta uno dei principali poli nazionali per la selezione e valorizzazione degli imballaggi provenienti da raccolta differenziata. L'impianto è autorizzato al trattamento di 320.000 t/anno di rifiuti da imballaggio (plastica e vetro), con una capacità di stoccaggio istantanea pari a 30.000 t, ed è integrato nel sistema consortile CONAI attraverso i consorzi di filiera COREPLA, CORIPET, CIAL, RICREA e COREVE. Il sito si estende su una superficie complessiva di circa 100.000 m², di cui 45.000 m² coperti, ed è caratterizzato da un'elevata automazione dei processi e da un sistema di supervisione centralizzato (SCADA).

Il ciclo di trattamento dei rifiuti plastici è articolato in una sequenza di fasi tecnologiche che consentono di massimizzare il recupero di materia. Dopo la ricezione e il pretrattamento, che comprendono pesatura, controlli visivi e apertura dei sacchi, il materiale viene sottoposto a vagliatura dimensionale mediante rotovagli e vagli balistici. Questi ultimi consentono la separazione in flussi bidimensionali (2D), tridimensionali (3D) e fini, oltre alla gestione di una frazione ingombrante. Le successive fasi di separazione ottica, basate su tecnologia NIR, permettono l'individuazione e l'estrazione selettiva dei principali polimeri (PET per colore, HDPE, PP, PS), mentre separatori magnetici ed a correnti parassite consentono il recupero dei metalli ferrosi e non ferrosi.

Il processo è completato da una fase di cernita manuale, finalizzata al miglioramento della purezza dei flussi in uscita, e dalle operazioni di pressatura, etichettatura e stoccaggio delle balle. L'assetto impiantistico è concepito per garantire flessibilità operativa, consentendo modifiche di setup in funzione delle caratteristiche del rifiuto in ingresso e delle condizioni di mercato.



Il risultato del processo di selezione è la produzione di numerosi flussi di polimeri omogenei destinati al riciclo meccanico (PET per colore, HDPE, PP, film in PE, PS), affiancati da una frazione residuale eterogenea, il Plasmix, che rappresenta lo scarto non ulteriormente separabile con le tecnologie standard. Ai fini della sperimentazione, Selectika distingue quattro tipologie di Plasmix: Plasmix Fine, Plasmix 2D, Plasmix 3D e Plasmix Ingombrante, ciascuna caratterizzata da diversa granulometria, composizione e incidenza sul bilancio complessivo dell'impianto.

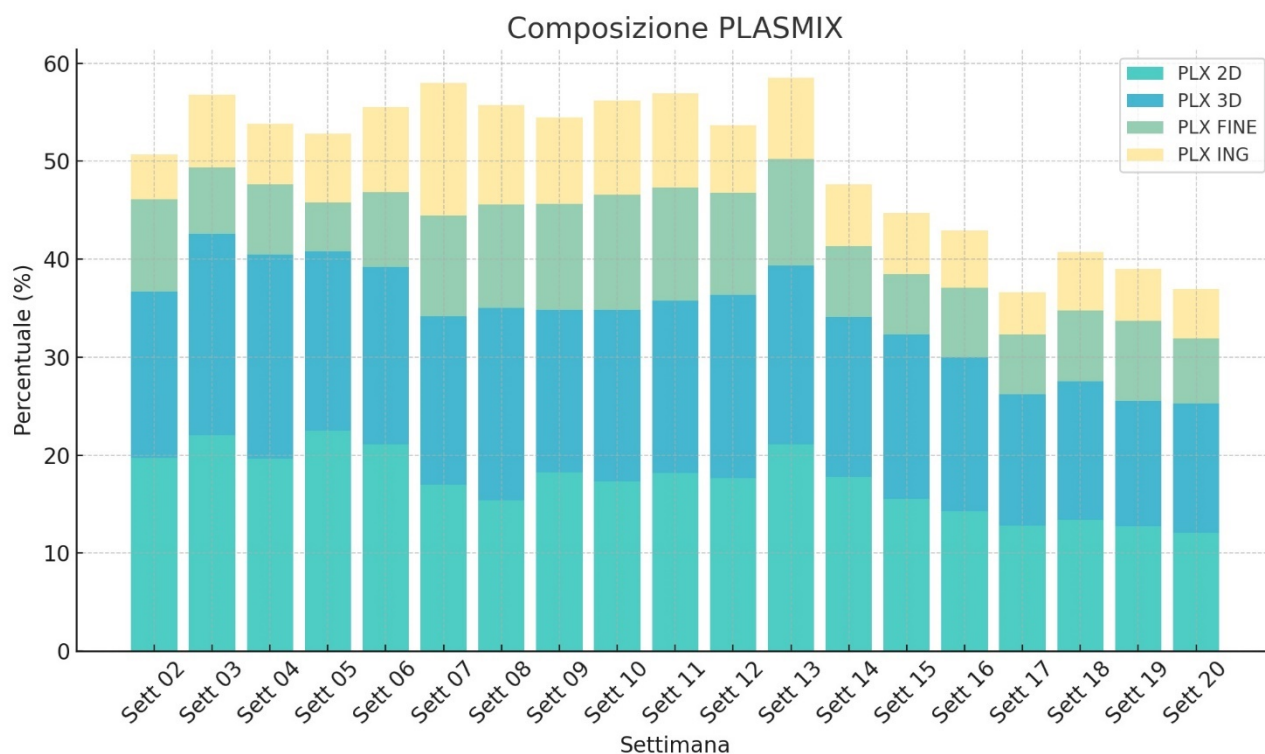
FASE 2 – Produzione, rendimenti e dinamiche del Plasmix

L'analisi dei dati di esercizio dell'impianto, riferiti alle prime 20 settimane del 2025, ha consentito di valutare l'evoluzione delle rese di selezione e l'impatto delle progressive ottimizzazioni di processo. Nelle fasi iniziali di avviamento, la quota complessiva di Plasmix prodotto si attestava su valori prossimi al 55% del materiale in uscita; con il consolidamento dell'esercizio e l'introduzione di nuove strategie di separazione, tale quota si è progressivamente ridotta fino a valori dell'ordine del 40%, con una tendenza ad ulteriore riduzione.

Un elemento chiave emerso dall'analisi è il ruolo svolto dall'introduzione, a partire dalla settimana 12, di nuovi flussi recuperati dal Plasmix, in particolare i flessibili secondari (FLEX.S), i rigidi poliolefinici misti (RPO.M) e il PET da vaschette (VPET). Questi flussi, inizialmente inclusi negli scarti, sono stati progressivamente intercettati attraverso modifiche mirate al setup dei lettori ottici, con effetti diretti sulla riduzione del Plasmix complessivo.

L'analisi statistica basata sulla matrice di correlazione di Pearson ha evidenziato forti correlazioni negative tra il Plasmix totale e i nuovi flussi introdotti, a conferma del fatto che il miglioramento della selettività impiantistica consente di sottrarre al Plasmix frazioni valorizzabili. In particolare, le correlazioni elevate con FLEX.S, VPET e RPO.M dimostrano che tali flussi rappresentano leve operative efficaci per ridurre lo scarto residuale.

Dal punto di vista compositivo, il Plasmix 3D risulta la frazione più rilevante in termini massici, seguita dal Plasmix 2D, mentre il Plasmix Fine e l'Ingombrante incidono in misura più contenuta sul bilancio complessivo. Le ottimizzazioni introdotte hanno mostrato come interventi mirati su specifici lettori ottici (ad esempio la trasformazione di un lettore PET da funzione di "pulizia" a funzione di produzione) possano determinare significative riduzioni di specifiche componenti del Plasmix, senza penalizzare la qualità dei flussi omogenei.



Composizione del plasmix nelle prime 20 settimane di esercizio del 2025

Nel complesso, i dati di produzione indicano che l'impianto, una volta raggiunte condizioni operative stabili, è in grado di definire in modo riproducibile i quantitativi e le caratteristiche delle quattro tipologie di Plasmix, creando le condizioni per una loro valutazione sistematica ai fini di possibili trattamenti di raffinazione e valorizzazione di materia.

FASE 2 – Caratteristiche sperimentali del Plasmix e idoneità come SRA

La caratterizzazione sperimentale del Plasmix prodotto da Selectika è stata finalizzata a valutare la possibilità di trasformare tali materiali in agenti riducenti secondari (Secondary Reducing Agent, SRA) per l'industria siderurgica, in conformità alla norma UNI 1066717. Le analisi si sono concentrate su tre aspetti principali: composizione merceologica, parametri energetici e contenuto di contaminanti critici.

Dal punto di vista merceologico, le analisi hanno evidenziato che tutte le tipologie di Plasmix presentano una quota di frazioni estranee mediamente inferiore al 20%, valore compatibile con i requisiti normativi per le miscele destinate a processi metallurgici. Tuttavia, la variabilità osservata suggerisce la necessità di prevedere, nelle fasi successive di sviluppo, trattamenti aggiuntivi per la rimozione delle impurità non plastiche.



Per quanto riguarda il contenuto di poliolefine (PP e PE), il Plasmix Ingombrante risulta il flusso più ricco, con valori medi superiori al 50%, seguito dal Plasmix Fine e dal Plasmix 3D. Il Plasmix 2D è invece caratterizzato da un contenuto di poliolefine sensibilmente inferiore. Considerando congiuntamente composizione e incidenza massica, il Plasmix 3D emerge come il flusso con il maggior potenziale complessivo di recupero di poliolefine.

Le determinazioni del Potere Calorifico Inferiore (PCI) hanno mostrato valori generalmente elevati per la maggior parte dei flussi, con l'eccezione del Plasmix 2D, che non raggiunge la soglia minima di 30 MJ/kg prevista dalla norma UNI 1066717 e risulta quindi non idoneo, se considerato singolarmente, alla produzione di SRA.

Il tenore di cloro, parametro critico per l'impiego in processi metallurgici, risulta per tutti i flussi inferiore al limite normativo del 2%. Tuttavia, il Plasmix Fine presenta valori prossimi alla soglia, rendendo necessario un approccio prudenziale ed eventuali trattamenti di dechlorazione o miscelazione con altri flussi.

Le analisi sui metalli pesanti (Cd, Pb, Hg) indicano concentrazioni generalmente inferiori ai limiti normativi.

FASE 2 – Sintesi finale e indirizzi operativi

I risultati della Fase 2 consentono di delineare un quadro chiaro delle potenzialità e dei limiti del Plasmix prodotto dall'impianto Selectika. Dal punto di vista quantitativo, il Plasmix 3D rappresenta il flusso più rilevante in termini di bilancio di massa e di poliolefine teoricamente recuperabili, mentre il Plasmix Ingombrante, pur molto ricco in PP e PE, incide in misura più limitata sui quantitativi complessivi. Il Plasmix Fine presenta un contenuto significativo di poliolefine ma pone criticità operative legate alla granulometria, mentre il Plasmix 2D risulta il meno idoneo per applicazioni come SRA.

Sulla base delle analisi effettuate, le miscele più promettenti per le successive fasi sperimentali sono costituite dall'accoppiamento del Plasmix 3D con il Plasmix Ingombrante e, in alternativa, con il Plasmix Fine. Tali miscele presentano un contenuto potenziale di poliolefine compreso tra il 30% e il 50% e possono essere oggetto di trattamenti di triturazione, raffinazione e ulteriore selezione per la produzione di materiali conformi ai requisiti RPMIXSRA.

In conclusione, la Fase 2 del progetto ha permesso di validare sperimentalmente la qualità del Plasmix prodotto da Selectika e di individuare le direttrici di sviluppo più promettenti per la valorizzazione di materia. Le evidenze raccolte costituiscono una base solida per la Fase 3 della



selectika

Sviluppo sperimentale per innovazione di processo per recuperare plastiche eterogenee residuali dalla selezione dei flussi da raccolta differenziata (Plasmix).

Report attività

Pag. 13 di 27

ricerca, nella quale saranno testate miscele e trattamenti sperimentali finalizzati alla produzione di agenti riducenti secondari idonei all'impiego nei processi siderurgici, contribuendo alla riduzione del ricorso a combustibili fossili e al miglioramento complessivo della circolarità del sistema di gestione delle plastiche miste.



FASE 3– OR3: Sviluppo del processo di trattamento ottimale

A seguito del completamento, durante la Fase 1, della review di letteratura e delle condizioni tecnico-normative inerenti all'attività oggetto di sperimentazione e della Fase 2, in cui sono state determinate le caratteristiche delle diverse tipologie di Plasmix prodotte da Selectika e la loro compatibilità con la norma UNI al fine di essere sottoposte ad un processo di affinamento meccanico per produrre un mix di poliolefine, nella Fase 3 sono state effettuate sia attività sperimentali in impianto Selectika che simulazioni utili alla progettazione di un futuro impianto di trattamento.

Sono state, infatti, considerate, sulla base della tipologia di plastiche di scarto più idonee da trattare, le fasi principali di un ipotetico trattamento di raffinazione del plasmix, costituito da una serie di operazioni unitarie (macinazione primaria, separatore aeraulico, selettori ottici, triturazione secondaria e vagliatura): l'operazione più critica in termini di recupero di poliolefine (selettori ottici) è stata testata sull'impianto reale su diversi miscele test di Plasmix per determinare le curve sperimentali di separazione. I dati sono stati utilizzati per simulare un trattamento industriale su miscele di plasmix finalizzato alla produzione di poliolefine.

FASE 3 - Caratteristiche Iniziali del Plasmix da Trattare e Caratteristiche Finali dei Prodotti da Utilizzare in Altoforno

Questo capitolo analizza le caratteristiche merceologiche del Plasmix derivante dall'impianto Selectika e definisce i requisiti per i prodotti finali destinati all'uso in altoforno come sostituti del carbone.

Il Plasmix è il residuo della selezione di plastiche da rifiuti differenziati (RD). Dall'analisi della Fase 2 del progetto, emergono quattro flussi principali nell'impianto Selectika: Plasmix Fine, Ingombrante, 2D e 3D.

- Plasmix Fine: Contiene oltre il 50% di poliolefine (PP+PE), ma rappresenta solo il 5-10% dei flussi totali. È fine (vagliatura 65-20 mm), rendendo complessa la selezione ottica.
- Plasmix Ingombrante: Ricco in poliolefine (35% PP + 18% HDPE), ma solo 5-7% del totale. Richiede pre-triturazione (fino a 300 mm).
- Plasmix 2D: 12-17% del totale, ma basso contenuto di poliolefine (22%) e PCI <30 MJ/kg, non idoneo.
- Plasmix 3D: 14-20% del totale, con 50% poliolefine; il flusso più significativo per recupero.



Le miscele ottimali per test sono:

- Mix 1 (Plasmix 3D + Ingombrante).
- Mix 2 (Plasmix 3D + Fine)

Durante le sperimentazioni, il Mix 1 ha mostrato le seguenti composizioni medie: 32.47% film, 17.24% PP, 11.44% PET, ecc., con tenore MPO (Mix Poliolefine) al 61%.

Gli MPO sono i polimeri ideali per utilizzo in altoforno, per alto PCI (40-45 MJ/kg) e basso cloro. Le esperienze industriali hanno indicato i seguenti aspetti chiave per l'utilizzo di plastiche nell'iniezione in altoforno come agente riducente ausiliario, con tasso di utilizzo massimo di plastiche di 70 kg/tHM, con contestuale riduzione del polverino di carbone in ragione del maggior poter calorifico della miscela di plastiche utilizzate:

- pre-trattamento per eliminazione PET e massimizzazione della presenza di poliolefine (PE/PP);
- trattamento per eliminazione cloro (o mediante eliminazione PVC al di sotto del 2% in peso o mediante processi di estrusione oltre i 250 °C che favoriscono l'eliminazione di cloro come HCl);
- produzione di pellet dopo la selezione dei polimeri di interesse e successivi trattamenti (es. polverizzazione in granuli dopo produzione di pellet con cicli termici di riscaldamento/raffreddamento).

Nel seguente paragrafo si definiscono le sezioni di trattamento (ovvero Operazioni Unitarie di trattamento) cui il Plasmix può essere sottoposto per migliorarne le caratteristiche al fine di renderle maggiormente aderenti all'utilizzabilità tecnica come SRA.

FASE 3- Descrizione delle Operazioni Unitarie di trattamento e relative rese di processo

Nel presente paragrafo si farà un approfondimento sia sulle caratteristiche meccaniche/tecnologiche delle sezioni tecnologiche da utilizzare in un impianto di trattamento del plasmix, sia sulle efficienze di separazioni delle singole sezioni.

La sezione di ricezione e pretrattamenti è comune a tutte le tipologie di impianti trattamenti rifiuti ed è costituita da una zona di scarico/carico ed una prima sezione di apertura balle rifiuti/macinazione primaria. L'impianto accoglie il PLASMIX, consegnato tramite camion nella zona di ricezione dimensionata sulla base del fabbisogno di accettazione di qualche giorno. Il trituratore



primario apre le balle di plasmix in arrivo ed omogeneizza i rifiuti, dando all'apparecchiatura anche la funzione di dosatore per le sezioni impiantistiche successive.

E' molto comune l'utilizzo di un vaglio nelle sezioni successive al trituratore primario. È il macchinario successivo al trituratore ed è qui che inizia l'effettiva suddivisione del materiale in differenti dimensioni. Esso è costituito da un cilindro ruotante (tamburo), all'interno del quale sono presenti dei fori di dimensioni differenti: nella parte iniziale del vaglio i fori sono di piccole dimensioni mentre, procedendo verso la parte finale del vaglio, il diametro dei fori diventa di dimensioni sempre maggiori. Ciò permette una separazione per dimensione e, di conseguenza, il rifiuto entrante nel vaglio viene suddiviso in 2 flussi distinti:

- il materiale di grandezza superiore ad un diametro di taglio (determinato in base alla merceologia del materiale) mm costituisce uno scarto di processo;
- la parte di grandezza minore inferiore al diametro di taglio costituito principalmente da materiale tridimensionale (bottiglie, contenitori) e materiale bidimensionale (film plastici, carta, tessuti), viene inviato nella sua totalità al separatore balistico.

L'incremento della grandezza dei diametri dei fori permette un'adeguata distribuzione del rifiuto sui nastri mentre, nella parte esterna del tamburo, ogni foro comprende un prolungamento che costituisce una specie di imbuto con lo scopo di evitare che il materiale già suddiviso rientri nel vaglio attraverso i fori successivi. Inoltre, all'interno del tamburo, sono presenti dei deflettori che rompono le eventuali trecce di materiale e sciolgono i diversi agglomerati formati.

La separazione balistica è una delle operazioni di pretrattamento a cui sono sottoposti i rifiuti prima di essere avviati alla selezione vera e propria; essa consiste nella separazione dei diversi materiali in base alla loro forma e al loro peso. In esso infatti sono combinati due effetti:

- quello della vagliatura balistica, che sfrutta la differenza di densità, elasticità e forma dei materiali;
- quello della vagliatura a soffiatura e vagliatura ad aspirazione, che utilizza le caratteristiche gravimetriche per operare la suddivisione dei materiali.

Più precisamente, il materiale viene posizionato su di una tramoggia per la separazione e vagliato su paddle (ossia piccole palette) formati da speciali profili in acciaio. Grazie all'utilizzo combinato di due sistemi di separazione e alla regolazione dell'inclinazione dei paddle, si raggiunge un ottimo livello di separazione dei materiali ed un'elevata qualità delle frazioni separate. In uscita dal macchinario si ritrovano tre flussi distinti:



- flusso di materiali 3D rotolanti e pesanti (bottiglie, lattine, etc.), condotti alla zona di separazione plastiche nella linea 3D;
- flusso di materiali 2D piatti e leggeri (film, carta, cartone, materiali tessili e fibrosi), condotti alla zona di separazione plastiche nella linea 2D;
- flusso di materiali fini vagliati (materiali selezionati a seconda della granulometria), raccolti sul fondo del Separatore Balistico.

In uno schema semplificato, il balistico può essere modellato come un ripartitore a 2 flussi:

- flusso 3D che costituisce l'uscita da sottoporre alle successive fasi di separazione ottica con i NIR.
- flusso 2D di film e fini: poiché il quantitativo di fini prodotti durante la separazione balistica sono trascurabili rispetto alla dimensione della vagliatura, è possibile effettuare la semplificazione di ripartizione in 2 flussi che semplifica il modello di simulazione.

I separatori ottici o NIR (Near Infrared Spectroscopy) sono il cuore del trattamento di ogni impianto di selezione delle plastiche. Sono costituiti da un sensore infrarosso che scansiona l'intera larghezza del nastro trasportatore e invia gli spettri dei differenti materiali analizzati ad un processore; i segnali vengono quindi confrontati con un database ed i risultati sono riportati in un tempo molto breve (frazioni di secondo). Se il materiale in esame viene riconosciuto come materiale da separare, il processore invia un segnale ad un compressore d'aria che sparerà un flusso di aria compressa sull'oggetto e che sarà quindi separato dal resto del flusso.

Nell'impianti più complessi ci sono separatori dedicati alla selezione del materiale bidimensionale (FIL/S in PE e PP) ed alla selezione del flusso tridimensionale in base al polimero e in base al colore di cui sono costituiti gli oggetti (PET INCOLORE, AZZURRATO e COLORATO, HDPE, PP):

- l'esito del balistico, costituito da frazioni plastiche 2D, viene inviato a separatori NIR che operano "in positivo", ovvero sottraggono gli imballaggi bidimensionali target dal resto, che viene considerato scarto;
- analogamente, l'output del balistico (plastica 3D) viene selezionata dai NIR in base al polimero ed al colore.

In letteratura sono state studiati negli ultimi anni le efficienze di separazione dei vari stadi di trattamento per la selezione delle plastiche, da ciascuna unità di trattamento, dai vagli al separatore balistico, ai NIR. I dati sono spesso frammentari e riguardano singole applicazioni sperimentali con una scarsa caratterizzazione dei materiali in ingresso ed in uscita dalle sezioni di trattamento. I dati raccolti sono stati analizzati in termini di rese per tipo di imballaggio e per



polimero relative alle singole macchine coinvolte nei processi di selezione; inoltre, i dati disponibili sono stati suddivisi e valutati rispetto alla sezione di vagliatura, di separazione aerea, di separazione balistica e di selezione ottica. Proprio perché la selezione ottica è la parte centrale del processo di selezione ed è fortemente dipendente dalle tipologie e granulometrie dei polimeri presenti, nel Progetto sperimentale sono stati condotti dei test sperimentali su scala industriale su parti dell'impianto Selectika.

Di seguito si analizzano gli elementi tecnici essenziali relativi alle rese delle Operazioni Unitarie considerate, sia utilizzando i più recenti dati di letteratura, che i risultati dei test sperimentali.

Vagliatura preliminare

La vagliatura è una fase consolidata negli impianti di selezione delle plastiche da imballaggio e ha lo scopo principale di separare, da un lato, il materiale troppo grossolano (in particolare i film di grandi dimensioni) e, dall'altro, le frazioni fini non idonee alla cernita ottica o manuale. Le aperture dei vagli variano tra impianti, ma negli esempi analizzati nello studio sono comprese tra 220/250 mm e 50/65 mm.

Un limite rilevante nell'interpretazione dei risultati sperimentali deriva dal fatto che molte prove sono state condotte su materiale pressato: la deformazione permanente degli imballaggi durante la pressatura altera la distribuzione granulometrica reale e influisce quindi sulle rese di vagliatura osservate.

I risultati mostrano che la maggior parte dei polimeri e delle tipologie di imballaggio tende a concentrarsi nelle frazioni di dimensione intermedia, mentre le frazioni grossolane e fini risultano meno rappresentative. Questo comportamento è funzionale all'efficienza dell'impianto, poiché l'arricchimento delle classi dimensionali intermedie favorisce i successivi processi di separazione a valle. Fa eccezione la frazione film, che, soprattutto nelle dimensioni maggiori, viene intercettata come flusso specifico.

Dal punto di vista metodologico, è importante evidenziare che la resa è riferita alle frazioni di sottovaglio, mentre il sopravaglio è considerato scarto, aspetto cruciale per la corretta impostazione delle matrici di separazione utilizzate nelle analisi di processo.

Separazione balistica

I separatori balistici concentrano con successo gli imballaggi rigidi (3D) sottraendoli dai flussi di plastiche miste. Tali separatori, quindi, sono uno strumento efficace per ridurre il contenuto di film

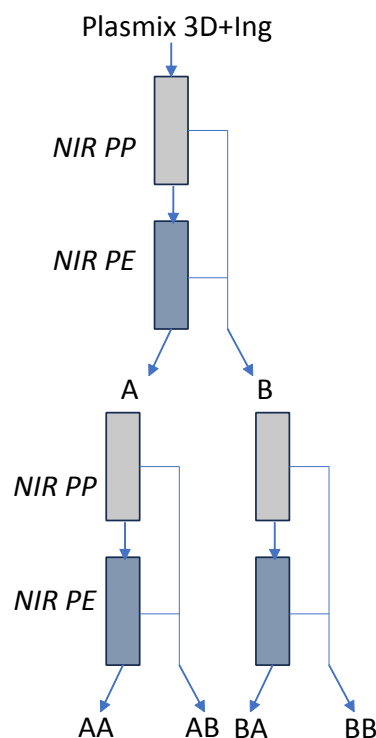


negli stadi di separazione a valle nell'impianto complessivo, senza causare perdita di materiale di valore (PET 3D o altri tipi di contenitori per liquidi). La differenza tra la resa degli oggetti rigidi (bottiglie) e film non è maggiore del 25% in valore assoluto, per cui è ragionevole che si trovi ancora della frazione film nell'uscita del balistico. E' importante notare che la resa si riferisce alle specifiche frazioni nel 3D: l'output è rappresentato dalle frazioni 3D e lo scarto è il materiale ricco in film.

Rese sperimentali in Selectika dei processi di selezione ottica (NIR) – PP+PE

I sistemi di separazione presenti nell'impianto di Selectika, ordinariamente utilizzati all'interno del processo di selezione imballaggi plastici di Selectika, sono stati testati per valutare la capacità di lavorazione del plasmix di scarto, con specifico riferimento alla frazione maggiormente degna di valorizzazione, ovvero il Mix 1 (Plasmix 3D+ING).

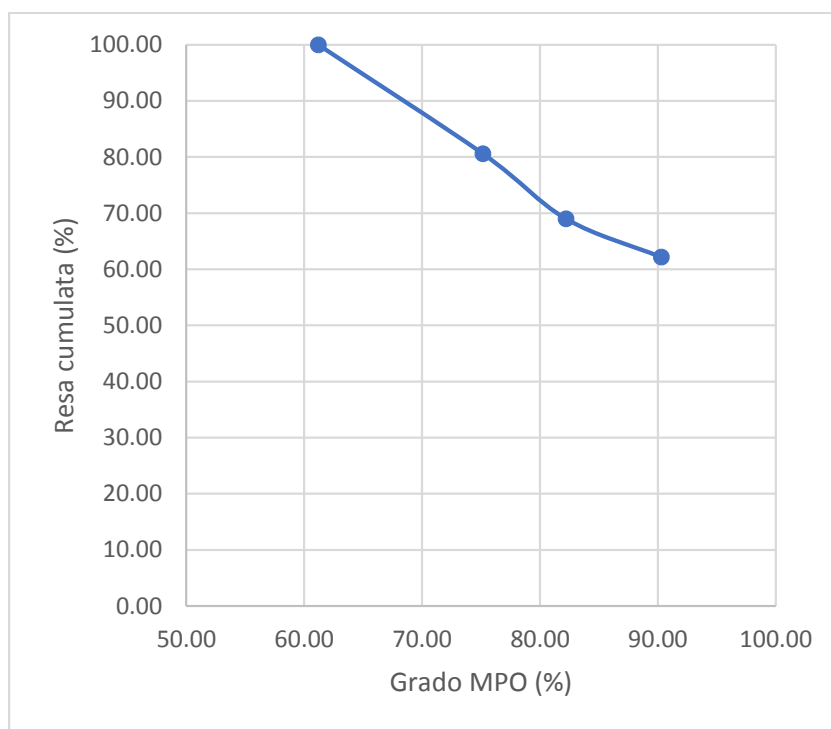
Innanzitutto, è stato confezionato un campione di 100 kg di Mix 1. La percentuale in massa di plastiche poliolefiniche di partenza è pari al 61% in massa del campione. L'obiettivo dei test di separazione è quello di verificare la capacità di arricchimento di poliolefine a seguito di un processo di separazione selettivo, in serie, mediante due lettori ottici per PE e per PP. I test di separazione sono stati effettuati in maniera sequenziale, secondo lo schema di sotto riportato.





Schema di lavoro nella fase sperimentale

Il campione iniziale da 100 kg (Plasmix 3D+ING) è stato quindi sottoposto ad un primo processo di separazione, producendo un prodotto ricco in poliolefine (A) ed uno scarto (B). Sia il flusso A che il flusso B sono stati sottoposti ad un ulteriore passaggio di separazione, fino a produrre i campioni AA (teoricamente quello che maggior contenuto di poliolefine), AB, BA e BB (campione con il contenuto minimo). Raggruppando in modo cumulato i dati delle 4 frazioni ottenute dai test sperimentali, si calcolano i dati di resa cumulata (Yield) e di tenore di poliolefine. Da questi dati si possono poi costruire le curve grade-recovery, riportando sull'asse delle ascisse il tenore di poliolefine e sull'asse delle ordinate la resa massica. Il 100% della resa massica corrisponde al prodotto iniziale, con tenore di MPO pari al 61%. Aumentando il tenore di poliolefine richiesto in uscita, naturalmente la resa massica diminuisce: per ottenere un prodotto al 75% di MPO avrò una resa massica del 80%, mentre per ottenere un prodotto al 82% di MPO, si avrà una resa massica del 69%. I dati sono riportati nella curva (denominata grade-recovery, di ampio uso nell'ingegneria mineraria per determinare le rese e purezze dei metalli ricavati dai minerali e recentemente utilizzata anche nei processi di urban mining).



Curva grade-recovery per il recupero di MPO dal Plasmix MIX 1



I punti di lavoro sulla curva grade-recovery del processo di separazione in serie PP+PE effettuato sull'impianto Selectika, sono coerenti ed anzi meglio performanti dei risultati riportati in letteratura. A fronte, infatti, di una resa di separazione (NIR singolo PP) intorno al 80% per i PP e del 65% (NIR singolo PE) per le varie categorie merceologiche di PE, si è ottenuta una resa complessiva misurata (NIR in serie PE+PP) sperimentalmente - su singolo stadio di separazione (prodotto A) - del 82% su tutte le frazioni PE+PP. Tale valore è stato ottenuto in condizioni di impianto industriale, in piena scala, nelle normali condizioni di marcia dei nastri dei separatori ottici. I valori ricavati saranno utilizzati, con adeguati fattori di correzione prudenziale, nella definizione del bilancio di massa per un impianto di trattamento di Plasmix, sviluppato nel capitolo successivo.

FASE 3- Sviluppo di un modello di simulazione per un impianto raffinazione plasmix per la produzione di polimeri da alimentare in altoforno

La sezione descrive lo sviluppo di un **modello di simulazione** finalizzato a rappresentare il funzionamento complessivo di un impianto di raffinazione del Plasmix per la produzione di frazioni polimeriche idonee all'alimentazione dell'altoforno. Il modello è stato costruito una volta definite la composizione dell'input, le caratteristiche dell'output desiderato e le rese dei principali stadi di trattamento, ed è concepito come una sequenza di blocchi di processo interconnessi che riproducono le singole operazioni unitarie dell'impianto sopra definite

In una prima fase è stato definito un approccio matematico per descrivere i singoli stadi di separazione; è stato deciso di sviluppare un codice di calcolo dedicato in ambiente Matlab e Python. Questa scelta, pur comportando un maggiore sforzo iniziale di modellazione, ha consentito di superare i limiti dei software chiusi, permettendo una maggiore flessibilità e la possibilità di diffondere il software con modalità open access.

Il modello assume come input la composizione merceologica del Plasmix, suddivisa in quattro classi principali (film, contenitori per liquidi, imballaggi rigidi e altre frazioni), e la relativa composizione polimerica (PP, PE, PET e altre componenti). A partire da tali dati, viene ricostruita la composizione polimerica complessiva del flusso in ingresso.

Ogni operazione unitaria di separazione è rappresentata mediante una **matrice di separazione**, che descrive i bilanci di massa tra flusso in ingresso, flusso utile in uscita e scarto. Il sistema matematico associato a ciascuno stadio è formulato come un sistema lineare risolvibile tramite inversione di matrice. Le matrici di separazione sono state definite per i principali stadi dell'impianto, tra cui vagliatura, separazione balistica e selezione ottica NIR per PP, PET e PE, con



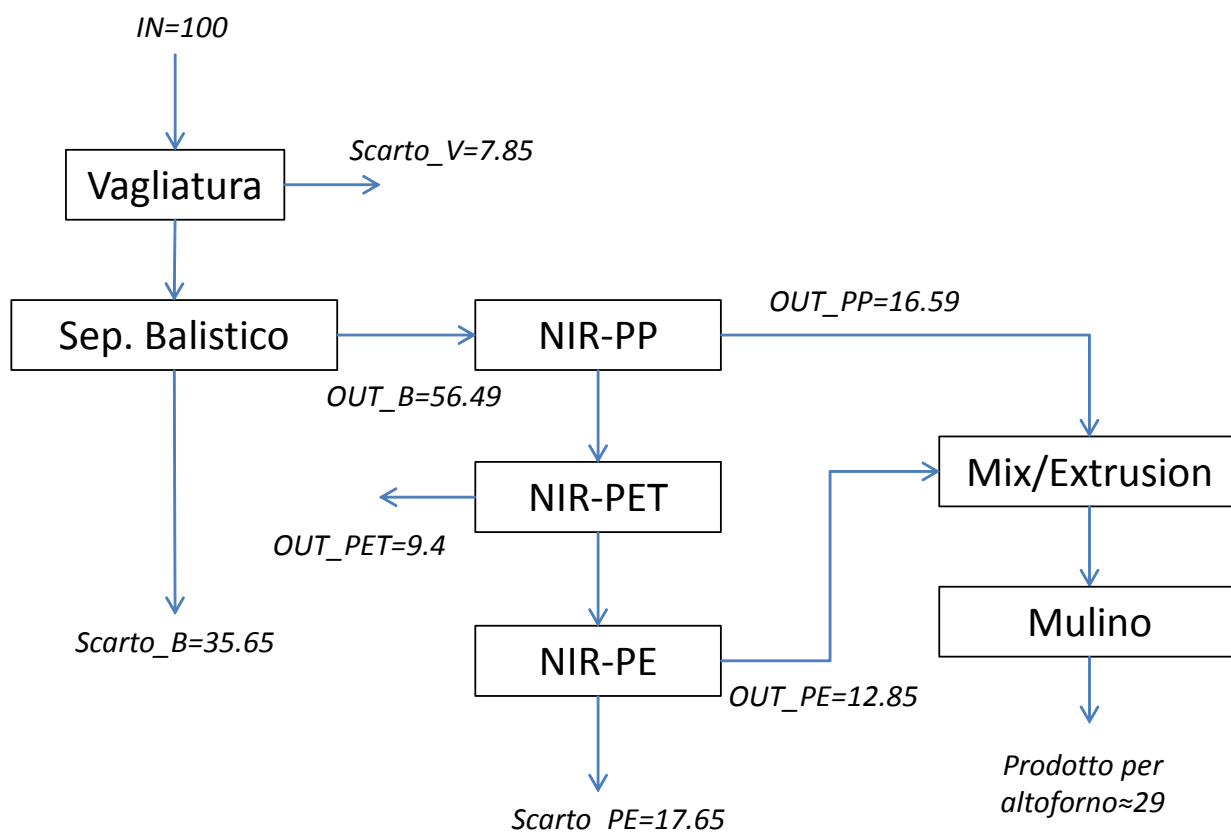
coefficienti di resa derivati dai dati sperimentali. Nel complesso, il modello consente di simulare in modo coerente e modulare il comportamento dell'impianto di raffinazione del Plasmix, fornendo uno strumento quantitativo per valutare l'efficacia delle diverse configurazioni di processo e il loro impatto sulla qualità dei flussi polimerici destinati all'impiego siderurgico.

Modello di impianto semplificato

Il primo modello di impianto (denominato semplificato) è costituito dalle seguenti sezioni:

- vagliatura;
- separazione balistica;
- separazione NIR su PP;
- separazione NIR su PET;
- separazione NIR su PE;
- pellettizzazione/macinazione.

Lo schema concettuale del modello di trattamento semplificato è riportato nella seguente figura, con indicazione del bilancio di massa.





Schema di impianto trattamento semplificato

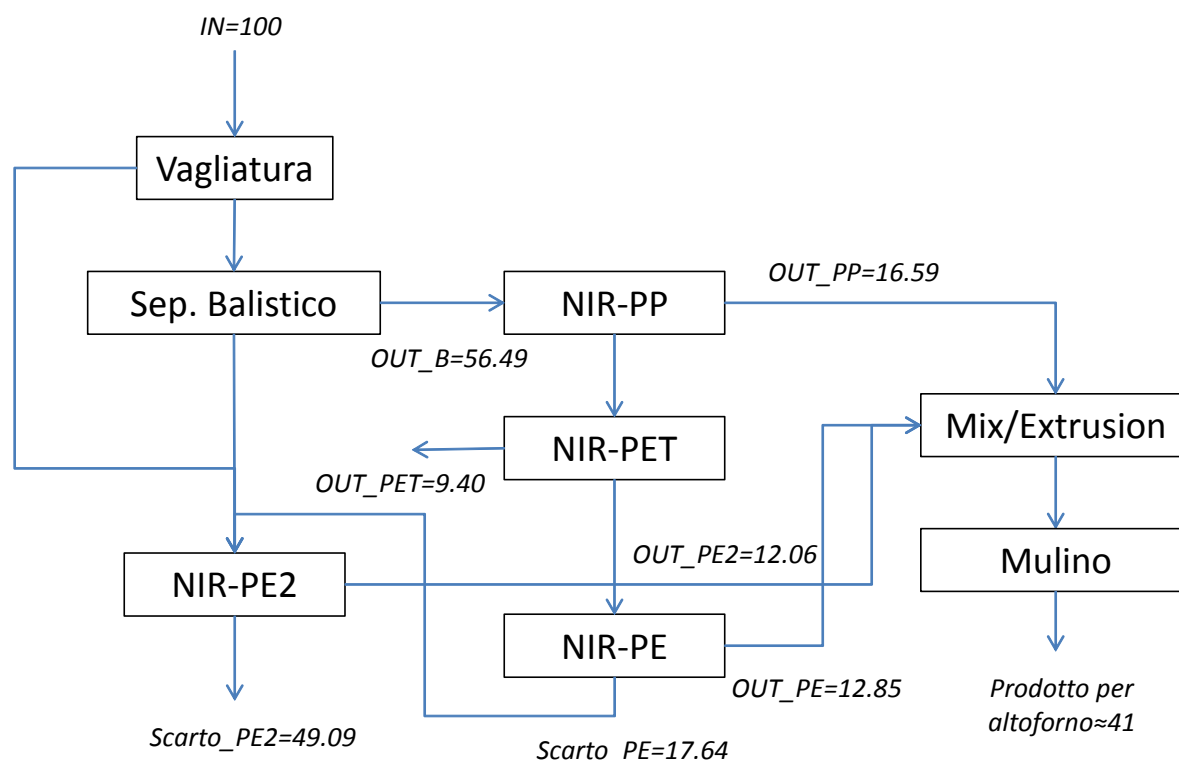
La tipologia di materiale idoneo per utilizzo in altoforno non deve contenere PET e PVC e deve essere costituita da un mix di poliolefine PE/PO, di dimensione granulometrica idonea a sostituire il polverino di carbone. Per questo motivo, una volta selezionate le frazioni di interesse con i sistemi meccanici/ottici è necessario sottoporre gli streams PE/PP a dei processi di pelletizzazione. Studi pregressi (Cfr. Fase 1 del rapporto di ricerca) hanno dimostrato che è possibile sfruttare la proprietà di riduzione della resistenza meccanica (e quindi aumento della fragilità) delle plastiche quando vengono miscelate e sottoposte a cicli di riscaldamento e raffreddamento a temperatura ambiente: se il mix di PE/PP selezionato dal processo di separazione viene mescolato, fuso e poi raffreddato a temperatura ambiente, si ritiene che aumenti la fragilità a causa delle sollecitazioni generate alle interfacce tra questi polimeri. Inoltre, poiché i legami C-C nella plastica sono in parte interrotti dai cicli di riscaldamento e fusione, le materie plastiche risultanti hanno un basso grado di polimerizzazione, e, nel caso di presenza di cloruro di polivinile (PVC), si può ottenere anche una reazione di dechlorazione se si raggiungono temperature di riscaldamento di superiori a 200-250°C. Il pellet residuo da questa fase di riscaldamento e raffreddamento di plastiche miste è, quindi, sufficientemente fragile da poter essere polverizzato nei mulini convenzionali e raggiungere la dimensione di 1 mm necessaria per l'iniezione delle plastiche in altoforno.

Il processo di riscaldamento/raffreddamento e macinazione provoca una minima perdita di massa rispetto al mix di poliolefine (PE/PP) in ingresso, per cui si stima che **il prodotto di interesse - polverino di mix di plastiche utile per alimentare l'altoforno - sia pari al 29% del Plasmix 3D+ING in ingresso.**

Notevole risulta il quantitativo di scarti che, tra sopravaglio, scarto del balistico, scarto del PET e scarto del PE ammontano a circa il 70% del Plasmix in ingresso: nel seguente paragrafo è stata effettuata una simulazione con l'inserimento di una ulteriore sezione per diminuire il quantitativo di scarti.

Modello di impianto con recupero polimeri da frazioni di scarto

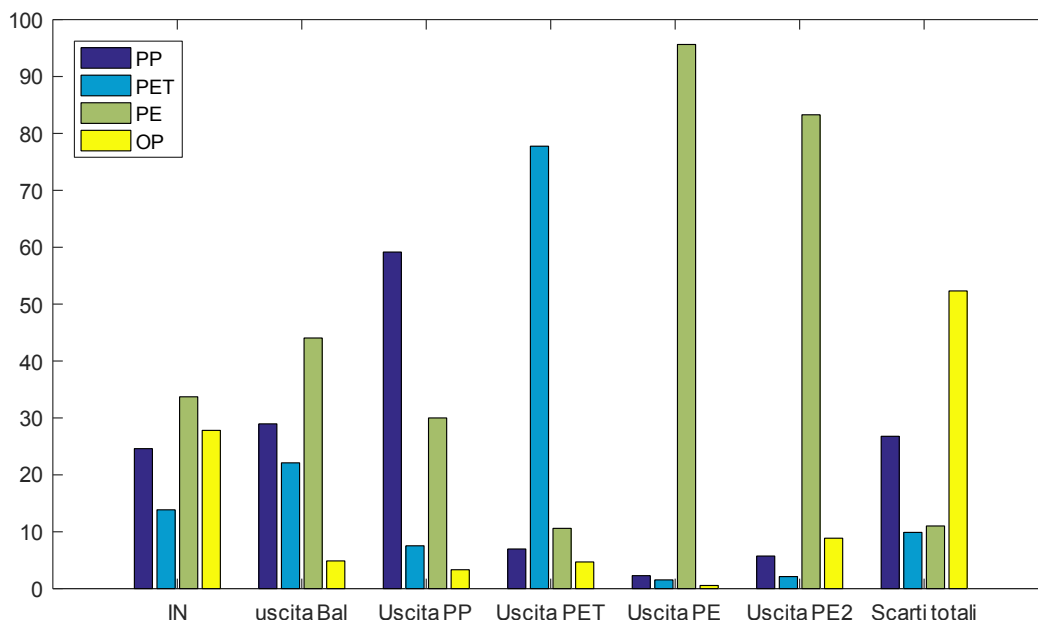
Si assume che il sopravaglio, lo scarto del balistico e lo scarto del NIR-PE sano trattati in un ulteriore NIR_PE2 per massimizzare il recupero di poliolefine da inviare alla sezione di estrusione e macinazione. Il selettore NIR-PE2 opera su frazioni film 2D di polimeri, costituenti principalmente l'esito del balistico.



Schema di impianto trattamento complesso con recupero frazioni recuperabili da scarti

Secondo questo modello di impianto, si ha una diminuzione di sottoprodotti dal 70% al 59% ed **un aumento del polverino per altoforno dal 29% al 41%**. Come si vedrà nel successivo paragrafo in cui sono esaminate le composizioni per polimero dello stream, questo limite è molto vicino al limite teorico di recuperabilità dei polimeri nel prodotto in ingresso, ricordando che il quantitativo di poliolefine nello stream IN è pari a al 60%.

Nella seguente figura si riporta la composizione polimerica delle principali frazioni recuperate e degli scarti totali dal processo di selezione nella versione complessa per massimizzare il recupero di poliolefine dai sottoprodotti.



Composizione percentuale dei polimeri nelle frazioni recuperate e di sottoprodotti nello schema di processo complesso.

Come previsto, sottoporre i sottoprodotti ad una selezione NIR-PE2 consente di ottenere un prodotto (OUT_PE2) con una percentuale elevata di PE, da avviare alla fase finale di pelletizzazione e macinazione. D'altra parte, l'inserimento del NIR-PE2, oltre a ridurre al 59% il quantitativo totale di scarti, ha anche massimizzato la presenza di frazioni estranee (OP), pari al 50% del flusso: considerando la composizione di tale flusso, è possibile sottoporre lo scarto di processo a lavorazione per produrre (fino al 40% di resa complessiva) un Combustibile Solido Secondario (CSS), in modo da massimizzare ulteriormente il tasso complessivo di recupero dell'impianto e ridurre i quantitativi da avviare a smaltimento.

FASE 3 – Elementi salienti della Fase 3

L'obiettivo del progetto di ricerca svolto per conto di Selectika è lo sviluppo di un trattamento innovativo per il recupero del Plasmix utilizzando dati di letteratura, dati reali di impianto e programmi di simulazione per verificare la possibilità di utilizzo di alcune frazioni plastiche in processi a forte impatto ambientale ed emissioni di CO₂, come gli altoforni. La Fase 3 (fase finale) dell'attività di ricerca costituisce il culmine di tutti gli approfondimenti svolti.



Inizialmente sono state definite le caratteristiche del Plasmix ottimale per le successive fasi di raffinazione sia per caratteristiche merceologiche (film contenitori per liquidi, imballaggi rigidi, frazioni estranee) che per composizione polimerica, definendo come ottimale il flusso Plasmix 3D+Ing, costituito dalla miscela del Plasmix 3D e di quello ingombrante che ammonta al 50% del totale del Plasmix prodotto da Selectika.

Sono state altresì definite le specifiche tecniche quantitative per l'utilizzo di plastiche nell'iniezione in altoforno come agente riducente ausiliario:

- tasso di utilizzo massimo di plastiche di 70 kg/tHM, con contestuale riduzione del polverino di carbone;
- pre-trattamento per eliminazione PET e massimizzazione della presenza di poliolefine (PE/PP);
- trattamento per eliminazione cloro (o mediante eliminazione PVC al di sotto del 2% in peso o mediante processi di estrusione oltre i 250 °C che favoriscono l'eliminazione di cloro come HCl);
- produzione di pellet dopo la selezione dei polimeri di interesse e successivi trattamenti (esempio polverizzazione in granuli dopo produzione di pellet con cicli termici di riscaldamento/raffreddamento).

Nel Capitolo successivo sono stati approfonditi gli aspetti tecnologici di un moderno impianto di selezione utilizzato per trasformare il Plasmix in uno o più flussi di materiali recuperabili, esaminando le sezioni di vagliatura, di separazione balistica, di separazione NIR selettiva per polimeri (PE, PET, PP), utilizzando dati di letteratura e, per la sezione più critica (separazione NIR), dati di una sperimentazione effettuata da Selectika sul flusso di interesse (Plasmix 3D+Ing).

Nell'ultimo capitolo si descrive la costruzione ed i dati ottenuti da un modello di simulazione che costituisce la sintesi di tutta l'attività di ricerca svolta: è stato simulato il trattamento del Plasmix di interesse (3D+Ing) in un impianto costituito da una sezione di vagliatura, un separatore balistico e 3 sezioni NIR selettive per polimeri a cascata. E' stato costruito un codice di calcolo per contemplare l'evoluzione dei flussi massici lungo il percorso di trattamento costituito dalla interconnessione dei blocchi di trattamento, in modo da ottenere i flussi di massa delle frazioni recuperabili e degli scarti e le relative purezze. La costruzione del codice si è basata sulla definizione delle matrici di separazione, ricavate specificamente per ogni sezione di trattamento partendo dai dati di selettività riportati nel capitolo precedente e costruendole con vettori linearmente indipendenti in modo da essere invertibili.

Nel caso di impianto a configurazione semplice, è stata simulata una produzione di:



- 9% di frazione ricca in PET, potenzialmente da avviare a recupero di materia nell'impianto Selectika;
- 29% di polverino di poliolefine per alimentare altoforno;
- 62% di scarti.

L'analisi della purezza delle frazioni effettuata mediante l'algoritmo di calcolo ha consentito di individuare gli spazi di miglioramento del processo per la massimizzazione del tasso complessivo di recupero dell'impianto e la riduzione dei quantitativi da avviare a smaltimento. Introducendo, quindi, una ulteriore sezione di separazione NIR-PE sugli scarti di processo (che ha il miglior tasso di selettività rispetto alle altre tipologie di selettori), è stata effettuata una simulazione nello scenario di impianto complesso in cui si sono ottenuti i seguenti risultati:

- 9% di frazione ricca in PET da avviare potenzialmente a recupero di materia nell'impianto di selezione Selectika;
- 41% di polverino di poliolefine per l'alimentazione di altoforno;
- 20% potenzialmente avviabile a produzione di CSS;
- 30% di scarti non recuperabili a smaltimento.