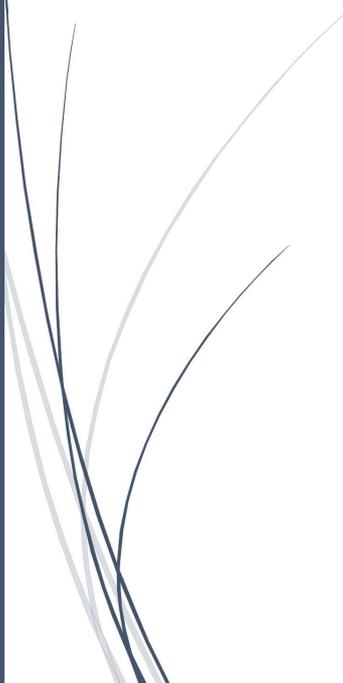




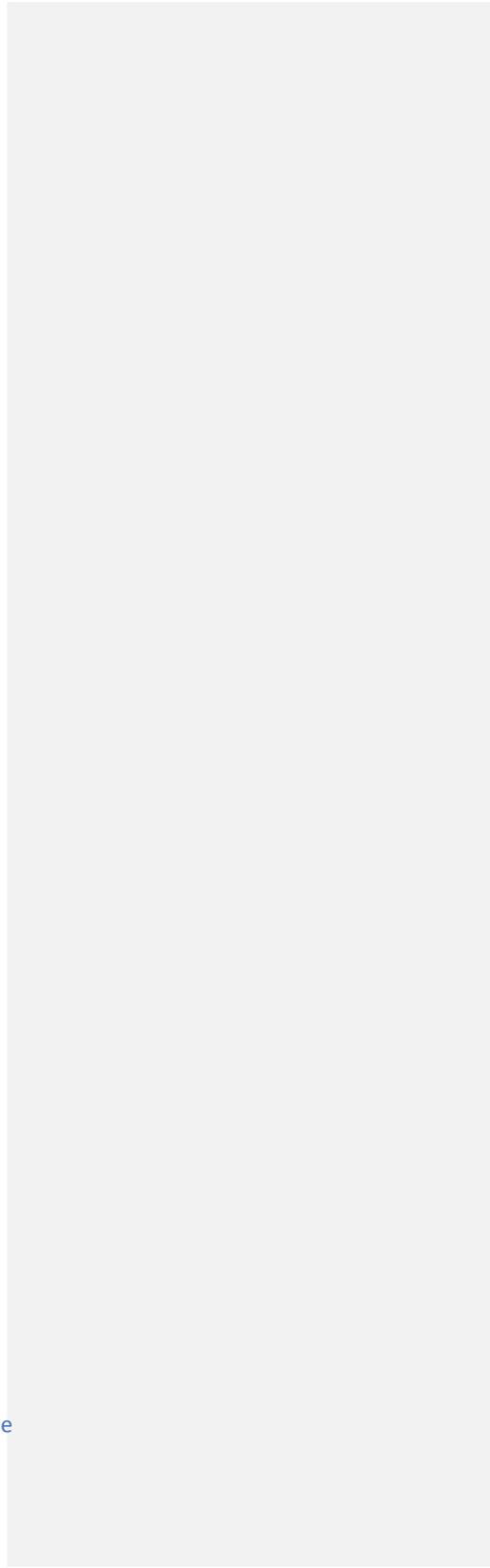
01/07/2021

## Deliverable 1.1

Analisi dell'impatto ambientale dei  
processi di fonderia



New recycling process for the foundry sands:  
innovation aimed to get materials with high added value



## Sommario

1	Scopo del deliverable .....	2
2	Le fasi del processo produttivo .....	3
2.1	I residui di produzione: le terre esauste.....	5
3	Analisi della letteratura scientifica .....	8
3.1	Foundry Sand Source Reduction Options: Life Cycle Assessment Evaluation (Ghormley et al., 2020) 8	
3.2	LCA as a decision support tool for evaluation of best available techniques (BATs) for cleaner production of iron casting (Yilmaz et al., 2015).....	9
3.3	Life Effige – Product Environmental Footprint di tre fonderie.....	11
3.4	Environmental analysis of waste foundry sand via life cycle assessment (Mitterpach et al., 2017a) 12	
3.5	Environmental evaluation of grey cast iron via life cycle assessment (Mitterpach et al., 2017b)..	13
3.6	Evaluating environmental impacts of sand cast products using LCA (Joshi et al., 2011).....	14
4	Metodi di valutazione dell’impatto ambientale impiegati negli studi .....	15
5	Confronto tra i risultati di Yilmaz, di Ecoinvent e delle fonderie italiane.....	18
6	Confronto tra l’impatto ambientale dello scenario base con quello di diversi scenari di riutilizzo delle sabbie .....	23
7	Scenari applicati alle fonderie lombarde.....	32
8	Valutazione degli impatti ambientali del riutilizzo di sabbie di fonderia come sottofondi per rilevati stradali .....	34
9	Contributo del processo di formatura all’impatto ambientale della fonderia .....	39
10	Conclusioni .....	41
11	Bibliografia.....	43
12	Appendice A: Confronto tra i risultati di Yilmaz, quelli di Ecoinvent e quelli delle fonderie italiane: categorie di impatto .....	45
13	Appendice B: Impatto dei processi di fonderia negli scenari di riutilizzo delle sabbie considerati ....	47
14	Appendice C: impatto degli scenari di riutilizzo delle sabbie considerati sulle singole categorie .....	51

## 1 Scopo del deliverable

Il progetto Cariplo 1216\_2020 *New recycling process for the foundry sands: innovation aimed to get materials with high added value* si propone di studiare i possibili riutilizzi delle terre di fonderia e verificare anche in quali di essi è possibile ottenere il maggior valore aggiunto sotto il profilo sia economico sia ambientale. La letteratura accademica sull'economia circolare mostra diversi casi di sabbie di fonderia riciclate come materia prima secondaria, ma non si è mai sviluppato un mercato di queste sabbie, nonostante le potenzialità economiche che potrebbero innescarlo, per due ordini di ragioni:

- ✓ l'ampia diversificazione delle tipologie di sabbie utilizzate, che spiega anche la numerosità dei settori nei quali è possibile avviarle come materia prima secondaria<sup>1</sup>;
- ✓ le barriere normative e informative che ostacolano il suo sviluppo.

Per superare questi due elementi critici, nel progetto è prevista una ampia mappatura delle sabbie di fonderia<sup>2</sup>, la verifica delle loro caratteristiche chimico-fisiche in laboratorio e la valutazione tecnica dei settori verso i quali possono essere indirizzate come materia prima secondaria. I benefici ambientali verranno valutati tramite una analisi LCA comparata che metta in evidenza le emissioni evitanti mediante un processo di economia circolare volto ad allungare il ciclo di vita delle sabbie come input. Per fare un'analisi completa è necessario aver definito con precisione in quali settori avverrà il processo di riciclo e se queste sabbie potranno essere utilizzate come input "tal quale", senza trattamenti aggiuntivi o se invece sono necessari trattamenti di pulitura di diversa natura (lavaggi, trattamenti di calcinazione, etc.). Questo sarà possibile solo dopo aver completato la raccolta dei campioni e le analisi di laboratorio, che rappresentano un elemento centrale del progetto<sup>3</sup>.

L'obiettivo di questo deliverable è di definire il ciclo di vita dei processi di fonderia, i confini del sistema che verrà considerato nel processo di riciclo delle sabbie e di fornire una prima valutazione dei benefici ambientali in base alla letteratura esistente. Questi benefici verranno valutati mediante un confronto comparato tra uno scenario baseline e scenari alternativi di riciclo delle sabbie.

Il conferimento in discarica sarà considerato uno scenario baseline di riferimento per la valutazione comparativa per altri scenari che prevedono diverse alternative di riutilizzo, sia interne che esterne. I confini del sistema in questo caso saranno dalla fase di produzione delle materie prime al cancello di uscita delle fonderie. Non verranno considerate le fasi successive perché sono articolate su numerosi settori.

L'analisi sarà ulteriormente integrata dopo le prove di laboratorio volte ad individuare i settori di riutilizzo e la valutazione degli eventuali trattamenti integrativi che si renderanno necessari. In questa fase si allargheranno i confini del sistema fino alla prima fase del ciclo produttivo dell'impresa che usa la sabbia riciclata per vedere quanto impattano questi trattamenti e quale sia l'effettivo miglioramento in termini di impatto ambientale.

Per la valutazione degli impatti del ciclo di vita delle fonderie ci è basati sulla letteratura esistente. Pertanto, questo deliverable presenta un'analisi degli studi attualmente disponibili nella letteratura scientifica

---

<sup>1</sup> Attualmente le sabbie sono utilizzate nella maggior parte dei casi nei sottofondi di rilevati stradali, ma vi sono studi e ricerche che mostrano il loro riutilizzo in settori come il cemento, i conglomerati bituminosi, la ceramica, i laterizi e il vetro. A livello di pratica industriale, tuttavia, vi è solo un piccolo utilizzo nel cemento, nei conglomerati bituminosi e nella produzione di mattoni.

<sup>2</sup> È previsto il campionamento di almeno 20 fonderie diverse, che rappresentano oltre il 20% delle fonderie che fanno ampio uso di sabbie a livello regionale e circa il 10% a livello nazionale.

<sup>3</sup> Al momento della definizione di questo deliverable, luglio 2021, è stata completata la prima mappatura delle fonderie lombarde e delle schede tecniche delle sabbie utilizzate ed è in corso la raccolta dei campioni.

sull'impatto ambientale, valutato tramite analisi del ciclo di vita (LCA), dei processi di lavorazione dei metalli all'interno delle fonderie con un focus sui processi che implicano l'utilizzo di sabbie. Il report presenta:

1. una breve descrizione del processo produttivo delle fonderie e della caratterizzazione delle sabbie che si vuole trattare come materia prima secondaria;
2. la letteratura scientifica che propone studi di valutazione dell'impatto ambientale mediante analisi LCA dei processi di fonderia;
3. le metodologie di valutazione dell'impatto ambientale (metodi LCIA) e le categorie di impatto prevalentemente usate nella letteratura scientifica nel caso dei processi di fonderia;
4. una analisi dell'impatto ambientale del processo di formatura;
5. un confronto tra i risultati delle analisi LCA condotte negli studi descritti al punto 1 ritenuti comparabili sulla base delle unità funzionali e dei metodi LCIA impiegati;
6. un confronto tra i risultati di analisi LCA condotte per diversi metodi di riutilizzo delle sabbie di fonderia (scenario base con smaltimento in discarica delle sabbie, rigenerazione primaria, rigenerazione primaria e secondaria e riutilizzo delle sabbie in processi esterni alla fonderia).

Purtroppo, gli articoli riportati utilizzano metodologie, unità di misura e categorie di impatto differenti nell'analisi LCA e questo rende difficilmente confrontabili tra loro i dati, se non per alcune delle categorie principali (e non in tutti i casi). Nonostante questo, è stato comunque possibile fornire un quadro di riferimento abbastanza preciso degli impatti del processo produttivo delle fonderie e del valore aggiunto che può offrire il riutilizzo delle sabbie di fonderia.

Il primo capitolo di questo deliverable è una descrizione delle principali fasi del processo produttivo delle fonderie, al fine di evidenziare i confini del sistema e mettere in evidenza il ruolo delle sabbie come flusso elementare di processo.

## 2 Le fasi del processo produttivo

Le fasi attraverso le quali si realizza il processo produttivo delle fusioni in ghisa e in acciaio<sup>4</sup> sono le seguenti:

1. Produzione delle materie prime in entrata;
2. Realizzazione della forma (Formatura) e fabbricazione delle anime;
3. Fusione;
4. Colata (riempimento della forma);
5. Distaffatura/sterratura;
6. Finitura (taglio attacchi di colata e materozze, granigliatura, molatura, etc.);
7. Recupero terre e sabbie.

Una breve descrizione di ogni fase del processo è riportata di seguito.

1. **Produzione delle materie prime in entrata:** Approvvigionamento e produzione delle materie prime: acciaio di base e rottame di acciaio, ferroleghie e altri metalli, materiali ausiliari (sabbie, resine, etc.).
2. **Formatura:** La forma è la cavità che riproduce (in negativo) la geometria del getto che deve essere prodotto ed all'interno della quale viene versato il metallo fuso; la forma può essere di tipo "a perdere" (ad ogni ciclo la forma viene distrutta per poter estrarre il getto) o "permanente" (con la stessa forma si possono realizzare da centinaia a milioni di getti). Per ottenere le cavità interne al getto, vengono impiegate altre parti di forma "a perdere" (tecnicamente dette "anime") ovvero, nel

<sup>4</sup> Le sabbie sono principalmente utilizzate nelle fusioni in ghisa e in acciaio, ovvero per i metalli ferrosi. Vi è anche un limitato utilizzo per le fusioni di metalli non ferrosi, soprattutto il rame.

caso delle forme “permanenti” (tecnicamente: “stampi” e “conchiglie”) utilizzando inserti metallici che si posizionano automaticamente in fase di chiusura dello stampo.

- a. **Fonderie con forme a perdere:** Nel sistema di formatura di tipo “a perdere” - utilizzato nella maggior parte delle fonderie di metalli ferrosi - ciascuna forma viene utilizzata una sola volta e distrutta al momento dell'estrazione del getto; la forma è realizzata con sabbie (comunemente silicee, ma anche di cromite) opportunamente miscelate con leganti e/o additivi che conferiscono loro le proprietà necessarie per consentire le operazioni di formatura. Durante la fase di formatura, viene predisposta l'impronta che riproduce in negativo la geometria esterna del pezzo da realizzare; tale impronta si ottiene costipando la miscela di formatura (sabbia + legante e eventuale catalizzatore), contenuta all'interno di un telaio metallico (denominato staffa) o di legno (nei casi di formatura in motta), contro un modello che ha la forma del pezzo da ottenere. In funzione della natura degli additivi utilizzati con la sabbia per preparare la miscela di formatura, è possibile classificare le tecniche di formatura in due famiglie: la formatura a verde e la formatura in sabbia-resina. Nella formatura a verde la sabbia è miscelata con bentonite, acqua e nero minerale (polvere di carbone) mentre nella formatura in sabbia-resina la sabbia è miscelata con resine (polimerizzate con catalizzatori o, nel caso di resine termoindurenti, per effetto del calore). Per potere consentire l'estrazione del modello dall'impronta, la forma è predisposta divisa in due mezze parti (forma inferiore e forma superiore). Qualora il pezzo da ottenere presenti delle cavità interne, si ricorre all'impiego delle anime, ossia di altre parti di forma preparate in apposite fasi produttive impiegando materiali analoghi a quelli utilizzati per le forme (sabbie e leganti); le anime riproducono in negativo la geometria interna del getto. Le anime, successivamente, vengono posizionate all'interno dell'impronta in una delle due mezze forme, alla quale viene poi accoppiata l'altra. La forma così completata è pronta per ricevere il metallo liquido nella fase di colata attraverso le canalizzazioni appositamente realizzate nella forma.
  - b. **Fonderie con formatura in forme permanenti:** nel sistema di formatura di tipo in “forma permanente”, la forma è sostanzialmente costituita da uno stampo metallico mediante il quale possono essere realizzati numerosi pezzi (da qualche centinaia a milioni di pezzi); nelle fonderie che impiegano questa tecnica di formatura le tecnologie ed i relativi impianti si differenziano sulla base del sistema utilizzato per la colata del metallo nella forma: per gravità in conchiglia statica o in conchiglia posta in rotazione (centrifugazione) utilizzabile per leghe ferrose e non ferrose, a bassa pressione o ad alta pressione (pressocolata), utilizzate per produzione di getti in leghe non ferrose.
3. **Fusione:** In questa fase del processo le materie prime metalliche sono caricate all'interno del Forno Fusorio dove vengono riscaldate fino a portarle a fusione; successivamente il metallo viene surriscaldato fino alla temperatura di spillata, definita in relazione all'assetto tecnico produttivo posto a valle del forno fusorio ed alla tipologia dei getti da produrre (tipo di lega richiesta, massa e spessori di parete del getto, etc.). Tra gli elementi in ingresso sono state considerate anche le materie prime metalliche la cui natura è dipendente dal tipo di lega metallica da produrre e dal tipo di forno fusorio utilizzato. La natura dei vettori energetici utilizzati e degli elementi in uscita dal processo sono invece funzione della tipologia di forno utilizzato: -
- a. Forni Elettrici ad induzione, a resistenza oppure ad arco (nel quale il vettore energetico è l'energia elettrica),
  - b. Forni a gas (rotativo, a crogiolo, a tino, a suola) nel quale il calore è prodotto dalla combustione del gas.
4. **Colata:** Le tecnologie utilizzate per i processi in oggetto differiscono nel caso di colata in forma a perdere oppure in forma permanente.
- a. **Colata in forma a perdere:** Nelle Fonderie che colano in forma in sabbia “a perdere” il metallo liquido è trasferito alle linee di colata e versato per gravità all'interno delle forme. La fase di trasferimento è effettuata mediante siviere movimentate a mezzo di carrelli elevatori o apparecchi di sollevamento mobili. Trascorso il tempo necessario per la solidificazione ed il

raffreddamento del getto ottenuto, la forma viene distrutta nell'operazione di distaffatura, ed il pezzo separato dalla terra (fase di sterratura). La frazione di terra riutilizzabile è recuperata e rinviata alla fase di formatura mentre quella non riutilizzabile è scartata.

- b. **Colata in forma permanente:** Nelle Fonderie che colano in forma "permanente" le tecnologie ed i relativi impianti sono per gravità in conchiglia statica o in conchiglia posta in rotazione (centrifugazione) utilizzabile per leghe ferrose e non ferrose.
5. **Distaffatura e Smaterozzatura:** Trascorso il tempo necessario per la solidificazione ed il raffreddamento del getto ottenuto, nel caso di forme in sabbia ("a perdere") la forma viene distrutta nell'operazione di distaffatura, ed il pezzo separato dalla terra (processo di sterratura). Il getto viene quindi avviato alle lavorazioni di finitura (eliminazione del dispositivo di colata, pulizia superficiale, eliminazione di eventuali bave, trattamenti termici se previsti). Nelle fasi di smaterozzatura il getto viene separato dalle parti metalliche costituenti il sistema di colata (canali e attacchi di colata) e di alimentazione (materozze).
6. **Finitura (granigliatura e controlli):** Il getto ottenuto viene sottoposto ad un processo di granigliatura finalizzato ad eliminare i residui di sabbia adesi al pezzo e tutte le impurità residue. Successivamente il getto viene sottoposto a controlli di "sanità" del pezzo per individuare difetti superficiali e/o occulti. Successivamente il pezzo viene levigato mediante mole a disco, utilizzate anche per eliminare dal getto eventuali bave metalliche o eccessi di metallo nelle zone degli attacchi di colata o dei dispositivi di "alimentazione" dei getti (materozze)
7. **Trasporto e aspirazione delle sabbie:** Dopo la fase di distaffatura, le terre e sabbie ottenute dalla distruzione della forma mediante la granigliatrice vengono trasportate da un nastro verso gli impianti di trattamento delle sabbie per poter essere riutilizzate per un nuovo ciclo produttivo. Durante questa fase le sabbie sul nastro passano per grandi impianti di aspirazione che aspirano le parti delle sabbie più leggere e le inviano in un cassone come rifiuto da smaltire.

## 2.1 I residui di produzione: le terre esauste

Il Settore della fonderia, in particolare quella di metalli ferrosi con sistemi di formatura "a perdere" in sabbia, è caratterizzato da un elevato rapporto rifiuti/prodotto netto, con una elevata produzione specifica di rifiuti (in particolare costituiti da: **terre esauste** e **fini** legati al ciclo di lavorazione delle terre – CER 10.09.08; **polveri** derivanti dalla depolverazione delle emissioni in aria – CER 10.09.12; **scorie** di fusione – CER 10.09.03); analoghe considerazioni valgono per le fonderie di metalli non ferrosi con sistemi di formatura "a perdere".

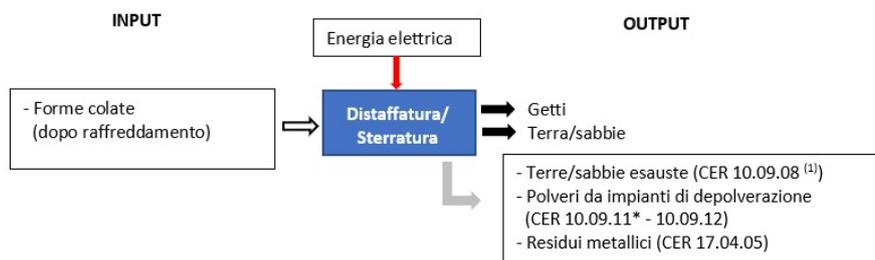


Figura 1: input e output del processo di distaffatura e sterratura.

Per semplicità di esposizione, la descrizione del ciclo che genera il residuo viene effettuata utilizzando uno schema di processo, nel quale sono individuati gli elementi in ingresso e in uscita dal processo. Dal punto di vista dell'analisi LCA descritta nei paragrafi successivi, questa schematizzazione rappresenta anche i "confini del della fase sistema produttivo" oggetto di analisi.

Gli schemi del presente paragrafo riportano riferimenti ai codici rifiuti relativi alla fusione di metalli ferrosi; gli stessi schemi valgono anche per i codici rifiuto originati dalla fusione di metalli non ferrosi.

### Fase produttiva: Recupero terre e sabbie

Le terre/sabbie vengono interamente avviate al riutilizzo interno, previo idoneo trattamento di recupero/rigenerazione, a differente grado di efficienza in relazione alla tecnologia di recupero utilizzata. Ad ogni ciclo, una quota parte delle terre/sabbie in esubero deve essere "scartata"; tale quota corrisponde al quantitativo di sabbia nuova introdotta attraverso le anime, al netto della quota necessaria al reintegro delle quantità corrispondenti alla resa del processo di recupero; in questo caso, le terre e sabbie non si configurano rifiuti.

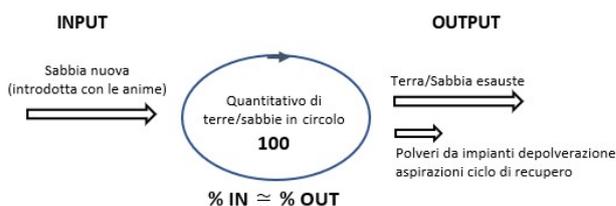


Figura 2: rappresentazione schematica delle sabbie in ingresso e uscita dai processi di fonderia.

Le caratteristiche chimico fisiche e qualitative di tali terre/sabbie scartate, anche se definite "esauste" sono le medesime di quelle rimesse in circolo.

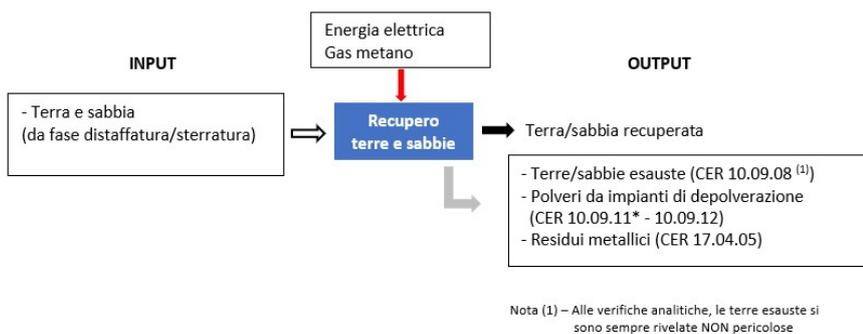


Figura 3: schematizzazione del processo di riutilizzo delle sabbie di fonderia.

## Descrizione dei residui

Fra i vari residui potenzialmente recuperabili decadenti dai processi di fonderia, il presente studio è focalizzato esclusivamente su: **terre e sabbie esauste** (CER 10.09.08 – 10.10.08) e **polveri** derivanti dal trattamento delle emissioni dei cicli di lavorazione delle terre e sabbie (CER 10.09.12 – 10.10.12), che rappresentano residui della medesima natura/composizione, solo a granulometria più fine delle terre/sabbie.

In relazione alla varietà di tipologie di impianti e di tecnologie produttive presenti in fonderia, per effettuare una caratterizzazione dei citati rifiuti, sia di tipo chimico – fisico che mineralogico, è necessario, prioritariamente, considerare lo specifico assetto tecnico-produttivo che origina il residuo.

Le imprese di fonderia sono caratterizzate in relazione al **tipo di lega** elaborata (ferrosa: ghisa, acciaio – non ferrosa: alluminio, magnesio, leghe di rame, leghe di zinco, nichel, titanio, piombo, leghe di metalli preziosi), al **tipo di formatura** (forme in sabbia “a perdere”; forma metallica “permanente”) e al sistema di **colata** (per gravità, a bassa pressione, ad alta pressione “pressocolata”).

Rispetto al tipo di lega elaborata, ai fini degli obiettivi di caratterizzazione dei residui decadenti dal processo di **fusione**, è rilevante il tipo di forno utilizzato in relazione alla fonte energetica utilizzata nel forno (elettrica o da combustibili: gas metano o GPL, carbone coke).

Rispetto al sistema di formatura in sabbia “a perdere” è rilevante il tipo di legante della sabbia utilizzato per forme ed anime: legante **inorganico** (argilla bentonite, silicati) o legante **organico** (resine).

Ciò premesso, con riferimento ai rifiuti originati dai processi di formatura, oggetto del presente studio, si possono individuare le seguenti fattispecie:

### A. Terre e sabbie esauste

1. Terre esauste derivanti da sistemi di formatura “a verde”;
2. Sabbie esauste derivanti da sistemi di formatura in silicato;
3. Sabbie esauste derivanti da processi di formatura in sabbia-resina.

### B. Polveri

1. Polveri derivanti dal ciclo di lavorazione terre “a verde”;
2. Polveri derivanti dal ciclo di recupero sabbia-resina.

### 3 Analisi della letteratura scientifica

Sono stati individuati otto studi che presentano valutazioni di impatto ambientale dei processi di fonderia effettuate mediante analisi LCA. L'elenco degli studi considerati è riportato in [Tabella 1](#),

ha eliminato: Tabella 1

Tabella 1: Elenco degli studi analizzati.

Studio	Primo autore	Anno	Nazione	Reference
Foundry Sand Source Reduction Options: Life Cycle Assessment Evaluation	Ghormely, S	2020	USA	(Ghormley et al., 2020)
Deliverable B2: Company 1	Life Effige	2018	Italia	(Life Effige, 2018a)
Deliverable B2: Company 2	Life Effige	2018	Italia	(Life Effige, 2018b)
Deliverable B2: Company 3	Life Effige	2018	Italia	(Life Effige, 2018c)
LCA as a decision support tool for evaluation of best available techniques (BATs) for cleaner production of iron casting	Yilmaz, O.	2015	Europa	(Yilmaz et al., 2015)
Environmental analysis of waste foundry sand via life cycle assessment	Mitterpach, J.	2017	Slovacchia	(Mitterpach et al., 2017a)
Evaluating environmental impacts of sand cast products using LCA	Joshi, D.	2011	India	(Joshi et al., 2011)
Environmental evaluation of grey cast iron via life cycle assessment	Mitterpach, J.	2017	Slovacchia	(Mitterpach et al., 2017b)

Si riporta di seguito un breve riassunto degli obiettivi e dei risultati ottenuti in ciascuno degli studi presi in considerazione.

#### 3.1 Foundry Sand Source Reduction Options: Life Cycle Assessment Evaluation (Ghormley et al., 2020)

ha formattato: Italiano (Italia)

Tipo di fonderia: fusioni in acciaio

Nazione: USA

Unità funzionale: 1 ton di sabbia usata per le forme

Lo studio considera tre differenti processi di riutilizzo delle sabbie esauste di fonderia e stima, per ciascuno dei tre processi, di quanto si riducono il consumo di risorse e la produzione di rifiuti rispetto a uno scenario base in cui nessuno dei tre processi di riutilizzo delle sabbie esauste è implementato. Lo studio si concentra sul processo di gestione delle sabbie, che consiste nell'acquisizione di sabbia vergine, utilizzo della sabbia nei processi di fonderia e smaltimento finale della sabbia. La sabbia viene estratta dalla cava, trasportata presso la fonderia e utilizzata nei processi di formatura di forme e anime. Dopo l'utilizzo la sabbia può andare incontro a due situazioni diverse: può essere nuovamente riutilizzata all'interno della fonderia oppure essere smaltita. In genere lo smaltimento avviene presso una discarica, ma alcune opzioni di riuso sono possibili (nel settore dell'edilizia). Per il riutilizzo interno alla fonderia sono necessari alcuni trattamenti, definiti di ricondizionamento o rigenerazione. La rigenerazione primaria avviene in quasi tutte le fonderie. Attraverso

trattamenti meccanici e magnetici la sabbia viene separata in base alla dimensione dei granelli. La rigenerazione secondaria non è sempre effettuata nelle fonderie americane e si basa tradizionalmente su trattamenti meccanici e termici, o recentemente anche su trattamenti con microonde.

La fonderia considerata nello studio estrae la sabbia da una cava distante circa 700km e la trasporta presso gli impianti con camion. Per la creazione di forme e anime usa processi no-bake fenolici-uretanici.

Lo studio analizza l'impatto ambientale del ciclo di vita delle sabbie confrontando l'impatto del processo attuale (C in Figura 4, che prevede solo una rigenerazione primaria) con l'impatto ambientale di tre diversi processi di rigenerazione secondaria (rigenerazione secondaria meccanica (M in Figura 4), rigenerazione secondaria termica (T in Figura 4) e rigenerazione secondaria con microonde (Mi in Figura 4)).

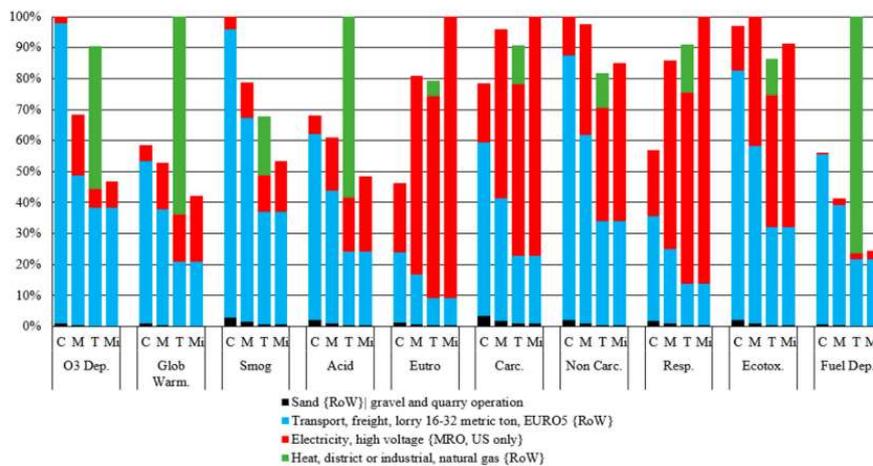


Figura 4: Impatto ambientale sulle categorie midpoint (caratterizzazione) dei processi di ricondizionamento considerati nello studio (C: processo attuale, M: ricondizionamento secondario meccanico; T: ricondizionamento secondario termico; Mi: ricondizionamento secondario con microonde). Fonte: (Ghormley et al., 2020).

Il processo attuale (C in Figura 4) è il più impattante per quanto riguarda le categorie Ozone Layer Depletion, Smog Formation, Human Toxicity – non cancer. La rigenerazione secondaria di tipo termico impatta maggiormente sulle categorie Global Warming, Acidification e Fossil Fuels Depletion, mentre la rigenerazione secondaria con microonde impatta maggiormente sulle categorie Eutrophication Human Toxicity – cancer e Human Toxicity – respiratory.

Lo studio evidenzia inoltre che il processo più impattante in ogni situazione è il trasporto della sabbia vergine dalla cava alla fonderia (Figura 4); una riduzione della distanza di trasporto contribuirebbe in maniera significativa alla riduzione dell'impatto ambientale complessivo del ciclo di vita delle sabbie di fonderia.

### 3.2 LCA as a decision support tool for evaluation of best available techniques (BATs) for cleaner production of iron casting (Yilmaz et al., 2015)

Codice campo modificato

Tipo di fonderia: fusioni in ghisa

Nazione: Europa (dati medi da letteratura rappresentativi di una fonderia di ghisa europea)

Unità funzionale: 1 tonnellata di getto grezzo

L'obiettivo dello studio è la valutazione delle Best Available Technologies (BATs) applicabili al processo di produzione della ghisa utilizzando l'analisi LCA come tool di supporto decisionale. La valutazione tiene conto di tre fattori: benefici ambientali ottenibili applicando le BATs; impatto ambientale delle BATs; costo dell'implementazione della BAT. Vengono considerati 11 scenari che applicano BATs diverse; 6 scenari riguardano i processi relativi alla fusione e 5 i processi relativi alla preparazione delle forme e delle anime e la fase di produzione della ghisa (casting stage). In Tabella 2 sono riassunti gli scenari considerati. Per quanto riguarda la produzione di rifiuti solidi, la rigenerazione primaria e secondaria delle sabbie e il loro riutilizzo in altri processi esterni alla fonderia contribuiscono notevolmente alla riduzione di scarti da smaltire.

Tabella 2: riassunto dei dati di inventario per gli scenari considerati. Fonte: (Yilmaz et al., 2015)

Scenario	Materie prime (ton/UF)	Consumi energetici (kWh/UF)	Emissioni in atmosfera (kg/UF)	Emissioni pericolose (kg/UF)	Rifiuti solidi (ton/UF)
Base scenario	9.64	750	478	4.38	8.38
Divided blast operation	9.61	750	480	4.38	8.38
High calorific value coke	9.64	750	482	4.38	8.38
High sulphur content coke	9.64	750	478	4.38	8.38
Furnace off-gas dedusting	9.64	790	466	4.38	8.38
Use of external scrap	9.14	750	489	5.51	8.38
Insufficient cleaning of internal scrap	9.66	748	507	4.38	8.4
Slag pre-treatment and external reuse	9.64	760	478	4.38	8.32
Dedusting exhaust from unit operations	9.64	778	471	2.53	8.39
External reuse of waste sand	9.64	750	478	4.38	0.062
Primary regeneration	5.01	1000	480	4.38	3.71
Primary + Secondary regeneration	2.43	1422	599	4.38	1.04
Minimization of binder and resin consumption	9.47	750	475	4.35	8.35

ha formattato: Inglese (Regno Unito)

Nello scenario base l'impatto dello smaltimento in discarica delle sabbie esauste di fonderia è rilevante (Figura 5). Infatti, il processo di smaltimento in discarica delle sabbie contribuisce al 67% dell'impatto sulla categoria Human Toxicity – cancer, al 94% dell'impatto sulla categoria Human Toxicity – non cancer, al 95% dell'impatto sulla categoria Freshwater ecotoxicity, al 65% dell'impatto sull'eutrofizzazione delle acque dolci al 51% dell'impatto sull'eutrofizzazione delle acque marine.

Lo studio conclude che la produzione di rifiuti solidi è la causa maggiore di impatto ambientale per le fonderie. Le BATs che riducono la produzione di rifiuti solidi aiutano a ridurre in maniera significativa l'impatto ambientale delle fonderie. Il riutilizzo all'esterno delle sabbie e la rigenerazione primaria e secondaria delle sabbie diminuiscono in maniera significativa la quantità di rifiuti solidi prodotti. L'introduzione di questi

processi, che si associano anche a una riduzione delle spese per l'acquisto di sabbia vergine o lo smaltimento, è fondamentale per rendere meno impattante il settore delle fonderie.

	Raw material transport	Melting	Mold making	Core making	Casting	Electricity	Landfill
Global warming	5	39		3	2	34	17
Human toxicity -cancer	1		18	2	1	11	67
Human toxicity - non cancer	1					5	94
Freshwater ecotoxicity	1		1			3	95
Acidification	7	29		26		30	8
Freshwater eutrophication	7					28	65
Marine eutrophication	8	8		23		10	51
Ozone depletion						57	43
Photochemical oxidation	7	30	14	17	1	16	15
Abiotic depletion metals		72	27			1	
Abiotic depletion fossils	6	26				55	13

Figura 5: contributo dei processi di fonderia all'impatto totale per lo scenario base. Fonte: (Yilmaz et al., 2015)

### 3.3 Life Effige – Product Environmental Footprint di tre fonderie

Tipo di fonderia: fusioni in ghisa

Nazione: Italia

Unità funzionale: 1 ton di getto grezzo

Nell'ambito del progetto europeo Life Effige sono state elaborate le PEF (Product Environmental Footprint) di diverse fonderie italiane. Gli studi condotti considerano l'impatto ambientale originato dalla produzione e dall'approvvigionamento di materie prime e quello dovuto a tutte le operazioni di fusione, formatura, colata, distaffatura e recupero sabbie che avvengono all'interno dello stabilimento della fonderia. Per ciascuna fonderia viene valutato l'impatto ambientale di due prodotti (denominati Prodotto 1 Prodotto 2). Le differenze nei processi di formatura impiegati dalle tre fonderie per i due prodotti sono riassunte in Tabella 3.

Tabella 3: differenze nei processi di formatura dei due prodotti delle tre fonderie italiane considerate.

Fonderia 1		Fonderia 2		Fonderia 3	
Prodotto 1	Prodotto 2	Prodotto 1	Prodotto 2	Prodotto 1	Prodotto 2
Sabbia rigenerata	Sabbia rigenerata + sabbia nuova	Sabbia silicea	Sabbia silicea	Sabbia silicea	Sabbia silicea
Resine	Bentonite	Resine	Resine	Resine	Bentonite

Catalizzatori	Nero minerale	Catalizzatori	Catalizzatori	Catalizzatori	Nero minerale
---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

Lo studio conclude che l'impatto ambientale della fase di produzione e approvvigionamento di materie prime è più rilevante rispetto a quello dei processi di produzione che avvengono all'interno della fonderia per la maggior parte delle categorie di impatto considerate. I risultati presentati nelle PEF delle tre fonderie italiane sono stati ricalcolati nel 2021 applicando il metodo LCIA Environmental Footprint (EF), v.2.

### 3.4 Environmental analysis of waste foundry sand via life cycle assessment (Mitterpach et al., 2017a)

Tipo di fonderia: fusioni in ghisa

Nazione: Slovacchia

Unità funzionale: 1 ton di getto grezzo

Lo studio valuta l'impatto ambientale dei processi di creazione e utilizzo delle sabbie di fonderia. Il processo che porta ad avere sabbie esauste da smaltire è infatti molto impattante dal punto di vista ambientale sul consumo di risorse, sulla salute umana e sulla qualità degli ecosistemi. La fonderia considerata, presso Hronec in Slovacchia, ha una capacità di produzione di 20 ton/giorno. Per la produzione di forme e anime viene utilizzata sabbia silicea e come legante viene impiegata bentonite. La fonderia dispone di sistemi di rigenerazione primaria delle sabbie esauste.

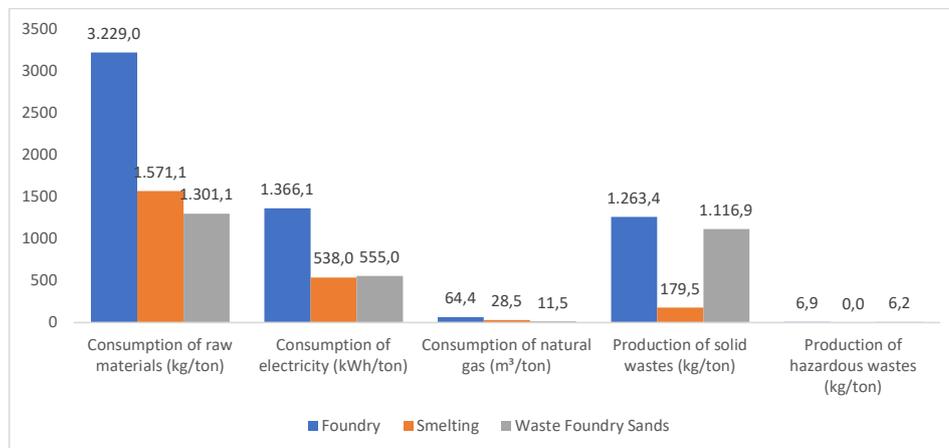


Figura 6: Consumi di materie prime, energia elettrica, gas naturale e produzione di rifiuti solidi e rifiuti pericolosi per il processo di fonderia (totale dei consumi), il processo di fusione e il processo di generazione delle sabbie di fonderia. Fonte: (Mitterpach et al., 2017a)

All'impatto ambientale totale della fonderia contribuiscono principalmente i consumi di materie prime, i consumi elettrici e la produzione di rifiuti solidi; il consumo di gas naturale e la produzione di rifiuti pericolosi hanno impatti trascurabili (Figura 6). Per quanto riguarda il consumo di materie prime il processo di fusione impatta maggiormente rispetto al processo di generazione di sabbie esauste mentre i processi di generazione delle sabbie esauste impattano maggiormente sulla produzione di rifiuti solidi rispetto alla fusione. I due

processi (fusione e generazione di sabbie esauste) impattano allo stesso modo sui consumi elettrici. L'impatto ambientale è valutato con 2 metodi: ReCiPe Endpoint ed Impact 2002+. Secondo il ReCiPe Endpoint la categoria su cui si ha maggiore impatto è la salute umana (50.4% dell'impatto totale) seguita dal consumo di risorse (27.3%) e qualità degli ecosistemi (22.3%). Secondo l'IMPACT 2002+ l'impatto maggiore si ha sul consumo di risorse (38.8%), seguito dalla salute umana (34.5%), cambiamento climatico (24.5%) e qualità degli ecosistemi (2.2%).

### 3.5 Environmental evaluation of grey cast iron via life cycle assessment (Mitterpach et al., 2017b)

Tipo di fonderia: fusioni in ghisa

Nazione: Slovacchia

Unità funzionale: 1 ton di getto grezzo

Lo studio valuta l'impatto ambientale della fonderia di Hronec, una fonderia di ghisa che ha una capacità di produzione di 20 ton/giorno. Vengono identificati i processi di produzione che hanno il maggiore impatto ambientale e proposte delle soluzioni per ridurre l'impatto ambientale dei processi individuati. Il metodo utilizzato è il ReCiPe Endpoint, ma l'impatto viene valutato anche a livello di Midpoint.

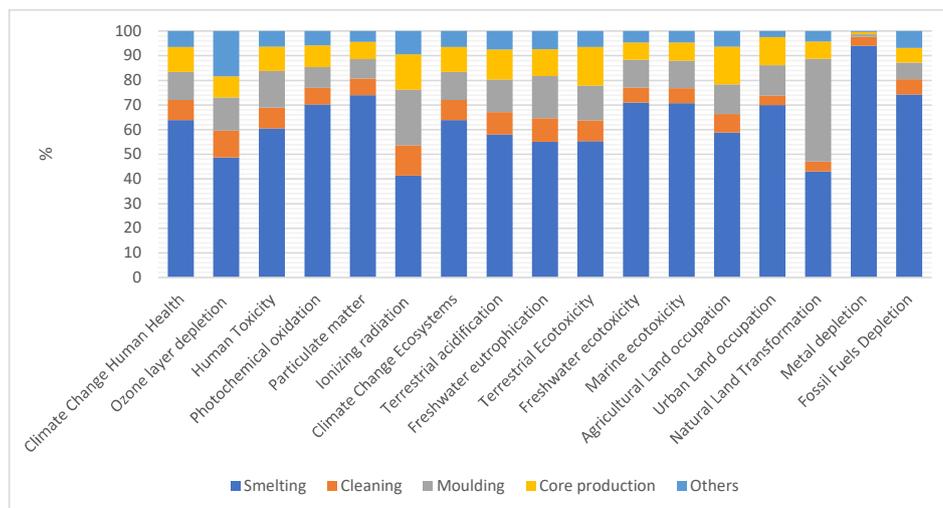


Figura 7: risultati della caratterizzazione sulle categorie midpoint del metodo ReCiPe per la produzione di 1 ton di getto grezzo di ghisa. Fonte: (Mitterpach et al., 2017b)

L'impatto ambientale maggiore si ha sul consumo di risorse (60.8% dell'impatto totale), seguito dall'impatto sulla salute umana (26%) e da quello sulla qualità degli ecosistemi (13.2%). Nel dettaglio il processo di fusione risulta altamente impattante su tutte le categorie midpoint (Figura 7), seguito dal processo di formatura. La fonderia dispone di un circuito di rigenerazione delle sabbie esauste.

### 3.6 Evaluating environmental impacts of sand cast products using LCA (Joshi et al., 2011)

Tipo di fonderia: fusioni in ghisa, acciaio, alluminio

Nazione: India

Unità funzionale: 1 kg di getto grezzo di ghisa

Lo studio stima l'impatto ambientale dei metalli di fusione (ghisa, alluminio e acciaio). Viene considerata l'influenza sull'impatto ambientale del tipo di forno di fusione, dei parametri del processo di fusione (temperatura del getto, rapporto metallo-sabbia...) e del tipo di fonti energetiche impiegate.

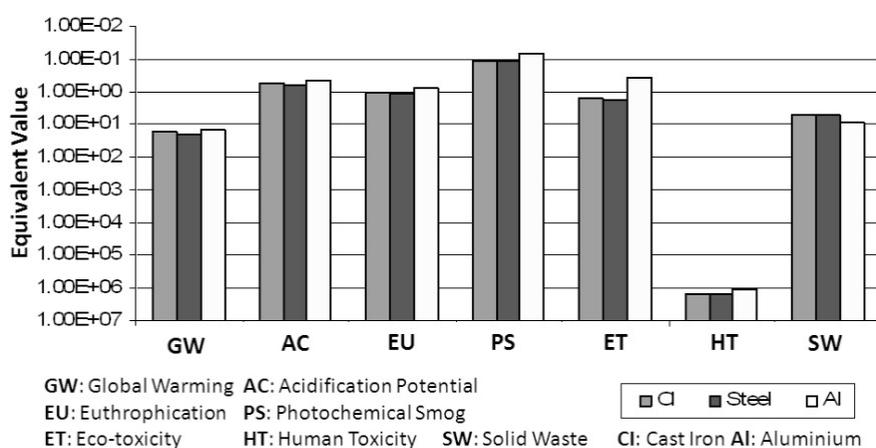


Figura 8: impatto totale sulle categorie del metodo EDIP per la produzione di 1 kg di getto grezzo di ghisa (CI), acciaio (Steel) e alluminio (Al). Fonte: (Joshi et al., 2011)

Per quanto riguarda la produzione di ghisa i maggiori impatti ambientali si hanno sulla produzione di smog fotochimico, seguita dall'acidificazione e dall'eutrofizzazione. Il metodo LCIA utilizzato è EDIP.

## 4 Metodi di valutazione dell'impatto ambientale impiegati negli studi

Le unità funzionali e i metodi di valutazione di impatto (metodi LCIA) utilizzati dagli studi analizzati sono riassunti in Tabella 4. È evidente che un confronto tra gli studi è spesso problematico per la non comparabilità dei metodi LCIA e delle unità funzionali.

Tabella 4: riassunto dei metodi LCIA e delle unità funzionali degli studi considerati.

Studio	Unità funzionale	Metodo LCIA
Foundry Sand Source Reduction Options: Life Cycle Assessment Evaluation	1 ton di sabbia per forme	TRACI 2.1
Deliverable B2: Company 1	1 ton di getto grezzo di ghisa	ILCD 2011 Midpoint v. 1.10
Deliverable B2: Company 2	1 ton di getto grezzo di ghisa	ILCD 2011 Midpoint v. 1.10
Deliverable B2: Company 3	1 ton di getto grezzo di ghisa	ILCD 2011 Midpoint v. 1.10
Deliverable B2: Company 1; aggiornamento 2021	1 ton di getto grezzo di ghisa	EF v.2
Deliverable B2: Company 2; aggiornamento 2021	1 ton di getto grezzo di ghisa	EF v.2
Deliverable B2: Company 3; aggiornamento 2021	1 ton di getto grezzo di ghisa	EF v.2
LCA as a decision support tool for evaluation of best available techniques (BATs) for cleaner production of iron casting	1 ton di getto grezzo	ReCiPe Midpoint, ILCD 2011
Environmental analysis of waste foundry sand via life cycle assessment	1 ton di getto grezzo di ghisa	ReCiPe Endpoint, IMPACT 2002+
Evaluating environmental impacts of sand cast products using LCA	1 kg di getto grezzo di ghisa	EDIP
Environmental evaluation of grey cast iron via life cycle assessment	1 ton di getto grezzo	ReCiPe Midpoint, ReCiPe Endpoint

Inoltre, in Tabella 5 si vede come le categorie di impatto utilizzate dai diversi metodi LCIA e le differenti unità di misura impiegate per le stesse categorie di impatto rendano difficile un confronto tra gli studi analizzati.

Tabella 5: categorie di impatto utilizzate nei diversi studi considerati e unità di misura delle categorie di impatto.

Studio	Metodo	Categorie di impatto considerate	Unità di misura
Foundry Sand Source Reduction Options: Life Cycle Assessment Evaluation	TRACI 2.1	Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq
		Global warming	kg CO2 eq
		Smog formation	kg O3 eq
		Acidification	kg SO2 eq
		Eutrophication	kg N eq
		Carcinogens	CTUh
		Non carcinogens	CTUh
		Respiratory	CTUh

		Ecotoxicity	CTUe
		Fossil Fuels Depletion	MJ
PEF Fonderia 1, PEF Fonderia 2, PEF Fonderia 3	ILCD 2011 Midpoint v. 1.10	Climate change, fossil	kg CO2 eq
		Climate change, biogenic	kg CO2 eq
		Climate change, land use & transf	kg CO2 eq
		Ozone depletion	kg CFC-11 eq
		Human toxicity, non-cancer effects	CTUh
		Human toxicity, cancer effects	CTUh
		Particulate matter	kg PM2.5 eq
		Ionizing radiation HH	kBq U235 eq
		Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq
		Acidification	molc H+ eq
		Terrestrial eutrophication	molc N eq
		Freshwater eutrophication	kg P eq
		Marine eutrophication	kg N eq
		Freshwater ecotoxicity	CTUe
		Land use	kg C deficit
		Water resource depletion	m3 water eq
Mineral, fossil & ren resource depletion	kg Sb eq		
PEF Fonderia 1, PEF Fonderia 2, PEF Fonderia 3; aggiornamento 2021	EF v.2	Climate change	kg CO2 eq
		Climate change - fossil	kg CO2 eq
		Climate change - biogenic	kg CO2 eq
		Climate change - land use and transform.	kg CO2 eq
		Ozone depletion	kg CFC11 eq
		Ionising radiation, HH	kBq U-235 eq
		Photochemical ozone formation, HH	kg NMVOC eq
		Respiratory inorganics	disease inc.
		Non-cancer human health effects	CTUh
		Cancer human health effects	CTUh
		Acidification terrestrial and freshwater	mol H+ eq
		Eutrophication freshwater	kg P eq
		Eutrophication marine	kg N eq
		Eutrophication terrestrial	mol N eq
		Ecotoxicity freshwater	CTUe
		Land use	Pt
Water scarcity	m3 depriv.		
Resource use, energy carriers	MJ		
Resource use, mineral and metals	kg Sb eq		
LCA as a decision support tool for evaluation of best available techniques (BATs) for cleaner production of iron casting	ReCiPe Midpoint, ILCD 2011	Global warming	kg CO2 eq
		Human toxicity cancer	CTUh
		Human Toxicity non cancer	CTUh
		Freshwater ecotoxicity	CTUe
		Acidification	kg SO2 eq
		Freshwater eutrophication	kg P eq
		Marine eutrophication	kg N eq
		Ozone depletion	kg CFC-11 eq
		Photochemical oxidation	kg NMVOC eq
		Abiotic depletion metals	kg Sb eq
		Abiotic depletion fossils	MJ
		Climate change	Pt

Environmental analysis of waste foundry sand via life cycle assessment	ReCiPe Endpoint, IMPACT 2002+	Human Health	Pt
		Ecosystem Quality	Pt
		Resources	Pt
Environmental evaluation of grey cast iron via life cycle assessment	ReCiPe Midpoint, ReCiPe Endpoint	Climate Change Human Health	DALY
		Ozone layer depletion	DALY
		Human Toxicity	DALY
		Photochemical oxidation	DALY
		Particulate matter	DALY
		Ionizing radiation	DALY
		Climate Change Ecosystems	species.yr
		Terrestrial acidification	species.yr
		Freshwater eutrophication	species.yr
		Terrestrial Ecotoxicity	species.yr
		Freshwater ecotoxicity	species.yr
		Marine ecotoxicity	species.yr
		Agricultural Land occupation	species.yr
		Urban Land occupation	species.yr
		Natural Land Transformation	species.yr
Metal depletion	\$		
Fossil Fuels Depletion	\$		
Evaluating environmental impacts of sand cast products using LCA	EDIP	Global warming	Equivalent value
		Acidification	Equivalent value
		Eutrophication	Equivalent value
		Photochemical smog	Equivalent value
		Ecotoxicity	Equivalent value
		Human Toxicity	Equivalent value
		Solid waste	Equivalent value

Per questi motivi si è scelto di prendere come studio di riferimento (Yilmaz et al., 2015), che considera l'impatto ambientale di una fonderia media europea e propone diversi scenari per i processi di riutilizzo delle sabbie di fonderia (rigenerazione primaria e secondaria, riutilizzo all'esterno della fonderia). I risultati di (Yilmaz et al., 2015) sono confrontati con quelli presenti nelle PEF delle tre fonderie italiane che hanno partecipato al progetto EFFIGE. Inoltre, grazie all'uso del software per analisi LCA SimaPro, è possibile effettuare un confronto tra l'impatto ambientale dello studio di riferimento, quello delle fonderie italiane e quello di una fonderia media europea calcolato sulla base dei dati presenti nel database Ecoinvent (Classen et al., 2009). L'utilizzo del software consente l'applicazione di diverse metodologie di calcolo dell'impatto ambientale e permette dunque un confronto più completo dei risultati delle PEF delle fonderie italiane rispetto a quello basato su (Yilmaz et al., 2015). Tuttavia il confronto con (Yilmaz et al., 2015) resta fondamentale, perché questo è il solo studio che valuta l'impatto ambientale di differenti tipologie di riutilizzo delle sabbie di fonderia.

## 5 Confronto tra i risultati di Yilmaz, di Ecoinvent e delle fonderie italiane

I risultati dell'analisi LCA condotta da Yilmaz (Yilmaz et al., 2015) per lo scenario base della fonderia media europea sono confrontati con quelli ottenuti attraverso la valutazione dell'impatto ambientale con metodo ILCD Midpoint 2011 e con quelli delle PEF delle tre fonderie italiane riferite al 2018 (Life Effige, 2018a, 2018b, 2018c). Ciascuna fonderia italiana ha presentato i risultati dell'analisi LCA per due diversi prodotti. I risultati dell'analisi LCA di entrambi i prodotti sono presentati in Tabella 6.

Tabella 6: confronto dei risultati delle analisi LCA condotte da Yilmaz (Yilmaz, 2017) e da tre fonderie italiane (risultati di due diversi prodotti per ciascuna fonderia italiana)\*

Categoria d'impatto	Yilmaz – scenario base	Fonderia 1 prodotto 1	Fonderia 2 prodotto 1	Fonderia 3 prodotto 1	Fonderia 1 prodotto 2	Fonderia 2 prodotto 2	Fonderia 3 prodotto 2	Ecoinvent
Global Warming (kg CO2 eq)	1024.5	1992.702	2762.89	2068.27	2006.662	2903.91	1289.34	1589.08
Human toxicity- cancer (CTUh)	2.68E-06	2.31E-05	3.06E-04	1.38E-04	2.47E-04	4.43E-04	1.09E-04	6.95E-03
Human toxicity- non cancer (CTUh)	1.37E-03	2.85E-04	5.05E-04	5.40E-04	1.73E-04	6.38E-04	6.86E-04	2.69E-03
Freshwater Ecotoxicity (CTU eco)	991.7	954.294	13667.86	12740.49	2927.038	18504.75	15888.49	92577.35
Acidification (kg SO2 eq)	5.4							
Freshwater Eutrophication (kg P eq)	0.000686	0.203	0.66	0.55	0.076	0.88	0.56	0.70
Marine Eutrophication (kg N eq)	0.37	1.497	3.38	1.82	1.518	3.35	1.25	1.59
Ozone depletion (kg CFC11 eq)	4.93E-07	1.35E-04	1.89E-04	1.58E-04	1.20E-04	2.13E-04	1.17E-04	8.57E-05
Photochemical Oxidation (kg NMVOC)	4.31	6.583	11.65	6.71	6.937	12.31	4.6	5.90
Abiotic depletion - elements (kg Sb eq)	0.0049							
Abiotic depletion - fossils (MJ)	10976.1							

\* I risultati per la categoria Acidification non sono riportati per le tre fonderie italiane perché l'unità di misura utilizzata nelle PEF è diversa da quella usata da Yilmaz; i risultati delle categorie Abiotic depletion – metals e Abiotic depletion – fossils non sono riportati perché nelle PEF delle fonderie italiane le due categorie sono aggregate e non c'è possibilità di confronto con i valori di Yilmaz.

Nel dettaglio, le seguenti figure mostrano un confronto tra i risultati dell'analisi LCA per una fonderia media europea nello scenario base proposto in (Yilmaz et al., 2015), quella per una fonderia media europea nello scenario proposto da (Classen et al., 2009) e quelli delle tre fonderie italiane considerate per tre categorie di impatto ritenute rappresentative delle macroaree Cambiamento Climatico (categoria Global Warming), Salute Umana (categoria Human Toxicity, risultati aggregati di Human Toxicity –cancer e Human Toxicity – non cancer) e Qualità degli Ecosistemi (Freshwater Ecotoxicity). In Appendice A sono riportati i risultati ottenuti per le rimanenti categorie di impatto.

Dalla tabella precedente è possibile cogliere che le fonderie italiane hanno un impatto mediamente più alto rispetto allo scenario proposto da Yilmaz, che rappresenta una media europea. Le motivazioni di questa differenza, si ipotizza che possano essere sostanzialmente due:

1. il mix energetico utilizzato nelle fonderie, che fa ancora ampio uso di fonti fossili, anche se per la quota di energia elettrica l'Italia ha una componente rilevante di fonti rinnovabili (tra le più alte d'Europa, pari a circa il 35%);

- il tipo prodotto sviluppato, che fa uso di ferroleghie e additivi di diversa natura, con impatti significativi; questo è necessario per offrire una qualità elevata al prodotto sul mercato<sup>5</sup>.

Per quanto riguarda l'impatto sul cambiamento climatico (Figura 9), lo scenario base per la fonderia media europea ipotizzato da Yilmaz (Yilmaz et al., 2015) e quello ipotizzato da Ecoinvent (Classen et al., 2009) si dimostrano meno impattante rispetto agli scenari relativi alle fonderie italiane descritti in (Life Effige, 2018a, 2018b, 2018c). Tra le fonderie italiane i prodotti della Fonderia 2 sono quelli che hanno un impatto maggiore sul cambiamento climatico, mentre il prodotto 2 della Fonderia 3 è il meno impattante (quest'ultimo prodotto risulta anche meno impattante del prodotto medio della fonderia europea ipotizzato in Ecoinvent)

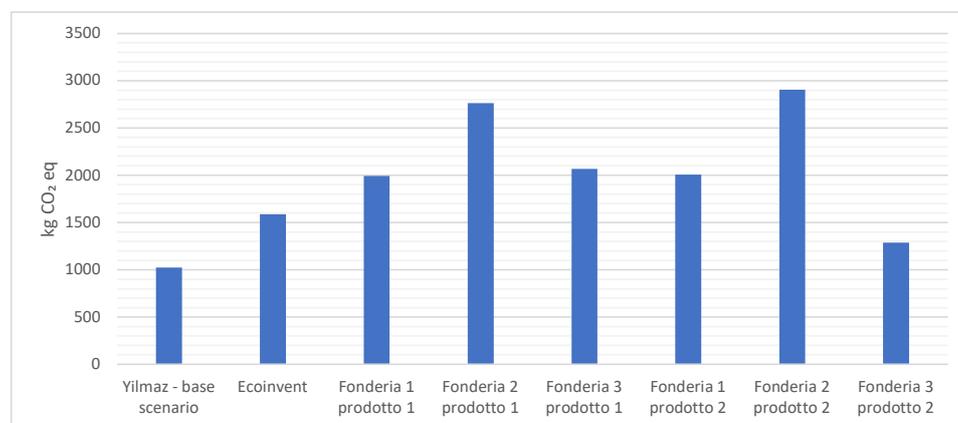


Figura 9: confronto tra l'impatto sulla categoria Global Warming della fonderia media europea (Yilmaz ed Ecoinvent) e dei prodotti 1 e 2 delle tre fonderie italiane che hanno partecipato al progetto Life EFFIGE.

<sup>5</sup> Tali ipotesi non sono suffragate da studi di letteratura o da dati certi. Sono solo inferite da alcune informazioni ottenute dalle imprese e dalle Associazioni di categoria.

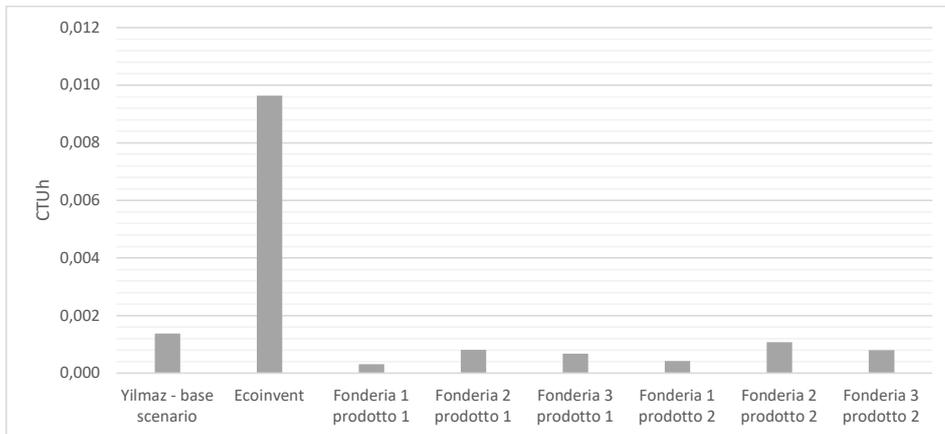


Figura 10: confronto tra l'impatto sulla categoria Human Toxicity della fonderia media europea (Yilmaz ed Ecoinvent) e dei prodotti 1 e 2 delle tre fonderie italiane che hanno partecipato al progetto Life EFFIGE.

L'impatto delle fonderie italiane sulla categoria Human Toxicity è inferiore rispetto a quello della fonderia media europea ipotizzata da Yilmaz e molto inferiore rispetto a quello della fonderia media europea ipotizzata in Ecoinvent (Figura 10). Tra i prodotti delle fonderie italiane quello meno impattante su questa categoria è il prodotto 1 della fonderia 1 (che usa sabbie rigenerate), mentre quello più impattante è il prodotto 2 della Fonderia 2.

Per quanto riguarda la categoria Freshwater Ecotoxicity, l'impatto delle fonderie italiane è in generale maggiore rispetto a quello della fonderia media europea ipotizzata da Yilmaz e di molto inferiore rispetto a quello della fonderia media europea ipotizzata da Ecoinvent (Figura 11); tuttavia riguardo a questa categoria d'impatto si notano differenze significative tra i diversi prodotti. Il prodotto 1 della Fonderia 1 ha un impatto ambientale inferiore rispetto a quello della fonderia media europea ipotizzata da Yilmaz. I prodotti della Fonderia 1, che usa sabbia rigenerata, sono quelli che hanno l'impatto minore su questa categoria, mentre i prodotti della Fonderia 2 sono quelli a maggiore impatto ambientale.

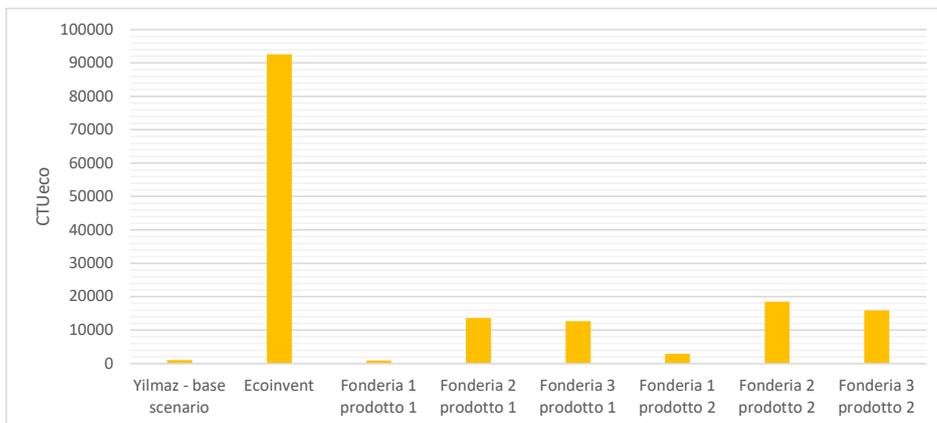


Figura 11: confronto tra l'impatto sulla categoria Freshwater Ecotoxicity della fonderia media europea (Yilmaz ed Ecoinvent) e dei prodotti 1 e 2 delle tre fonderie italiane che hanno partecipato al progetto Life EFFIGE.

I risultati del confronto dell'impatto ambientale tra le tre fonderie italiane e la fonderia media europea (Yilmaz ed Ecoinvent) per le categorie Freshwater Eutrophication, Marine Eutrophication, Ozone Layer Depletion, e Photochemical Oxidant Formation sono presentati in Appendice A. In generale la fonderia media europea proposta da Yilmaz ha un impatto inferiore rispetto alle fonderie italiane su queste categorie, mentre la fonderia media europea proposta in Ecoinvent ha un impatto confrontabile o maggiore su queste categorie rispetto alle fonderie italiane. I prodotti maggiormente impattanti sono quelli della Fonderia 2.

Sono stati considerati anche i risultati delle PEF delle tre fonderie italiane ricalcolati secondo il metodo Environmental Footprint (EF v.2), come riportato nell'aggiornamento del 2021 delle PEF. Inoltre è stato ricalcolato secondo lo stesso metodo anche l'impatto della fonderia media europea descritta nello scenario di Ecoinvent (Classen et al., 2009). Il confronto tra i risultati delle analisi LCA per lo scenario di riferimento di Yilmaz (Yilmaz, 2017), lo scenario di Ecoinvent (Classen et al., 2009) e le PEF delle tre fonderie italiane aggiornate al 2018 e le PEF aggiornate al 2021 è mostrato in Tabella 7. Sono state selezionate le categorie di impatto comparabili tra i tre studi sulla base delle unità di misura utilizzate. Purtroppo, Fonderia 3 non ha fornito la PEF aggiornata al 2021, perciò non è stato possibile inserire tali dati in Tabella 7.

Si può notare che nel caso di Fonderia 1 il ricalcolo dei valori con il metodo EF v.2 ha portato a un leggero incremento dell'impatto su tutte le categorie, mentre il ricalcolo dei valori nel caso di Fonderia 2 ha mostrato una leggera diminuzione dell'impatto sulla categoria "Global Warming" mentre l'impatto su tutte le altre categorie è rimasto invariato su entrambi i prodotti. Per quanto riguarda invece il ricalcolo dell'impatto della fonderia media europea di Ecoinvent con il metodo Environmental Footprint, si nota come le emissioni di gas serra (categoria Global Warming) siano leggermente aumentate, coerentemente con quanto visto nei casi di Fonderia 1 e Fonderia 2. Sono diminuiti gli impatti sulle categorie Human Toxicity, Freshwater Ecotoxicity, Freshwater Eutrophication, Marine Eutrophication, ma sono aumentati gli impatti sulle categorie Ozone Depletion e Photochemical Oxidant Formation.

Tabella 7: Confronto tra i risultati delle valutazioni di impatto per lo scenario di riferimento di Yilmaz (Yilmaz et al., 2015), le PEF delle tre fonderie italiane aggiornate al 2018 (Life Effige, 2018a, 2018b, 2018c) e le PEF delle tre fonderie italiane aggiornate al 2021.

Categoria d'impatto	Yilmaz - base scenario	Ecoinvent	Fonderia 1 prodotto 1		Fonderia 2 prodotto 1		Fonderia 3 prodotto 1		Fonderia 1 prodotto 2		Fonderia 2 prodotto 2		Fonderia 3 prodotto 2	
			2018 PEF	2021 PEF										
Global Warming (kg CO2 eq)	1024.5	1669.6	1992.702	2059.941	2762.89	2759.20	2068.27	ND	2006.662	2043.137	2903.91	2899.22	1289.34	ND
Human toxicity (CTUh)	1.37E-03	4.15E-03	3.08E-04	4.66E-04	8.11E-04	8.11E-04	6.78E-04	ND	4.20E-04	4.88E-04	1.08E-03	1.08E-03	7.95E-04	ND
Freshwater Ecotoxicity (CTU eco)	991.7	17819.6	954.294	1322.538	13667.86	13667.86	12740.49	ND	2927.038	3060.824	18504.75	18504.75	15888.49	ND
Freshwater Eutrophication (kg P eq)	6.86E-04	6.97E-01	2.03E-01	9.09E-01	6.60E-01	6.60E-01	5.50E-01	ND	7.60E-02	6.39E-01	8.80E-01	8.80E-01	5.60E-01	ND
Marine Eutrophication (kg N eq)	0.370	1.585	1.497	1.967	3.380	3.380	1.820	ND	1.518	1.918	3.350	3.350	1.250	ND
Ozone depletion (kg CFC11 eq)	4.93E-07	8.78E-05	1.35E-04	1.39E-04	1.89E-04	1.89E-04	1.58E-04	ND	1.20E-04	1.40E-04	2.13E-04	2.13E-04	1.17E-04	ND
Photochemical Oxidation (kg NMVOC)	4.310	6.823	6.583	8.065	11.650	11.650	6.710	ND	6.937	7.631	12.310	12.310	4.600	ND

## 6 Confronto tra l'impatto ambientale dello scenario base con quello di diversi scenari di riutilizzo delle sabbie

In questa sezione viene proposto un confronto tra gli impatti ambientali di una fonderia media europea considerando i seguenti scenari:

- Uno scenario di riferimento, assunto come scenario base, che prevede lo smaltimento in discarica delle sabbie di fonderia dopo il loro normale ciclo di utilizzo<sup>6</sup>;
- Uno scenario che prevede la rigenerazione primaria delle sabbie all'interno della fonderia (Primary regeneration). Con primary regeneration si intende l'utilizzo di impianti che consentono l'allungamento del ciclo di vita ordinario delle sabbie. Lo scenario include i consumi energetici e di materiale necessari per la rigenerazione primaria delle sabbie.
- Uno scenario che prevede la rigenerazione primaria e secondaria delle sabbie all'interno della fonderia (Primary + secondary regeneration). In questo secondo caso, oltre alla rigenerazione, si rendono necessarie azioni di pulitura e trattamento specifici. Lo scenario include i consumi energetici e di materiale necessari per la rigenerazione primaria e secondaria delle sabbie.
- Uno scenario che prevede il riutilizzo delle sabbie in processi esterni alla fonderia (Sand reuse). Lo scenario include il processo di trasporto delle sabbie presso il sito di riutilizzo.

In questi ultimi tre scenari sono considerati i benefici ambientali derivanti dalla mancata estrazione di sabbia vergine. I dati utilizzati per l'analisi sono riportati in (Yilmaz, 2017).

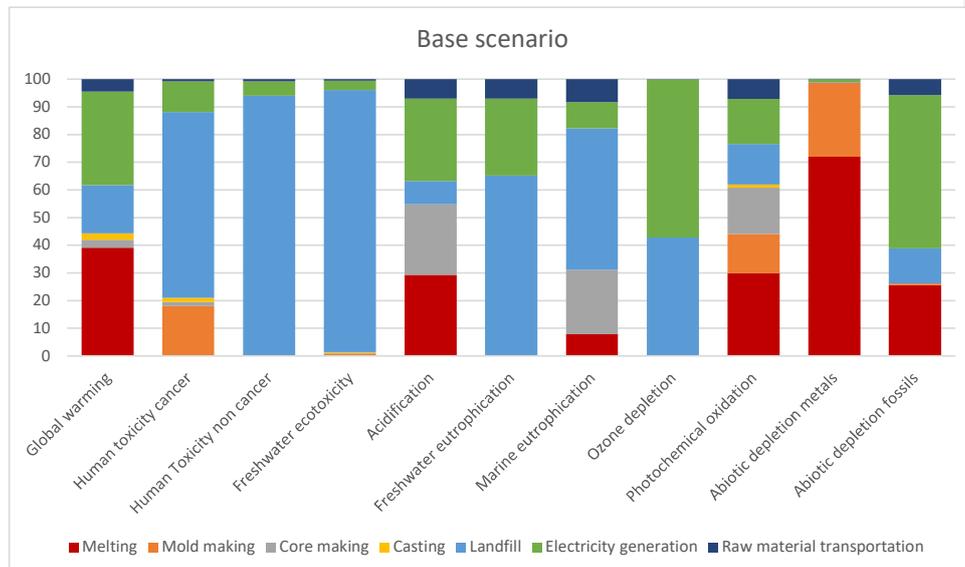


Figura 12: Impatto dei processi di fonderia su ciascuna delle categorie per lo scenario di riferimento. Fonte: elaborazione su dati da (Yilmaz, 2017)

<sup>6</sup> Si ricorda che le sabbie di formatura sono normalmente riutilizzate più volte. E' molto difficile stimare il numero medio dei cicli di utilizzo, perché dipende molto dalla forma e dal tipo di processo, ma un ordine di grandezza è un utilizzo che va dalle 10 alle 20 volte.

Nello scenario di riferimento il processo di smaltimento in discarica delle sabbie di fonderia è altamente impattante sulle categorie Human Toxicity, Freshwater Ecotoxicity, Freshwater Eutrophication, Marine Eutrophication e Ozone Depletion (Figura 12). Il processo di fusione impatta principalmente sulle categorie Global Warming, Acidification, Photochemical Oxidation e Abiotic depletion – metals. I consumi elettrici hanno un impatto rilevante sulle categorie Global Warming, Acidification, Freshwater Eutrophication, Ozone Depletion e Abiotic Depletion – Fossil Fuels.

Il riutilizzo delle sabbie in processi esterni alla fonderia genera benefici ambientali su quasi tutte le categorie di impatto (ad eccezione di Abiotic depletion – metals). I benefici ambientali sono rappresentati dai valori negativi in Figura 13. I benefici più rilevanti si hanno sulle categorie Global Warming, Freshwater Eutrophication e Abiotic Depletion – Fossil Fuels (Figura 13).

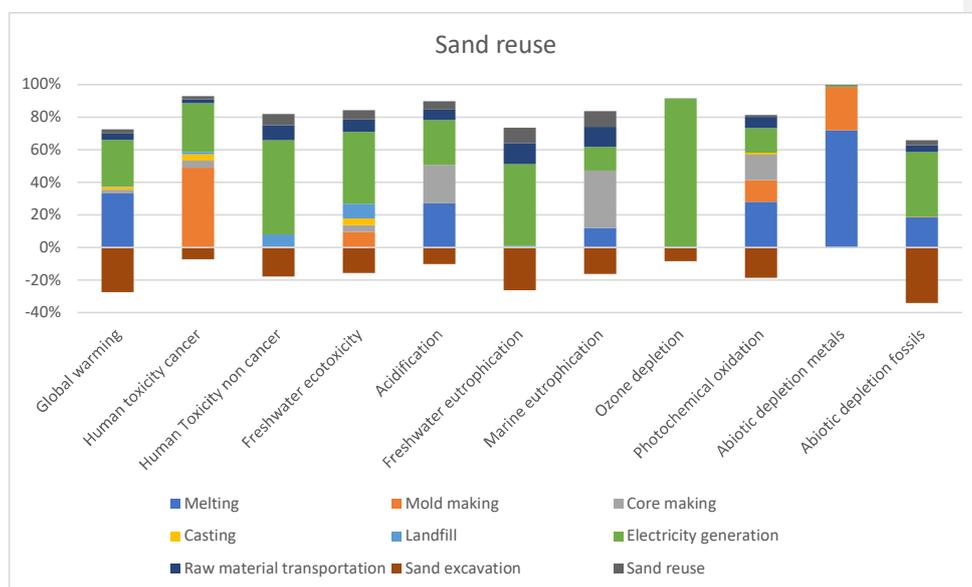


Figura 13: Impatto dei processi di fonderia su ciascuna delle categorie per lo scenario di riutilizzo delle sabbie in processi esterni alla fonderia. Fonte: elaborazione su dati da (Yilmaz, 2017)

Anche la rigenerazione primaria delle sabbie presenta dei vantaggi ambientali. In particolare, i benefici maggiori si hanno sulle categorie Global Warming, Freshwater Eutrophication, Photochemical Oxidation e Abiotic Depletion – Fossil Fuels (Figura 14). Mentre nello scenario di riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia lo smaltimento in discarica dei rifiuti veniva evitato, nel caso della rigenerazione primaria dopo alcuni trattamenti di rigenerazione le sabbie non più idonee vengono comunque smaltite in discarica. Lo smaltimento in discarica incide soprattutto sulle categorie Human Toxicity, Freshwater Ecotoxicity e Freshwater and Marine Eutrophication (Figura 14).

La rigenerazione primaria e secondaria delle sabbie genera benefici ambientali maggiori su alcune categorie di impatto, come Global Warming e Freshwater Eutrophication (Figura 15). Inoltre, rispetto alla rigenerazione primaria, l'impatto legato allo smaltimento in discarica delle sabbie esauste si riduce, perché i quantitativi di sabbia da smaltire per unità funzionale sono inferiori. Tuttavia, l'impatto ambientale legato ai consumi

energetici aumenta, in particolare sulle categorie Human Toxicity, Freshwater Eutrophication e Ozone Depletion (Figura 15).

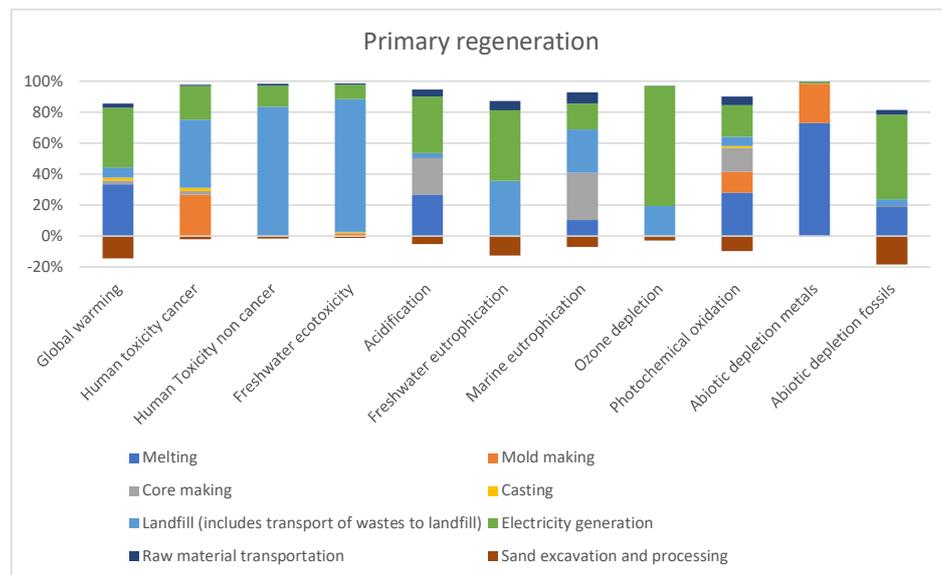


Figura 14: Impatto dei processi di fonderia su ciascuna delle categorie per lo scenario di rigenerazione primaria delle sabbie presso la fonderia. Fonte: elaborazione su dati da (Yilmaz, 2017)

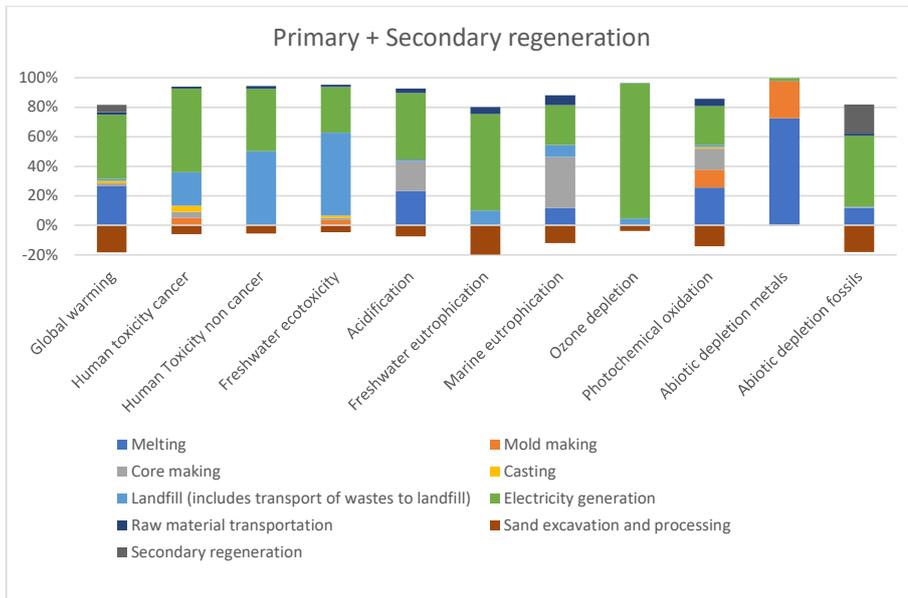


Figura 15: Impatto dei processi di fonderia su ciascuna delle categorie per lo scenario di rigenerazione primaria e secondaria delle sabbie presso la fonderia. Fonte: elaborazione su dati da (Yilmaz, 2017)

I processi che contribuiscono maggiormente nei quattro scenari (di riferimento, rigenerazione primaria, rigenerazione primaria e secondaria e riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia) per tre categorie di impatto ritenute rappresentative di tre macroaree (Cambiamento Climatico, Salute Umana e Qualità degli Ecosistemi) sono rappresentati nelle seguenti figure.

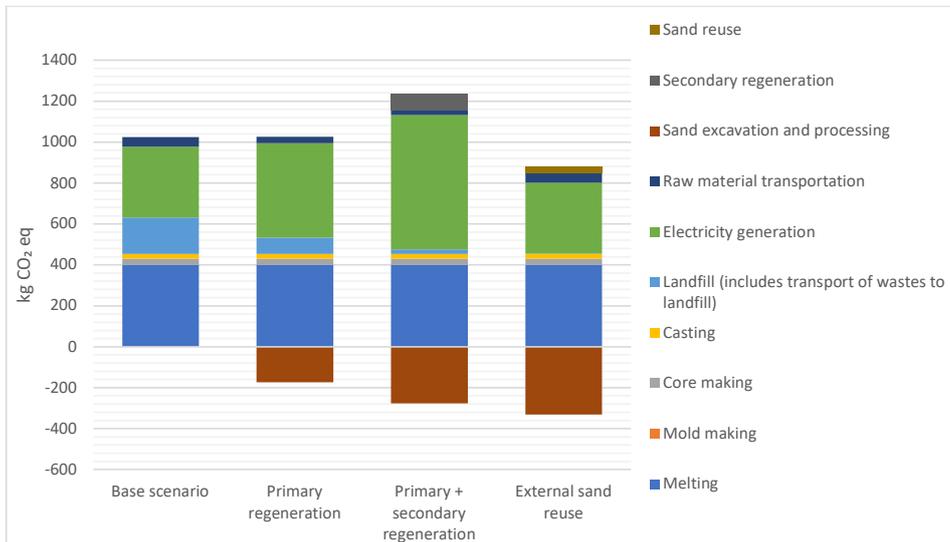


Figura 16: impatto dei quattro scenari considerati (scenario di riferimento, rigenerazione primaria delle sabbie, rigenerazione primaria e secondaria delle sabbie, riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia) sulla categoria Global Warming.

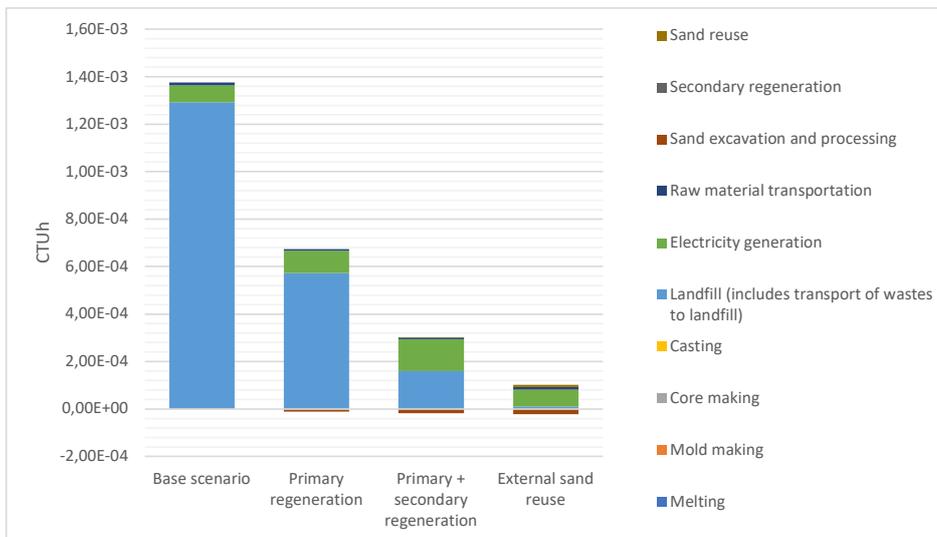


Figura 17: impatto dei quattro scenari considerati (scenario di riferimento, rigenerazione primaria delle sabbie, rigenerazione primaria e secondaria delle sabbie, riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia) sulla categoria Human Toxicity (aggregazione di cancer e non cancer).

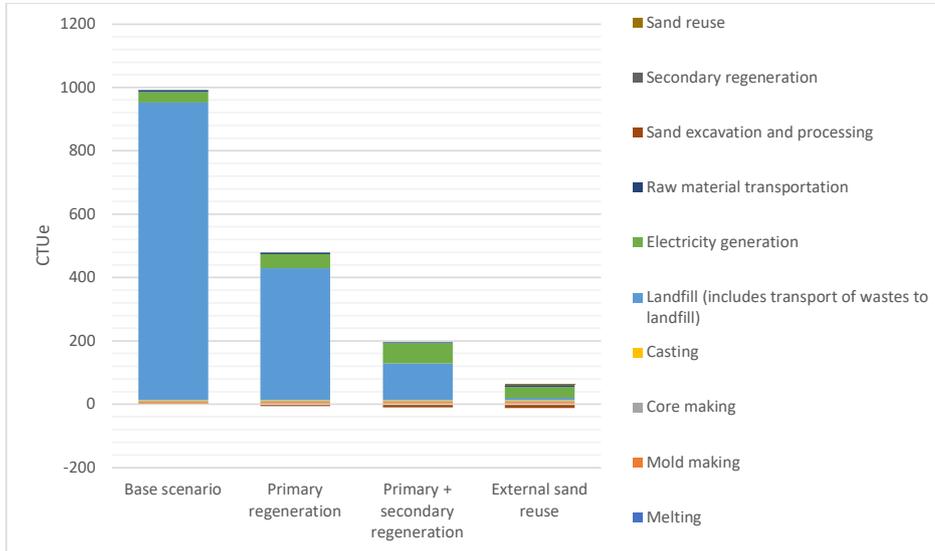


Figura 18: impatto dei quattro scenari considerati (scenario di riferimento, rigenerazione primaria delle sabbie, rigenerazione primaria e secondaria delle sabbie, riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia) sulla categoria Freshwater Ecotoxicity.

Un riassunto dei risultati ottenuti dal confronto dell'impatto dello scenario di riferimento con i diversi scenari di riutilizzo delle sabbie è presentato in Tabella 8. Lo stesso dato è riportato in forma grafica in [Figura 19](#),

ha eliminato: Figura 28

Tabella 8: confronto tra l'impatto dello scenario di riferimento (Base scenario) posto a 100 e l'impatto dei tre processi di trattamento delle sabbie considerati sulle categorie considerate. Dati numerici. Fonte: (Yilmaz, 2017)

	Global warming	Human toxicity cancer	Human Toxicity non cancer	Freshwater ecotoxicity	Acidification	Freshwater eutrophication	Marine eutrophication	Ozone depletion	Photochemical oxidation	Abiotic depletion metals	Abiotic depletion fossils
Base scenario	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Primary regeneration	83.23	64.55	48.18	47.61	97.41	60.54	65.68	92.16	85.61	98.31	84.61
Primary + secondary regeneration	93.55	32.17	20.53	18.79	107.04	48.43	51.03	108.86	83.52	98.64	139.11
External sand reuse	53.63	31.38	5.72	5.26	85.93	26.01	44.48	52.33	66.70	99.33	44.12

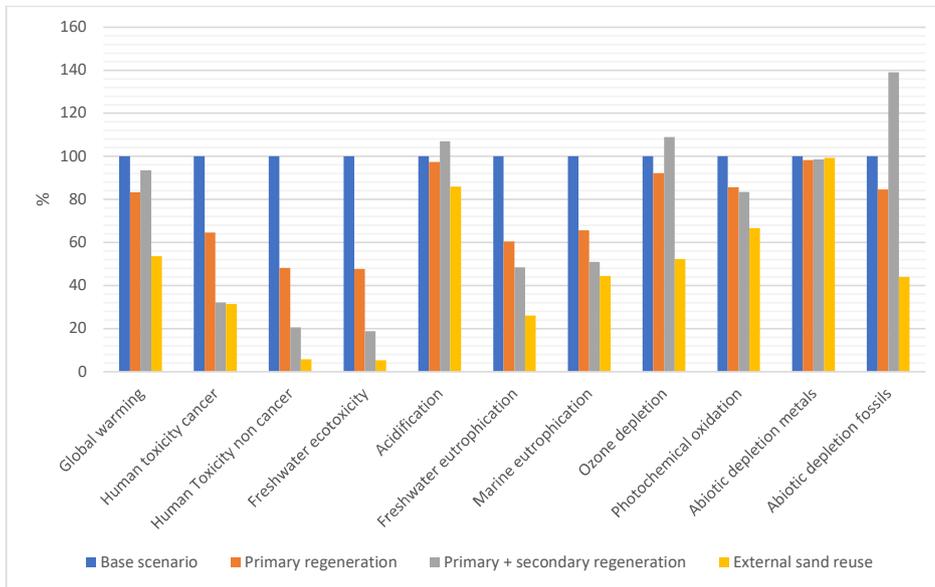


Figura 19: confronto tra l'impatto dello scenario di riferimento (Base scenario) posto a 100 e l'impatto dei tre processi di trattamento delle sabbie considerati sulle categorie considerate. Fonte: (Yilmaz, 2017)

Le figure in Appendice B riportano i dettagli riguardanti le variazioni di impatto dei quattro scenari considerati per alcune categorie ritenute significative.

Per quanto riguarda la categoria Global Warming, lo scenario di riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia è quello meno impattante; rispetto allo scenario base le emissioni di gas serra sono quasi dimezzate. Lo scenario che prevede una rigenerazione primaria e secondaria delle sabbie riduce l'impatto sulla categoria Global Warming solo di 66.1 kg CO<sub>2</sub> eq, mentre sola rigenerazione primaria riduce le emissioni di gas serra di 172 kg CO<sub>2</sub> eq rispetto allo scenario di riferimento (Figura 20).

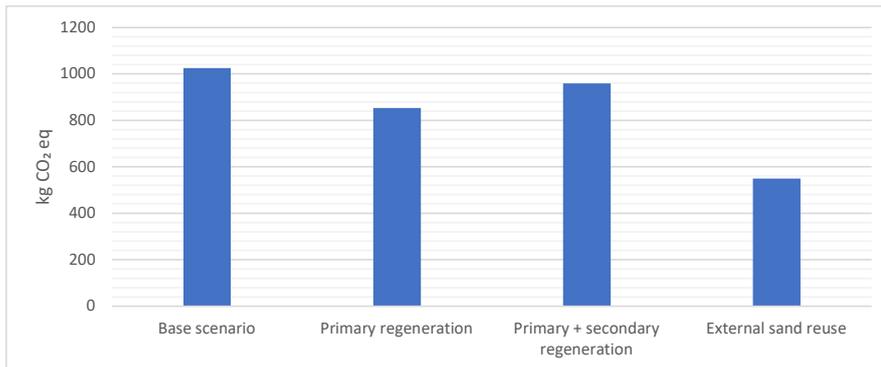


Figura 20: impatto dei quattro scenari considerati (scenario di riferimento, rigenerazione primaria, rigenerazione primaria e secondaria e riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia) sulla categoria Global Warming.

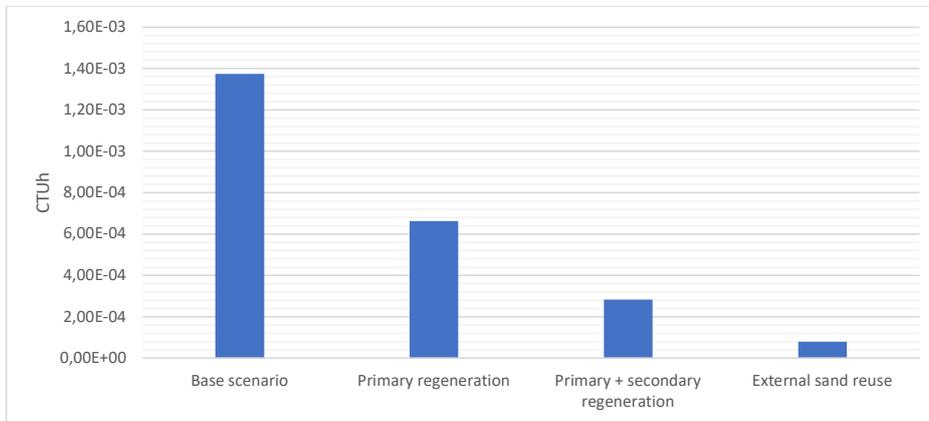


Figura 21: impatto dei quattro scenari considerati (scenario di riferimento, rigenerazione primaria, rigenerazione primaria e secondaria e riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia) sulla categoria Human Toxicity. I risultati delle due categorie Human Toxicity – cancer e Human Toxicity – non cancer sono aggregati.

Per quanto riguarda la categoria Human Toxicity (risultati aggregati per le due categorie Human Toxicity – cancer e Human Toxicity – non cancer) il riutilizzo esterno delle sabbie riduce del 96% le emissioni di composti tossici per la salute umana. Già la rigenerazione primaria delle sabbie dimezza l'impatto sulla categoria Human Toxicity rispetto allo scenario di riferimento. La rigenerazione primaria e secondaria riduce ulteriormente le emissioni di composti tossici rispetto alla rigenerazione primaria (Figura 21).

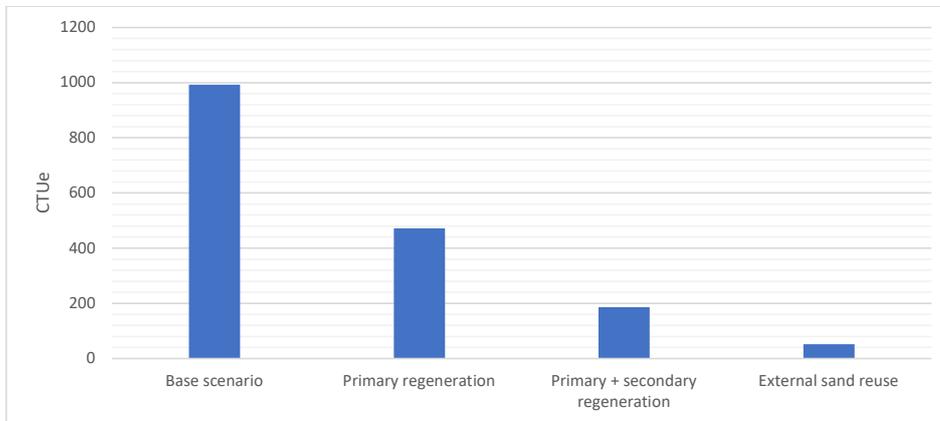


Figura 22: impatto dei quattro scenari considerati (scenario di riferimento, rigenerazione primaria, rigenerazione primaria e secondaria e riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia) sulla categoria Freshwater Ecotoxicity.

Lo scenario più impattante sulla categoria Freshwater Ecotoxicity è ancora lo scenario base seguito dalla rigenerazione primaria, dalla rigenerazione primaria e secondaria e dal riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia (Figura 22).

Di nuovo lo scenario di riferimento (Base Scenario) è il più impattante sulle categorie Freshwater Eutrophication, Marine Eutrophication, e Photochemical Oxidant Formation, come riportato nelle figure in Appendice C.

Per quanto riguarda invece la categoria Abiotic Depletion – Fossil Fuels lo scenario più impattante è la rigenerazione primaria e secondaria, a causa dei consumi energetici e di materiale che il processo di rigenerazione primaria e secondaria delle sabbie richiede (Figura 42, in Appendice C). Lo scenario meno impattante è sempre il riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia.

ha eliminato: Figura 39

Da quanto esposto fino a ora appare evidente che la situazione più efficiente dal punto di vista ambientale è quella del riciclo in altri settori, che consente una riduzione degli impatti nel ciclo di vita rispetto allo scenario baseline dal 50% ad oltre il 90% a seconda della categoria. E' anche interessante osservare che questi benefici derivano in massima parte dalle emissioni evitate connesse alla minor estrazione di sabbie e terre di origine naturali, quindi si collocano all'esterno dei confini del sistema che sono stati considerati in questa analisi. Solo con riferimento alla categoria di impatto "Climate Change" che è oggi quella più considerata, la comparazione tra lo scenario baseline e quello del riciclo presso altri settori consente di evitare ben 473 Kg di CO<sub>2</sub> eq. per ogni tonnellata di sabbia recuperata. Va però detto che questo valore non considera gli eventuali trattamenti che l'impresa destinataria della materia prima secondaria riciclata deve fare per rendere utilizzabile queste sabbie. E' possibile in alcuni casi che tali sabbie vengano utilizzate "tal quali" ma non è detto che sia così. Quindi occorrerà fare una valutazione più completa alla luce delle verifiche che verranno effettuate dopo le analisi chimico fisiche effettuate sui campioni delle sabbie, in modo da aver un quadro più completo di quali trattamenti si rendano necessari e quale sottrazione di benefici ambientali possano eventualmente generare tali trattamenti.

A questo punto occorre porsi una domanda essenziale: quale scenario si applica alle fonderie lombarde tra quelli indicati fino ad ora? Si può applicare a tutte lo scenario baseline o la situazione è più complessa. A questo si proverà a dare una risposta nel prossimo capitolo.

## 7 Scenari applicati alle fonderie lombarde

In Lombardia sono operative 477 fonderie di metalli ferrosi e non ferrosi (dato del 2019), delle quali circa una metà usano processi di formatura con terre e sabbie. Secondo i dati dell'Assessorato all'Ambiente della Regione Lombardia, ogni anno vengono smaltite circa 240.000 tonnellate di sabbia, mentre a livello nazionale il valore stimato è di circa 600.000 tonnellate.

Gli scenari 2 e 3 prima considerati hanno un valore a livello europeo, ma in Italia c'è solo un'azienda che utilizza impianti per allungare il ciclo di vita delle sabbie, che si trova in Puglia. Vi sono imprese che stanno considerando l'ipotesi di investire in questi impianti, ma si tratta in generale di imprese che sono collocate in zone decentrate dove l'approvvigionamento delle sabbie è più costoso per la lunghezza del trasporto e la difficoltà di accesso. In ogni caso, nello stato attuale, in Lombardia non vi sono imprese che hanno impianti che le collochino negli scenari 2 e 3. Quindi permangono solo due possibilità: o lo scenario 1 o lo scenario 4.

Se applicassimo lo scenario baseline a tutte le fonderie lombarde e ipotizzassimo di poter passare in breve tempo allo scenario 4, nell'ipotesi di avere un riutilizzo delle sabbie esauste senza ulteriori trattamenti, si potrebbero evitare: 240.000 ton \* 0,473 ton CO<sub>2</sub> Eq. = 113.520 ton di CO<sub>2</sub> all'anno solo nell'area lombarda. Tuttavia, la situazione è più complessa, perché non vi è certezza di come siano smaltite le sabbie. Infatti, per l'attuale normativa vigente, le fonderie devono trattare le sabbie come rifiuto e quindi le conferiscono a smaltitori autorizzati che poi provvedono allo smaltimento. Ma tale smaltimento non è affatto detto che sia in discarica: da un primo set di informazioni prese da un campione di smaltitori, la maggior parte di queste sabbie sono riciclate come sottofondi di rilevati stradali o, in casi più rari, nel cemento e nei conglomerati bituminosi<sup>7</sup>.

Per avere un quadro più chiaro della situazione, è in corso un'indagine presso un campione di smaltitori autorizzati di sabbie al fine di poter formulare una stima più precisa di quante sabbie siano effettivamente riutilizzate e in quali processi. Dai primi dati emersi, si stima che la gran parte di queste sabbie viene utilizzata come sottofondo di rilevati stradali. Questo implica due problemi. Da un lato non è possibile applicare banalmente lo scenario baseline alle fonderie lombarde, anche se rappresenta comunque un punto di partenza. Dall'altro c'è il fatto che i sottofondi dei rilevati stradali usano terre e sabbie di bassa qualità, spesso anche scavate sul posto, per cui le emissioni in questo caso sono molto basse. Quindi, se non è possibile applicare lo scenario baseline in toto, tuttavia può rappresentare una prima approssimazione, che deve essere ulteriormente approfondita. Ma soprattutto è evidente un'altra questione. Se le sabbie esauste fossero utilizzate in settori come la ceramica, i mattoni o il vetro, dove si utilizzano effettivamente sabbie di cava di una certa qualità allora le emissioni evitate sarebbero senza dubbio molto più elevate<sup>8</sup>.

Ne consegue che per avere una stima precisa delle emissioni evitate effettive è necessario non solo avere una valutazione degli eventuali trattamenti che devono essere effettuati nei settori di destinazione del riciclo quando siano imprese che producano ceramica, vetro, laterizi o altri prodotti che utilizzano sabbie di alta qualità, ma è importante anche avere:

1. una stima delle quantità di sabbie che vengono conferite in discarica, nei sottofondi di rilevati stradali o riciclate in altri processi (stima che è in corso);

<sup>7</sup> Si ha notizia di qualche fonderia che ha fatto il dossier di materia prima secondaria per conferire direttamente le sabbie come sottoprodotto per conglomerati bituminosi, ma si tratta di casi molto rari.

<sup>8</sup> La ceramica e il vetro usano sabbie che hanno un costo che varia da 10 a 20 euro a tonnellata. Non è un costo alto come quello delle sabbie di fonderia, che varia da 40 a 100 euro a ton perché hanno minimo il 98% di quarzo, ma è comunque una sabbia di qualità molto superiore alla terra utilizzata nei sottofondi dei rilevati stradali.

2. valutare gli impatti generati dai materiali di bassa qualità (come le terre) usate nei sottofondi dei rilevati stradali, per valutare con chiarezza l'aggiustamento che deve essere effettuato per questo scenario rispetto allo scenario baseline.

Una prima valutazione degli impatti ambientali legati al riutilizzo di sabbie di fonderia per la realizzazione di sottofondi rilevati stradali è presentata nel capitolo, mentre tutte le altre valutazioni saranno oggetto delle successive fasi del progetto.

## 8 Valutazione degli impatti ambientali del riutilizzo di sabbie di fonderia come sottofondi per rilevati stradali

Dalla analisi effettuata presso gli smaltitori lombardi è emerso che la maggior parte delle sabbie di fonderia viene riutilizzata nella costruzione di sottofondi rilevati stradali oppure come riempitivo per gli strati di fondazione e base delle strade, come mostrato in Figura 23. L'utilizzo delle sabbie di fonderia per la pavimentazione stradale dovrebbe sostituire l'uso di terra estratta nelle vicinanze del sito di costruzione.

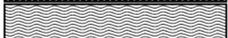
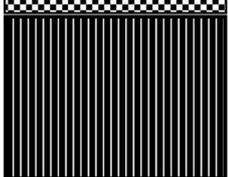
Tipologia strato	Strato	Spessore
Manto d'usura		5~100 mm
Binder		20~150 mm
Base		50~250 mm
Fondazione legata		70~300 mm
Fondaz. non legata		Variabile
Suolo sottostante		

Figura 23: strati della pavimentazione stradale. Le sabbie di fonderia sono utilizzate per la realizzazione dello strato di fondazione e di quello di base

La valutazione dell'impatto ambientale mediante analisi LCA del riutilizzo delle sabbie di fonderia per la costruzione di sottofondi rilevati stradali è stata effettuata in un numero ridotto di studi. (Meeran Rawther Salim and Siva Rama Krishna Prasad, 2020) in una review di oltre 30 studi che discutono diverse opzioni per l'utilizzo di sabbie riciclate nel settore delle costruzioni, riportano solamente quattro lavori che si occupano del riciclo di sabbie di fonderia per la realizzazione di sottofondi stradali: (Yazoghli-Marzouk et al., 2014), (Arulrajah et al., 2017; Guney et al., 2006; Iqbal et al., 2019). Tutti questi studi esaminano le proprietà fisiche e chimiche delle sabbie di fonderia e ne valutano l'idoneità per la realizzazione dei sottofondi stradali in diversi casi studio. (Yazoghli-Marzouk et al., 2014) prende in considerazione l'impatto ambientale del riutilizzo di sabbie di fonderia per pavimentazione stradale solo per quanto riguarda la possibile percolazione di sostanze inquinanti eventualmente presenti nelle sabbie. Nel caso studio in esame, la realizzazione di un tratto di una strada statale in Francia, l'autore conclude, sulla base di test sia di laboratorio che sul campo, che l'uso di sabbie di fonderia per i sottofondi stradali non è dannoso per l'ambiente perché non porta a nessun rilascio di quantità rilevanti di sostanze inquinanti. (Iqbal et al., 2019) si concentra sull'analisi delle proprietà meccaniche di miscele di sabbie di fonderia e sabbie vergini (diverse percentuali di sabbie di fonderia sono presenti nei campioni, da 0% a 10%). Lo studio conclude che una miscela costituita dal 6% di sabbie di fonderia presenta le migliori proprietà meccaniche per la realizzazione di sottofondi stradali. L'uso di sabbie di fonderia non porta al rilascio di quantità di sostanze inquinanti nel terreno per valori superiori ai limiti di legge in un caso studio cinese. (Arulrajah et al., 2017) esegue test geotecnici per valutare l'idoneità delle sabbie di fonderia come riempitivo per sottofondi stradali. Inoltre stima in maniera approssimativa il risparmio di tonnellate di CO<sub>2</sub>-eq nel caso di riutilizzo delle sabbie di fonderia in sostituzione di sabbia vergine.

Non viene effettuata nessuna analisi LCA, ma l'autore afferma che il riuso di sabbie di fonderia porta a un risparmio compreso tra 4.8 e 5.1 kg CO<sub>2</sub>-eq per tonnellata di sabbia usata. (Guney et al., 2006) esegue test di laboratorio per valutare l'idoneità di miscele di terra e sabbie di fonderia come substrati per sottofondi stradali. Lo studio afferma che la resistenza all'usura dei miscugli di sabbie di fonderia e terreno è maggiore rispetto a quella del materiale di riferimento (terra). Dal punto di vista ambientale test idraulici indicano che se le miscele di sabbie di fonderia e terra entrano in contatto con l'acqua, la qualità dell'acqua rilasciata nell'ambiente resta inalterata rispetto a quella rilasciata nell'ambiente nel caso di uso di sola terra come substrato per la pavimentazione stradale.

Gli studi citati mostrano chiaramente che le sabbie di fonderia sono idonee per l'impiego nella realizzazione di sottofondi stradali e non rilasciano nell'ambiente sostanze inquinanti. Tuttavia il loro utilizzo è limitato a quei casi in cui il materiale già presente in sito non è idoneo a sostenere la pavimentazione stradale. Perciò l'utilizzo di sabbie di fonderia non sostituisce quello di sabbia vergine.

Tuttavia, una valutazione mediante analisi LCA dell'impatto ambientale del processo di riutilizzo delle sabbie di fonderia come substrato stradale è opportuna per capire meglio il potenziale di tossicità ed ecotossicità associato all'uso di queste sabbie e il risparmio in termini di emissioni di gas a effetto serra che il loro uso comporta. Solo un numero ridotto di studi ha eseguito una valutazione dell'impatto ambientale del riutilizzo delle sabbie di fonderia nei sottofondi stradali. Gli studi analizzati si sono focalizzati principalmente su 4 categorie di impatto: cambiamento climatico, consumo di energia, tossicità ed ecotossicità.

(Lee et al., 2010) valuta l'impatto ambientale derivante dalla costruzione di un tratto di strada di 4.7km nel contesto del Wisconsin (USA). Sono proposti due materiali alternativi per la realizzazione della strada: un materiale convenzionale proposto dal dipartimento dei trasporti del Wisconsin e un materiale alternativo realizzato impiegando sabbie di fonderia (Figura 24).

ha eliminato: Figura 2

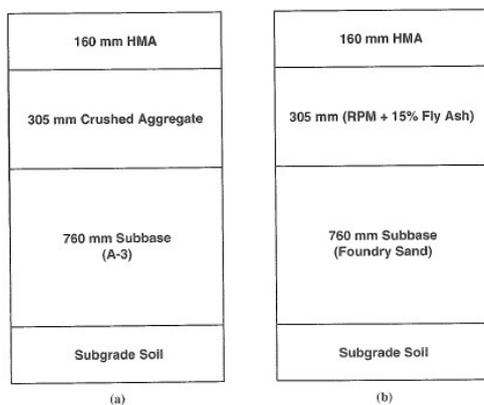


Figura 24: tipologie di pavimentazione stradale considerate in (Lee et al., 2010). (a): pavimentazione convenzionale proposta dal dipartimento dei trasporti del Wisconsin; (b): pavimentazione innovativa basata sull'uso di materiali riciclati, tra cui sabbie di fonderia.

(Lee et al., 2010) valuta l'impatto ambientale dei due materiali durante tre fasi: produzione del materiale, trasporto dal luogo di produzione al luogo di utilizzo e costruzione della strada. I risultati sono presentati in Tabella 9. Inoltre considera quattro categorie di impatto: il cambiamento climatico, il consumo di energia, la produzione di rifiuti pericolosi e il consumo di acqua. L'uso del materiale riciclato porta a una riduzione del 20% delle emissioni di gas serra rispetto al materiale convenzionale, a una riduzione del 16% dei consumi energetici, a calo del 6% nella produzione di rifiuti pericolosi e una riduzione dell'11% dei consumi di acqua. Lo studio conclude che dal punto di vista ambientale l'utilizzo delle sabbie di fonderia come substrato per la

pavimentazione stradale porta a benefici ambientali netti nel caso vada a sostituire materiali appositamente creati in laboratorio per realizzare la pavimentazione.

Tabella 9: valutazione dell'impatto ambientale di un materiale convenzionale e di uno riciclato basato sull'uso di sabbie di fonderia. I risultati fanno riferimento alla costruzione di 1km di strada.

Categoria	Unità	Materiale convenzionale			Materiale riciclato			Differenza (%)
		Produzione	Trasporto	Costruzione strada	Produzione	Trasporto	Costruzione strada	
GWP	kg CO2eq	772340	68723	23617	644255	34681	11489	-20
Energia	GJ	14187	919	314	12345	465	154	-16
Rifiuti pericolosi	kg	133830	6596	1915	130000	3404	851	-6
Acqua	l	3656	156	31	3327	79	15	-11

Più recentemente (Proust et al., 2014) ha proposto un confronto tra l'impatto ambientale del riutilizzo di sabbie di fonderia come sottofondo stradale e lo smaltimento delle stesse in discarica nel contesto francese. Proust considera nullo l'impatto ambientale della produzione di sabbie di fonderia, perché queste sarebbero comunque prodotte all'interno della fonderia, perciò l'impatto ambientale legato all'uso di sabbie di fonderia come sottofondo stradale è da ascrivere al solo trasporto delle sabbie dalla fonderia al luogo di riutilizzo. Proust ipotizza un trasporto su gomma di 30km. Inoltre considera come beneficio ambientale il fatto che, grazie all'uso di sabbie di fonderia, non venga estratta sabbia vergine dalle cave. Lo studio considera quattro categorie di impatto: cambiamento climatico, consumo di energia, tossicità ed ecotossicità.

Tabella 10: valutazione dell'impatto ambientale dell'uso di sabbie di fonderia come substrato per la pavimentazione e dello smaltimento in discarica per 1 ton di sabbia.

Categoria	Unità	Trasporto FS (30km)	Discarica FS	Discarica + trasporto (30km)	Sabbia vergine non prodotta
Energia	MJ	13.075	0.314	13.389	0.060
GWP	kg CO2 eq	0.913	0.010	0.922	0.002
Ecotossicità	kg 1.4 DCB eq	108.500	7233.333	7333.333	1.680
Tossicità	kg 1.4 DCB eq	0.082	1.900	1.982	0.002

Tabella 10 mostra chiaramente che il trasporto influisce notevolmente sull'impatto ambientale delle categorie Energia e GWP, mentre lo smaltimento in discarica impatta notevolmente sull'ecotossicità e la tossicità. Lo studio mostra quindi come sia importante evitare lo smaltimento in discarica delle sabbie di fonderia.

Infine (Zhang et al., 2021) esegue una valutazione della Carbon Footprint relativa a tre materiali impiegati nella costruzione dei sottofondi stradali. I tre materiali considerati sono sabbia vergine, filter cloth e sabbia di fonderia. L'unica categoria considerata per la valutazione d'impatto ambientale è il cambiamento climatico; in aggiunta lo studio esegue anche una stima dei costi associati all'uso di ciascuno dei tre materiali

selezionati. Le emissioni sono suddivise in: emissioni per la produzione del materiale, emissioni per il trasporto, emissioni per l'applicazione in sede stradale e emissioni per la compattazione. I risultati del confronto della Carbon Footprint per i tre materiali sono riportati in Tabella 11. Si nota come l'utilizzo delle sabbie di fonderia consenta di ridurre le emissioni di gas serra sia rispetto alla sabbia vergine che rispetto al filter cloth. Rispetto all'uso di sabbia vergine, l'uso delle sabbie di fonderia consente di ridurre del 23.5% le emissioni di kg CO<sub>2</sub> eq per km di strada realizzato, mentre rispetto all'uso del filter cloth l'uso delle sabbie di fonderia riduce le emissioni di kg CO<sub>2</sub> eq per km di strada realizzato del 46%.

Tabella 11: emissioni di gas serra in kg CO<sub>2</sub> eq per km di strada realizzato.

	Sabbia vergine	Filter cloth	Sabbia di fonderia
Compattazione	386	368	386
Applicazione	4932	5347	4932
Trasporto	31503	38236	31503
Produzione	22523	40165	8550
<b>Totale</b>	<b>59344</b>	<b>84116</b>	<b>45371</b>

Tabella 12: costi per km di strada realizzato (in migliaia di €).

	Sabbia vergine	Filter cloth	Sabbia di fonderia
Costi di produzione, trasporto e applicazione	122.2	234.3	77.7
Costi di compattazione	83.3	90.3	83.3

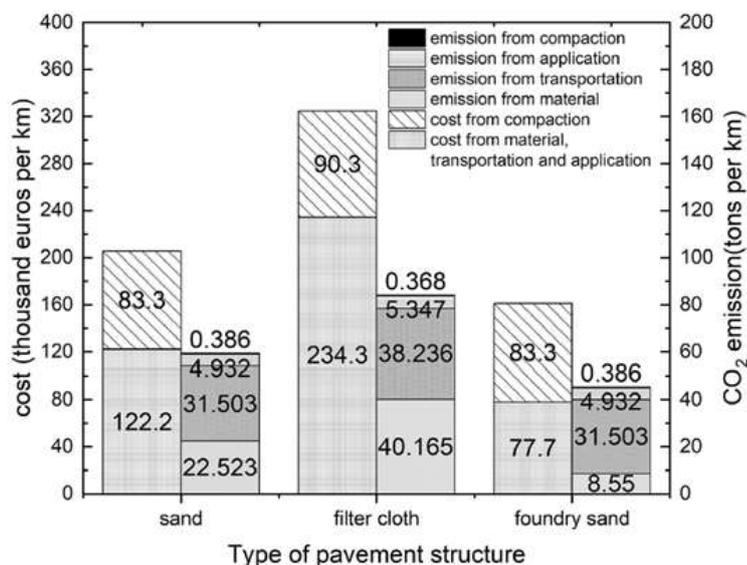


Figura 25: valutazione dei costi e delle emissioni di gas serra di tre tipologie di materiali usati per la realizzazione di substrati per la pavimentazione stradale (Zhang et al., 2021).

L'utilizzo delle sabbie di fonderia in sostituzione di sabbia vergine è interessante anche dal punto di vista economico. L'uso di sabbie di fonderia per sottofondi stradali riduce i costi di produzione, trasporto e applicazione del materiale del 36% (Figura 25), lasciando i costi di compattazione invariati. L'uso di filter cloth rispetto a sabbia vergine aumenta sia i costi di produzione del materiale (+92%) che i costi di compattazione (+8.4%).

Gli studi presentati mostrano che l'utilizzo delle sabbie di fonderia come substrato per la pavimentazione stradale porta ad alcuni benefici ambientali in termini di riduzione delle emissioni di gas serra e a vantaggi economici in termini di riduzione dei costi di produzione del materiale se confrontato con l'utilizzo di sabbia vergine appositamente estratta per la realizzazione del sottofondo stradale. Tuttavia, restano diverse criticità nella valutazione dell'efficienza sia in termini ambientali che economici del riuso delle sabbie di fonderia come sottofondi stradali. Innanzitutto, i risultati riportati sono di difficile comparazione, sia per la diversità dei casi studio analizzati, che per le differenze nelle categorie di impatto selezionate e per le unità di misura scelte. Inoltre, resta da capire se normalmente per la realizzazione di sottofondi stradali venga utilizzata sabbia vergine appositamente estratta da cave o altro materiale di minor valore, come terre già presenti in loco. L'utilizzo delle sabbie di fonderia nella realizzazione di sottofondi stradali è sicuramente migliore dello smaltimento in discarica, ma si potrebbero ottenere risultati migliori in termini ambientali se queste sabbie fossero riutilizzate in altri settori industriali, come la produzione di vetro, ceramica o cemento, settori in cui la sabbia è necessaria e viene appositamente estratta dalle cave.

La realizzazione di una analisi dell'impatto ambientale del riutilizzo delle sabbie di fonderia come substrato per la pavimentazione stradale potrebbe essere un punto di forza del progetto.

## 9 Contributo del processo di formatura all'impatto ambientale della fonderia

Il processo di formatura è il processo in cui vengono impiegate le sabbie all'interno delle fonderie. La formatura ha un impatto ambientale limitato all'interno del processo di fonderia. La fusione è infatti il processo che genera l'impatto più elevato (Figura 26); in particolare impatta principalmente sul consumo di risorse, seguito dalla salute umana e dalla qualità degli ecosistemi. Il solo processo di fusione contribuisce al 74% dell'impatto ambientale totale della fonderia (Figura 27). Il processo di formatura (Moulding), che contribuisce all'8% dell'impatto totale della fonderia, impatta maggiormente sul consumo di risorse e sulla salute umana.

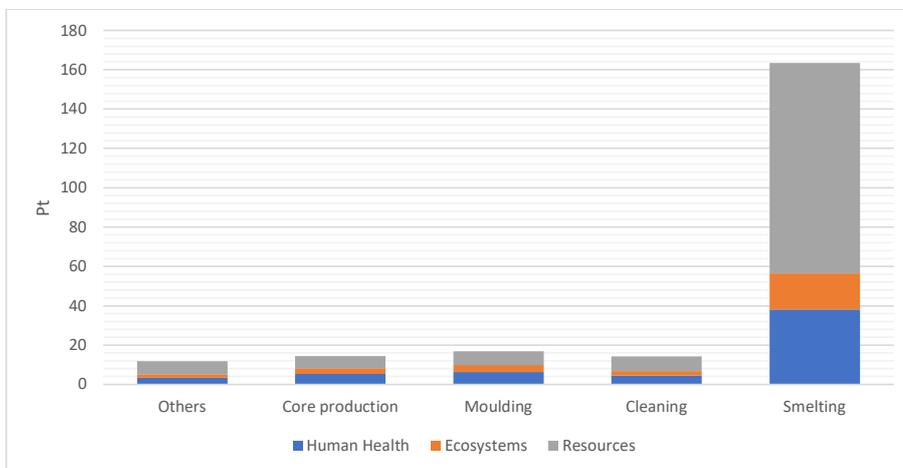


Figura 26: impatto ambientale dei processi che avvengono all'interno della fonderia sulle tre categorie Salute Umana, Qualità degli Ecosistemi e Consumo di Risorse. Fonte: (Mitterpach et al., 2017b)

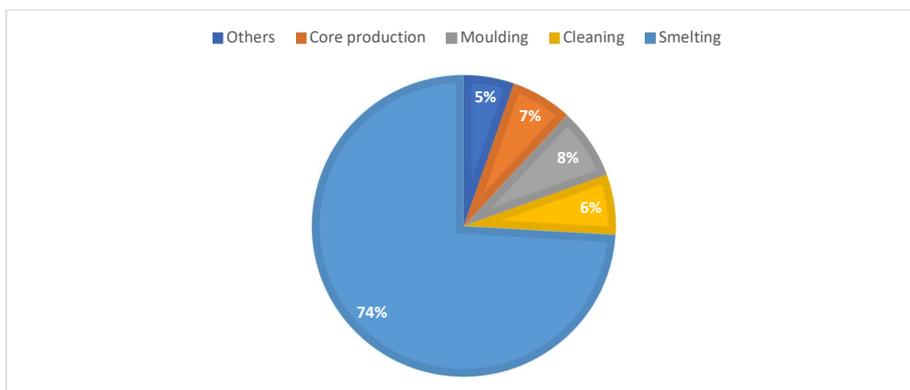


Figura 27: contributo dei processi che avvengono all'interno della fonderia all'impatto ambientale totale della fonderia. Fonte: (Mitterpach et al., 2017b)

Va chiarito che gli impatti evitati nel processo di riciclo per le imprese lombarde sono poco attinenti alla fase di formatura. Questa avrebbe un netto miglioramento in termini di benefici ambientali solo qualora vi fossero applicati processi di rigenerazione delle sabbie, come quelli previsti negli scenari 2 e 3 del capitolo 6. Ma come si è visto nel capitolo 7, tali impianti in Italia non sono presenti, tranne un'eccezione che è fuori dalla Regione Lombardia. Pertanto, il riciclo delle sabbie esauste comporta un certo miglioramento della fase di formatura perché allunga il ciclo di vita della sabbia utilizzata, ma l'allocazione di questo beneficio è principalmente sul processo produttivo dell'impresa che attua il riciclo e non tanto (se non per una quota limitata) sulla fase di formatura delle fonderie.

## 10 Conclusioni

Il report ha analizzato otto studi scientifici che effettuano una valutazione dell'impatto ambientale delle fonderie mediante analisi del ciclo di vita (LCA). Gli studi considerati impiegano diverse unità funzionali per la valutazione di impatto, diversi metodi LCIA e si riferiscono a contesti geografici differenti (Stati Uniti, India, Europa, Slovacchia e Italia). Data la difficoltà di paragonare studi che impiegano metodologie così diverse si è scelto di confrontare i risultati dello studio di Yilmaz (Yilmaz et al., 2015), quelli di una valutazione di impatto ambientale appositamente realizzata con SimaPro su una fonderia media europea usando dati di Ecoinvent (Classen et al., 2009) e quelli delle Product Environmental Footprint elaborate durante il progetto Life EFFIGE da tre fonderie italiane. Questi studi infatti usano la stessa unità funzionale di riferimento e le stesse categorie di impatto.

Dal confronto è emerso che l'impatto della fonderia media europea descritta in Yilmaz in uno scenario di riferimento è inferiore rispetto a quello delle fonderie italiane per quanto riguarda quasi tutte le categorie di impatto, mentre l'impatto della fonderia media europea di Ecoinvent è confrontabile con quello delle fonderie italiane. L'unica categoria di impatto per cui le fonderie italiane hanno performance migliori rispetto alla fonderia media europea sia di Yilmaz che di Ecoinvent è la categoria Human Toxicity. Questo può essere dovuto all'utilizzo nelle PEF delle fonderie italiane di un mix energetico che è più impattante rispetto a un mix energetico medio europeo. Inoltre, è molto probabile che nelle fonderie italiane si produca una ghisa di elevata qualità che richiede elementi di lega e additivi più impattanti.

Inoltre, sulla base dello studio di Yilmaz (Yilmaz et al., 2015) è stato effettuato un confronto tra l'impatto ambientale dello scenario di riferimento e di tre scenari che prevedono un riutilizzo o una rigenerazione delle sabbie di fonderia. I tre scenari sono la rigenerazione primaria delle sabbie all'interno della fonderia, la rigenerazione primaria e secondaria delle sabbie all'interno della fonderia e il riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia. È emerso che per quasi tutte le categorie di impatto considerate il riutilizzo delle sabbie all'esterno delle fonderie è lo scenario che genera i maggiori benefici ambientali. In particolare, contribuisce a dimezzare le emissioni di gas serra rispetto allo scenario di riferimento (che prevede lo smaltimento delle sabbie di fonderia in discarica), a ridurre notevolmente il consumo di combustibili fossili e a ridurre in maniera considerevole l'impatto sulle categorie afferenti alla tossicità per gli ecosistemi e all'eutrofizzazione di acque dolci e marine. Questi due scenari sono quelli più aderenti alla situazione delle fonderie lombarde, perché in queste imprese non vi sono impianti per la rigenerazione delle sabbie. La rigenerazione primaria e secondaria genera interessanti benefici sulla qualità degli ecosistemi (riduce infatti l'impatto sulle categorie Freshwater Ecotoxicity, Freshwater Eutrophication e Marine Eutrophication) rispetto allo scenario di riferimento, ma impatta maggiormente rispetto allo scenario di riferimento sul consumo di combustibili fossili, a causa dei consumi energetici necessari all'interno della fonderia per i processi di rigenerazione.

Si è visto nel capitolo 7 che le fonderie lombarde generano 240.000 tonnellate di sabbie esauste. Se ad esse si applicasse lo scenario base e si ipotizzasse di attuare un riciclo completo e senza trattamenti di queste sabbie, si potrebbe avere 113.520 ton di CO<sub>2</sub> all'anno. Si tratta di un valore notevole ma che fornisce in realtà solo un potenziale ordine di grandezza, perché sicuramente una parte rilevante di queste sabbie esauste viene già riciclata, anche se in processi di riciclo che le usano come sostituti di materiali poveri, la cui estrazione genera basse emissioni. Sebbene manchino stime precise, è assai probabile che questi processi di riciclo evitino emissioni per valori ben lontani al dato stimato di 113.520 ton annue di CO<sub>2</sub> eq. Senza dubbio se fossero utilizzate come sostituti di sabbie naturale ad alto valore aggiunto in processi come la ceramica, il vetro o altri processi che richiedono sabbie di qualità, le emissioni evitate sarebbero molto più prossime a questo valore. Per poter effettuare una stima più precisa occorre:

1. Fare un'indagine campionaria presso gli smaltitori per definire con precisione le quote di smaltimento in discarica e di riciclo nei settori a basso valore aggiunto come i sottofondi dei rilevati stradali; tale indagine è in corso e sarà tra i layout di progetto più avanti;
2. valutare con precisione quali impatti generi l'estrazione della terra naturale che viene messa nei sottofondi dei rilevati stradali, per integrare gli scenari di riferimento con dati più precisi;
3. verificare se vi sono dei trattamenti che devono essere applicati alle sabbie di riciclo nei processi ad alto valore aggiunto per le sabbie di fonderia.

Gli i dati che emergeranno dalle successive fasi del progetto porteranno ad un quadro più chiaro che integrerà quanto emerso da questa analisi della letteratura. Tuttavia, emerge già come ipotesi di studio che gli impatti che si possono potenzialmente evitare sono ben superiori a quelli che si erano stimati inizialmente di 43 kg di CO<sub>2</sub> eq per ogni ton di sabbia riciclata<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup> Il dato era stato stimato sulla base dell'analisi riportata in Grbeš A. (2015) A Life Cycle Assessment of Silica Sand: Comparing the Beneficiation Processes", Sustainability 2016, 8, 11.

## 11 Bibliografia

- Arulrajah, A., Yaghoubi, E., Imteaz, M., and Horpibulsuk, S. (2017). Recycled waste foundry sand as a sustainable subgrade fill and pipe-bedding construction material: Engineering and environmental evaluation. *Sustainable Cities and Society*, 28, 343–349. doi:10.1016/j.scs.2016.10.009
- Classen, M., Althaus, H.-J., Blaser, S., Scharnhorst, W., and Tuchs Schmidt, M. (2009). *Life Cycle Inventory of metals. Data v.2.0*. Dübendorf, CH.
- Ghormley, S., Williams, R., and Dvorak, B. (2020). Foundry Sand Source Reduction Options: Life Cycle Assessment Evaluation. *Environments*, 7(9), 66. doi:10.3390/environments7090066
- Guney, Y., Aydilek, A. H., and Demirkan, M. M. (2006). Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases. *Waste Management*, 26(9), 932–945. doi:10.1016/j.wasman.2005.06.007
- Iqbal, M. F., Liu, Q. F., and Azim, I. (2019). Experimental study on the utilization of waste foundry sand as embankment and structural fill. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 474(1), 012042. doi:10.1088/1757-899X/474/1/012042
- Joshi, D., Modi, Y., and Ravi, B. (2011). Evaluating Environmental Impacts of Sand Cast Products Using Life Cycle Assessment. *Research into Design — Supporting Sustainable Product Development, Indian Institute of Science, Bangalore, India*, (January 2011), 978–981. Retrieved from <https://www.designsociety.org/publication/32396/Evaluating+Environmental+Impacts+of+Sand+Cast+Products+Using+Life+Cycle+Assessment>
- Lee, J. C., Edil, T. B., Tinjum, J. M., and Benson, C. H. (2010). Quantitative Assessment of Environmental and Economic Benefits of Recycled Materials in Highway Construction. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2158(1), 138–142. doi:10.3141/2158-17
- Life Effige. (2018a). *Deliverable B2 PEF report summary Company 1 Product 1: Torque Arm Product 2: Scatola IR600*.
- Life Effige. (2018b). *Deliverable B2 PEF report summary Company 2 Product 1: Torque Arm Product 2: Mozzo*.
- Life Effige. (2018c). *Deliverable B2 PEF report summary Company 3 Product 1: Torque Arm Product 2: Stander*.
- Meeran Rawther Salim, P., and Siva Rama Krishna Prasad, B. (2020). A Review on the Usage of Recycled Sand in the Construction Industry. In *Sandy Materials in Civil Engineering - Usage and Management* (Vol. i, p. 13). IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.92790
- Mitterpach, J., Hroncová, E., Ladomerský, J., and Balco, K. (2017a). Environmental analysis of waste foundry sand via life cycle assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(3), 3153–3162. doi:10.1007/s11356-016-8085-z
- Mitterpach, J., Hroncová, E., Ladomerský, J., and Balco, K. (2017b). Environmental evaluation of grey cast iron via life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 148, 324–335. doi:10.1016/j.jclepro.2017.02.023
- Proust, C., Yazoghli-Marzouk, O., Ropert, C., and Jullien, A. (2014). *LCA of roads alternative materials in various reuse scenarios*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/272748749>
- Yazoghli-Marzouk, O., Vulcano-greullet, N., Cantegrit, L., Friteyre, L., and Jullien, A. (2014). Recycling foundry sand in road construction—field assessment. *Construction and Building Materials*, 61, 69–78. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.055

- Yilmaz, O. (2017). Supplementary Material to LCA as a decision support tool for evaluation of best available techniques (BATs) for cleaner production of iron casting. *Journal of Cleaner Production*.
- Yilmaz, O., Anctil, A., and Karanfil, T. (2015). LCA as a decision support tool for evaluation of best available techniques (BATs) for cleaner production of iron casting. *Journal of Cleaner Production*, 105(305), 337–347. doi:10.1016/j.jclepro.2014.02.022
- Zhang, Y., Sappinen, T., Korkiala-Tanttu, L., Vilenius, M., and Juuti, E. (2021). Investigations into stabilized waste foundry sand for applications in pavement structures. *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105585. doi:10.1016/j.resconrec.2021.105585

## 12 Appendice A: Confronto tra i risultati di Yilmaz, quelli di Ecoinvent e quelli delle fonderie italiane: categorie di impatto

In questa sezione è riportato il confronto tra l'impatto ambientale dello scenario di riferimento di Yilmaz (Yilmaz et al., 2015), quello dello scenario di una fonderia media europea ipotizzata in Ecoinvent (Classen et al., 2009) e le PEF delle tre fonderie italiane per le categorie di impatto Freshwater Eutrophication (Figura 28), Marine Eutrophication (Figura 29), Ozone Layer Depletion (Figura 30) e Photochemical Oxidant formation (Figura 31).

ha eliminato: Figura 22

ha eliminato: Figura 23

ha eliminato: Figura 24

ha eliminato: Figura 25



Figura 28: confronto tra l'impatto sulla categoria Freshwater Eutrophication della fonderia media europea (Yilmaz ed Ecoinvent) e dei prodotti 1 e 2 delle tre fonderie italiane che hanno partecipato al progetto Life EFFIGE.

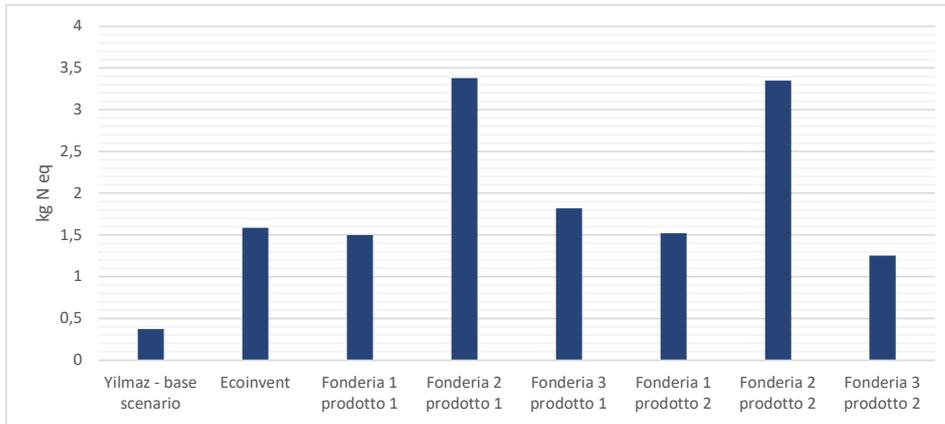


Figura 29: confronto tra l'impatto sulla categoria Marine Eutrophication della fonderia media europea (Yilmaz ed Ecoinvent) e dei prodotti 1 e 2 delle tre fonderie italiane che hanno partecipato al progetto Life EFFIGE.

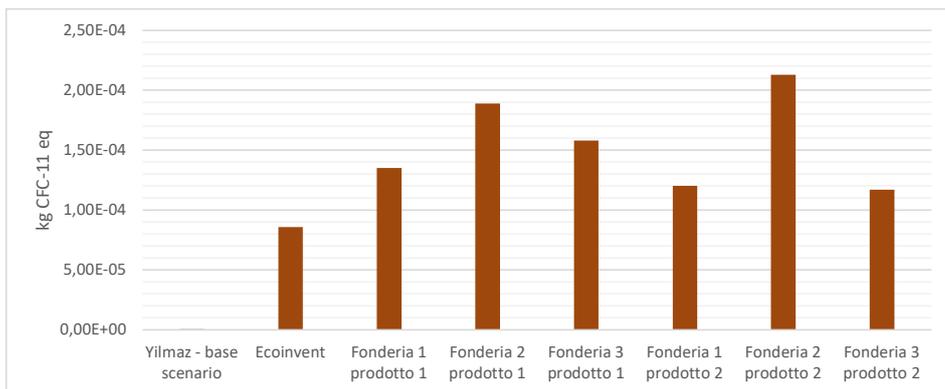


Figura 30: confronto tra l'impatto sulla categoria Ozone Layer Depletion della fonderia media europea (Yilmaz ed Ecoinvent) e dei prodotti 1 e 2 delle tre fonderie italiane che hanno partecipato al progetto Life EFFIGE.

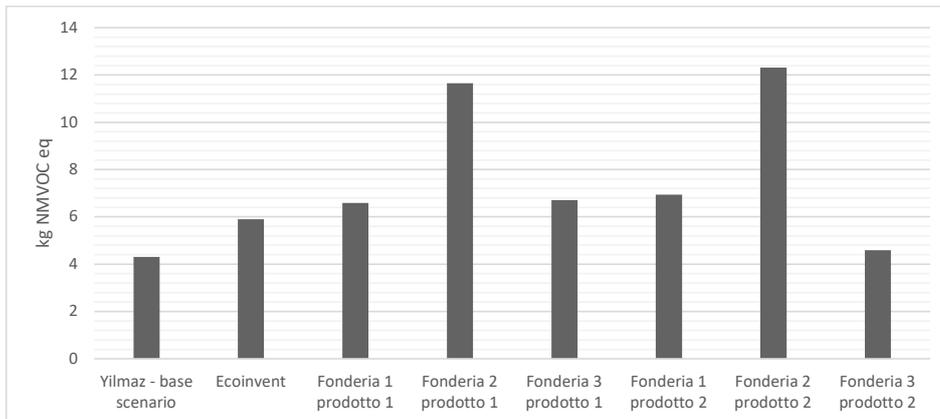


Figura 31: confronto tra l'impatto sulla categoria Photochemical Oxidant Formation della fonderia media europea (Yilmaz ed Ecoinvent) e dei prodotti 1 e 2 delle tre fonderie italiane che hanno partecipato al progetto Life EFFIGE.

### 13 Appendice B: Impatto dei processi di fonderia negli scenari di riutilizzo delle sabbie considerati

Questa sezione riporta una analisi dell'impatto che i singoli processi di fonderia hanno in ciascuno degli scenari di riutilizzo delle sabbie considerati (scenario di riferimento, rigenerazione primaria, rigenerazione primaria e secondaria, riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia). Le categorie considerate sono Acidification (Figura 32), Freshwater Eutrophication (Figura 33), Marine Eutrophication (Figura 34), Ozone Layer Depletion (Figura 35), Photochemical Oxidant Formation (Figura 36), Abiotic Depletion – metals (Figura 37) e Abiotic Depletion – Fossils (Figura 36).

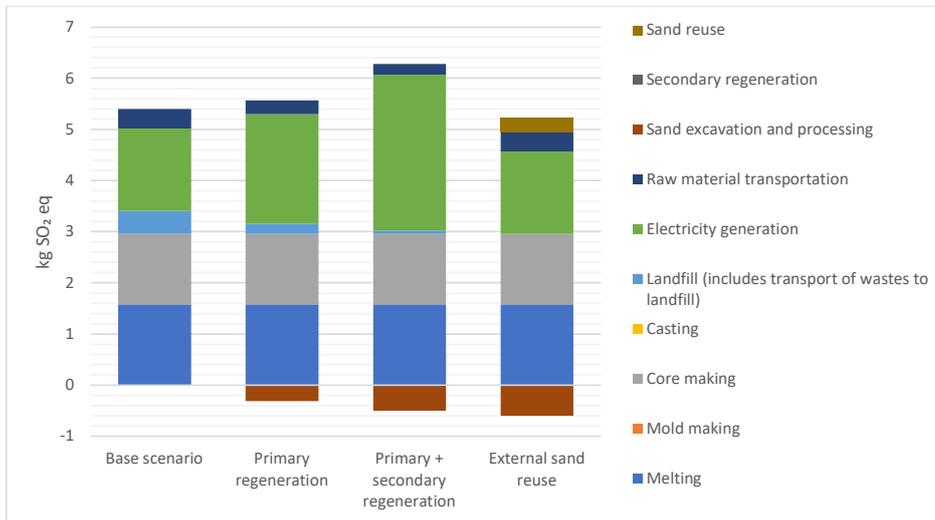


Figura 32: impatto dei quattro scenari considerati (scenario di riferimento, rigenerazione primaria delle sabbie, rigenerazione primaria e secondaria delle sabbie, riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia) sulla categoria Acidification.

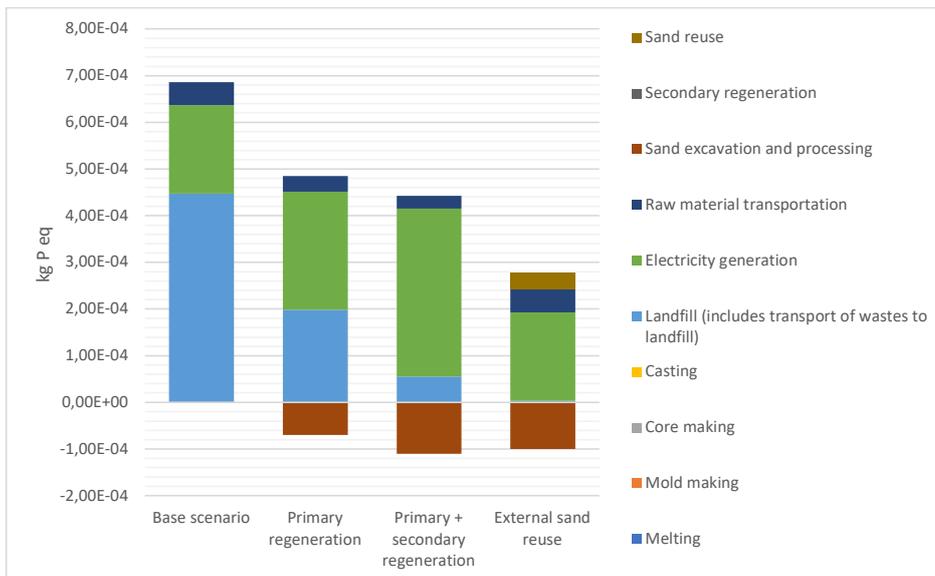


Figura 33: impatto dei quattro scenari considerati (scenario di riferimento, rigenerazione primaria delle sabbie, rigenerazione primaria e secondaria delle sabbie, riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia) sulla categoria Freshwater Eutrophication.

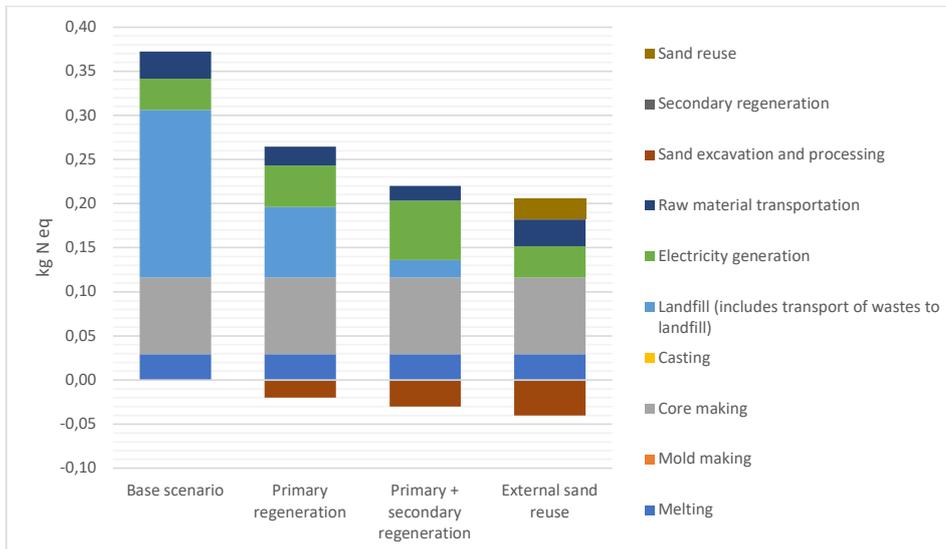


Figura 34: impatto dei quattro scenari considerati (scenario di riferimento, rigenerazione primaria delle sabbie, rigenerazione primaria e secondaria delle sabbie, riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia) sulla categoria Marine Eutrophication.

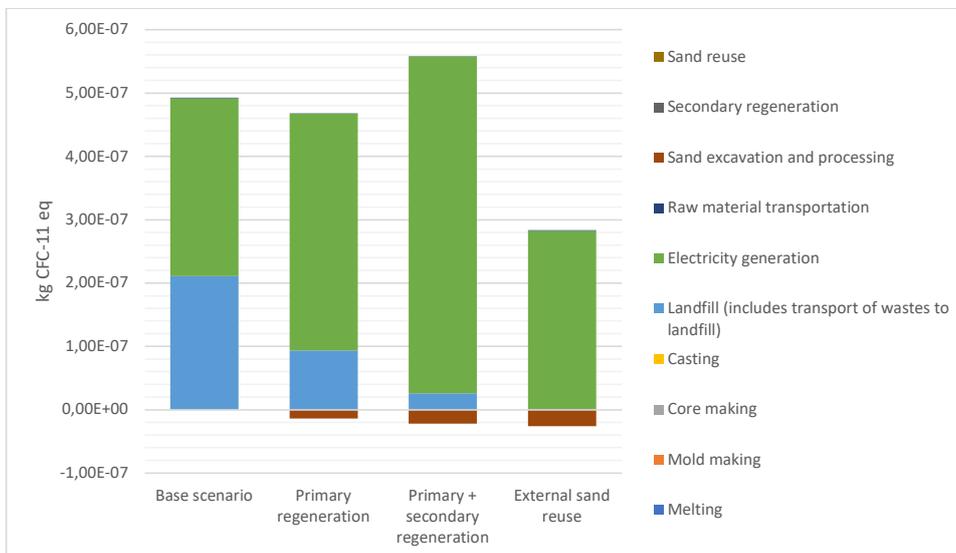


Figura 35: impatto dei quattro scenari considerati (scenario di riferimento, rigenerazione primaria delle sabbie, rigenerazione primaria e secondaria delle sabbie, riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia) sulla categoria Ozone Depletion.

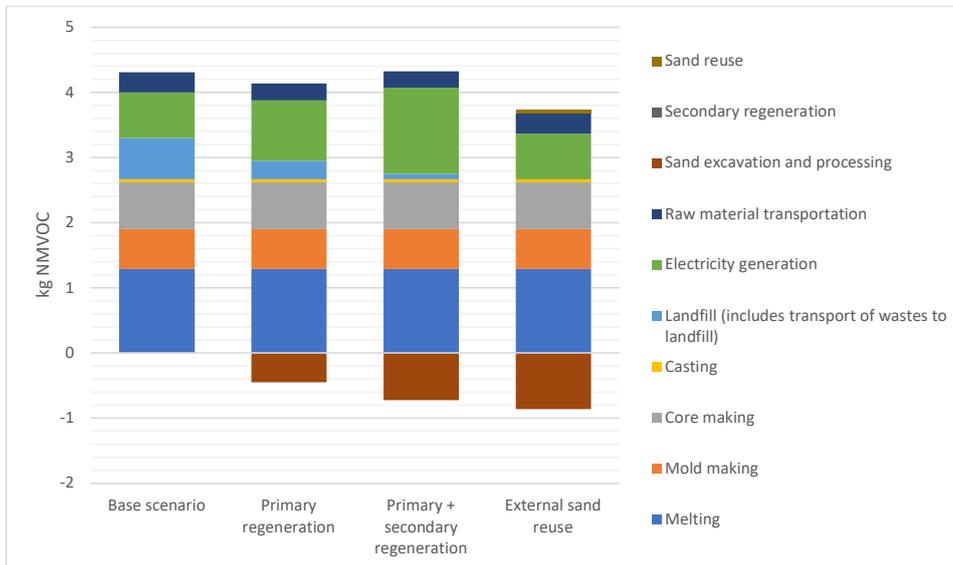


Figura 36: impatto dei quattro scenari considerati (scenario di riferimento, rigenerazione primaria delle sabbie, rigenerazione primaria e secondaria delle sabbie, riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia) sulla categoria Photochemical Oxidant Formation.

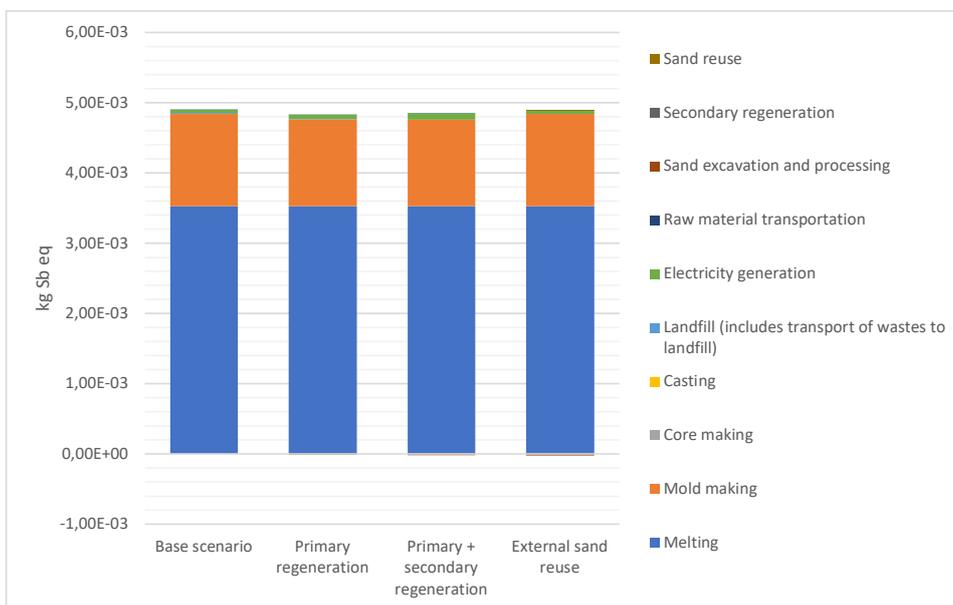


Figura 37: impatto dei quattro scenari considerati (scenario di riferimento, rigenerazione primaria delle sabbie, rigenerazione primaria e secondaria delle sabbie, riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia) sulla categoria Abiotic Depletion - metals.

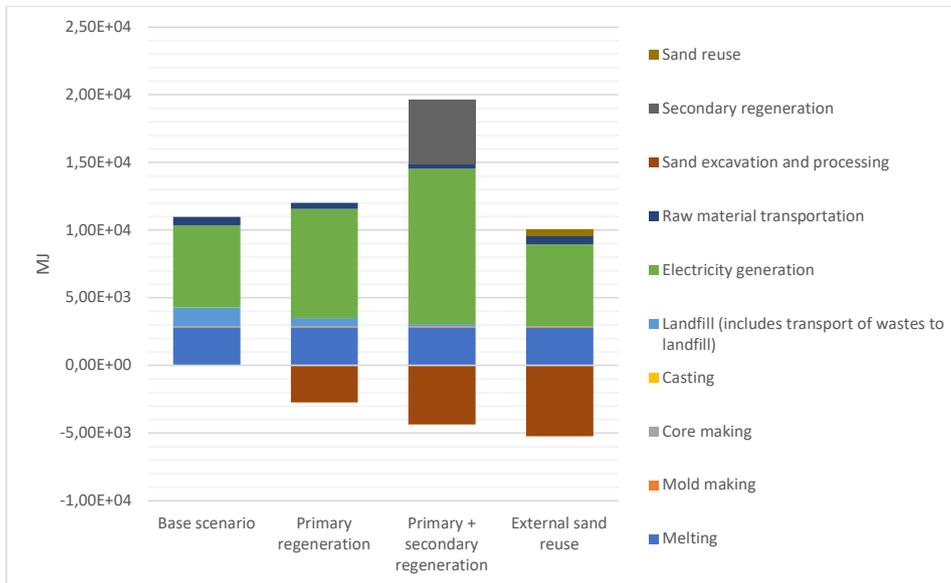


Figura 38: impatto dei quattro scenari considerati (scenario di riferimento, rigenerazione primaria delle sabbie, rigenerazione primaria e secondaria delle sabbie, riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia) sulla categoria Abiotic Depletion – Fossil Fuels.

## 14 Appendice C: impatto degli scenari di riutilizzo delle sabbie considerati sulle singole categorie

Questa sezione riporta una analisi dell'impatto che i quattro scenari considerati (scenario di riferimento, rigenerazione primaria, rigenerazione primaria e secondaria, riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia) hanno sulle singole categorie di impatto. Le categorie considerate sono Freshwater Eutrophication (Figura 39), Marine Eutrophication (Figura 40), Photochemical Oxidant Formation (Figura 41) e Abiotic Depletion – Fossils (Figura 42).

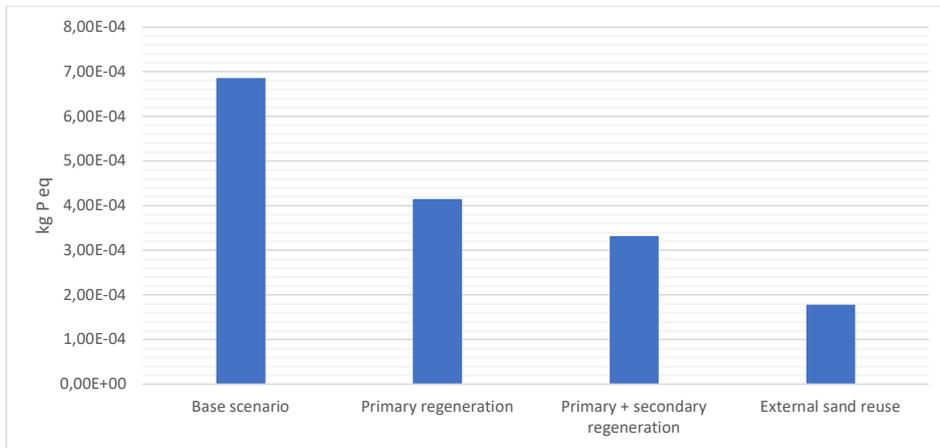


Figura 39: impatto dei quattro scenari considerati (scenario di riferimento, rigenerazione primaria, rigenerazione primaria e secondaria e riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia) sulla categoria Freshwater Eutrophication.

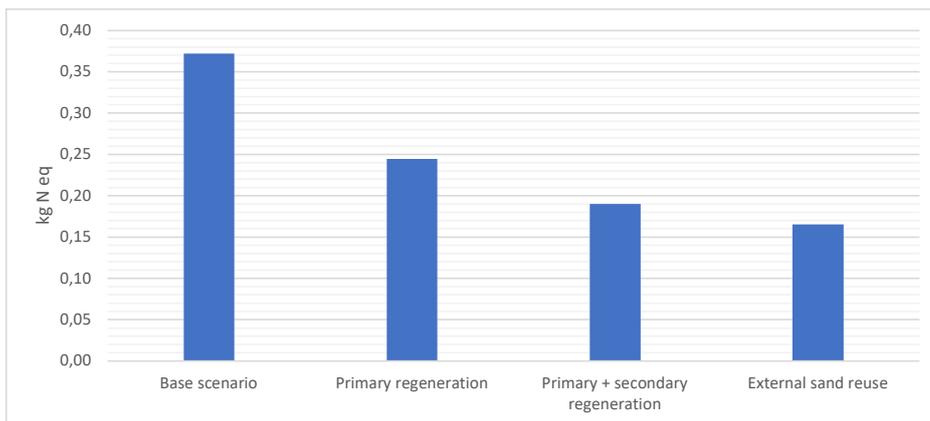


Figura 40: impatto dei quattro scenari considerati (scenario di riferimento, rigenerazione primaria, rigenerazione primaria e secondaria e riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia) sulla categoria Marine Eutrophication.

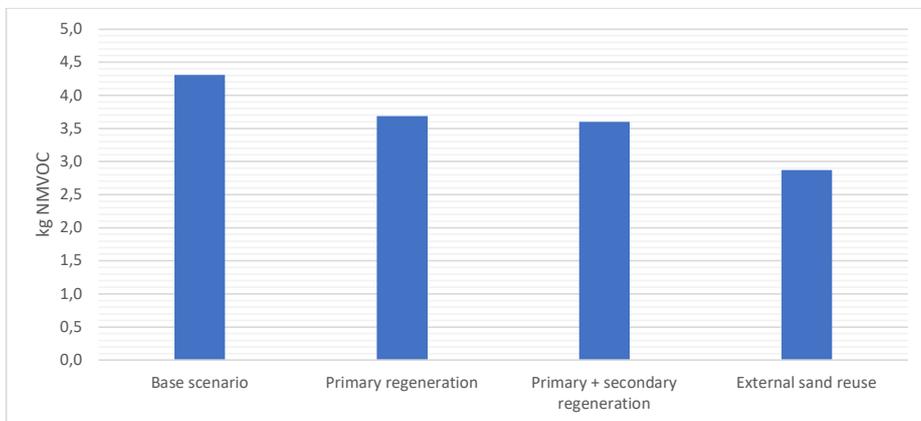


Figura 41: impatto dei quattro scenari considerati (scenario di riferimento, rigenerazione primaria, rigenerazione primaria e secondaria e riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia) sulla categoria Photochemical Oxidant Formation.

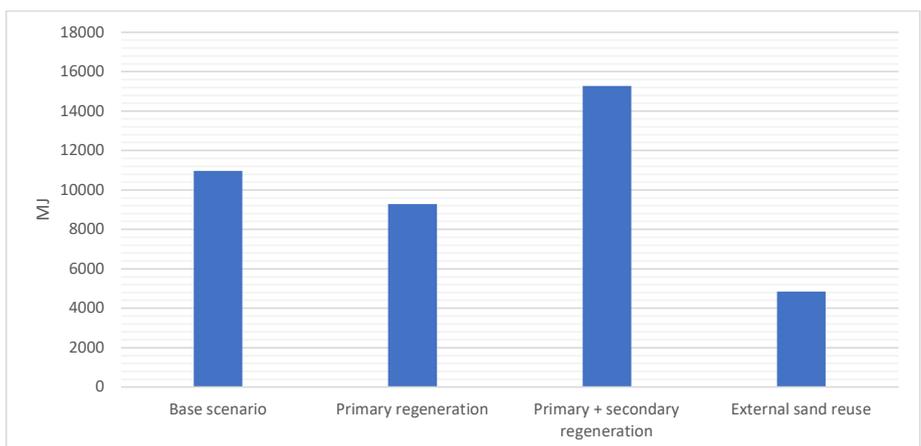


Figura 42: impatto dei quattro scenari considerati (scenario di riferimento, rigenerazione primaria, rigenerazione primaria e secondaria e riutilizzo delle sabbie all'esterno della fonderia) sulla categoria Abiotic Depletion - Fossil Fuels.