

EDILIZIA COSTRUZIONI

Studio LCA della filiera del cemento





EDILIZIA COSTRUZIONI

Studio LCA della filiera del cemento

Autori:

Paola Sposato, Antonella Luciano, Sara Corrado, Paola Altamura, Caterina Rinaldi

Revisione critica:

Ecoinnovazione S.r.l

ENEA - Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali

Data di redazione: Febbraio 2022

Data di pubblicazione: Giugno 2025

Sommario

1	Sintesi	7
2	Scopo del documento.....	8
3	Descrizione del settore.....	9
1.	Prodotti rappresentativi a livello nazionale	9
3.1	Impatto socio-economico del settore	10
3.2.1	Produzione e fatturato	10
3.2.2	Import-export	12
3.2	Impatti ambientali e strumenti di sostenibilità	13
3.3.1	Le materie prime utilizzate.....	13
3.3.2	I combustibili e le emissioni	15
3.4	Certificazioni ambientali di prodotto	16
4	Gruppo di lavoro	22
5	Ambito di applicazione dello studio	22
5.1	Funzione del sistema, unità funzionale e flusso di riferimento	22
5.2	Descrizione del processo produttivo e confini del sistema	23
5.3	Assunzioni e giudizi di valore	24
5.4	Gestione della multifunzionalità	25
5.5	Revisione critica.....	26
5.6	Modellizzazione e metodologia di analisi degli impatti	26
5.7	Informazioni ambientali aggiuntive	26
6	Modellazione dei dataset della filiera	26
7	Analisi di inventario	27
7.1	Assunzioni utilizzate nello studio	28
7.2	Descrizione e documentazione processi unitari	28
7.3	Sviluppo dei datasets	36
8	Valutazione degli impatti ambientali	36
8.1	Caratterizzazione	37
8.2	Normalizzazione.....	38
8.3	Pesatura	39

8.4	Analisi di sensitività.....	40
8.5	Categorie di impatto rilevanti.....	41
8.6	Fasi del ciclo di vita e processi rilevanti.....	42
8.7	Flussi elementari rilevanti.....	51
9	Conclusioni	52
10	Bibliografia.....	55

Lista delle Figure

Figura 1: Layout del processo di produzione del cemento. (Fonte: Luciano et al. Rapporto ENEA “Elementi per lo sviluppo di un piano per l’uso efficiente delle risorse nella filiera “edilizia e attività estrattiva”)	9
Figura 2: Distribuzione delle cementerie e degli impianti di macinazione in Italia, 2021. (Fonte: FEDERBETON, 2021a)	11
Figura 3: Andamento Import – export di cemento e clinker – Anni 2010-2021 (Fonte: FEDERBETON 2021a)	13
Figura 4: Materie prime vergini e materie sostitutive utilizzabili per la produzione di cemento (Fonte: Luciano et al. Rapporto ENEA “Elementi per lo sviluppo di un piano per l’uso efficiente delle risorse nella filiera “edilizia e attività estrattiva”)	15
Figura 5: Layout dei flussi in ingresso ed uscita dal forno nel corso del processo produttivo del clinker. (Fonte: modificato da Luciano et al. Rapporto ENEA “Elementi per lo sviluppo di un piano per l’uso efficiente delle risorse nella filiera “edilizia e attività estrattiva”)	16
Figura 7: Diagramma del confine del sistema.....	24
Figura 8 Contributo percentuale delle fasi di produzione sul totale degli impatti (valori normalizzati).....	44
Figura 9 Contributo percentuale delle fasi del ciclo di vita sul totale di ogni singola categoria d’impatto (in ordine di rilevanza da sinistra a destra).....	44

Lista delle Tabelle

Tabella 1: Ripartizione della produzione di cemento per tipi di cemento e classi di resistenza. (Fonte: FEDERBETON, 2021a; FEDERBETON 2020).....	10
Tabella 2: Ripartizione della produzione di cemento per classi di resistenza. (Fonte: FEDERBETON, 2021a; FEDERBETON 2020)	10
Tabella 3: Impianti, capacità produttiva e produzione annua di cemento anni 2019-2021 (Fonte: FEDERBETON, 2021a; FEDERBETON 2020)	11
Tabella 4: Destinazioni intermedie del cemento (%). (Fonte: FEDERBETON, 2021a)	12
Tabella 5: Import – export di cemento e clinker (Fonte: FEDERBETON 2021a)	12
Tabella 6: EPD cemento (Elaborazione Enea da dati EPD Italy. https://www.epditaly.it/epd-digitalizzate/).....	18
Tabella 7: certificazioni CSC per i cementi italiani (Fonte: https://toolbox.csc.eco/)	21
Tabella 8: Rifiuti e scarti in ingresso alla produzione di cemento e per cui è stato applicato un cut-off	25

Tabella 9: Processi utilizzati per la modellazione degli input di materie prime al processo di produzione di clinker e relative distanze di trasporto. I valori sono riferiti a 1 t di clinker. Fonte dati di attività: media dati 2019 – 2020 comunicati da AITEC	30
Tabella 10: Processi utilizzati per la modellazione di combustibili, consumi energetici, e trasporto nel processo di produzione di clinker. I valori sono riferiti a 1 t di clinker. Fonte dati di attività: media dati 2019 – 2020 comunicati da AITEC	31
Tabella 11: Elenco dei flussi in uscita al processo di produzione di clinker. Valori riferiti alla produzione di 1 t di clinker. Fonte dati di attività: ISPRA, 2019; per anidride carbonica, rame, acido cloridrico, acido cianidrico, e acido fluoridrico, media dati 2019 – 2020 comunicati da AITEC.....	32
Tabella 12: Processi utilizzati per la modellazione di 537 Kg di CSS. Dati presi da Rigamonti, L., Grosso, M., & Biganzoli, L. (2012). Environmental Assessment of Refuse Derived Fuel Co-Combustion in a Coal Fired Power Plant. Journal of Industrial Ecology, 16(5), 748-760.	33
Tabella 13: Elenco dei flussi in uscita al processo di produzione di CSS (537 Kg di CSS). Dati presi da Rigamonti, L., Grosso, M., & Biganzoli, L. (2012). Environmental Assessment of Refuse Derived Fuel Co-Combustion in a Coal Fired Power Plant. Journal of Industrial Ecology, 16(5), 748-760.....	33
Tabella 14: Processi utilizzati per la modellazione degli input al processo di produzione di cemento e relative distanze di trasporto. I valori sono riferiti a 1 t di cemento. Fonte dati di attività: media dati 2019 – 2020 comunicati da AITEC	34
Tabella 15: Processi utilizzati per i consumi energetici e trasporto nel processo di produzione di cemento. I valori sono riferiti a 1 t di cemento. Fonte dati di attività: media dati 2019 – 2020 comunicati da AITEC	35
Tabella 16: Caratterizzazione	37
Tabella 17: Risultati di normalizzazione per le categorie d’impatto considerate dal metodo EF3	38
Tabella 18: Risultati di pesatura per le categorie d’impatto considerate dal metodo EF3	39
Tabella 19: modellazione degli scenari	40
Tabella 20: Risultati di normalizzazione (per le categorie d’impatto considerate dal metodo EF3) relativi al confronto tra Scenario base A e Scenario B.....	41
Tabella 21: Contributo percentuale delle fasi del ciclo di vita della pre-manifattura suddivisa per processi della produzione clinker e produzione cemento e con dettaglio sulle categorie d’impatto più rilevanti	42
Tabella 22: Contributo percentuale delle fasi del ciclo di vita della manifattura suddivisa per processi della produzione clinker e produzione cemento e con dettaglio sulle categorie d’impatto più rilevanti.	43
Tabella 23: Contributo percentuale delle fasi del ciclo di vita delle categorie d’impatto rilevanti sul totale degli impatti dello studio	45

Tabella 24: Contributi (percentuali) dei processi della fase di produzione cemento sul totale degli impatti per le categorie d’impatto rilevanti. La tabella evidenzia per le categorie d’impatto rilevanti i diversi contributi dei processi della produzione cemento suddivisi per pre-manifattura e manifattura. Nelle ultime due righe sono riportati i totali dei contributi per ogni processo sia considerate le sole categorie rilevanti sia considerato l’intero studio. Dalla tabella si evince come la produzione di elettricità costituisca un processo rilevante poiché rappresenta il 13,5% degli impatti dell’intero studio.	47
Tabella 25: Contributi (percentuali) dei processi produzione clinker sul totale degli impatti per le categorie d’impatto rilevanti suddivisi per pre-manifattura e manifattura. Nel box in nero si evidenziano i due processi su cui è stata condotta una analisi di sensitività e per cui è stato assunto che metà del consumo aggregato (fornito da AITEC) corrisponda a carbone e l’altra metà a petcoke.	48
Tabella 26: Contributi percentuali dei processi dello studio di filiera di produzione cemento medio italiano all’interno della categoria d’impatto Ecotoxicity, freshwater	49
Tabella 27: Contributi percentuali dei processi dello studio di filiera di produzione cemento medio italiano all’interno della categoria d’impatto Climate change	50
Tabella 28: Contributi percentuali dei processi dello studio di filiera di produzione cemento medio italiano all’interno della categoria d’impatto Resource use, fossi	50

Lista degli Acronimi

CAM - Criteri Ambientali Minimi
 CSS – Combustibile solido secondario
 EPD - Enviromental Product Declaration
 JRC - Joint Research Centre
 LCA - Life Cycle Assessment

1 Sintesi

Il presente report riguarda il settore del cemento e ne fornisce una descrizione a livello generale, delle sue caratteristiche peculiari, dei prodotti rappresentativi al suo interno e delle principali tipologie di impatto (sia ambientale che socio-economico) che lo contraddistinguono. Il presente studio è stato sviluppato da ENEA.

All'interno del documento sono presentati anche i risultati di uno specifico studio di ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA) applicato alla filiera del cemento, che ha preso in considerazione una tonnellata di "cemento medio" prodotto in Italia (rappresentativo delle media nazionale).

Lo studio LCA è stato svolto adottando un approccio "cradle-to-gate", ovvero considerando tutti i processi fino al "cancello aziendale", senza includere la distribuzione del prodotto, e le successive fasi di uso e fine vita. Include quindi le fasi di estrazione delle materie prime e di produzione dei prodotti utilizzati per la produzione di cemento, il loro trasporto, la produzione di energia elettrica, l'estrazione di acqua, e la produzione di cemento. Le fasi del ciclo di vita successive all'uscita del cemento dallo stabilimento produttivo sono state escluse in quanto il cemento può essere destinato a vari utilizzi con caratteristiche molto diverse tra di loro.

L'unità funzionale (UF) dello studio è la produzione di 1 t di "cemento medio" prodotto in Italia. Per cemento medio si intende il mix delle principali tipologie di cementi prodotti in Italia secondo la UNI EN 197-1 e tenuto conto dei volumi di produzione nazionale come segue: cemento Portland (CEM I) e il Portland di miscela (CEM II) con l'86% di quota della produzione totale, cementi pozzolanici (12%) e il cemento d'alto forno (2%). - dati medi forniti dall'Associazione Italiana Tecno Economica del Cemento (AITEC) relativi agli anni 2019 e 2020.

Il flusso di riferimento dello studio è 1 t di cemento medio in uscita dallo stabilimento produttivo.

Lo studio è stato svolto utilizzando dati di buona qualità utilizzando dati primari raccolti presso l'Associazione di categoria nazionale (AITEC) e utilizzati per dalla stessa associazione per lo sviluppo dell'EPD di settore relativa al cemento medio (EPD cementi grigi medi Italia).

I risultati dello studio LCA, ottenuti tramite il metodo di valutazione degli impatti EF 3.0, che costituisce il metodo di valutazione dell'iniziativa della Commissione Europea sull'impronta ambientale e consente di ottenere un profilo di impatto completo a livello prodotto, indicano che le categorie di impatto più rilevanti per la produzione del cemento sono:

1. Ecotoxicity, freshwater con il **23,8%**
2. Climate change con il **22,9%**
3. Resource use, fossils con l'**8,2%**
4. Eutrophication, freshwater con il **7,3%**
5. Photochemical ozone formation con il **7,2%**
6. Acidification con il **6,1%**
7. Eutrophication, terrestrial con il **5,9%**

Il totale degli impatti generati da tali categorie d'impatto rappresenta l'**81,4% degli impatti totali** della produzione del cemento medio italiano. La fase preponderante è quella della produzione del clinker che rappresenta il maggior contributo sia a causa del suo peso con 763 kg su 1 t di massa, sia per le emissioni generate dai processi di calcinazione e di cottura nel forno e che si rivelano il maggiore impatto ambientale dello studio. Contributi significativi sono inoltre determinati dal consumo di elettricità impiegata per i processi produttivi.

Si ringraziano AITEC e Federbeton per avere contribuito con i dati forniti al presente studio e allo sviluppo dei dataset per la banca dati di Arcadia.

2 Scopo del documento

Il seguente rapporto è stato realizzato all'interno del progetto Arcadia - approccio ciclo di vita nei contratti pubblici e banca dati italiana LCA, finanziato dal PON Governance e Capacità Istituzionali 2014-2020, come output dell'Azione 5 "Analisi e raccolta dati per la costituzione della banca dati". Questo rapporto rientra nella sotto-azione A5.2 "Raccolta dati prodotto/servizio lungo il ciclo di vita ed elaborazione dei documenti" e rappresenta lo studio relativo alla filiera del Cemento.

3 Descrizione del settore

Si riporta in Figura 1 una schematizzazione del processo di produzione che prevede le fasi di produzione del clinker e del cemento. Il clinker viene prodotto a partire prevalentemente da materie prime naturali tra cui le principali sono calcare, argilla e marna, che vengono frantumate, finemente macinate, omogeneizzate e alimentate al forno di cottura.

In uscita dal forno il clinker viene raffreddato e inviato alla fase successiva per la macinazione nei mulini con l'aggiunta di gesso e altri componenti selezionati (come loppa d'altoforno, ceneri volanti, pozzolane naturali, calcare, etc.) per formare la polvere omogenea che costituisce il cemento.

Per normare la qualità del cemento in uso in Europa, è stata prodotta una classificazione armonizzata sulla base della composizione e della classe di resistenza normalizzata. La UNI EN 197-1 descrive le 5 tipologie di cemento, divise in 27 sottotipi e 6 classi di resistenza, per un totale di 162 (27×6) cementi.

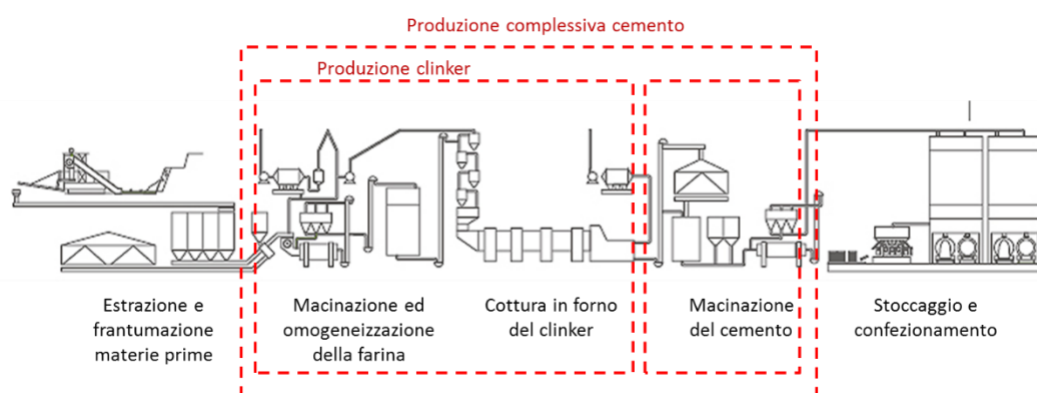


Figura 1: Layout del processo di produzione del cemento. (Fonte: Luciano et al. Rapporto ENEA "Elementi per lo sviluppo di un piano per l'uso efficiente delle risorse nella filiera "edilizia e attività estrattiva")

1. Prodotti rappresentativi a livello nazionale

La ripartizione qualitativa della produzione di cemento in Italia è sostanzialmente rimasta costante negli ultimi anni. Il cemento Portland (CEM I) e il cemento Portland composito (CEM II) rappresentano le principali tipologie di cemento prodotte (86%-87% di quota della produzione totale). A seguire il cemento pozzolanico (10-12%) e il cemento d'alto forno (2-3%). Il cemento Portland composito rimane la tipologia maggiormente prodotta in Italia (70-72%) (Tabella 1). La distribuzione della produzione di cemento per classi di resistenza conferma la prevalenza di cementi ad alta e altissima resistenza con una quota del 70% (Tabella 2) (FEDERBETON, 2021a).

Per quanto riguarda le modalità di distribuzione, il prodotto sfuso rappresenta l'85,2% della produzione rispetto alla modalità in sacco (FEDERBETON, 2021a).

Tabella 1: Ripartizione della produzione di cemento per tipi di cemento e classi di resistenza. (Fonte: FEDERBETON, 2021a; FEDERBETON 2020)

	2021		2020		2019	
Tipo	tonnellate	%	tonnellate	%	tonnellate	%
I	3.026.153	15	2.786.465	15	3.023.451	16
II/A-L	10.074.363	49	8.640.685	48	9.546.648	50
II/B-L	4.357.340	21	3.640.181	20	3.768.482	20
II/B-M	138.066	1	297.993	2	72.141	0
II/B-P	147.283	1	115.308	1	137.763	1
III/A	560.017	3	356.233	2	315.861	2
III/B	34.339	0	62.809	0	52.144	0
IV/A	1.525.074	7	1.396.020	8	1.548.312	8
IV/B	675.580	3	736.091	4	775.843	4
V/A	82.823	0	30.829	0	0	0
Totale Nazionale	20.621.037	100	18.062.613	100	19.240.645	100

Tabella 2: Ripartizione della produzione di cemento per classi di resistenza. (Fonte: FEDERBETON, 2021a; FEDERBETON 2020)

	2021		2020		2019	
Classi di resistenza	tonnellate	%	tonnellate	%	tonnellate	%
32,5 e altre resistenze	6.186.318	30,0%	5.744.079	31,8%	5.951.648	30,9%
42,5	12.515.850	60,7%	10.742.837	59,5%	11.505.879	59,8%
52,5	1.918.870	9,3%	1.575.697	8,7%	1.783.118	9,3%
Totale	20.621.037	100,0%	18.062.613	100,0%	19.240.645	100,0%

3.1 Impatto socio-economico del settore

3.2.1 Produzione e fatturato

Si riporta in Tabella 3 il quadro riassuntivo degli impianti presenti in Italia, della capacità produttiva e della produzione negli ultimi anni.

Il numero di impianti delle aziende attive a livello nazionale nel 2021 ammonta a 28 cementerie a ciclo completo (stabilimenti che realizzano l'intero ciclo produttivo del cemento, inclusa la cottura necessaria alla produzione del clinker) e 23 centri di macinazione (stabilimenti che acquistano clinker, o utilizzano clinker prodotto da altri stabilimenti o da altre linee, e lo miscelano con sostanze di carica durante la "macinazione del cotto" per produrre le diverse tipologie di cemento) (Figura 2).

La capacità produttiva nel 2021 è stata di circa 31 milioni di tonnellate di cemento, in linea con l'anno precedente e con un tasso di utilizzo dei forni negli impianti a ciclo completo del 66% in crescita rispetto agli anni precedenti.

Performance produttive migliori vengono registrate negli impianti delle aree settentrionale e meridionale del Paese con una percentuale di utilizzo dei forni rispettivamente del 75% e del 71%.

Si rileva una capacità produttiva utilizzata sotto la media nazionale invece negli impianti produttivi localizzati nell'area insulare (59%) e soprattutto in quella centrale del Paese (53%) (FEDERBETON, 2021a).

Nel 2021 la produzione di cemento in Italia è stata pari a 20,6 milioni di tonnellate, in crescita del 14,2% rispetto al 2020 le cui destinazioni intermedie sono riportate in Tabella 4 per tutto l'ultimo decennio.

Tabella 3: Impianti, capacità produttiva e produzione annua di cemento anni 2019-2021 (Fonte: FEDERBETON, 2021a; FEDERBETON 2020)

	Impianti	Capacità produttiva	Produzione
2021	28 cementerie a ciclo completo e 23 centri di macinazione	31 milioni di tonnellate	20,6 milioni di tonnellate
2020	30 cementerie a ciclo completo e 24 centri di macinazione	31 milioni di tonnellate	18,1 milioni di tonnellate
2019	32 cementerie a ciclo completo e 23 centri di macinazione	31 milioni di tonnellate	19,2 milioni di tonnellate

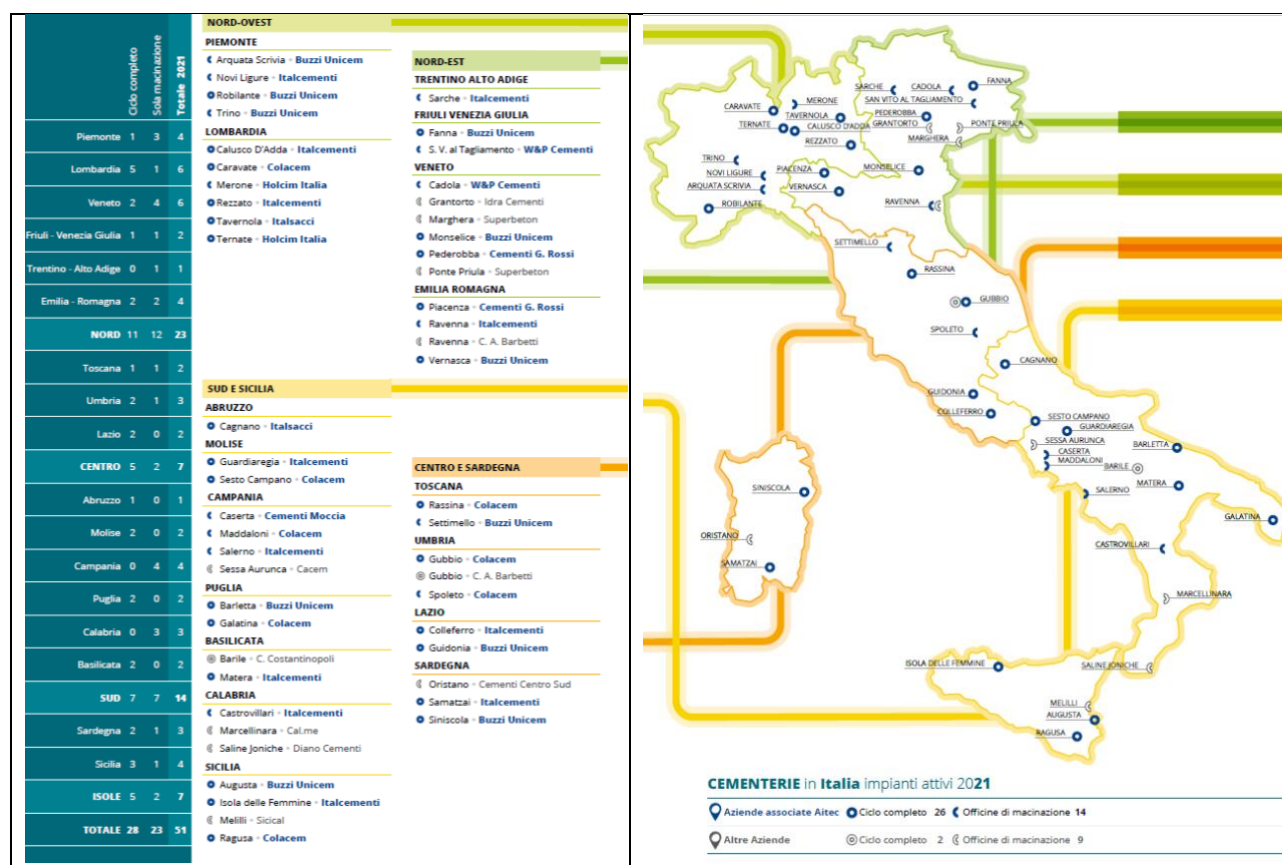


Figura 2: Distribuzione delle cementerie e degli impianti di macinazione in Italia, 2021. (Fonte: FEDERBETON, 2021a)

Tabella 4: Destinazioni intermedie del cemento (%). (Fonte: FEDERBETON, 2021a)

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Centrali di betonaggio	51,7	52,4	50,9	49,6	50,5	48,1	48,2	50,8	52,8	47,7	49,4
Grossisti e rivenditori	25,8	26,6	28,3	28,1	28,1	28,3	28	27,1	23,6	26,1	24,5
Prefabbricatori	10,8	10,1	9,5	9,6	9,4	10,1	10,3	10,4	10,7	10,9	10,8
Imprese di costruzione	6,4	6,2	5,9	6,8	5,8	5,5	5,4	5,3	4,9	6,3	6,7
Premiscelatori	4,3	4,2	5,7	5,4	5,7	6,5	6,6	6,3	6,4	7,6	7,7
Altre destinazioni	0,5	1	-0,2	0,6	0,5	1,5	1,4	-	1,6	1,5	0,8
Totale consegne interne	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Il settore (FEDERBETON, 2021a) mostra nel 2021 un fatturato complessivo di 11,3 miliardi in crescita del 22,6% rispetto al 2020 ed in linea con i valori di un decennio fa ed un numero di addetti di 34mila unità.

3.2.2 Import-export

L'andamento dei flussi di import-export dell'ultimo decennio è riportato in Tabella 5. Nel 2021 i flussi combinati in entrata (cemento + clinker) hanno raggiunto un livello pari a 2,66 milioni di tonnellate (in crescita del 25% rispetto al 2020) superando le esportazioni che invece sono state pari a 2 milioni di tonnellate (in linea con l'anno precedente) con un saldo commerciale negativo di circa 0,66 milioni di tonnellate (Tabella 5). L'Italia perde quindi già a partire dal 2020 il proprio tradizionale ruolo di Paese esportatore netto di cemento e clinker (Figura 3).

Sempre con riferimento al 2021, il 32% del cemento e del clinker importato proviene dalla Turchia, seguita da Slovenia (20%) e Grecia (14%). La Francia si conferma principale mercato di sbocco delle esportazioni italiane (27%), seguita da Malta (19%) e Spagna (16%).

Tabella 5: Import – export di cemento e clinker (Fonte: FEDERBETON 2021a)

	Esportazioni				Importazioni			
	Cemento	Clinker	Totale	% di produzione nazionale	Cemento	Clinker	Totale	% di produzione nazionale
2011	1.585	45	1.630	4,9	1.244	844	2.088	6,3
2012	1.727	47	1.774	7,7	1.105	729	1.834	7,9
2013	2.314	129	2.443	10,6	914	450	1.364	5,9
2014	2.295	207	2.502	11,6	758	437	1.195	5,5
2015	2.184	237	2.421	11,6	831	421	1.252	6
2016	1.588	292	1.880	9,7	935	292	1.226	6,3
2017	1.785	249	2.034	10,5	966	391	1.357	7
2018	1.975	218	2.193	11,4	1.302	484	1.785	9,3
2019	1.886	178	2.064	10,7	1.317	645	1.962	10,2
2020	1.810	177	1.987	11	1.418	711	2.129	11,8
2021	1.938	133	2.071	10	1.689	976	2.664	12,9

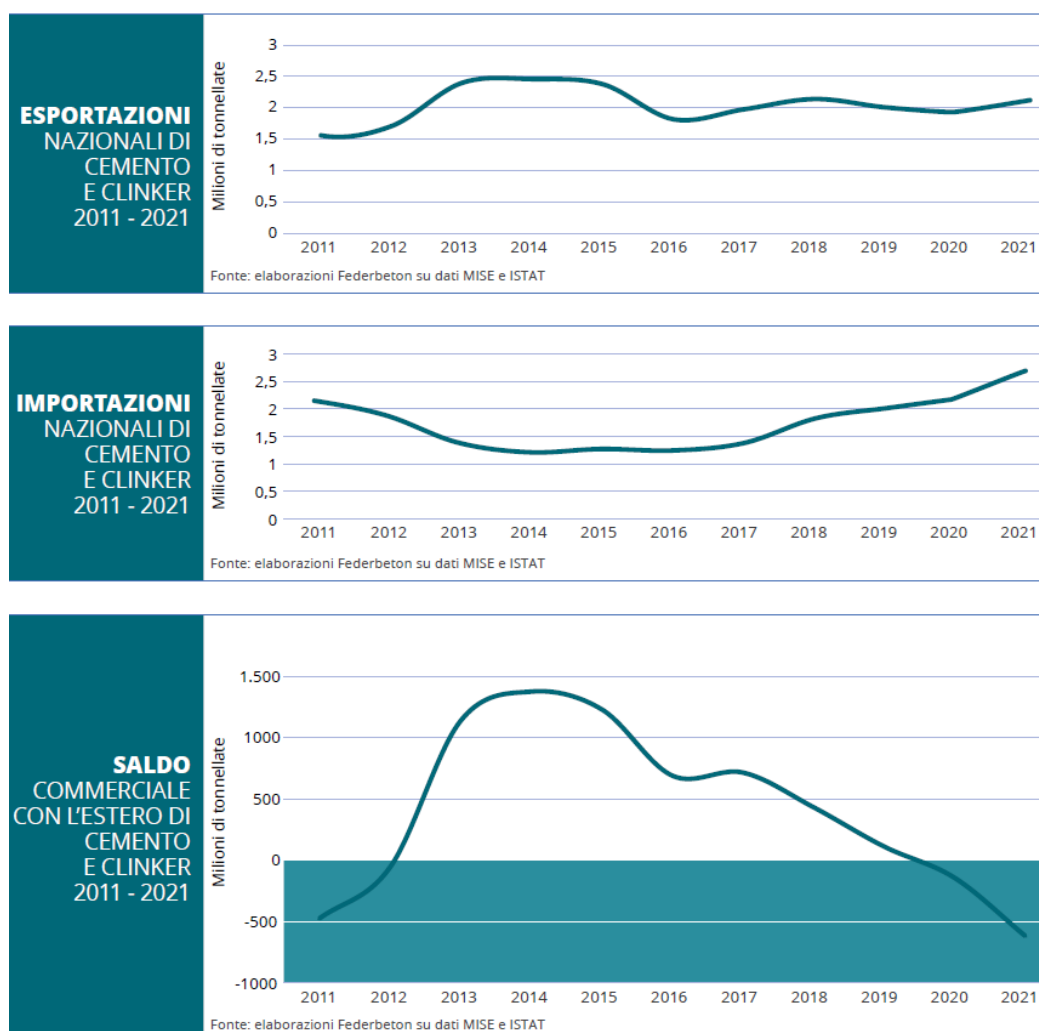


Figura 3: Andamento Import – export di cemento e clinker – Anni 2010-2021 (Fonte: FEDERBETON 2021a)

3.2 Impatti ambientali e strumenti di sostenibilità

I principali aspetti ambientali della filiera sono rappresentati dal consumo di materie prime, di energia e dalle emissioni in atmosfera dovute alla calcinazione e alla combustione durante il processo di cottura in forno del clinker.

3.3.1 Le materie prime utilizzate

Le materie prime per la produzione del cemento sono storicamente rocce di origine naturale: calcare, argilla, scisto, marna, gesso, pozzolana. La quantità maggiore di materie prime impiegate per la produzione di cemento è destinata alla realizzazione della “farina cruda”, una miscela di materiali finemente macinati, dalla quale, si ricava il clinker tramite cottura. Le principali materie prime impiegate per la produzione di clinker sono argilla, calcare, marna. A queste si aggiungono quelle impiegate per la produzione dei diversi tipi di cemento (gesso, pozzolana, calcare, scisto). Circa 24 milioni di tonnellate di materiali vergini sono stati consumati dall’industria del cemento nel

2021 (AITEC, 2021), ne consegue che l'utilizzo di materie prime di recupero è una buona pratica (Best Available Technologies) da incoraggiare in quanto consente di ridurre l'impiego di materie prime naturali (risorse non rinnovabili).

Sotto il profilo ambientale, l'utilizzo di scarti e residui industriali in parziale sostituzione di materie prime di origine naturale offre quindi importanti opportunità per la razionalizzazione del consumo di risorse naturali (cave e miniere) ma anche per la riduzione delle emissioni totali di CO₂ connesse al processo di cottura della roccia calcarea (calcinazione) durante la produzione del clinker. Questa fase del processo, infatti, determina circa il 60% delle emissioni totali di CO₂ dell'intero ciclo produttivo del cemento, mentre il restante 40% circa è dovuto alla combustione. Le materie di sostituzione utilizzate nel processo di produzione del cemento vengono inoltre sottoposte a recupero di materia, in alternativa allo smaltimento in discarica, con un vantaggio ambientale e sociale sia per la collettività che per il sistema industriale.

Dal punto di vista del prodotto, il cemento deve rispettare gli standard definiti a livello comunitario dalla norma armonizzata (UNI EN 197-1) ed essere conforme alle disposizioni del Regolamento 305/2011 sui prodotti da costruzione e del Regolamento REACH sulla commercializzazione di sostanze e preparati. Per questo l'industria del cemento deve selezionare e controllare con estrema cura e secondo processi molto rigorosi tutti i materiali in ingresso negli stabilimenti. Un cemento non conforme a tali standard non può essere commercializzato nell'UE. I controlli periodici di conformità del cemento sono effettuati sia internamente alla fabbrica che da parte di Enti indipendenti accreditati. La concentrazione di determinati elementi nel prodotto finale può variare, entro limiti prefissati, in funzione della qualità e della quantità delle materie prime e combustibili utilizzati. Tuttavia, i materiali alternativi utilizzati devono contenere gli stessi elementi delle materie prime che sostituiscono e dunque il loro impiego non deve influenzare la qualità del prodotto finale: il cemento prodotto co-utilizzando rifiuti deve essere uguale (rispettare le stesse caratteristiche chimico-fisiche e proprietà) al cemento prodotto con le materie prime naturali.

Materiali di origine naturale provenienti dalle attività estrattive (calcare, argilla e scisti) sono di fatto già parzialmente sostituiti da materiali alternativi: questi sono tipicamente rifiuti non pericolosi o sottoprodotti provenienti da altri settori industriali, come le scorie d'altoforno, le ceneri volanti, e i fumi di silice (Luciano et al. 2020):

Dunque i materiali di composizione chimica compatibile che trovano impiego nella produzione di cemento sono:

- scorie di acciaieria, scaglie di laminazione, residui di minerali di ferro dalla industria siderurgica e metallurgica;
- gessi da desolforazione fumi e ceneri pesanti degli inceneritori di rifiuti;
- fanghi da processi di lavorazione e di depurazione delle acque e da trattamento delle acque di processo;
- scarti inorganici e catalizzatori esausti dell'industria chimica;
- rifiuti da demolizioni (privi di amianto), sfridi da lavorazione di marmi e graniti, rifiuti di roccia e residui inerti da lavorazione del settore estrattivo e delle costruzioni;
- polveri raccolte nell'ambito della stessa produzione del cemento, reimmesse nel processo di lavorazione.

Si riporta in Figura 4 il layout di processo con l'indicazione dei materiali sostitutivi.

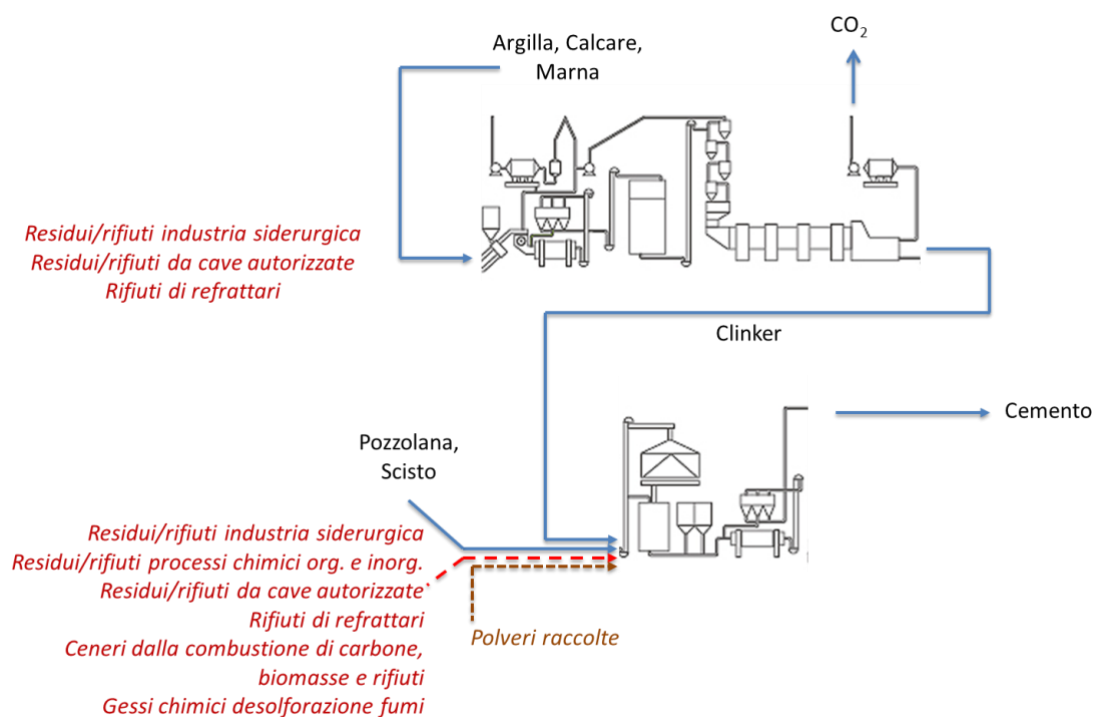


Figura 4: Materie prime vergini e materie sostitutive utilizzabili per la produzione di cemento (Fonte: Luciano et al. Rapporto ENEA "Elementi per lo sviluppo di un piano per l'uso efficiente delle risorse nella filiera "edilizia e attività estrattiva")

Il tasso di sostituzione delle materie prime naturali nel processo di produzione del cemento si è attestato nel 2021 intorno al 7%, costante rispetto al 2020 (FEDERBETON, 2021b) e con +0,5 punti percentuali rispetto al 2015 (Luciano et al., 2020).

Il tasso effettivo di sostituzione delle materie prime potrebbe aumentare notevolmente grazie all'elevata disponibilità di materie prime alternative e alla potenzialità dell'industria cementiera di utilizzare tali residui e sottoprodotti. Gli impianti italiani, sia dal punto di vista energetico che ambientale, sono sicuramente idonei a realizzare recuperi percentualmente superiori di rifiuti e residui.

Ovviamente non tutti i rifiuti possono essere utilizzati, in primo luogo devono rispondere alla definizione di "rifiuto non pericoloso". Quindi sono soggetti alle rigorose procedure di controllo e accettazione, alle modalità di campionamento e analisi definite nel "Piano di Monitoraggio e Controllo" opportunamente valutato in sede di rilascio della A.I.A. e sistematicamente verificato da parte degli Organi competenti. Lo scopo è sia tutelare la qualità del prodotto finale, che prevenire emissioni inquinanti.

3.3.2 I combustibili e le emissioni

Le emissioni di maggior rilievo connesse al processo di produzione del cemento sono rappresentate da NO_x, SO₂, Polveri, CO₂, CO, COV, HF, HCl.

La strategia nazionale di decarbonizzazione del settore del cemento prevede di raggiungere un tasso di sostituzione calorica dei combustibili fossili del 47% al 2030 e dell'80% al 2050, arrivando a ridurre le emissioni di CO₂ nel 2050 del 12% rispetto a uno scenario "business as usual". L'Italia però è

ancora ferma al 22% di sostituzione calorica, lontana non solo quindi da tali obiettivi, ma anche dai livelli di sostituzione calorica degli altri Paesi europei, la cui media, già nel 2020, ha superato il 50%. (FEDERBETON, 2021b). Incrementare l'utilizzo dei combustibili alternativi contribuirebbe di certo al raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione.

I combustibili alternativi principalmente utilizzati nel settore sono: CSS (Combustibile Solido Secondario), plastiche gomme e pneumatici, fanghi di depurazione delle acque reflue.

In Figura 5 si riporta il layout dei flussi in ingresso e uscita dal forno nel corso del processo produttivo del clinker con particolare riguardo alla fase di cottura.

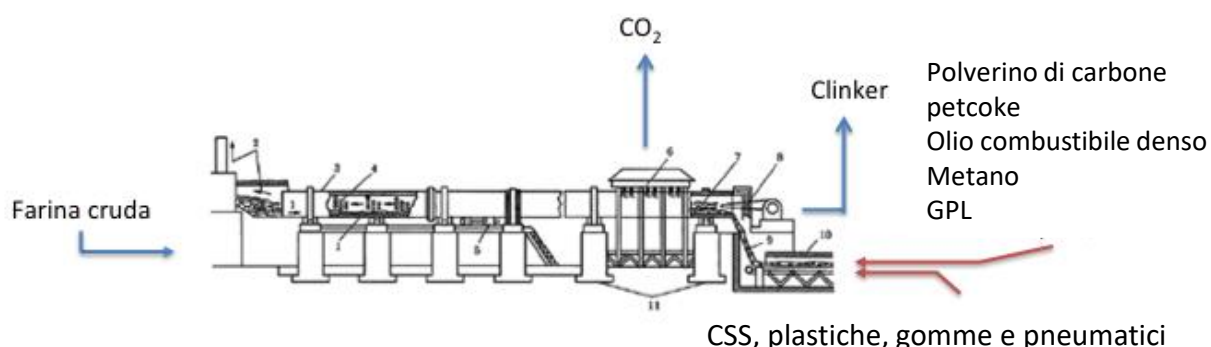


Figura 5: Layout dei flussi in ingresso ed uscita dal forno nel corso del processo produttivo del clinker. (Fonte: modificato da Luciano et al. Rapporto ENEA "Elementi per lo sviluppo di un piano per l'uso efficiente delle risorse nella filiera "edilizia e attività estrattiva")

3.4 Certificazioni ambientali di prodotto

Le certificazioni e le etichette ambientali forniscono al consumatore (finale o intermedio) informazioni sulla qualità ambientale del prodotto.

L'industria del cemento, in linea con l'esigenza ormai consolidata del mercato dei prodotti da costruzione di connotarli e qualificarli anche a livello ambientale, ha intrapreso e mantenuto nel tempo la redazione di studi LCA e EPD relativi ai prodotti.

In particolare, AITEC, Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento, ha deciso, a partire dal 2014 relativamente ad un panel selezionato di impianti a essa associati, di realizzare lo studio di "Valutazione del ciclo di vita (LCA)" elaborato sulla base della produzione di cemento grigio come metodologia per l'identificazione e la quantificazione degli impatti ambientali della "Produzione di cemento in Italia" ¹ seguendo le regole del Sistema Internazionale EPD® (ISO 14025). Lo studio LCA è stato condotto conformemente alle indicazioni riportate nella PCR (Product Category Rules) 2012:01 versione 2.3 e Sub-PCR-H – Cemento per lo sviluppo di una Dichiarazione Ambientale di Prodotto di Settore in conformità a quanto previsto dalle norme della serie ISO 14040, UNI EN 15804, EN 16908:2017+A1:2022 e seguendo le indicazioni del "General Programme Instructions for Environmental Product Declarations" versione 2.5, tenuto conto della PCR.

¹Si veda: <https://www.Aitecweb.com/Sostenibilità/Sostenibilità-delprocesso-e-del-prodotto>

L'EPD è basata su un campione rappresentativo del settore composto da un panel di Aziende associate a AITEC ed include anche la valutazione del potenziale impatto ambientale della produzione del clinker. L'EPD elaborate fino al 2021 sono state pubblicate sul sito di Environdec².

Obiettivo dello studio è stato valutare il carico ambientale della produzione di clinker e cementi grigi medi, predisponendo una EPD di settore a livello Italia. Il presente studio di settore è eseguito su un campione rappresentativo delle aziende associate ad AITEC che ha coinvolto 6 impianti a ciclo produttivo completo.

Il cemento medio italiano è stato calcolato come la media pesata, in base alla produzione in massa, delle singole tipologie di cemento, al netto della produzione di eventuali coprodotti.

Il panel del campione selezionato ha prodotto il 16,4%, il 17% e il 23% della produzione totale nazionale rispettivamente agli anni 2018, 2019 e 2020 (studi del 2019,2020,2021) con una rappresentatività di dati allineati alla media italiana per quanto riguarda: posizione geografica degli stabilimenti; classe di resistenza; uso di combustibili e materie prime, considerando anche l'uso di combustibili alternativi e rifiuti recuperati; tipi di cemento prodotti; consumi energetici.

Nel 2022, relativamente ai dati del 2021, lo stesso studio è stato pubblicato sul program Operator EPD Italy in conformità alla PCR ICMQ 3.0-Prodotti da costruzione e servizi per costruzioni (pubblicazione o aggiornamento) (Rev3) – 02/12/2019 sub-PCR EPDItaly029-Cemento, leganti e premiscelati – 05/09/2022 e alle EN 15804:2012+A2:2019 “Sustainability of construction works - Environmental product declarations Core rules for the product category of construction products”; EN 16908:2022 “Cement and building lime – Environmental product declarations — Product category rules complementary to EN 15804” EN 16449 “Wood and wood-based products - Calculation of the biogenic carbon content of wood and conversion to carbon dioxide”.

Oltre all'EPD di prodotto medio, diverse aziende hanno intrapreso ovvero proseguito iniziative di studi LCA e EPD sui propri prodotti come riportato in Tabella 6.

² <https://www.environdec.com/library/?Epd=11688>

<https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/69ef8220-1fab-487c-cf1e-08d9df0ea78f/Data>

Tabella 6: EPD cemento (Elaborazione Enea da dati EPD Italy. <https://www.epditaly.it/epd-digitalizzate/>)

Prodotto	Azienda	Unità produttiva	Descrizione
Cementi al calce CERTOCCEM 32,5 R, CERTOCCEM 42,5 R e NOVICEM 52,5 R (https://www.epditaly.it/epd/cementi-al-calce-certoccem-325-r-certoccem-425-r-e-novicem-525-r/)	CEMENTERIA COSTANTINO POLI S.r.l.	S.S. 93 km 76, 85022 Barile (PZ)	Questa EPD di prodotto medio si riferisce ai cementi al calce (CERTOCCEM 32,5 R, CERTOCCEM 42,5 R e NOVICEM 52,5 R) prodotti da CEMENTERIA COSTANTINOPOLI S.r.l. presso lo stabilimento sito in Barile (PZ) - Italia.
Cementi dello stabilimento Colacem di Caravate (https://www.epditaly.it/epd/cementi-dello-stabilimento-colacem-di-caravate/)	Colacem S.p.A. - Via della Vittorina, 60 06024 Gubbio (PG) - Italia	Via 1° maggio, 13 - 21032 - Caravate (VA) - Italia	Questa EPD si riferisce ai cementi (CEM I 52,5 R, CEM II/A-LL 42,5 R, CEM II/B-LL 32,5 R, CEM IV/A (V) 42,5 R – SR, CEM IV/B (V) 32,5 N – LH/SR) prodotti da Colacem S.p.A. presso lo stabilimento di Via 1° maggio, 13 - 21032 - Caravate (VA) - Italia
Cementi dello stabilimento Colacem di Galatina (https://www.epditaly.it/epd/cementi-cem-i-425r-ce-nf-cem-iv-av-425r-sr-cem-iv-bv-325r-lh-sr/)	Colacem S.p.A.	Via Corigliano d'Otranto - 73013 – Galatina (LE) - Italia	La presente EPD si riferisce ai Cementi CEM I 42,5R CE NF, CEM IV/A(V) 42,5R – SR, CEM IV/B(V) 32,5R - LH/SR prodotti da Colacem SpA nello stabilimento situato in Via Corigliano d'Otranto - 73013 – Galatina (LE) - Italia
Cementi dello stabilimento Colacem di Gubbio (https://www.epditaly.it/epd/cementi-cem-i-525r-cem-ii-a-ll-425r-cem-ii-b-ll-325r-cem-iv-ap-425r-cem-iv-bp-425n-sr/)	Colacem S.p.A.	Via Degli Artigiani, n. 69 - 06024 - Località Ghigiano - Gubbio (PG)	La presente EPD si riferisce ai Cementi CEM I 52,5R; CEM II/A-LL 42,5R; CEM II/B-LL 32,5R; CEM IV/A(P) 42,5R; CEM IV/A(P) 42,5N - SR prodotti da Colacem SpA nello stabilimento situato in Via Degli Artigiani, n. 69 - 06024 - Località Ghigiano - Gubbio (PG)
Cementi dello stabilimento Colacem di Rassina (https://www.epditaly.it/epd/cementi-cem-i-525r-cem-ii-a-ll-425r-cem-ii-a-ll-325r-cem-ii-b-ll-325r-cem-iv-ap-425n-sr-cem-iv-bp-325r-lh-sr/)	Colacem S.p.A.	Loc. Begliano - 52016 Castel Focognano - Rassina (AR) - Italia	La presente EPD si riferisce ai cementi CEM I 52,5R, CEM II/A-LL 42,5R, CEM II/A-LL 32,5R CEM II/B-LL 32,5R, CEM IV/A(P) 42,5N – SR, CEM IV/B(P) 32,5R – LH/SR, prodotti da Colacem S.p.A. nello stabilimento situato in Loc. Begliano - 52016 Castel Focognano - Rassina (AR) - Italia
Cementi dello stabilimento Colacem di Sesto Campano (https://www.epditaly.it/epd/cementi-dello-stabilimento-colacem-di-sesto-campano/)	Colacem S.p.A.	Località Carrera Del Conte - 86078 Sesto Campano (IS)	Questa EPD si riferisce ai cementi CEM I 52,5 R, CEM II/A-LL 42,5 R, CEM IV/B(P) 32,5 R-LH/SR, CEM IV/A(P) 42,5 N - SR, prodotti presso lo stabilimento Colacem S.p.A. in Località Carrera Del Conte - 86078 Sesto Campano (IS) - Italia.
Cementi dello stabilimento Ragusa Cementi di Ragusa (https://www.epditaly.it/epd/cementi-cem-i-525r-cem-ii-a-ll-425r-cem-ii-b-ll-325r-cem-iv-ap-425r-sr/)	Ragusa Cementi S.p.A.	Contrada Tabuna - 97100 - Ragusa (RG) – Italia	La presente EPD si riferisce ai Cementi CEM I 52,5R, CEM II/A-LL 42,5R, CEM II/B-LL 32,5R, CEM IV/A(P) 42,5R – SR prodotti da Ragusa Cementi S.p.A. nello stabilimento situato in Contrada Tabuna - 97100 - Ragusa (RG) – Italia

Prodotto	Azienda	Unità produttiva	Descrizione
Cementi al calcare CERTOCEM 32,5 R, CERTOCEM 42,5 R e NOVICEM 52,5 R (https://www.epditaly.it/epd/cementi-al-calcare-certocem-325-r-certocem-425-r-e-novicem-525-r/)	CEMENTERIA COSTANTINO POLI S.r.l.	S.S. 93 km 76, 85022 Barile (PZ)	Questa EPD di prodotto medio si riferisce ai cementi al calcare (CERTOCEM 32,5 R, CERTOCEM 42,5 R e NOVICEM 52,5 R) prodotti da CEMENTERIA COSTANTINOPOLI S.r.l. presso lo stabilimento sito in Barile (PZ) - Italia.
Cementi dello stabilimento Colacem di Caravate (https://www.epditaly.it/epd/cementi-dello-stabilimento-colacem-di-caravate/)	Colacem S.p.A. - Via della Vittorina, 60 06024 Gubbio (PG) - Italia	Via 1° maggio, 13 - 21032 - Caravate (VA) - Italia	Questa EPD si riferisce ai cementi (CEM I 52,5 R, CEM II/A-LL 42,5 R, CEM II/B-LL 32,5 R, CEM IV/A (V) 42,5 R – SR, CEM IV/B (V) 32,5 N – LH/SR) prodotti da Colacem S.p.A. presso lo stabilimento di Via 1° maggio, 13 - 21032 - Caravate (VA) - Italia
CEMENTI PORTLAND E POZZOLANICI (https://www.epditaly.it/epd/cementi-portland-e-pozzolanici/)	CEMENTIROSSI I S.p.A.	Via Caorsana, 14 - 29122 Piacenza, Italia	La presente EPD si riferisce ai cementi grigi Portland e Pozzolanici prodotti da Cementirossi S.p.a nel loro stabilimento situato via Caorsana, 14 - 29122 Piacenza, Italia
Cementi pozzolanici TENACEM 32,5 R e TENACEM 42,5 R (https://www.epditaly.it/epd/cementi-pozzolanici-tenacem-325-r-e-tenacem-425-r/)	CEMENTERIA COSTANTINO POLI S.r.l.	S.S. 93 km 76 - 85022 Barile (PZ)	Questa EPD di prodotto medio si riferisce ai cementi pozzolanici (TENACEM 32,5 R e TENACEM 42,5 R) prodotti da CEMENTERIA COSTANTINOPOLI S.r.l. presso lo stabilimento sito in Barile (PZ) - Italia.
Cemento (https://www.epditaly.it/epd/cemento/)	Buzzi Unicem S.p.A. - via Luigi Buzzi, 6 – 15033 Casale Monferrato (AL)	Arquata, Augusta, Barletta, Fanna, Guidonia, Monselice, Robilante, Settimello, Siniscola, Testi, Trino, Vernasca	Questa EPD si riferisce al cemento medio dei cementi prodotti in ciascuna delle unità produttive localizzate nelle seguenti città: Augusta, Barletta, Guidonia, Robilante, Settimello, Siniscola, Trino, Vernasca. L'EPD si riferisce anche al cemento medio delle unità produttive precedentemente indicate.
Cementi grigi medi italia (https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/69ef8220-1fab-487c-cf1e-08d9df0ea78f/Data)	A.I.T.E.C. - Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento	Anni 2017-2020 6 impianti a ciclo produttivo completo.	Obiettivo dello studio è valutare il carico ambientale della produzione di clinker e cementi grigi medi, predisponendo una EPD di settore a livello Italia. Il presente studio di settore è eseguito su un campione rappresentativo delle aziende associate ad AITEC.
Cemento grigio medio (https://www.epditaly.it/epd/cemento-grigio-medio/)	A.I.T.E.C. - Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento	Anno 2021 BUZZI UNICEM S.p.A. Strada S. Angelo Romano, 14 00012 Guidonia Montecelio (RM) COLACEM S.p.A. Loc. Carrera del Conte	La presente EPD si riferisce al CEMENTO GRIGIO MEDIO, prodotto da A.I.T.E.C. - Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento nello stabilimento situato in Via Giovanni Amendola, 46 – 00185 Roma Italia

Prodotto	Azienda	Unità produttiva	Descrizione
Cementi al calcare CERTOCEM 32,5 R, CERTOCEM 42,5 R e NOVICEM 52,5 R (https://www.epditaly.it/epd/cementi-al-calcare-certocem-325-r-certocem-425-r-e-novicem-525-r/)	CEMENTERIA COSTANTINO POLI S.r.l.	S.S. 93 km 76, 85022 Barile (PZ)	Questa EPD di prodotto medio si riferisce ai cementi al calcare (CERTOCEM 32,5 R, CERTOCEM 42,5 R e NOVICEM 52,5 R) prodotti da CEMENTERIA COSTANTINOPOLI s.r.l. presso lo stabilimento sito in Barile (PZ) - Italia.
Cementi dello stabilimento Colacem di Caravate (https://www.epditaly.it/epd/cementi-dello-stabilimento-colacem-di-caravate/)	Colacem S.p.A. - Via della Vittorina, 60 06024 Gubbio (PG) - Italia	Via 1° maggio, 13 - 21032 - Caravate (VA) - Italia	Questa EPD si riferisce ai cementi (CEM I 52,5 R, CEM II/A-LL 42,5 R, CEM II/B-LL 32,5 R, CEM IV/A (V) 42,5 R – SR, CEM IV/B (V) 32,5 N – LH/SR) prodotti da Colacem S.p.A. presso lo stabilimento di Via 1° maggio, 13 - 21032 - Caravate (VA) - Italia
		86078 Sesto Campano (IS) HOLCIM ITALIA S.p.A. Via A. Bongiasca, 1364 21020 Comabbio (VA) INDUSTRIA CEMENTI G.ROSSI S.p.A. Via Caorsana, 14 29122 Piacenza (PC) ITALCEMENTI S.p.A. Via Vittorio Emanuele II, 419 24033 Calusco d'Adda (BG) ITALSACCI S.p.A. Via Roma, 67012 Cagnano Amiterno (AQ)	

Oltre all'EPD un'altra certificazione di interesse è rappresentata dal sistema di certificazione CSC sviluppato dal Concrete Sustainability Council (<https://csc.eco/>) per il calcestruzzo. Tale schema considera infatti nella valutazione del punteggio finale anche il contributo proveniente dai crediti della “chain of custody”, i quali valutano la sostenibilità delle due principali catene di fornitura dei materiali componenti il calcestruzzo: il cemento e gli aggregati.

Le informazioni relative al cemento, in particolare sul tasso di sostituzione delle materie prime potrebbero essere utili per il raggiungimento dei target di materiale riciclato presente nel calcestruzzo come previsto dai CAM Edilizia (D.M. 23 giugno 2022).

Lo schema del CSC è di tipo multicriteriale e prevede il rispetto obbligatorio di 5 prerequisiti (il cui soddisfacimento non fornisce alcun punteggio) e di oltre 26 crediti (il cui soddisfacimento contribuisce al punteggio). I crediti sono suddivisi in 5 aree tematiche: management, environmental, social, economic, chain of custody. A sua volta ciascun credito risulta suddiviso in uno o più sottocriteri, per un totale di più di novanta criteri di valutazione. Ogni credito pesa in modo differente sul punteggio finale della valutazione, in base al quale viene ad essere stabilita la classe

di rating finale attribuita (bronze, silver, gold, platinum). Lo schema ha ottenuto il riconoscimento di rating system internazionali quali BREEAM del BRE e del DGNB per la valutazione della sostenibilità degli edifici, oltre che di ENVISION, il rating system del Institute for Sustainable Infrastructure (ISI) per la valutazione della sostenibilità delle infrastrutture.

Si riporta in Tabella 7 l'elenco delle certificazioni CSC per i cementi italiani.

Tabella 7: certificazioni CSC per i cementi italiani (Fonte: <https://toolbox.csc.eco/>)

Prodotto	Azienda	Livello
Cement	Italcementi SpA - Matera - Cement — Matera, Italy	Bronze
Cement	Italcementi SpA - Rezzato (BS) - Cement — Rezzato (BS), Italy	Bronze
Cement	Buzzi Unicem spa - Trino - Cement — Trino (VC), Italy	Bronze
Cement	Buzzi Unicem spa - Vernasca - Cement — Vernasca (PC), Italy	Bronze
Cement	Italcementi SpA – Calusco d'Adda (BG) - Cement — Calusco d'Adda (BG), Italy	Bronze

4 Gruppo di lavoro

Nella tabella sottostante è riportato il gruppo di lavoro che ha contribuito allo studio di filiera.

Nome	Ente/impresa	Tipologia	Sito web	Contatti
Antonella Luciano (referente studio di filiera)	ENEA (SSPT-USER-RISE)	Centro di ricerca	www.enea.it	antonella.luciano@enea.it
Paola Sposato	ENEA (SSPT-SEC)	Centro di ricerca	www.enea.it	paola.sposato@enea.it
Sara Corrado	ENEA (SSPT-USER-RISE)*	Centro di ricerca	www.enea.it	sara.corrado@enea.it
Paola Altamura	ENEA (SSPT-USER-RISE)**	Centro di ricerca	www.enea.it	paola.altamura@enea.it
Caterina Rinaldi (coordinatrice progetto Arcadia)	ENEA (SSPT-USER-RISE)	Centro di ricerca	www.enea.it	caterina.rinaldi@enea.it
Alessandra Zamagni, Nicola Ferrara (revisori)	Ecoinnovazione S.r.l	Società	www.ecoinnovazione.it	a.zamagni@ecoinnovazione.it ; n.ferrara@ecoinnovazione.it

* fino al 31/12/2021

** fino al 21/12/2021

Si ringraziano AITEC e FEDERBETON per aver fornito dati primari sulla produzione di cemento medio nazionale.

5 Ambito di applicazione dello studio

5.1 Funzione del sistema, unità funzionale e flusso di riferimento

Il progetto Arcadia si prefigge di costruire dei dataset contenenti dati riferiti al contesto italiano, per le filiere più significative a livello nazionale. Fra queste, la filiera di produzione del cemento è stata individuata come una di quelle di maggiore interesse per il progetto.

Lo studio LCA è stato sviluppato in conformità alle norme ISO 14040-14044 (UNI, 2018; UNI, 2021), modellando il ciclo di vita dei prodotti in modo “attribuzionale”, ovvero riproducendo la catena di fornitura esistente e utilizzando processi di background rappresentativi del mix di consumo del mercato medio (JRC, 2010).

L'unità funzionale (UF) dello studio è **la produzione di 1 t di “cemento medio” prodotto in Italia.**

Per cemento medio si intende il mix delle principali tipologie di cementi prodotti in Italia secondo la UNI EN 197-1 e tenuto conto dei volumi di produzione nazionale come segue: cemento Portland

(CEM I) e il Portland di miscela (CEM II) con l'86% di quota della produzione totale, cementi pozzolanici (12%) e il cemento d'alto forno (2%.) - dati medi forniti dall'Associazione Italiana Tecnica Economica del Cemento (AITEC) relativi agli anni 2019 e 2020.

Il flusso di riferimento dello studio è 1 t di cemento medio in uscita dallo stabilimento produttivo.

Cosa	Produzione di cemento
Quanto	1 t
Quale livello di qualità	Media pesata della produzione in massa delle tipologie di cemento, definite dalla norma UNI EN 197-1
Per quanto tempo	Non applicabile

5.2 Descrizione del processo produttivo e confini del sistema

Il confine del sistema è definito con un approccio “dalla culla al cancello”. Include quindi le fasi di estrazione delle materie prime e di produzione dei prodotti utilizzati per la produzione di cemento, il loro trasporto, la produzione di energia elettrica, l'estrazione di acqua, e la produzione di cemento. Le fasi del ciclo di vita successive all'uscita del cemento dallo stabilimento produttivo sono state escluse in quanto il cemento può essere destinato a vari utilizzi con caratteristiche molto diverse tra di loro.

Il diagramma del confine del sistema è riportato in Figura 6. Tutti i processi della fase di produzione clinker e cemento, inclusi i trasporti e le emissioni in atmosfera sono di foreground, modellati attraverso dati primari, mentre le materie prime in input sono processi di background, modellati con dati secondari.

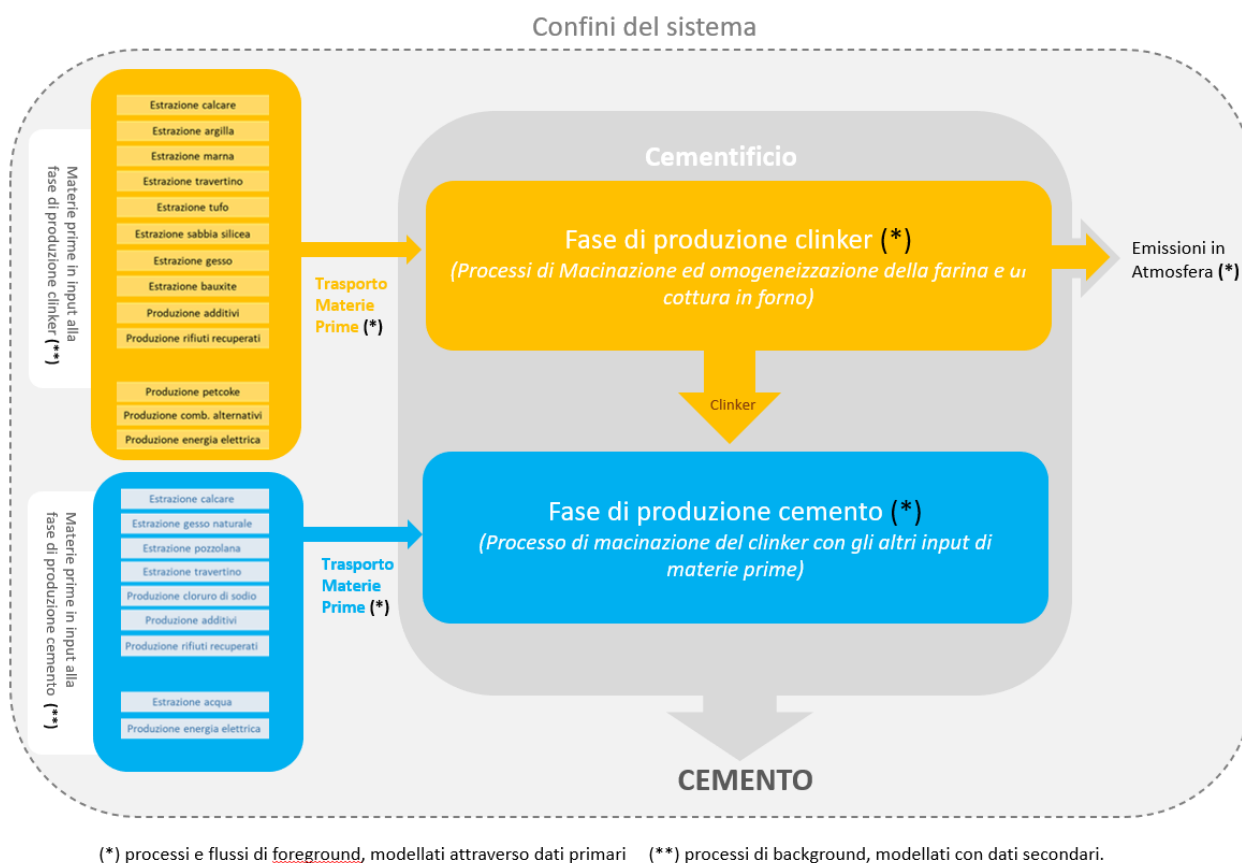


Figura 6: Diagramma del confine del sistema.

5.3 Assunzioni e giudizi di valore

Di seguito si riportano le principali assunzioni dello studio:

- la tipologia e i quantitativi di materiali in ingresso alla produzione di cemento e clinker, le relative distanze di trasporto, i consumi di combustibili e di energia elettrica, i dati sulle emissioni di processo in atmosfera di anidride carbonica (CO₂), rame (Cu), acido cloridrico (HCl), acido cianidrico (HCN), e l'acido fluoridrico (HF) relativi alla produzione di clinker si riferiscono ai dati medi forniti dall'Associazione Italiana Tecno Economica del Cemento (AITEC) relativi agli anni 2019 e 2020. Tali dati sono stati raccolti e utilizzati dalla stessa associazione per l'elaborazione dell'EPD dei cementi grigi italiani. Le EPD elaborate sono state pubblicate sul sito di Environdec³.
- Per le emissioni sono stati considerati i fattori di emissione medi nazionali per l'anno 2019 (ISPRA, 2019) relativi alla produzione di cemento e pubblicati da ISPRA per il calcolo degli inventari nazionali delle emissioni. Tali fattori di emissione si riferiscono alle sole emissioni da combustione e non considerano pertanto quelle di processo (rame (Cu), acido cloridrico (HCl), acido cianidrico (HCN), e acido fluoridrico (HF)) che sono state prese dai dati forniti da

³ <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/69ef8220-1fab-487c-cf1e-08d9df0ea78f/Data>

AITEC come riportato al punto precedente. I fattori di emissione di ISPRA sono riferiti ad un kg di cemento e sono stati ricalcolati per kg di clinker considerando un contenuto di clinker nel cemento pari al 76,3% (AITEC, media dati 2019-2020).

- Per la realizzazione dello studio è stato necessario fare alcune assunzioni in particolare sull'estrazione di pozzolana e tufo per i quali non è disponibile un dataset secondario nel database Ecoinvent, sul consumo di carbone e petcoke per il quale si dispone del dato aggregato e sulla modellazione della produzione di CSS (Rigamonti et al. (2012). Tali assunzioni sono riportate nel dettaglio al par. 7.1
- Lo studio non include tutti i trasporti del prodotto finito alla sua destinazione finale di uso. Sono, invece incluse le operazioni di trasporto relative alla fase di pre-produzione. Questa scelta è legata alle finalità di utilizzo della banca dati di Arcadia da parte di possibili utenti, che potranno associare ai dataset trasporti e/o utilizzi specifici del cemento. In particolare per i trasporti è stato utilizzato il dataset di Ecoinvent *Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RER}| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 | Cut-off, U*

5.4 Gestione della multifunzionalità

Entrambe le produzioni di cemento e clinker non comportano la produzione di co-prodotti, per cui non è stato necessario gestire alcuna multifunzionalità per la modellazione del sistema di foreground.

L'impatto della produzione di sottoprodotti e rifiuti in ingresso al processo produttivo di cemento e clinker (Tabella 8) sono stati modellati con un approccio "cut-off", allocando cioè la produzione del rifiuto al prodotto che l'ha generato e alla produzione di clinker e cemento solo il trasporto dal luogo di produzione del rifiuto al cementificio.

Tabella 8: Rifiuti e scarti in ingresso alla produzione di cemento e per cui è stato applicato un cut-off

Prodotto	Scarto/Rifiuto utilizzato come input
Clinker e cemento	Travertino
Cemento	Rifiuti recuperati (ceneri leggere, fanghi, gesso da desolforazione, gesso rosso, terre esauste, allumina)
Clinker	Terre e rocce da scavo argillose
Clinker	Rifiuti recuperati (refrattari, scaglie laminazione, fanghi, ceneri, terre esauste, calcare di recupero, cemento di recupero, allumina)

Coerentemente, i processi di background sono stati modellati usando datasets ecoinvent di tipo cut-off. Maggiori dettagli sono riportati sul sito di ecoinvent⁴.

⁴ <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/system-models/> Consultato a Gennaio 2023

5.5 Revisione critica

La metodologia per gli studi di filiera del progetto Arcadia prevede una revisione critica degli studi LCA di filiera e dei rispettivi dataset, effettuata da revisori interni afferenti ad ENEA oppure da revisori esterni. La verifica dello studio LCA (dati raccolti, calcolati e stimati, modello LCA) assicura la conformità alle norme ISO 14040-44, mentre la validazione delle informazioni contenute nello studio valuta se i dati e le informazioni utilizzate nello studio sono consistenti, affidabili e tracciabili, e se i calcoli sono stati eseguiti correttamente.

Lo studio LCA di filiera è stato sottoposto a revisione critica esterna (da parte di Ecoinnovazione S.r.l), secondo la metodologia di revisione prevista dal progetto Arcadia. Il revisore ha stabilito che lo studio LCA risulta conforme alla metodologia ISO 14040-44 e alla “Metodologia per gli studi di filiera della Banca Dati italiana LCA”. Inoltre, i dataset sviluppati e i relativi metadati sono da ritenere corretti e coerenti con lo studio LCA.

5.6 Modellizzazione e metodologia di analisi degli impatti

La valutazione degli impatti si basa sull'utilizzo del metodo di caratterizzazione EF 3.0 come da indicazioni della Commissione Europea per la realizzazione di studi basati sul metodo Product Environmental Footprint (PEF) (Zampori e Pant, 2019). La valutazione degli impatti include le fasi di classificazione, caratterizzazione, normalizzazione, e pesatura.

Lo studio è stato svolto utilizzando il software Simapro v 9.2.

5.7 Informazioni ambientali aggiuntive

Nessuna

6 Modellazione dei dataset della filiera

I dataset sviluppati nell'ambito del presente studio sono i seguenti:

1. **Cement, at production, IT** (vedi Allegato I: Dataset della filiera di produzione del Cemento)
2. **Clinker, at production, IT** (vedi Allegato II: Dataset della filiera di produzione del Clinker)

Il modello scelto per la creazione dei dataset per la banca dati di Arcadia è di tipo “attribuzionale”, ovvero un modello che riproduce la catena di fornitura del prodotto oggetto di analisi utilizzando dati ed eventuali processi di background rappresentativi di una situazione media del mercato di riferimento. Il dataset sviluppato per lo studio di filiera è relativo alla produzione di cemento medio italiano. Il dataset è relativo alla sola fase di produzione e non include tutti i trasporti del prodotto finito alla sua destinazione finale di uso. Sono, invece, in linea generale incluse le operazioni di trasporto relative alla fase di produzione. Questa scelta è legata alle finalità di utilizzo della banca dati di Arcadia da parte di possibili utenti, che potranno associare ai dataset trasporti e/o utilizzi specifici del cemento.

7 Analisi di inventario

La raccolta dei dati è stata impostata con l'obiettivo di ottenere un inventario che sia il più possibile rappresentativo della produzione media di cemento a livello nazionale. Sono stati quindi utilizzati dati medi nazionali forniti dall'Associazione Italiana Tecno Economica del Cemento (AITEC) e da ISPRA.

In particolare, le fonti dei dati di inventario per il presente studio includono:

- Dati medi forniti da AITEC relativi agli anni 2019 e 2020, rappresentativi rispettivamente del 16.4% e del 17% della produzione nazionale. Tali dati sono quelli raccolti ed utilizzati dalla stessa associazione per l'elaborazione dell'EPD dei cementi grigi italiani.
- Questa fonte è stata considerata per la tipologia e i quantitativi di materiali in ingresso alla produzione di cemento e clinker, le relative distanze di trasporto, e i consumi di combustibili e di energia elettrica. Inoltre, sono stati utilizzati i dati sulle emissioni in atmosfera di anidride carbonica (CO₂), rame (Cu), acido cloridrico (HCl), acido cianidrico (HCN), e l'acido fluoridrico (HF) relativi alla produzione di clinker, per i motivi descritti al punto successivo.
- Fattori di emissione medi nazionali per l'anno 2019 (ISPRA, 2019) relativi alla produzione di cemento. I fattori di emissione sono pubblicati da ISPRA per il calcolo degli inventari nazionali delle emissioni. Essendo rappresentativi della realtà media nazionale sono stati preferiti alle emissioni comunicate da AITEC, che hanno una rappresentatività più limitata. Questa fonte è stata considerata per le emissioni in atmosfera dovute alla produzione di clinker, fatta alle sole emissioni della combustione e non considerando quelle di processo, rame (Cu), acido cloridrico (HCl), acido cianidrico (HCN), e acido fluoridrico (HF), in quanto ISPRA non riporta fattori di emissione per queste sostanze. Per questi dati, come indicato al punto precedente, sono stati utilizzati la media dei dati 2019-2020 forniti da AITEC. I fattori di emissione di ISPRA includono le emissioni aggregate di NMVOC, incluse nell'inventario. Questo ha comportato l'esclusione delle emissioni di benzene riportate da AITEC, in quanto gli NMVOC includono il benzene. I fattori di emissione di ISPRA sono riferiti ad un kg di cemento e sono stati ricalcolati per kg di clinker considerando un contenuto di clinker nel cemento pari al 76,3% (AITEC, media dati 2019-2020). I dati di emissione scelti sono stati elaborati e confrontati anche con altri dati di letteratura, e dall'analisi la variazione tra le fonti non è significativa, pertanto si è ritenuto corretto combinarle e inserire anche le emissioni AITEC non considerate da ISPRA.
- Dati ambientali Buzzi Unicem per i consumi idrici per la produzione di cemento. Il consumo di acqua nel ciclo tecnologico del cemento è principalmente dovuto al condizionamento dei gas derivanti dai forni, all'abbattimento della temperatura durante la macinazione cemento, al raffreddamento degli organi motore e alla riduzione della polverosità diffusa negli impianti. Gli impianti Buzzi Unicem sul territorio nazionale rappresentano circa il 30 % del totale degli impianti consorziati AITEC ai quali fanno riferimento gli altri dati ambientali. Tale dato quindi si può considerare rappresentativo del contesto nazionale.

- Lo studio di Rigamonti et al. (2012) è stato considerato per la modellazione della produzione di combustibile solido secondario (CSS).

7.1 Assunzioni utilizzate nello studio

Per la realizzazione dello studio è stato necessario fare alcune assunzioni:

- Per l'estrazione di pozzolana non è disponibile un dataset secondario nel database ecoinvent, per cui l'estrazione di sabbia (Sand {CH}| gravel and quarry operation | Cut-off, U) è stata utilizzata come proxy. La scelta del dataset proxy si è basata sulle modalità di estrazione della pozzolana. La pozzolana, infatti, similmente alla sabbia, è estratta per mezzo di escavatori (comunicazione personale di un cavatore di pozzolana).
- Per l'estrazione del tufo non è disponibile un dataset secondario nel database ecoinvent, per cui l'estrazione di calcare (Limestone, crushed, for mill {CH}| production | Cut-off, U) è stata utilizzata come proxy. La scelta del dataset proxy è basata sulla similarità dei processi estrattivi da cui è possibile ipotizzare che gli impatti siano simili.
- AITEC ha fornito il consumo aggregato di carbone e petcoke. In mancanza di dati sul consumo disaggregato si è assunto che metà del consumo aggregato corrisponda a carbone e l'altra metà a petcoke.
- La produzione di combustibile solido secondario è stata modellata sulla base dei dati riportati da uno studio condotto da Rigamonti et al. (2012).

7.2 Descrizione e documentazione processi unitari

Nelle tabelle seguenti (Tabella 9, Tabella 10, Tabella 11,

Tabella 12, Tabella 13, Tabella 14, Tabella 15) è riportata una breve descrizione di tutti i processi/flussi coinvolti nel ciclo di vita dei prodotti oggetto di studio e tutti i dati relativi ai processi unitari⁵ utilizzati nello studio di filiera, con una chiara identificazione della banca dati (e relativi dataset) di riferimento. Per maggiore fruibilità si suddividono gli input come segue:

- input materici (materie prime)
- input energetici e combustibili
- dettaglio sulla modellazione del CSS
- output

⁵ Un processo unitario è l'elemento più piccolo preso in considerazione nell'inventario del ciclo di vita per il quale sono quantificati i dati di input e output (basato su ISO 14040: 2006).

Tabella 9: Processi utilizzati per la modellazione degli input di materie prime al processo di produzione di clinker e relative distanze di trasporto. I valori sono riferiti a 1 t di clinker. Fonte dati di attività: media dati 2019 – 2020 comunicati da AITEC

Flussi/processi in input per la produzione di clinker	Valore	Unità di misura	Distanza a trasporto (km)*	Dataset di riferimento	Banca dati
Calcare	901,4	kg	10	Limestone, crushed, for mill {CH} production Cut-off, U	Ecoinvent 3.7.1
Argilla	219,4	kg	50	Clay {CH} clay pit operation Cut-off, U	Ecoinvent 3.7.1
Travertino	201,7	kg	20	n.a. Essendo uno scarto di lavorazione, si considera solo l'impatto del trasporto	
Tufo	60,9	kg	40	Limestone, crushed, for mill {CH} production Cut-off, U	Ecoinvent 3.7.1
Marna	137,6	kg	20	Calcareous marl {CH} production Cut-off, U	Ecoinvent 3.7.1
Gesso naturale	13,8	kg	50	Gypsum, mineral {CH} gypsum quarry operation Cut-off, U_E MIX ITALY	Ecoinvent 3.7.1
Sabbia silicea	13,0	kg	50	Sand {CH} gravel and quarry operation Cut-off, U	Ecoinvent 3.7.1
Bauxite	1,0	kg	10	Bauxite {GLO} bauxite mine operation Cut-off, U	Ecoinvent 3.7.1
Terre e rocce da scavo argillose	16,1	kg	80	n.a.	
Urea, ossidi di ferro, soluzione ammoniacale, matrix, sabbia rigenerata, silicato di ferro, minerali di ferro, allumina	30,9	kg	40	n.a Essendo scarti/rifiuti si considera solo l'impatto del trasporto	
Refrattari, scaglie laminazione, fanghi, ceneri, terre esauste, calcare di recupero, cemento di recupero, allumina	13,5	kg	10	n.a Essendo scarti/rifiuti si considera solo l'impatto del trasporto	

Tabella 10: Processi utilizzati per la modellazione di combustibili, consumi energetici, e trasporto nel processo di produzione di clinker. I valori sono riferiti a 1 t di clinker. Fonte dati di attività: media dati 2019 – 2020 comunicati da AITEC

Flussi in input per la produzione di clinker	Valore	Unità di misura	Dataset di riferimento
Carbone	23,5	kg	Hard coal {Europe, without Russia and Turkey} market for hard coal Cut-off, U
Petcoke	23,5	kg	Petroleum coke {GLO} market for Cut-off, U
Combustibile solido secondario (CSS)	45	kg	Dettagli dataset in Tabella 12
Energia elettrica	78	kWh	Electricity, medium voltage {IT} market for Cut-off, U
Trasporto materiali in input	^	kg*km	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RER} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cut-off, U

Tabella 11: Elenco dei flussi in uscita al processo di produzione di clinker. Valori riferiti alla produzione di 1 t di clinker. Fonte dati di attività: ISPRA, 2019; per anidride carbonica, rame, acido cloridrico, acido cianidrico, e acido fluoridrico, media dati 2019 – 2020 comunicati da AITEC

Flussi in output per la produzione di clinker	Comparto	Valore	U.M.	Flusso di riferimento
Ossidi di zolfo (SOx)	Aria	1,19E-01	kg	Sulfur oxides
Ossidi di azoto (NOx)	Aria	1,04E+00	kg	Nitrogen oxides
Composti organici volatili non metanici (NMVOC)	Aria	3,01E-02	kg	NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin
Metano (CH ₄)	Aria	3,01E-02	kg	Methane
Monossido di carbonio (CO)	Aria	1,04E+00	kg	Carbon monoxide
Anidride carbonica (CO ₂)	Aria	8,10E+02	kg	Carbon dioxide, fossil
Protossido di azoto (N ₂ O)	Aria	6,94E-02	kg	Dinitrogen monoxide
Ammoniaca (NH ₃)	Aria	4,62E-02	kg	Ammonia
Particolato PM ₁₀	Aria	6,90E-03	kg	Particulates, < 10 µm
Particolato PM _{2.5}	Aria	3,83E-03	kg	Particulates, < 2.5 µm
Acido cloridrico (HCl)	Aria	5,67E-03	kg	Hydrogen chloride
Acido fluoridrico (HF)	Aria	2,64E-04	kg	Hydrogen fluoride
Acido cianidrico (HCN)	Aria	6,64E-04	kg	Hydrogen cyanide
Arsenico (As)	Aria	1,57E-05	kg	Arsenic
Cadmio (Cd)	Aria	1,05E-05	kg	Cadmium
Cromo (Cr)	Aria	2,62E-05	kg	Chromium
Rame (Cu)	Aria	1.48E-05	kg	Copper
Piombo (Pb)	Aria	7,86E-06	kg	Lead
Nichel (Ni)	Aria	1,45E-04	kg	Nickel
Zinco (Zn)	Aria	3,84E-04	kg	Zinc
Mercurio (Hg)	Aria	3,93E-05	kg	Mercury
Selenio (Se)	Aria	2,62E-06	kg	Selenium

Tabella 12: Processi utilizzati per la modellazione di 537 Kg di CSS. Dati presi da Rigamonti, L., Grosso, M., & Biganzoli, L. (2012). *Environmental Assessment of Refuse Derived Fuel Co-Combustion in a Coal Fired Power Plant. Journal of Industrial Ecology*, 16(5), 748-760.

Flussi in input per la produzione di CSS	Valore	Unità di misura	Dataset di riferimento
Energia elettrica	103	kWh	Electricity, medium voltage {IT} market for Cut-off, U
Gas	2	M3	Natural gas, high pressure {IT} market for Cut-off, U
Trasporto	127*50	Kg/km	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RER} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cut-off, U

Tabella 13: Elenco dei flussi in uscita al processo di produzione di CSS (537 Kg di CSS). Dati presi da Rigamonti, L., Grosso, M., & Biganzoli, L. (2012). *Environmental Assessment of Refuse Derived Fuel Co-Combustion in a Coal Fired Power Plant. Journal of Industrial Ecology*, 16(5), 748-760.

Flussi in output per la produzione di clinker	Valore	U.M.	Flusso di riferimento
Anidride carbonica (CO ₂)	143	kg	Carbon dioxide, fossil
Monossido di carbonio (CO)	10	g	Carbon monoxide
Ossidi di azoto (NO _x)	71,6	g	Nitrogen dioxide
Ossidi di zolfo (SO _x)	0,15	g	Sulfur dioxide
Composti organici volatili non metanici (NMVOC)	7,68	g	NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin
Ammoniaca	7,99	g	Ammonia
Protossido di azoto (N ₂ O)	17,3	g	Dinitrogen monoxide
Acido cloridrico (HCl)	2	g	Hydrogen chloride
Acido fluoridrico (HF)	200	mg	Hydrogen fluoride
Cadmio (Cd)	5	mg	Cadmium
Mercurio (Hg)	15	mg	Mercury
Ferro (Fe)	125	mg	Lead
Manganese (Mn)	5	mg	Manganese
Nickel (Ni)	11	mg	Nickel
Rame (Cu)	5	mg	Copper
Zinco (Zn)	75	mg	Zinc
Diossine (TEQ)	5,53	ng	Dioxins (TEQ)
Mercaptani	0,09	g	Mercaptans, unspecified
Particolato PM ₁₀	1,23	g	Particulates, < 10 um

Tabella 14: Processi utilizzati per la modellazione degli input al processo di produzione di cemento e relative distanze di trasporto. I valori sono riferiti a 1 t di cemento. Fonte dati di attività: media dati 2019 – 2020 comunicati da AITEC

Flussi/processi per la produzione di cemento	Valore	Unità di misura	Distanza trasporto (km)	Dataset di riferimento
Calcare	112,1	kg	10	Limestone, crushed, for mill {CH} production Cut-off, U
Gesso naturale	26,1	kg	50	Gypsum, mineral {CH} gypsum quarry operation Cut-off, U_E MIX ITALY
Pozzolana	34,6	kg	30	Sand {CH} gravel and quarry operation Cut-off, U
Marna	1,12	Kg	30	Calcareous marl {CH} production Cut-off, U
Travertino	25,5	kg	40	n.a. Essendo uno scarto di lavorazione, si considera solo l'impatto del trasporto
Cloruro di sodio	0,0	kg	80	Sodium chloride, powder {GLO} market for Cut-off, U
Clinker	763,3	kg	0	vedi Tabella 9
Solfato ferroso, additivi, solfato di calcio, polveri CKD+BPD, flue dust, argilla espansa, loppa, fluorgesso, legante intermedio	16,4	kg	250	Iron sulfate {RER} market for iron sulfate Cut-off, U
ceneri leggere, fanghi, gesso da desolforazione, gesso rosso, refrattari, allumina	25,6	kg	40	n.a. Essendo rifiuti, si considera solo l'impatto del trasporto

Tabella 15: Processi utilizzati per i consumi energetici e trasporto nel processo di produzione di cemento. I valori sono riferiti a 1 t di cemento. Fonte dati di attività: media dati 2019 – 2020 comunicati da AITEC

Flussi in input per la produzione di cemento	Valore	Unità di misura	Dataset di riferimento
Energia elettrica	40	KWh	Electricity, medium voltage {IT} market for Cut-off, U
Trasporto materiali in input	^	kg*km	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RER} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cut-off, U

7.3 Sviluppo dei datasets

A seguito del presente studio sono stati sviluppati i seguenti dataset

- dataset Clinker
- dataset cemento medio

Tali dataset sono basati su dati solidi caratterizzati da una rappresentatività molto buona, sia primari che secondari.

8 Valutazione degli impatti ambientali

Secondo le indicazioni della Norma ISO 14040, la fase di valutazione degli impatti ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni ambientali che si generano a seguito dei rilasci nell'ambiente e del consumo di risorse provocati sistema di prodotto in esame. Tale fase consiste quindi nell'imputare i consumi e le emissioni a specifiche categorie di impatto, riferibili ad effetti ambientali conosciuti, e nel quantificare l'entità del contributo che il processo arreca agli effetti considerati. La valutazione degli impatti in accordo alla ISO 14040 si articola nelle seguenti fasi obbligatorie:

- Classificazione: assegnazione dei dati raccolti nell'inventario ad una o più categorie d'impatto ambientale selezionate;
- Caratterizzazione: calcolo dei risultati di ogni indicatore di categoria, è determinato il contributo relativo di ogni sostanza emessa o risorsa usata;
- Valutazione vera e propria dell'impatto. Come fasi opzionali della valutazione degli impatti di ciclo di vita, sono invece indicate dalla ISO 14040 le operazioni di normalizzazione, raggruppamento e ponderazione (pesatura).

Ai fini del presente studio LCA di filiera è stato utilizzato il metodo di valutazione degli impatti EF 3.0 (Zampori e Pant, 2019) e i risultati delle fasi appena descritte sono riportate nei paragrafi successivi.

8.1 Caratterizzazione

In Tabella 16 sono indicati i risultati di caratterizzazione risultanti dalla produzione di 1 t di cemento medio italiano con i relativi contributi delle fasi di produzione del clinker e di produzione del cemento.

Tabella 16: Caratterizzazione

Impact category	Unit	Cemento medio		Totale Cemento medio
		Fase di Produzione Clinker	Fase di Produzione Cemento	
Climate change	kg CO2 eq	6,98E+02	2,29E+01	7,21E+02
Ozone depletion	kg CFC11 eq	1,70E-05	3,11E-06	2,01E-05
Ionising radiation	kBq U-235 eq	7,54E+00	3,34E+00	1,09E+01
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	1,07E+00	6,67E-02	1,14E+00
Particulate matter	disease inc.	6,28E-06	6,62E-07	6,95E-06
Human toxicity, non-cancer	CTUh	4,62E-06	1,88E-07	4,81E-06
Human toxicity, cancer	CTUh	6,26E-08	1,02E-08	7,27E-08
Acidification	mol H+ eq	1,17E+00	1,13E-01	1,28E+00
Eutrophication, freshwater	kg P eq	3,14E-02	6,65E-03	3,81E-02
Eutrophication, marine	kg N eq	3,94E-01	2,20E-02	4,16E-01
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	4,79E+00	2,49E-01	5,03E+00
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	3,35E+03	5,98E+02	3,95E+03
Land use	Pt	3,21E+02	9,17E+01	4,12E+02
Water use	m3 depriv.	1,64E+01	2,15E+01	3,80E+01
Resource use, fossils	MJ	1,72E+03	3,47E+02	2,07E+03
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	1,92E-04	2,68E-04	4,60E-04
Climate change - Fossil	kg CO2 eq	6,97E+02	2,26E+01	7,20E+02
Climate change - Biogenic	kg CO2 eq	3,87E-01	2,39E-01	6,25E-01
Climate change - Land use and LU change	kg CO2 eq	1,43E-02	7,90E-03	2,22E-02
Human toxicity, non-cancer - organics	CTUh	3,30E-08	1,25E-08	4,55E-08
Human toxicity, non-cancer - inorganics	CTUh	1,13E-07	3,36E-08	1,47E-07
Human toxicity, non-cancer - metals	CTUh	4,48E-06	1,44E-07	4,63E-06
Human toxicity, cancer - organics	CTUh	7,10E-09	2,72E-09	9,82E-09
Human toxicity, cancer - inorganics	CTUh	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Human toxicity, cancer - metals	CTUh	5,55E-08	7,44E-09	6,29E-08
Ecotoxicity, freshwater - organics	CTUe	5,43E+01	3,84E+00	5,81E+01
Ecotoxicity, freshwater - inorganics	CTUe	1,95E+02	2,81E+01	2,23E+02
Ecotoxicity, freshwater - metals	CTUe	3,10E+03	5,66E+02	3,67E+03

8.2 Normalizzazione

I valori della normalizzazione sono riportati per le sole categorie d'impatto considerate dal metodo EF 3. In Tabella 17 sono indicati i risultati di normalizzazione risultanti dalla produzione di 1 t di cemento medio italiano, i relativi contributi delle fasi di produzione clinker e produzione cemento ed il contributo percentuale di ogni singola categoria d'impatto sul totale degli impatti. I risultati sono ordinati secondo l'ordine d'importanza dei contributi delle categorie d'impatto. In rosso si evidenziano le categorie più rilevanti. La tabella include anche i contributi percentuali del totale delle due fasi di produzione sul totale degli impatti.

Tabella 17: Risultati di normalizzazione per le categorie d'impatto considerate dal metodo EF3

Impact category	Fase di Produzione Clinker	Fase di Produzione Cemento	Totale Cemento medio	Contributo % del cemento medio sul totale degli impatti per ogni categoria
Ecotoxicity, freshwater	7,86E-02	1,40E-02	9,26E-02	23,81%
Climate change	8,62E-02	2,82E-03	8,90E-02	22,89%
Resource use, fossils	2,65E-02	5,33E-03	3,18E-02	8,18%
Eutrophication, terrestrial	2,71E-02	1,41E-03	2,85E-02	7,32%
Photochemical ozone formation	2,64E-02	1,64E-03	2,81E-02	7,22%
Eutrophication, freshwater	1,96E-02	4,14E-03	2,37E-02	6,10%
Acidification	2,10E-02	2,03E-03	2,30E-02	5,92%
Eutrophication, marine	2,02E-02	1,13E-03	2,13E-02	5,47%
Human toxicity, non-cancer	2,01E-02	8,19E-04	2,09E-02	5,38%
Particulate matter	1,06E-02	1,11E-03	1,17E-02	3,00%
Resource use, minerals and metals	3,02E-03	4,21E-03	7,23E-03	1,86%
Human toxicity, cancer	3,70E-03	6,01E-04	4,30E-03	1,11%
Water use	1,43E-03	1,88E-03	3,31E-03	0,85%
Ionising radiation	1,79E-03	7,91E-04	2,58E-03	0,66%
Land use	3,91E-04	1,12E-04	5,03E-04	0,13%
Ozone depletion	3,16E-04	5,80E-05	3,75E-04	0,10%
Totale impatti	3,47E-01	4,21E-02	3,89E-01	100,00%
Contributo percentuale di ogni fase sul totale impatti	89,18%	10,82%	100%	

8.3 Pesatura

I valori della pesatura sono riportati per le sole categorie d'impatto considerate dal metodo EF 3. In Tabella 18 sono indicati i risultati di pesatura risultanti dalla produzione di 1t di cemento medio italiano con i relativi contributi delle fasi di produzione clinker e produzione cemento. In rosso sono sottolineate le categorie d'impatto più rilevanti.

Tabella 18: Risultati di pesatura per le categorie d'impatto considerate dal metodo EF3

Impact category	Unit	Fase di Produzione Clinker	Fase di Produzione Cemento	Totale Cemento medio	Contributo % del cemento medio sul totale degli impatti per ogni categoria
Climate change	mPt	1,82E+01	5,95E-01	1,87E+01	60,8%
Resource use, fossils	mPt	2,20E+00	4,44E-01	2,65E+00	8,6%
Ecotoxicity, freshwater	mPt	1,51E+00	2,69E-01	1,78E+00	5,8%
Acidification	mPt	1,30E+00	1,26E-01	1,43E+00	4,6%
Photochemical ozone formation	mPt	1,26E+00	7,85E-02	1,34E+00	4,4%
Eutrophication, terrestrial	mPt	1,00E+00	5,22E-02	1,06E+00	3,4%
Particulate matter	mPt	9,46E-01	9,97E-02	1,05E+00	3,4%
Eutrophication, marine	mPt	5,48E-01	1,16E-01	6,64E-01	2,2%
Eutrophication, freshwater	mPt	5,97E-01	3,33E-02	6,30E-01	2,0%
Human toxicity, non-cancer	mPt	2,28E-01	3,18E-01	5,46E-01	1,8%
Water use	mPt	3,70E-01	1,51E-02	3,85E-01	1,2%
Ionising radiation	mPt	1,22E-01	1,60E-01	2,82E-01	0,9%
Human toxicity, cancer	mPt	8,95E-02	3,96E-02	1,29E-01	0,4%
Ozone depletion	mPt	7,89E-02	1,28E-02	9,17E-02	0,3%
Land use	mPt	3,11E-02	8,89E-03	3,99E-02	0,1%
Resource use, minerals and metals	mPt	2,00E-02	3,66E-03	2,36E-02	0,1%
Totale impatti	mPt	2,85E+01	2,37E+00	3,08E+01	100,0%
Contributo percentuale di ogni fase sul totale impatti		92,31%	7,69%	100%	

8.4 Analisi di sensitività

Come indicato al paragrafo 7.1, Federbeton ha fornito il consumo aggregato di carbone e petcoke. In mancanza di dati sul consumo disaggregato si è assunto come **scenario base (A)** dello studio di filiera che metà del consumo aggregato corrisponda a carbone e l'altra metà a petcoke. L'analisi di sensitività è stata pertanto condotta su uno scenario alternativo con l'obiettivo di valutare quanto tale assunzione influenzi i risultati finali. In particolare, il consumo di petcoke ed hardcoal (carbone) determinano il 16,6% degli impatti sul totale dello studio (vedi Tabella 25) con la seguente ripartizione: petcoke (5,7%) ed hardcoal (10,9%). Guardando ai risultati nelle categorie d'impatto rilevanti, il petcoke determina impatti lievemente maggiori o equiparabili in tutte le categorie ad eccezione della categoria *Resource use, fossil* in cui il petcoke performa sensibilmente meglio.

Si è pertanto identificato lo scenario alternativo "**Scenario B**" con il processo del petcoke **al 30% e dell'hardcoal al 70%**. A fronte di tale variazione si è assunto che il potere calorifico del CSS così composto resti invariato rispetto alla composizione dello scenario A, ovvero che non è necessario adattare la quantità dell'input aggregato. Non si è ritenuto utile inoltre comparare lo scenario opposto (aumentando l'hardcoal e diminuendo il petcoke) poiché, come evidenziato sopra, andrebbe ad aumentare la quantità del processo complessivamente più impattante (scenario peggiorativo). Di seguito la tabella con i due scenari identificati.

Tabella 19: modellazione degli scenari

Scenario	Dataset	Percentuale
Scenario base (A)	Petroleum coke {GLO} market for Cut-off, U	50%
	Hard coal {Europe, without Russia and Turkey} market for hard coal Cut-off, U	50%
Scenario (B)	Petroleum coke {GLO} market for Cut-off, U	70%
	Hard coal {Europe, without Russia and Turkey} market for hard coal Cut-off, U	30%

Come emerge dai risultati in Tabella 20, lo scenario B presenta miglioramenti sul totale degli impatti dell'ordine di grandezza del 2,1%. In particolare, considerando le categorie rilevanti, si nota come lo scenario B presenti un lieve peggioramento solo nella categoria "Resource use, fossil" come prevedibile dati i risultati dello studio.

Tabella 20: Risultati di normalizzazione (per le categorie d'impatto considerate dal metodo EF3) relativi al confronto tra Scenario base A e Scenario B

Impact category	Scenario Base (A)	Scenario (B)	Variazione percentuale da comparazione (B-A)/A
Ecotoxicity, freshwater	9,26E-02	8,82E-02	-4,78%
Climate change	8,90E-02	8,90E-02	0,01%
Resource use, fossils	3,18E-02	3,28E-02	3,18%
Photochemical ozone formation	2,85E-02	2,81E-02	-1,45%
Eutrophication, terrestrial	2,81E-02	2,83E-02	0,81%
Acidification	2,37E-02	2,32E-02	-1,91%
Eutrophication, freshwater	2,30E-02	1,80E-02	-21,87%
Eutrophication, marine	2,13E-02	2,11E-02	-0,94%
Human toxicity, non-cancer	2,09E-02	2,07E-02	-0,75%
Particulate matter	1,17E-02	1,18E-02	0,91%
Resource use, minerals and metals	7,23E-03	7,21E-03	-0,33%
Water use	3,31E-03	3,30E-03	-0,35%
Human toxicity, cancer	4,30E-03	4,26E-03	-0,95%
Ionising radiation	2,58E-03	2,82E-03	9,31%
Land use	5,03E-04	5,10E-04	1,36%
Ozone depletion	3,75E-04	4,51E-04	20,32%
Totale impatti	3,89E-01	3,80E-01	-2,33%

8.5 Categorie di impatto rilevanti

L'analisi dei risultati derivanti dalla normalizzazione (Tabella 17) mostra come le categorie di impatto più rilevanti per la produzione del cemento siano:

8. Ecotoxicity, freshwater con il **23,8%**
9. Climate change con il **22,9%**
10. Resource use, fossils con l'**8,2%**
11. Eutrophication, freshwater con il **7,3%**
12. Photochemical ozone formation con il **7,2%**
13. Acidification con il **6,1%**
14. Eutrophication, terrestrial con il **5,9%**

Il totale degli impatti generati da tali categorie d'impatto rappresenta l'**81,4% degli impatti totali** della produzione del cemento medio italiano.

Se si considerano i risultati della pesatura, che per il metodo utilizzato pone maggiore enfasi alla categoria d'impatto del *climate change*, vediamo (come prevedibile) una diversa distribuzione, in particolare:

1. Climate change con il 60,8%
2. Resource use, fossils con il 8,6%
3. Ecotoxicity, freshwater con il 5,8%
4. Acidification con il 4,6%
5. Photochemical ozone formation con il 4,4%

Il totale degli impatti generati da tali categorie d'impatto rappresenta l'**84,2% degli impatti totali** della produzione del cemento medio italiano.

8.6 Fasi del ciclo di vita e processi rilevanti

Come si evince dalle tabelle 21 e 22 seguenti, la fase di manifattura è la maggiore responsabile degli impatti ambientali contribuendo con l'**80,4%** rispetto al 19,4% della pre-manifattura.

Tabella 21: Contributo percentuale delle fasi del ciclo di vita della pre-manifattura suddivisa per processi della produzione clinker e produzione cemento e con dettaglio sulle categorie d'impatto più rilevanti

	PRE-MANIFATTURA														
-	PREMANIFATTURA CEMENTO							PREMANIFATTURA Clinker							
Impact category	Limestone, crushed, for mill {CH} production Cut-off, U	Gypsum, mineral {CH} gypsum quarry operation	Sand {CH} gravel and quarry operation Cut-off, U	Calcareous marl {CH} production Cut-off, U	Sodium chloride, powder {GLO} market for Cut-off, U	Iron sulfate {RER} market for iron sulfate Cut-off, U	trasporti materie prime (aggregati)	Limestone, crushed, for mill {CH} * production Cut-off, U	Clay {CH} clay pit operation Cut-off, U	Calcareous marl {CH} production Cut-off, U	Limestone, crushed, for mill {CH} ** production Cut-off, U	Sand {CH} gravel and quarry operation Cut-off, U	Gypsum, mineral {CH} gypsum quarry operation	bauxite {GLO} bauxite mine operation Cut-off, U	Trasporti materie prime (processi aggregati)
Ecotoxicity, freshwater	1,50 %	0,30 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,60 %	0,10 %	9,21%	0,24 %	1,11 %	0,62 %	0,00 %	0,14 %	0,03 %	0,34 %
Climate change	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,10 %	0,10 %	0,05%	0,04 %	0,02 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,15 %
Resource use, fossils	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,20 %	0,10 %	0,08%	0,06 %	0,04 %	0,01 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,28 %
Eutrophicatio n, terrestrial	0,04 %	0,01 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,05 %	0,05 %	0,26%	0,06 %	0,05 %	0,02 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,15 %
Photochemic al ozone formation	0,04 %	0,01 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,06 %	0,06 %	0,24%	0,06 %	0,05 %	0,02 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,18 %
Eutrophicatio n, freshwater	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,41 %	0,02 %	0,02%	0,07 %	0,02 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,05 %
Acidification	0,03 %	0,01 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,08 %	0,04 %	0,17%	0,05 %	0,03 %	0,01 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,12 %
Totale contributo (solo categorie rilevanti)	1,63 %	0,38 %	0,03 %	0,01 %	0,01 %	1,48 %	0,43 %	10,03 %	0,58 %	1,32 %	0,68 %	0,01 %	0,15 %	0,03 %	1,27 %
Totale contributo (tutte le categorie)	1,71 %	0,40 %	0,10 %	0,00 %	0,00 %	2,70 %	0,60 %	10,50 %	1,20 %	1,50 %	0,70 %	0,00 %	0,20 %	0,00 %	1,80 %
Totale contributo su intero studio	5,52%							15,90%							
TOT	21,4%														

Tabella 22: Contributo percentuale delle fasi del ciclo di vita della manifattura suddivisa per processi della produzione clinker e produzione cemento e con dettaglio sulle categorie d'impatto più rilevanti.

	MANIFATTURA									
	MANIFATTURA Cemento			MANIFATTURA Clinker						
Impact category	Electricity, medium voltage {IT} market for Cut-off, U	Water, unspecified natural origin, IT	Cement factory {CH} construction Cut-off, U	Petroleum coke {GLO} market for Cut-off, U	Hard coal {Europe, without Russia and Turkey} market for	Electricity, medium voltage {IT} market for Cut-off, U	CSS-Combustibile solido secondario	Emissioni	Cement factory {CH} construction Cut-off, U	Industrial machine, heavy, unspecified {RER} market for
Ecotoxicity, freshwater (23,5% degli impatti)	1,00%	0,00%	0,00%	1,97%	4,79%	1,51%	0,18%	0,05%	0,00%	0,00%
Climate change	0,60%	0,00%	0,00%	0,22%	0,22%	0,85%	0,40%	20,20%	0,00%	0,00%
Resource use, fossils	1,10%	0,00%	0,00%	2,61%	1,96%	1,57%	0,20%	0,00%	0,00%	0,00%
Eutrophication, terrestrial	0,20%	0,00%	0,00%	0,17%	0,27%	0,30%	0,08%	5,61%	0,00%	0,00%
Photochemical ozone formation	0,24%	0,00%	0,00%	0,29%	0,29%	0,36%	0,08%	5,22%	0,00%	0,00%
Eutrophication, freshwater	0,63%	0,00%	0,00%	0,07%	3,75%	0,94%	0,11%	0,00%	0,00%	0,00%
Acidification	0,36%	0,00%	0,00%	0,38%	0,24%	0,54%	0,09%	3,76%	0,00%	0,00%
Totale contributo (solo categorie rilevanti) sul totale impatti	4,09%	0,00%	0,00%	5,70%	11,52%	6,08%	1,13%	34,84%	0,00%	0,00%
Totale contributo (tutte le categorie) sul totale impatti	5,00%	0,30%	0,00%	6,50%	12,30%	7,50%	1,50%	45,50%	0,00%	0,00%
Totale contributo su intero studio	5,30%			73,26%						
TOT	78,6%									

Andando in maggiore dettaglio si evince come, sia in manifattura che in pre-manifattura, i processi che contribuiscono maggiormente sono quelli relativi alla fase di produzione del clinker che contribuisce infatti sia sul totale degli impatti con l'**89,18%** (Figura 7), sia considerato il suo contributo nelle singole categorie d'impatto rilevanti (Figura 8).

Ciò è dovuto da due aspetti fondamentali:

- sebbene gli input di materie prime nelle due fasi di produzione siano molto simili in termini di numero e tipologie di materiali in input, il contributo in peso (massa) su 1 t di cemento è quasi tutto clinker (763 Kg);

- il clinker viene cotto nel forno (a differenza della fase di produzione di cemento che è una miscelazione di clinker ed altri input materici): questo determina la maggioranza degli impatti dovuti ai consumi energetici e alle emissioni in aria.

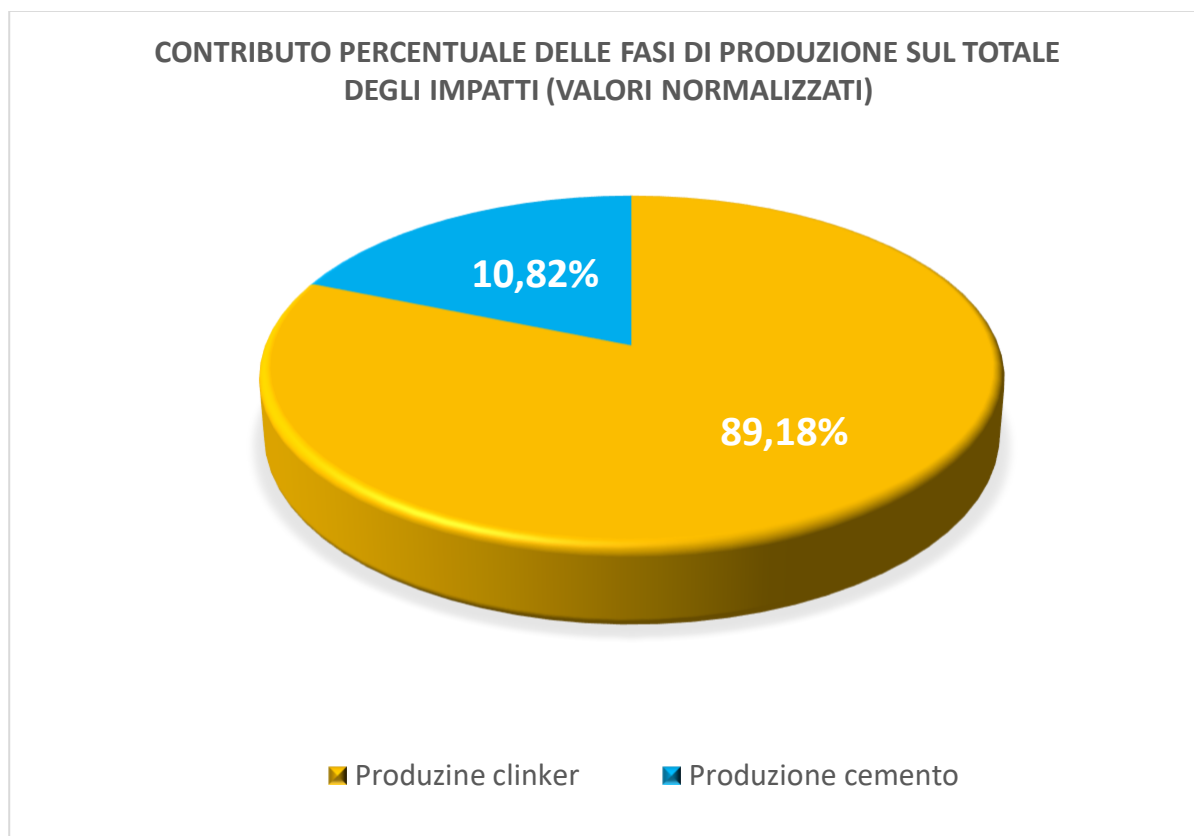


Figura 7 Contributo percentuale delle fasi di produzione sul totale degli impatti (valori normalizzati)

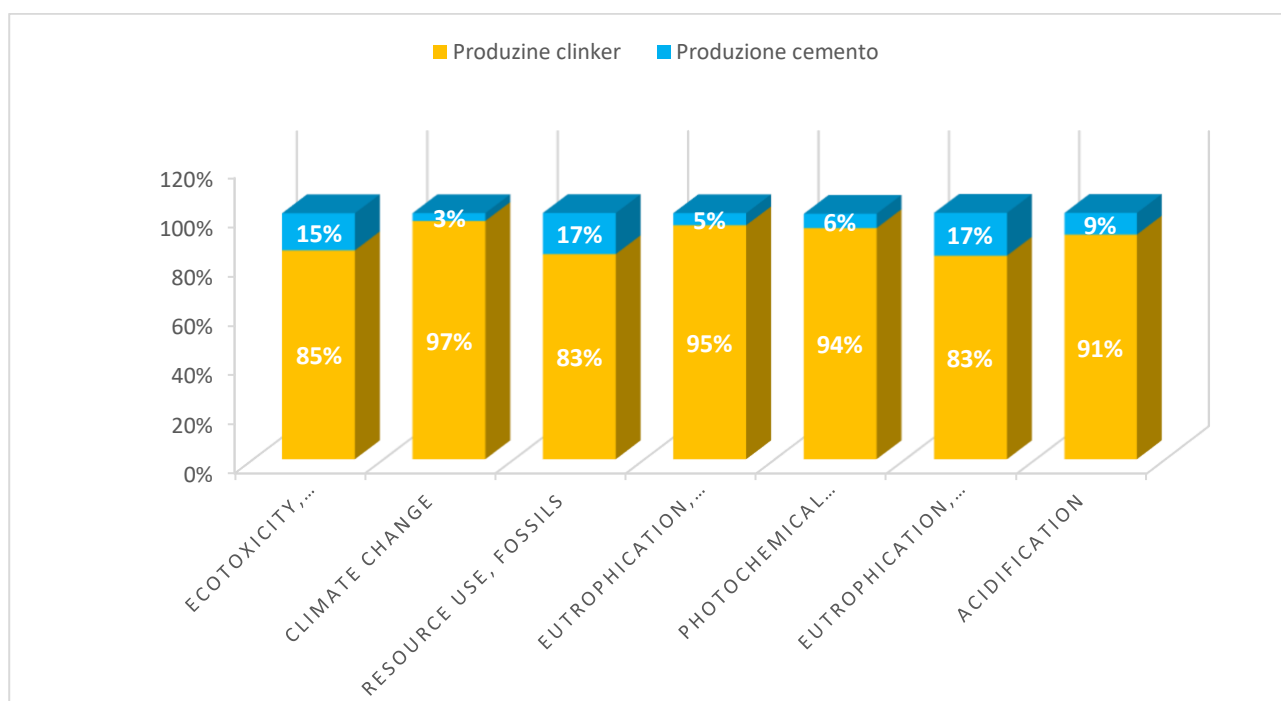


Figura 8 Contributo percentuale delle fasi del ciclo di vita sul totale di ogni singola categoria d'impatto (in ordine di rilevanza da sinistra a destra)

La Tabella 23 fornisce ulteriore dettaglio sul contributo delle fasi di produzione del clinker e del cemento sul totale degli impatti dello studio suddivisa per fase di produzione clinker e fase di produzione cemento.

Tabella 23: Contributo percentuale delle fasi del ciclo di vita delle categorie d'impatto rilevanti sul totale degli impatti dello studio

Impact category	Fase di Produzione Clinker	Fase di Produzione Cemento	Contributo % del cemento medio sul totale degli impatti per ogni categoria
Ecotoxicity, freshwater	20,2%	3,6%	23,81%
Climate change	22,2%	0,7%	22,89%
Resource use, fossils	6,8%	1,4%	8,18%
Eutrophication, terrestrial	7,0%	0,4%	7,32%
Photochemical ozone formation	6,8%	0,4%	7,22%
Eutrophication, freshwater	5,0%	1,1%	6,10%
Acidification	5,4%	0,5%	5,92%
Totale impatti	73,34%	8,07%	81,41%
Contributo percentuale di ogni fase sul totale impatti	89,18%	10,82%	

Per quanto concerne i processi, nelle tabelle sottostanti sono riportati i contributi percentuali dei processi delle fasi di produzione del cemento (Tabella 24) e del clinker (Tabella 25) sul totale degli impatti dello studio.

Come si vede dai risultati, sebbene l'89,18% degli impatti è rintracciabile nei processi della fase della produzione clinker, all'interno della fase di produzione cemento (10,82% degli impatti) il processo di produzione di elettricità (Electricity, medium voltage {IT}| market for | Cut-off, U) fornisce un contributo non secondario per un totale del 5% sul totale degli impatti.

Più in generale, considerata anche la fase di produzione di clinker, emerge che gli impatti più rilevanti sono dovuti a (in ordine di rilevanza sul totale degli impatti dello studio di filiera):

1. Le **emissioni** prodotte nella fase di produzione clinker e dovute al processo di cottura nel forno e alla calcinazione che contribuiscono per un totale del **45,5% sul totale degli impatti** (vedi dettaglio in par 8.7 sui flussi elementari)
2. Il consumo dei **combustibili fossili (petcoke e hardcoal)** forniti in modo aggregato da Federbeton e per cui è stato assunto che metà del consumo corrisponda a carbone e l'altra metà a petcoke. Il dato aggregato dei due flussi contribuisce per il **18,8% degli impatti totali** e rappresenta la quasi interezza degli impatti delle categorie *Resource use, fossils* ed *Eutrophication, freshwater* nonché il secondo contributo rilevante per la categoria maggiormente impattante *Ecotoxicity, freshwater* (con il 6,7%)
3. Il **consumo di elettricità** con un totale del 5% nella fase di produzione cemento ed un 6,6% nella fase di produzione clinker **per un totale del 11,6% degli impatti totali**

4. Il processo Limestone della fase di premanifattura associato al **calcare** contribuisce per il **12,21% degli impatti totali** con il contributo maggiore nella fase di produzione clinker (10,5%) ove vi è la maggior parte di presenza di tale input di materia in termini di massa. Tale processo rappresenta il principale impatto per le categorie di *Ecotoxicity*, *freshwater* (con l'9,2% iper la produzione clinker e 1,5% nella fase di produzione cemento) per un totale del 9.8% sul totale del 23,8%. Non si considerano qui i contributi dati dal processo di *Limestone* utilizzato come proxy per l'input di tufo.

Tabella 24: Contributi (percentuali) dei processi della fase di produzione cemento sul totale degli impatti per le categorie d'impatto rilevanti. La tabella evidenzia per le categorie d'impatto rilevanti i diversi contributi dei processi della produzione cemento suddivisi per pre-manifattura e manifattura. Nelle ultime due righe sono riportati i totali dei contributi per ogni processo sia considerate le sole categorie rilevanti sia considerato l'intero studio. Dalla tabella si evince come la produzione di elettricità costituisca un processo rilevante poiché rappresenta il 13,5% degli impatti dell'intero studio.

Impact category	Intero studio produzione cemento medio italiano	Produzione Cemento	PRODUZIONE CEMENTO									
			PREMANIFATTURA							MANIFATTURA		
			Limestone, crushed, for mill {CH} production Cut-off, U	Gypsum, mineral {CH} gypsum quarry operation Cut-off, U_E MIX ITALY	Sand {CH} gravel and quarry operation Cut-off, U	Calcareous marl {CH} production Cut-off, U	Sodium chloride, powder {GLO} market for Cut-off, U	Iron sulfate {RER} market for iron sulfate Cut-off, U	trasporti materie prime (aggregati)	Electricity, medium voltage {IT} market for Cut-off, U	Water, unspecified natural origin, IT	Cement factory {CH} construction
Ecotoxicity, freshwater	23,8%	3,6%	1,5%	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,6%	0,1%	1,0%	0,0%	0,0%
Climate change	22,9%	0,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	0,6%	0,0%	0,0%
Resource use, fossils	8,2%	1,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,1%	1,1%	0,0%	0,0%
Eutrophication, terrestrial	7,32%	0,36%	0,04%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,05%	0,05%	0,20%	0,00%	0,00%
Photochemical ozone formation	7,22%	0,42%	0,04%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,06%	0,06%	0,24%	0,00%	0,00%
Eutrophication, freshwater	6,10%	1,06%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,41%	0,02%	0,63%	0,00%	0,00%
Acidification	5,92%	0,52%	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,08%	0,04%	0,36%	0,00%	0,00%
Totale contributo (solo categorie rilevanti)	81,44%	8,07%	1,63%	0,38%	0,03%	0,01%	0,01%	1,48%	0,43%	4,09%	0,00%	0,00%
Totale contributo (tutte le categorie)	100%	10,82%	1,71%	0,4%	0,1%	0,0%	0,0%	2,7%	0,6%	5,0%	0,3%	0,0%
Totale contributo su intero studio			5,52%							5,30%		

Tabella 25: Contributi (percentuali) dei processi produzione clinker sul totale degli impatti per le categorie d'impatto rilevanti suddivisi per pre-manifattura e manifattura. Nel box in nero si evidenziano i due processi su cui è stata condotta una analisi di sensitività e per cui è stato assunto che metà del consumo aggregato (fornito da AITEC) corrisponda a carbone e l'altra metà a petcoke.

		PRODUZIONE CLINKER														
		PREMANIFATTURA								MANIFATTURA						
Impact category	Fase di produzione clinker	Limestone, crushed, for mill {CH} * production Cut-off, U	Clay {CH} clay pit operation Cut-off, U	Calcareous marl {CH} production Cut-off, U	Limestone, crushed, for mill {CH} ** production Cut-off, U	Sand {CH} gravel and quarry operation Cut-off, U	Gypsum, mineral {CH} gypsum quarry operation Cut-off, U	bauxite {GLO} bauxite mine operation Cut-off, U	Trasporti materie prime (processi aggregati)	Petroleum coke {GLO} market for Cut-off, U	Hard coal {Europe, without Russia and Turkey} market for Cut-off, U	Electricity, medium voltage {IT} market for Cut-off, U	CSS-Combustibile solido secondario	Emissioni	Cement factory {CH} construction Cut-off, U	Industrial machine, heavy, unspecified {RER} market for
Ecotoxicity, freshwater (23,5% degli impatti)	20,19%	9,21%	0,24%	1,11%	0,62%	0,00%	0,14%	0,03%	0,34%	1,97%	4,79%	1,51%	0,18%	0,05%	0,00%	0,00%
Climate change	22,15%	0,05%	0,04%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,15%	0,22%	0,22%	0,85%	0,40%	20,20%	0,00%	0,00%
Resource use, fossils	6,80%	0,08%	0,06%	0,04%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,28%	2,61%	1,96%	1,57%	0,20%	0,00%	0,00%	0,00%
Eutrophication, terrestrial	6,96%	0,26%	0,06%	0,05%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,15%	0,17%	0,27%	0,30%	0,08%	5,61%	0,00%	0,00%
Photochemical ozone formation	6,79%	0,24%	0,06%	0,05%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,18%	0,29%	0,29%	0,36%	0,08%	5,22%	0,00%	0,00%
Eutrophication, freshwater	5,03%	0,02%	0,07%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,05%	0,07%	3,75%	0,94%	0,11%	0,00%	0,00%	0,00%
Acidification	5,40%	0,17%	0,05%	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,12%	0,38%	0,24%	0,54%	0,09%	3,76%	0,00%	0,00%
Totale contributo (solo categorie rilevanti) sul totale impatti	73,34%	10,03%	0,58%	1,32%	0,68%	0,01%	0,15%	0,03%	1,27%	5,70%	11,52%	6,08%	1,13%	34,84%	0,00%	0,00%
Totale contributo (tutte le categorie) sul totale impatti	89,18%	10,5%	1,2%	1,5%	0,7%	0,0%	0,2%	0,0%	1,8%	6,5%	12,3%	7,5%	1,5%	45,5%	0,0%	0,0%
Totale contributo fase su intero studio		15,87%								73,26%						

* processo Limestone riferito all'input di calcare

** processo Limestone riferito all'input di tufo

A seguire nelle tre tabelle successive sono riportati i dettagli di tutti i processi coinvolti nello studio ed il loro contributo percentuale per le tre categorie più rilevanti: Ecotoxicity, freshwater (Tabella 26, Climate change (Tabella 27) e Resource use, fossil (

Tabella 28). In rosso i contributi maggiori.

Tabella 26: Contributi percentuali dei processi dello studio di filiera di produzione cemento medio italiano all'interno della categoria d'impatto Ecotoxicity, freshwater

Ecotoxicity, freshwater (tot impatti 23,8%)	
Processi dello studio di filiera (in arancione della fase produzione clinker ed in blu della fase produzione cemento)	Contributo (%)
Limestone, crushed, for mill {CH} production Cut-off, U	9,2%
Electricity, medium voltage {IT} market for Cut-off, U	1,5%
Limestone, crushed, for mill {CH} production Cut-off, U	1,5%
Calcareous marl {CH} production Cut-off, U	1,1%
Electricity, medium voltage {IT} market for Cut-off, U	1,0%
Limestone, crushed, for mill {CH} production Cut-off, U	0,6%
Iron sulfate {RER} market for iron sulfate Cut-off, U	0,6%
Gypsum, mineral {CH} gypsum quarry operation Cut-off, U_E MIX ITALY	0,3%
Trasporti aggregati	0,3%
Clay {CH} clay pit operation Cut-off, U	0,2%
CSS-Combustibile solido secondario	0,2%
Gypsum, mineral {CH} gypsum quarry operation Cut-off, U_E MIX ITALY	0,1%
Trasporti aggregati	0,1%
Emission	0,0%
bauxite {GLO} bauxite mine operation Cut-off, U	0,0%
Calcareous marl {CH} production Cut-off, U	0,0%
Sand {CH} gravel and quarry operation Cut-off, U	0,0%
Sodium chloride, powder {GLO} market for Cut-off, U	0,0%
Sand {CH} gravel and quarry operation Cut-off, U	0,0%
Cement factory {CH} construction Cut-off, U	0,0%
Cement factory {CH} construction Cut-off, U	0,0%
industrial machine, heavy, unspecified {RER} market for industrial machine, heavy, unspecified Cut-off, U	0,0%
Water	0,0%

* processo Limestone riferito all'input di calcare

** processo Limestone usato come proxy e riferito all'input di tufo

Tabella 27: Contributi percentuali dei processi dello studio di filiera di produzione cemento medio italiano all'interno della categoria d'impatto Climate change

Climate Change (tot impatti 22,9%)	
Processi dello studio di filiera (in arancione della fase produzione clinker ed in blu della fase produzione cemento)	Contributo (%)
Emission	20,2%
Electricity, medium voltage {IT} market for Cut-off, U	0,9%
Electricity, medium voltage {IT} market for Cut-off, U	0,6%
CSS-Combustibile solido secondario	0,4%
Hard coal {Europe, without Russia and Turkey} market for hard coal Cut-off, U	0,2%
Petroleum coke {GLO} market for Cut-off, U	0,2%
Trasporti aggregati	0,2%
Iron sulfate {RER} market for iron sulfate Cut-off, U	0,1%
Limestone, crushed, for mill {CH} production Cut-off, U	0,0%
Trasporti aggregati	0,0%
Clay {CH} clay pit operation Cut-off, U	0,0%
Calcareous marl {CH} production Cut-off, U	0,0%
Limestone, crushed, for mill {CH} production Cut-off, U	0,0%
Limestone, crushed, for mill {CH} production Cut-off, U	0,0%
Sand {CH} gravel and quarry operation Cut-off, U	0,0%
Gypsum, mineral {CH} gypsum quarry operation Cut-off, U_E MIX ITALY	0,0%
Gypsum, mineral {CH} gypsum quarry operation Cut-off, U_E MIX ITALY	0,0%
Sand {CH} gravel and quarry operation Cut-off, U	0,0%
Sodium chloride, powder {GLO} market for Cut-off, U	0,0%
bauxite {GLO} bauxite mine operation Cut-off, U	0,0%
Calcareous marl {CH} production Cut-off, U	0,0%
Cement factory {CH} construction Cut-off, U	0,0%
Cement factory {CH} construction Cut-off, U	0,0%
industrial machine, heavy, unspecified {RER} market for industrial machine, heavy, unspecified Cut-off, U	0,0%
Water	0,0%

Tabella 28: Contributi percentuali dei processi dello studio di filiera di produzione cemento medio italiano all'interno della categoria d'impatto Resource use, fossi

Resource use, fossils (tot impatti 8,2%)	
Processi dello studio di filiera (in arancione della fase produzione clinker ed in blu della fase produzione cemento)	Contributo (%)
Petroleum coke {GLO} market for Cut-off, U	2,6%
Hard coal {Europe, without Russia and Turkey} market for hard coal Cut-off, U	2,0%
Electricity, medium voltage {IT} market for Cut-off, U	1,6%
Electricity, medium voltage {IT} market for Cut-off, U	1,1%
CSS-Combustibile solido secondario	0,2%
Iron sulfate {RER} market for iron sulfate Cut-off, U	0,2%
Trasporti aggregati	0,1%
Limestone, crushed, for mill {CH} production Cut-off, U	0,1%
Trasporti aggregati	0,1%
Clay {CH} clay pit operation Cut-off, U	0,1%
Calcareous marl {CH} production Cut-off, U	0,0%
Limestone, crushed, for mill {CH} production Cut-off, U	0,0%
Limestone, crushed, for mill {CH} production Cut-off, U	0,0%
Sand {CH} gravel and quarry operation Cut-off, U	0,0%
Gypsum, mineral {CH} gypsum quarry operation Cut-off, U_E MIX ITALY	0,0%
Sand {CH} gravel and quarry operation Cut-off, U	0,0%
Gypsum, mineral {CH} gypsum quarry operation Cut-off, U_E MIX ITALY	0,0%
Sodium chloride, powder {GLO} market for Cut-off, U	0,0%
bauxite {GLO} bauxite mine operation Cut-off, U	0,0%
Calcareous marl {CH} production Cut-off, U	0,0%
Cement factory {CH} construction Cut-off, U	0,0%
Cement factory {CH} construction Cut-off, U	0,0%
industrial machine, heavy, unspecified {RER} market for industrial machine, heavy, unspecified Cut-off, U	0,0%
Water	0,0%
Emission	0,0%

8.7 Flussi elementari rilevanti

Come visto le **emissioni** prodotte nella fase di produzione clinker e dovute al processo di cottura nel forno rappresentano la problematica ambientale di maggior rilievo per l'intero studio.

In particolare, con un totale del **45,5% sul totale degli impatti** costituiscono la quasi totalità degli impatti per le categorie del **climate change (20,2% sul totale del 22,2%)**, **Eutrophication, terrestrial (5,6% sul totale del 7%)** e **Photochemical ozone formation (5,2% sul totale del 7%)** ed **Acidification**

(**3,7% sul totale del 5,4%**), vedi *Tabella 25*. Si rimanda alla *Tabella 11* per la modellazione delle emissioni. In particolare, nella categoria *Climate Change*, il flusso elementare più rilevante è la **CO₂ fossile**, che contribuisce per il **96% del totale degli impatti in tale categoria**.

Guardando infine alle altre categorie più rilevanti si ha che:

- le **emissioni in aria di alluminio** rappresentano circa l'**82,4%** del totale della categoria ***Ecotoxicity freshwater***. Esse sono principalmente associate alla produzione del calcare (37,8%) e al consumo del carbone (18,7%).
- l'estrazione di **petrolio, gas naturale**, e di carbone contribuiscono **rispettivamente per il 40,6%, 29,8% e 21,9%** al totale della categoria ***Resource Use, fossils***; essi sono principalmente imputabili ai processi per la produzione clinker.

9 Conclusioni

Nel presente report, a seguito di una descrizione della filiera del cemento italiano, delle sue caratteristiche peculiari, dei prodotti rappresentativi e delle principali tipologie di impatto (sia ambientale che socio-economico) che la contraddistinguono, sono presentati i risultati di uno specifico studio LCA applicato alla filiera stessa. Lo studio è stato svolto sulla base di dati di qualità buona, ovvero dati primari disponibili a livello di filiera forniti da Federbeton/AITEC e per parte delle emissioni da ISPRA, nonché dati di letteratura e/o di settore rappresentativi della filiera italiana.

I dati della modellazione sono stati forniti come medi rappresentativi nazionali delle principali tipologie di cemento prodotte in Italia sia in termini qualitativi che quantitativi. In particolare, il cemento Portland (CEM I) e il cemento Portland composito (CEM II) rappresentano le principali tipologie di cemento prodotte (86% di quota della produzione totale). A seguire i cementi pozzolanici (12%) e il cemento d'alto forno (2%). I dati forniti da Federbeton/Aitec sono quelli utilizzati dalla stessa associazione per lo sviluppo dell'EPD dei cementi grigi medi italiani.

Lo studio LCA di filiera è stato svolto adottando un approccio "cradle-to-gate", ovvero un approccio che considera tutti i processi fino al "cancello aziendale", escludendo la distribuzione del prodotto al cliente finale, e le successive fasi di uso e fine vita.

I risultati dello studio LCA, ottenuti tramite il metodo di valutazione degli impatti EF 3.0, che costituisce il metodo di valutazione dell'iniziativa della Commissione Europea sull'impronta ambientale e consente di ottenere un profilo di impatto completo a livello prodotto, indicano che le categorie di impatto più rilevanti per la produzione del cemento sono:

1. Ecotoxicity, freshwater con il **23,8%**
2. Climate change con il **22,9%**
3. Resource use, fossils con l'**8,2%**
4. Eutrophication, freshwater con il **7,3%**
5. Photochemical ozone formation con il **7,2%**
6. Acidification con il **6,1%**
7. Eutrophication, terrestrial con il **5,9%**

Il totale degli impatti generati da tali categorie d'impatto rappresenta l'**81,4% degli impatti totali** della produzione del cemento medio italiano.

Come evidenziato nei paragrafi precedenti, si evince come i maggiori impatti della produzione del cemento medio italiano siano imputabili ai processi di produzione del clinker (con l'**89,18%** sul totale degli impatti). Nella fase di produzione cemento (**10,82%** degli impatti) il processo di produzione di elettricità (Electricity, medium voltage {IT}| market for | Cut-off, U) fornisce contributi non secondari considerate le diverse categorie d'impatto e per un totale del 13,5% sul totale degli impatti.

Più in generale emerge che gli impatti più rilevanti sono dovuti a (in ordine di rilevanza sul totale degli impatti dello studio di filiera):

1. Le emissioni prodotte nella fase di produzione clinker e dovute al processo di cottura nel forno e alla calcinazione che contribuiscono per un totale del 45,5% sul totale degli impatti (vedi dettaglio in par 8.7 sui flussi elementari)
2. Il consumo dei combustibili fossili (petcoke e hardcoal) forniti in modo aggregato da AITEC e per cui è stato assunto che metà del consumo corrisponda a carbone e l'altra metà a petcoke. Il dato aggregato dei due flussi contribuisce per il 18,8% degli impatti totali e rappresenta la quasi interezza degli impatti delle categorie *Resource use, fossils* ed *Eutrophication, freshwater* nonché il secondo contributo rilevante per la categoria maggiormente impattante *Ecotoxicity, freshwater* (con il 6,7%)
3. Il consumo di elettricità con un totale del 5% nella fase di produzione cemento ed un 6,6% nella fase di produzione clinker per un totale del 11,6% degli impatti totali
4. Il processo Limestone della fase di premanifattura associato al calcare contribuisce per il 12,21% degli impatti totali con il contributo maggiore nella fase di produzione clinker (10,5%) ove vi è la maggior parte di presenza di tale input di materia in termini di massa. Tale processo rappresenta il principale impatto per le categorie di *Ecotoxicity, freshwater* (con l'9,2% per la produzione clinker e 1,5% nella fase di produzione cemento) per un totale del 9,8% sul totale del 23,8%. Non si considerano qui i contributi dati dal processo di *Limestone* utilizzato come proxy per l'input di tufo.

Massimizzare le performance del clinker, il componente prevalente nella composizione del cemento e il maggiore responsabile degli impatti, aumentando il tasso di sostituzione calorica dei combustibili fossili, è sicuramente un'azione da perseguire per la riduzione degli impatti così come previsto dalla strategia di decarbonizzazione del settore del cemento che prevede di raggiungere un tasso di sostituzione calorica dei combustibili fossili del 47% al 2030 e dell'80% al 2050.

10 Bibliografia

AITEC, Linee Guida Progettazione gestione recupero delle aree estrattive, 2012.
<https://www.aitecweb.com/Sostenibilit%C3%A0/Attivit%C3%A0-estrattiva>

D.M. 23 giugno 2022 Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l'affidamento dei lavori per interventi edilizi e per l'affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi. (22A04307) (GU Serie Generale n.183 del 06-08-2022)

FEDERBETON, 2020. Rapporto di filiera 2020
https://www.federbeton.it/Portals/0/pubdoc/pubblicazioni/Rapporti/Federbeton_Rapporto_di_Filiera_2020.pdf?ver=2021-11-10-150045-927

FEDERBETON, 2021a. Rapporto di filiera 2020.
https://www.federbeton.it/Portals/0/pubdoc/pubblicazioni/Rapporti/Federbeton_Rapporto_di_Filiera_2020.pdf?ver=2021-11-10-150045-927

FEDERBETON, 2021b. Rapporto di sostenibilità 2020.
https://www.federbeton.it/Portals/0/pubdoc/pubblicazioni/Rapporti/Rapporto_di_Sostenibilit%C3%A0_Federbeton_2020.pdf?ver=2021-10-29-151837-237

Huntzinger, D. N., & Eatmon, T. D. (2009). A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production*, 17(7): 668-675. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.007>

ISPRA, 2019. <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni/fattori-di-emissione-per-le-sorgenti-di-combustione-stazionarie-in-italia/view> (ultimo accesso: dicembre 2021).

ISPRA, 2020. Il sistema EU-ETS in Italia e nei principali paesi europei, Rapporti 327/2020

JRC, 2010 - International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010

JRC, 2018. Environmental Footprint reference package 3.0 (EF 3.0).
<https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml> Consultato a dicembre 2021

Kellenberger D., Althaus H.-J., Jungbluth N., Künniger T., Lehmann M. and Thalmann P. (2007) Life Cycle Inventories of Building Products. Final report ecoinvent Data v2.0 No. 7. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, Online-Version under: www.ecoinvent.org.

Luciano A, Reale P, Cutaia L, Carletti R e al. (2020). Resources Optimization and Sustainable Waste Management in Construction Chain in Italy: Toward a Resource Efficiency Plan. *Waste and Biomass Valorization*. 11, 5405–5417. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0533-1>

Luciano et al. 2017. Rapporto ENEA “Elementi per lo sviluppo di un piano per l’uso efficiente delle risorse nella filiera “edilizia e attività estrattiva”

Rigamonti, L., Grosso, M., & Biganzoli, L. (2012). Environmental Assessment of Refuse-Derived Fuel Co-Combustion in a Coal-Fired Power Plant. *Journal of Industrial Ecology*, 16(5), 748-760.

UNI EN 197-1. Cemento - Parte 1: Composizione, specifiche e criteri di conformità per cementi comuni. <https://store.uni.com/uni-en-197-1-2011>

UNI EN 15804:2021. Sostenibilità delle costruzioni - Dichiarazioni ambientali di prodotto - Regole quadro di sviluppo per categoria di prodotto. <https://store.uni.com/uni-en-15804-2021>

EN 16908:2017+A1:2022 Cement and building lime - Environmental product declarations - Product category rules complementary to EN 15804. <https://store.uni.com/en-16908-2017-a1-2022>

Vaccari M., Riganti V., Collivignarelli M.C., Zanaboni S (2009). Recupero e valorizzazione del residuo limo-argilloso da lavaggio di suoli contaminati da idrocarburi, Recycling demolizioni & riciclaggio, luglio 2009, edizioni PEI

Zampori, L. and Pant, R., Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, EUR 29682 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-00654-1. doi:10.2760/424613, JRC115959

Siti

<https://www.environdec.com/library/> Consultato a Febbraio 2022

<https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/system-models/> Consultato a Dicembre 2021

<https://www.buzziunicem.it/ambiente> Consultato a Dicembre 2021

<https://csc.eco/> consultato a Gennaio 2023

<https://toolbox.csc.eco/> consultato a Febbraio 2023

<https://www.epditaly.it/epd-digitalizzate/> consultato a settembre 2021

AGROALIMENTARE

EDILIZIA COSTRUZIONI

ENERGIA

LEGNO ARREDO

ISBN 978-88-8286-510-8



enea.it