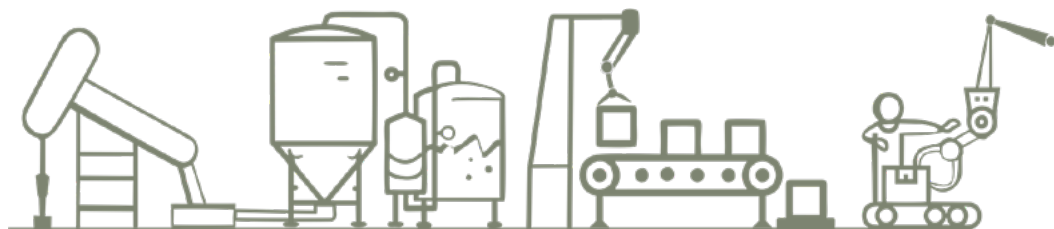


# CEMENTO



*Efficienza  
Energetica  
nei Settori  
Economici*



QUADERNI DELL'EFFICIENZA ENERGETICA

AGENZIA NAZIONALE  
EFFICIENZA ENERGETICA





**CEMENTO**



ENEA DUEE-SPS-ESE

QUADERNI DELL'EFFICIENZA ENERGETICA

# CEMENTO

Prima edizione Aprile 2021

ISBN Edizione digitale: 978-88-8286-411-8

## *Autori*

Alessandra De Santis, Chiara Martini, Fabrizio Martini,  
Marcello Salvio, Claudia Toro

## *Hanno collaborato*

Per ENEA: G. Bruni, C. Herce, L. Leto, F.A. Tocchetti

Per l'Università degli Studi di Firenze: Prof. F. De Carlo, A. Cantini, L. Leoni

*Si ringrazia per il prezioso supporto fornito*

Federbeton



Questa pubblicazione è stata realizzata nell'ambito della  
Ricerca di Sistema PTR 2019-2021, progetto 1.6 "Efficienza energetica  
dei prodotti e dei processi industriali", finanziato dal  
Ministero dello Sviluppo Economico

*Editing grafico Giorgio Scavino*

*Tipografia La Commerciale*

# CEMENTO

## Sommario

Premessa	6
Presentazione	8
Prefazione	10
1. Quadro normativo di riferimento	14
2. Obiettivo della pubblicazione	18
3. Il cemento in Italia	23
4. Metodologia di analisi	27
5. La diagnosi energetica	32
5.1 Redazione del rapporto di diagnosi energetica	32
5.2 La diagnosi energetica negli impianti di produzione del cemento	36
5.2.1 Il Ciclo di produzione del cemento	36
5.2.2 Rendicontazione dei consumi energetici	37
6. Risultanze delle diagnosi energetiche ripartizione consumi ed Indici di prestazione energetica generali (IPEg) e specifici (IPEs)	44
6.1 Distribuzione dei consumi nel processo del cemento grigio	44
6.2 Indice di prestazione energetica generali (IPEg) o IPE di primo livello	51
6.2.1 IPE Elettrico	51
6.2.2 IPE Termico	53
6.2.2.1 Consumo Termico in funzione del clinker effettivamente prodotto in sito	54
6.2.2.2 Consumo Termico in funzione del cemento virtualmente prodotto	55
6.2.3 IPE Totale	57
6.3 Indici di prestazione energetica specifici (IPEs)	59
6.3.1 IPEs Elettrici - Attività principali	59
6.3.1.1 Reparto Cava	60
6.3.1.2 Reparto Materie Prime	62
6.3.1.3 Reparto Crudo	64
6.3.1.4 Reparto Forno: fase di Trasporto	66
6.3.1.5 Reparto Forno: fase di Cottura	68
6.3.1.5.1 Consumo Elettrico della fase di Cottura delle materie prime in funzione del clinker effettivamente prodotto in sito	69
6.3.1.5.2 Consumo Elettrico della fase di Cottura delle materie prime in funzione del cemento virtualmente prodotto	70
6.3.1.6 Reparto Cotto: fase di macinazione del clinker	71
6.3.1.7 Reparto Cotto: fase di Trasporto cemento ai silos di deposito	73

6.3.1.8	Reparto Spedizione	74
6.3.2	IPEs Termici - Attività principali	74
6.3.2.1	Reparto Materie Prime: fase di Essiccazione delle materie prime	75
6.3.2.2	Reparto Forno: fase di cottura delle materie prime	76
6.3.3	Indici di prestazione energetica specifici (IPEs) - Servizi Ausiliari	79
6.3.3.1	Produzione di aria compressa	79
6.3.3.2	Pompaggio acqua di processo	81
6.3.3.3	Macinazione coke	81
6.3.4	Indici di prestazione energetica specifici (IPEs) - Servizi Generali	83
6.4	Il cemento bianco	83
<b>7.</b>	<b>Interventi di efficientamento energetico e soluzioni tecnologiche per il settore del cemento</b>	<b>87</b>
7.1	Preparazione delle materie prime	87
7.1.1	Frantumazione	88
7.1.2	Controllo qualità	89
7.1.3	Pre-omogeneizzazione	90
7.1.4	Essiccazione	90
7.1.5	Macinazione materie prime	91
7.1.6	Omogeneizzazione	93
7.2	Cottura e raffreddamento	94
7.2.1	Preriscaldamento	94
7.2.2	Cottura	96
7.2.3	Raffreddamento	97
7.3	Macinazione del cemento	99
7.4	Macinazione combustibile	101
7.5	Trattamento e depolverizzazione dei gas di scarico	101
7.6	Sistemi di trasporto	103
7.7	Recupero calore	104
7.8	Combustibili alternativi	105
7.9	Impianti ausiliari	109
<b>8.</b>	<b>Analisi degli interventi individuati ed effettuati nelle diagnosi energetiche</b>	<b>114</b>
8.1	Metodologia di analisi	114
8.2	Risultati complessivi e Divisione ATECO 23	117
8.3	Risultati per il settore cemento	123
	<b>APPENDICE - INDICE</b>	<b>129</b>
	Ateco 23: Fabbricazione di Altri Prodotti della Lavorazione di Minerali Non Metalliferi	130
	Ateco 23.51.00: Produzione di Cemento	136
<b>9.</b>	<b>Bibliografia</b>	<b>142</b>

## Premessa

Il presente lavoro è stato svolto all'interno dell'attività di ricerca finanziata con il *“Piano della Ricerca di sistema elettrico per il triennio 2019-2021”* e regolamentata attraverso l'Accordo di Programma<sup>2</sup> tra MiSE e RSE, ENEA e CNR.

L'attività individuata dall'accordo di programma, come previsto dall'articolo 15 della legge 241 del 1990, attraverso la cooperazione tra il Ministero dello sviluppo economico e gli Enti firmatari (ENEA, RSE e CNR) ha lo scopo di sviluppare nuove conoscenze e tecnologie in grado di contribuire alla transizione energetica del Paese e, allo stesso tempo, per gli Enti firmatari rappresenta un campo di indagine primario per lo svolgimento delle attività istituzionali di ricerca e sviluppo nel settore dell'energia.

L'attività è finanziata dal *“Fondo per il finanziamento delle attività di ricerca”* (art. 11 del decreto 26 gennaio 2000). Tale fondo è alimentato dal gettito, versato mensilmente a CSEA dai distributori elettrici, della componente tariffaria A5RIM della bolletta dei clienti finali, la cui entità è stabilita trimestralmente dall'Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente (ARERA).

L'attività oggetto di questa pubblicazione è parte integrante del **Work Package 4 del Progetto di ricerca 1.6. “Definizione di best practices e di indicatori di performance per interventi di efficienza energetica”** ha lo scopo di valorizzare la banca dati costituita dalle diagnosi energetiche pervenute ad ENEA ai sensi dell'articolo 8 del D.Lgs. 102/2014. Il progetto prevede la determinazione e la valutazione di indici di prestazione energetica di riferimento per il settore produttivo manifatturiero. Inoltre, per i principali settori manifatturieri, sono previste caratterizzazioni e analisi specifiche dei processi produttivi caratteristici del settore.

---

<sup>1</sup> <http://www.ricercadisistema.it>

<sup>2</sup> <https://www.mise.gov.it/index.php/it/energia/energia-elettrica/ricerca-di-sistema-elettrico-nazionale/17-energia/energia-elettrica/2041222-piano-della-ricerca-di-sistema-elettrico-per-il-triennio-2019-2021-accordo-di-programma-tra-mise-e-rse-enea-e-cnr>

Per la realizzazione del WP4 ENEA si è avvalsa della collaborazione di cinque Università:

- ✦ Alma Mater Studiorum - Università di Bologna (Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali);
- ✦ Università degli Studi di Roma Tor Vergata (Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa);
- ✦ Università degli Studi di Salerno (Dipartimento di Ingegneria Industriale);
- ✦ Università degli Studi della Tuscia (Centro Interuniversitario per l'innovazione Tecnologica e lo sviluppo del territorio);
- ✦ Università degli Studi di Firenze (Dipartimento di Ingegneria Industriale).

Il WP4 del Progetto di ricerca I.6. si colloca all'interno di un contesto più ampio individuato dal **Progetto di ricerca I.6** "*Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali*". L'obiettivo del progetto è la realizzazione di strumenti e metodologie per la promozione e diffusione delle tecnologie ad alta efficienza energetica, allo scopo di favorire il mercato di prodotti più performanti sia a livello di componenti sia a livello di sistemi energetici e contribuire alla riduzione della bolletta energetica nazionale aumentando la competitività del settore produttivo rispetto ai mercati internazionali. La finalità è quella di produrre un incremento dell'impatto di misure di efficientamento note alla comunità scientifica, ma in molti casi poco esplorate da un punto di vista ingegneristico, e che presentano notevoli barriere alla diffusione di tipo conoscitivo, gestionale ed economico.

## Presentazione

Con la direttiva 2012/27/UE l'Unione europea ha rimarcato il ruolo dell'efficienza energetica, in quanto capace di garantire un sistema energetico meno esposto ai rischi e alla volatilità che la crescita economica globale inevitabilmente determina e di contribuire alla riduzione di emissioni di CO<sub>2</sub> e inquinanti locali per una crescita sostenibile. La direttiva è stata recepita in Italia nel luglio 2014 con il Decreto Legislativo 102/2014 che, tra le altre cose, ha introdotto per una parte del sistema produttivo italiano (le grandi imprese e le imprese energivore) l'obbligo di effettuare una diagnosi energetica ogni quattro anni, a partire dal dicembre 2015. In tal modo il decreto recepisce l'indirizzo e lo spirito della Direttiva 2012/27/UE sull'Efficienza Energetica, che individua nella diagnosi energetica uno strumento efficace per la promozione dell'efficienza energetica nel mondo produttivo al fine di una corretta gestione dell'energia sia dal punto di vista tecnico sia economico.

In tale contesto il decreto assegna ad ENEA il ruolo di gestore del meccanismo delle diagnosi energetiche obbligatorie e di supporto al Ministero, nella verifica e controllo del corretto adempimento agli obblighi previsti per i soggetti obbligati.

Dall'entrata in vigore dell'obbligo di diagnosi energetica previsto dal D.Lgs.102, ENEA è stata il collettore, ad oggi, di circa 30.000 diagnosi energetiche tramite il proprio portale dedicato Audit 102. Una imponente raccolta di dati che ENEA ha ritenuto doveroso valorizzare con il fine di restituire agli stakeholder utili riferimenti in termini di: consumi specifici, best practice, opportunità di miglioramento, analisi di scenario etc..

Il piano della Ricerca di Sistema elettrico, programma di ricerca finanziato dal MiSE, si è quindi rivelato lo strumento più opportuno all'interno del quale collocare questa attività di analisi dei dati. In particolare nel triennio 2019-2021, ENEA si è posta come obiettivo quello di analizzare tutti i settori merceologici afferenti al settore industriale manifatturiero al fine di individuare degli indici di riferimento per i consumi energetici e le principali best practices. Inoltre, per alcuni di questi settori è stato svolto un approfondimento maggiore, andando ad individuare, laddove dove i dati lo hanno permesso, sia indici specifici di consumi con livelli di dettaglio crescente (entrando quindi nelle fasi del processo



produttivo) che i principali interventi di efficientamento energetico per ciascuna di queste fasi. Per portare avanti questa analisi di approfondimento ci si è anche avvalsi del supporto e della competenza di cinque Università Italiane quali: Università di Roma Tor Vergata, Università degli Studi della Toscana, Università degli studi di Salerno, Università degli studi di Firenze e Università di Bologna. Oltre ai partner Universitari, come consuetudine ENEA, non poteva mancare il coinvolgimento di esperti del settore come ad esempio le associazioni di categoria.

Questa attività ha quindi permesso la nascita di una collana di monografie settoriali che hanno il doppio fine di guidare da un lato l'auditor energetico nella realizzazione della diagnosi energetica e dall'altro fornire alle imprese degli spunti per individuare eventuali interventi di efficientamento energetico e per "confrontarsi" con il resto del settore industriale italiano.

Ritengo doveroso, quindi, ringraziare tutti gli attori coinvolti per il prezioso supporto fornito che ha permesso di valorizzare ed arricchire l'attività di analisi di ENEA.

Voglio, infine, rivolgere ringraziamento particolare a FEDERBETON in particolare al dott. Zampella ed a tutti gli Associati per i numerosi spunti forniti, per l'attenzione ed il supporto che hanno rivolto in questa attività di ricerca.

**Ilaria Bertini**

*Capo Dipartimento*

*Unità efficienza energetica Enea*

## Prefazione

L'industria del cemento è tra quelle più energivore dell'intero comparto manifatturiero.

Il processo di trasformazione della materia prima in prodotto finito richiede infatti, notevoli quantità di energia, termica ed elettrica che rappresentano, di fatto, la parte preponderante dei costi variabili di produzione.

Da sempre l'attenzione all'efficienza energetica è stata una necessità vitale per questo settore, con importanti investimenti in ricerca e sviluppo in tecnologia e processo.

Si è così generato un approccio culturale che fonde sostenibilità economica e ambientale, che diventano obiettivi convergenti di un'unica strategia.

In tale contesto, le diagnosi energetiche analizzate da Enea forniscono una preziosa occasione per effettuare una attenta analisi del livello di consumi energetici nei siti produttivi, rapportandoli ai benchmark di riferimento elaborati dalla stessa Enea.

Oggi un ulteriore argomento di grande interesse è rappresentato dalla necessità di ridurre l'emissione dei gas climalteranti legati ai processi produttivi. In questo senso il settore cemento deve affrontare una duplice sfida in quanto alle emissioni di CO<sub>2</sub> derivanti dalle necessità energetiche si sommano quelle derivanti dal processo di calcinazione delle materie prime.

Per raggiungere la neutralità carbonica entro il 2050, come previsto dal Green Deal europeo, il settore cemento ha elaborato una propria strategia di decarbonizzazione.

Le iniziative previste nel medio termine si basano sia sullo sviluppo di prodotti con una minore impronta carbonica, che sulle attività di ricerca, con importanti progetti su tecnologie breakthrough per la cattura e il riutilizzo della CO<sub>2</sub>. Queste soluzioni, sulle quali il settore sta investendo, non hanno ancora applicazione su scala industriale, ma avranno sicuramente un ruolo centrale nel prossimo futuro. Per quanto concerne le emissioni, esistono invece pratiche virtuose già ampiamente applicate in altri Paesi attenti ai temi ambientali, le quali mitigano sensibilmente l'impatto dovuto all'uso di combustibili fossili. L'industria italiana del cemento può contare su un sistema produttivo moderno già in grado, con limitati investimenti, di utilizzare combustibili solidi secondari (CSS) in luogo dei fossili,

con una riduzione rilevante delle emissioni di CO2 da combustione, in virtù del contenuto di biomassa presente nei CSS.

Questo strumento, di facile implementazione, è ampiamente illustrato nella presente pubblicazione, che costituisce un lavoro esauriente, prezioso e funzionale a favorire la transizione verso un'economia maggiormente sostenibile. Uno sforzo che Federbeton vuole condividere con tutti gli operatori della manifattura nazionale e in generale con l'intero Paese, certa del ruolo che questo settore può giocare nella costruzione di un futuro più sostenibile.

**Ing. Fabrizio Pedetta**

*Coordinatore Commissione Tecnologie e Prodotto*  
Federbeton





# QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO

1

## I. Quadro normativo di riferimento

In attuazione delle Direttive sull'efficienza energetica emanate dal Parlamento Europeo l'Italia ha recepito prima con il **Decreto Legislativo n° 102 del 4 luglio 2014** (G.U. Serie Generale n.175 del 14-07-2020) la Direttiva 2012/27/UE e successivamente con il **Decreto Legislativo n° 73 del 14 luglio 2020** (G.U. Serie Generale n.175 del 14-07-2020) la Direttiva 2018/27/UE che ha modificato ed adeguato alcune parti della direttiva 2012/27/UE.

L'art. 8 del D.Lgs. 102/2014 prima e del D.Lgs. 73/2020 dopo, individua i soggetti obbligati che a partire dal 5 dicembre 2015 debbono svolgere, con cadenza quadriennale, una diagnosi energetica presso i propri siti produttivi. I soggetti obbligati sono:

- ✓ le grandi imprese<sup>3</sup> (comma 1);
- ✓ le imprese a forte consumo di energia<sup>4</sup> (comma 3).

La diagnosi energetica è lo strumento più qualificato per analizzare il quadro della gestione energetica di un'attività (industriale, servizi, primario e terziario) e rappresenta una valutazione sistematica di come venga utilizzata l'energia dal punto in cui essa viene acquisita al suo punto di utilizzo finale.

*La diagnosi energetica è una procedura sistematica volta a fornire un'adeguata conoscenza del profilo di consumo energetico di un edificio o gruppo di edifici, di una attività o impianto industriale o di servizi pubblici o privati, ad individuare e quantificare le opportunità risparmio energetico sotto il profilo costi-benefici e riferire in merito ai risultati.*

<sup>3</sup> Ogni entità, a prescindere dalla forma giuridica, che eserciti un'attività economica con più di 250 occupati e con un fatturato annuo che superi i 50 milioni di euro, oppure il cui totale di bilancio annuo superi i 43 milioni di euro, i cui effettivi e soglie finanziarie sono calcolabili secondo i criteri e i principi stabiliti dalla raccomandazione 2003/362/CE della Commissione europea del 6 maggio 2003.

<sup>4</sup> Le imprese che si avvalgono delle agevolazioni alle imprese energivore previste dal Decreto Ministeriale del 21 dicembre 2017 attuazione dell'articolo 19 della legge 20 novembre 2017, n. 167 recante Disposizioni per l'adempimento degli obblighi derivanti dall'appartenenza dell'Italia all'Unione europea.

Il D.Lgs. 102/2014 affidata ad ENEA l'attività di gestione del meccanismo attraverso:

- La realizzazione di una banca dati in grado di permettere il controllo dell'applicazione dell'obbligo (Art. 8 comma 5);
- Il controllo sulla conformità delle diagnosi all'allegato 2 dei sopracitati decreti, realizzabile anche tramite attività in situ (Art.8 comma 6);
- La realizzazione e la pubblicazione di un rapporto di sintesi i sulle attività diagnostiche complessivamente svolte e sui risultati raggiunti (Art. 8 comma 8).









# OBIETTIVO DELLA PUBBLICAZIONE

2

## 2. Obiettivo della pubblicazione

L'obiettivo di questa pubblicazione è quello di fornire alle imprese operanti nel settore della fabbricazione del cemento ed ai professionisti uno strumento di ausilio nella redazione di una diagnosi energetica di qualità.

Obiettivo principale di una diagnosi energetica è **l'individuazione e la quantificazione delle opportunità di risparmio energetico sotto il profilo costi-benefici, attraverso l'analisi della distribuzione e della gestione dei vettori energetici nel sito sottoposto ad analisi.**

Per poter individuare delle opportunità di efficientamento energetico sono necessari tre presupposti fondamentali:

- Una corretta analisi dei flussi energetici;
- Una conoscenza degli Indici/parametri di riferimento per confrontare i propri risultati (in termini di indicatori prestazionali) con lo stato dell'arte presente per lo specifico settore nella letteratura scientifica;
- Una conoscenza delle possibili opportunità di miglioramento caratteristiche del settore che si sta analizzando.

La presente pubblicazione, attraverso l'analisi delle diagnosi energetiche pervenute ad ENEA nel dicembre 2019 per l'ottemperamento degli obblighi previsti dall'Art.8 del D.Lgs. 102/2014, al supporto di FEDERBETON<sup>5</sup> e dei gruppi di ricerca universitari coinvolti nel progetto vuole proporsi come un utile strumento per redigere la diagnosi energetica in modo più consapevole fornendo indicazioni relative ai tre presupposti fondamentali sopra citati.

Nella prima parte del documento è presente una descrizione generale del settore produttivo oggetto della presente pubblicazione, successivamente si entra nel merito dell'oggetto del documento:

- Verrà quindi descritta la metodologia di approccio alle informazioni ricavabili sia dalle diagnosi energetiche che da pubblicazioni tecniche e da esperti del settore.

---

<sup>5</sup> Federazione di settore delle Associazioni della filiera del cemento, del calcestruzzo, dei materiali di base, dei manufatti, componenti e strutture per le costruzioni, delle applicazioni e delle tecnologie ad essa connesse nell'ambito della filiera sopra indicata, <https://www.federbeton.it/>

- Verrà illustrato come dovrebbe essere condotta una diagnosi energetica di qualità tenendo conto anche delle prescrizioni normative legate alla presenza di dati misurati e come, seguendo le linee guida generali per la redazione della diagnosi energetica realizzate da ENEA come questi dati dovrebbero essere rappresentati.
- Dopo l'illustrazione degli elementi fondamentale per redigere una diagnosi energetica di qualità e conforme a quanto previsto dall'allegato 2 del D. Lgs. 102/2014 (e successivi aggiornamenti), si entra nello specifico del processo. Si fornirà quindi prima una descrizione di come i consumi energetici ricavati dalle diagnosi energetiche si ripartiscono tra le differenti aree funzionali e come questi si ripartiscono a loro volta all'interno delle stesse. Successivamente verranno individuati sia gli indici di primo livello (elettrico, termico e globale), che quelli di secondo livello relativi cioè alle singole fasi di processo.
- La pubblicazione si conclude fornendo un elenco ed un'analisi delle principali opportunità di miglioramento. In particolare saranno prima riportati tutti gli specifici interventi che possono insistere sulle diverse fasi del processo ricavabili in letteratura e successivamente un'analisi tecnico-economica degli interventi proposti nelle diagnosi energetiche.





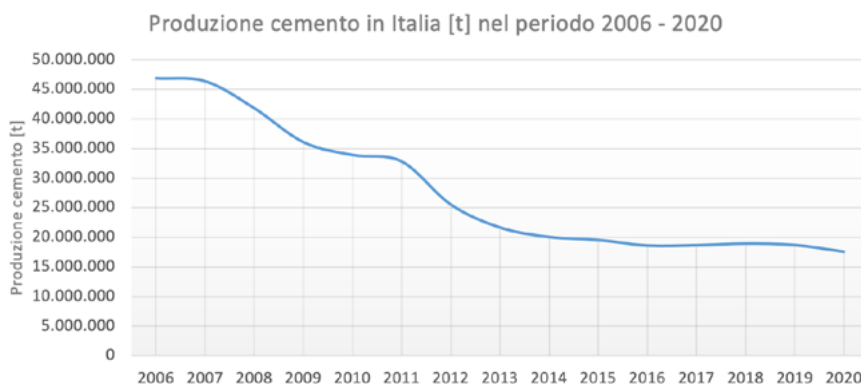


# IL CEMENTO IN ITALIA

3

### 3. Il cemento in Italia

Il volume di produzione di cemento in Italia nel 2019 è stato di 19,2 milioni di tonnellate [1], dato che fa dell'Italia uno dei maggiori produttori di cemento in ambito europeo. Tuttavia, bisogna evidenziare che il settore nel periodo 2011 - 2019 ha subito un forte ridimensionamento nella produzione, il Rapporto AITEC [2] stima ad esempio che la produzione di cemento nel periodo in esame si sia più che dimezzata come risulta evidente dal grafico di *Figura 1*.



*Figura 1 – Andamento della produzione di calcestruzzo in Italia nel periodo 2006 – 2020*

Le aziende italiane di produzione del cemento sono 19, con una distribuzione capillare dei diversi stabilimenti produttivi sul territorio nazionale: attualmente operano 55 unità di produzione, delle quali 32 sono cementifici a ciclo completo e 23 sono officine di macinazione [3].

In particolare in *Tabella 1* viene fornita una suddivisione degli stabilimenti per tipologia di produzione e per macro-area geografica, mentre in *Figura 2* è riportata la mappa dettagliata dei cementifici italiani.

	Nord	Centro e Sardegna	Sud e Sicilia	Totale
Cementerie a ciclo completo	11	9	12	32
Officine di macinazione	12	2	9	23
Totale	23	11	21	55

*Tabella 1: Distribuzione degli stabilimenti di produzione sul territorio nazionale (fonte AITEC [4])*

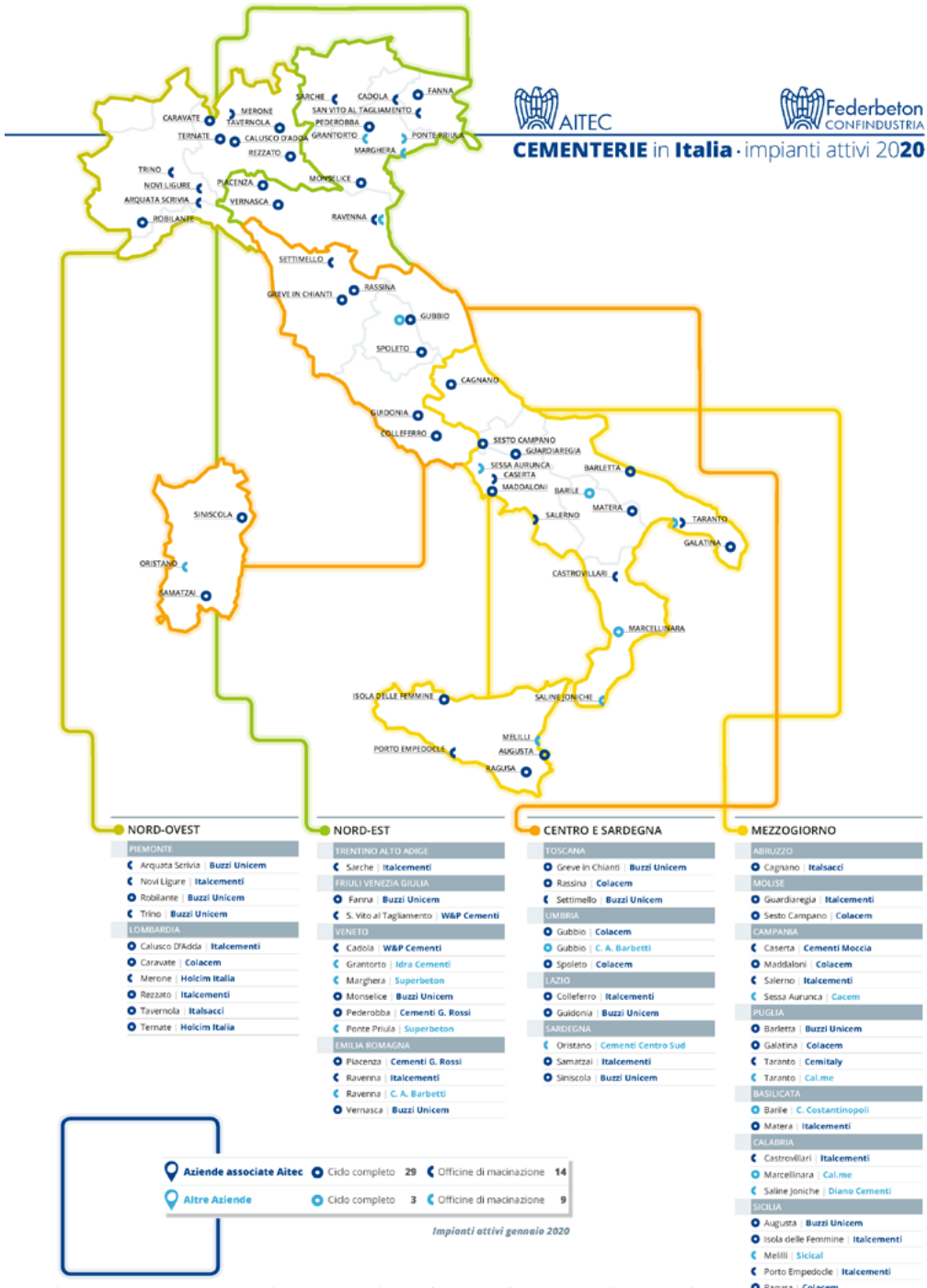


Figura 2: Mappa dei cementifici italiani anno 2020 (Fonte AITEC [4])







# METODOLOGIA DI ANALISI

4

## 4. Metodologia di analisi

Le aziende dell'industria del cemento si differenziano sostanzialmente, come visto precedentemente, per tipologia di ciclo produttivo: ciclo completo e officina di macinazione. Ai fini prettamente energetici, però, non può essere trascurata la tipologia di cemento realizzato, nel presente documento questa differenza si ritrova sostanzialmente nelle produzioni di cemento grigio e cemento bianco.

Pertanto per ciascuna tipologia di ciclo produttivo e di cemento prodotto è stata prima valuta la consistenza del campione e verificata l'omogeneità dei processi produttivi e quindi si è proceduto all'individuazione di indici di prestazione energetica caratteristici, sia di primo livello che di secondo livello.

Per indici di primo livello si intendono gli indici calcolati andando a considerare l'energia totale consumata dei singoli vettori energetici rispetto al parametro caratteristico di produzione (ed. tonnellate, metri quadri, etc..). Riprendendo la struttura energetica proposta da ENEA, sono gli indici ricavabili dai dati forniti al livello B (*Figura 1*).

Per indici di secondo livello si intendono invece gli indici specifici che per ciascun vettore energetico scendono nel dettaglio del processo (es. fase di fusione, fasi di formatura, consumi ausiliari, etc). Questa tipologia di indice è di più difficile determinazione in quanto dipende in maniera stretta dal processo e da come il consumo è misurato ed imputato ad esso. Facendo riferimento alla struttura energetica proposta da ENEA [4], questa tipologia di indice si basa sui dati forniti al livello D (*Figura 3*).

Sinteticamente la metodologia di analisi utilizzata può essere schematizzata nelle seguenti fasi:

- Fase I - Selezione del campione statistico: consiste nell'analisi numerica dei consumi di ogni sito per ciascun sottogruppo Ateco presente nella banca dati ENEA (detta popolazione di riferimento) e nella selezione del campione statistico utile all'implementazione matematica del modello. A tal fine, vengono studiati sia i file dei rapporti tecnici che i fogli di calcolo di riepilogo dei consumi allegati al rapporto tecnico (laddove presenti). È importante sottolineare l'ingente lavoro di omogeneizzazione effettuato

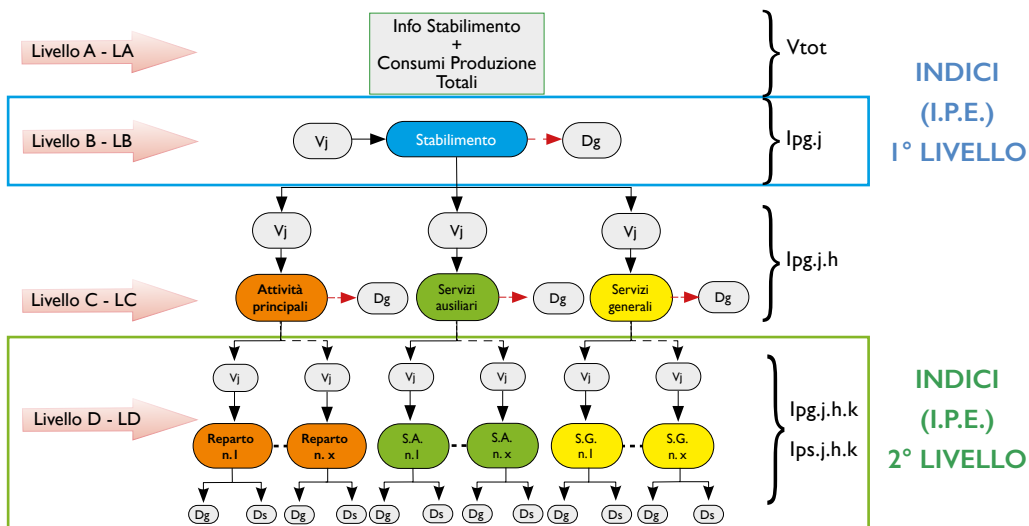


Figura 3 - Schematizzazione della struttura energetica aziendale e caratterizzazione del livello degli IPE

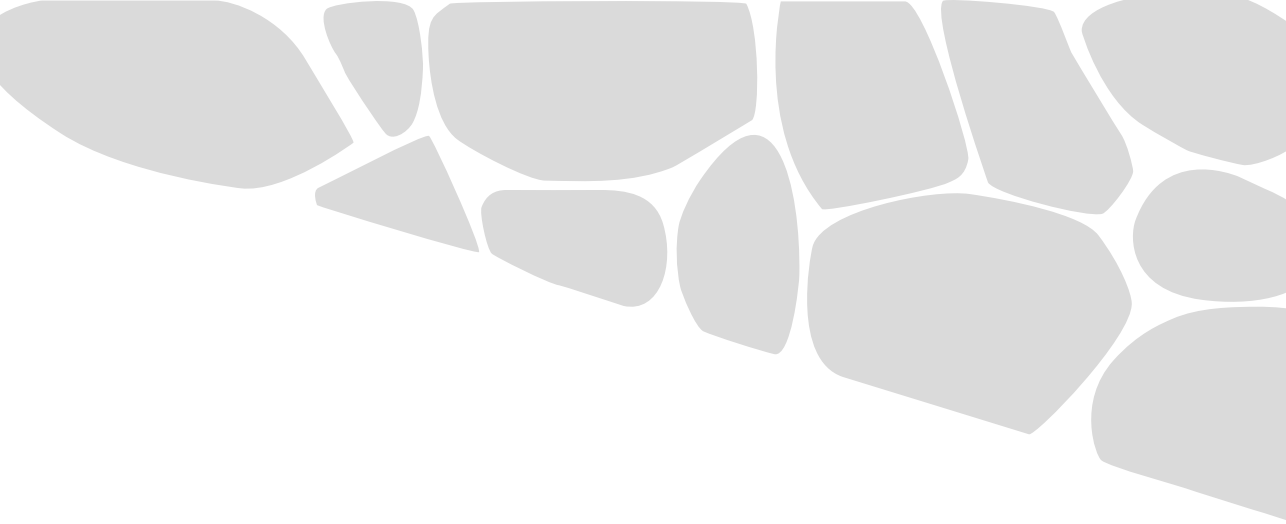
preventivamente per eliminare dalla popolazione analizzata tutti gli elementi considerati non utili (perché aventi unità di produzione (U.P) non coerenti con il resto della popolazione, oppure per mancanza di dati o errori di caricamento, o ancora incongruenze riferibili alla non pertinenza del sito in esame con il sottogruppo considerato). Inoltre, è stata definita una soglia numerica minima di siti rappresentativi, pari a 5, al di sotto della quale la modellizzazione risulta essere non rappresentativa.

- Fase 2 - Ricerca della correlazione tra consumo e produzione: viene effettuata un'analisi di regressione lineare al fine di valutare "la bontà" della relazione che c'è tra i consumi ed il parametro di aggiustamento (es. produzione) utilizzato. Questa valutazione viene fatta attraverso l'analisi dei principali indici statistici come l'R2, l'indice di Pearson ed il valore del P-value. Il controllo della correlazione rappresenta un passaggio importante per capire se effettivamente il consumo energetico sia legato al parametro di aggiustamento o vi sia la presenza di altri fattori in gioco più influenti.
- Fase 3 - Aggregazione dati: L'analisi precedente, in alcuni casi, permette di individuare la presenza di gruppi o cluster di siti, che possono dare indicazioni su tipologie di prodotti o processi differenti. Oppure è possibile individuare macro raggruppamenti legati ai volumi di produzione.

- Fase 4 – Individuazione IPE di riferimento: ultima fase, qualora le fasi precedenti suggeriscano un legame tra il consumo energetico ed il parametro di influenza si passa all'individuazione degli IPE di riferimento, che potranno essere differenziati per specifiche tecnologie, processi, prodotti o intervalli di produzione.

La bontà degli indici di prestazione individuati dipende, quindi, da come i dati riportati in diagnosi siano confrontabili tra loro con confini e limiti di batteria ben determinati.

Nel presente lavoro, i dati a disposizione hanno permesso un'accurata analisi delle due tipologie di processo produttivo, relative al solo cemento grigio, infatti il campione dati relativo alla produzione di cemento bianco si è rivelato troppo limitato e quindi non utilizzabile per un'analisi statistica affidabile e rappresentativa.



The background of the page is filled with various grey, rounded, organic shapes of different sizes and orientations, creating a textured, stone-like or cellular pattern. The shapes are scattered across the entire page, with a higher density in the upper half.

# LA DIAGNOSI ENERGETICA

5

## 5. La diagnosi energetica

In questo capitolo si entra nel merito di come deve essere condotta una diagnosi energetica di qualità, ed in particolare come questa dovrebbe essere affrontata nel settore del cemento.

Dopo una panoramica generale sulla metodologia di approccio e sui contenuti minimi che debbono essere soddisfatti per redigere un rapporto di diagnosi conforme ai dettami del D.Lgs. 102/2014, si entra nello specifico del settore del cemento, suggerendo struttura energetica, e fornendo una panoramica dei principali indici di prestazione energetica (IPE) di primo e secondo livello determinati dall'analisi delle diagnosi energetiche.

### 5.1 Redazione del rapporto di diagnosi energetica

**Diagnosi Energetica o Audit energetico:** procedura sistematica finalizzata a ottenere un'adeguata conoscenza del profilo di consumo energetico di un edificio o gruppo di edifici, di una attività o impianto industriale o commerciale o di servizi pubblici o privati, a individuare e quantificare le opportunità di risparmio energetico sotto il profilo costi-benefici e a riferire in merito ai risultati.

Per la stesura di un rapporto di diagnosi energetica di qualità e conforme ai dettami legislativi è necessario seguire le indicazioni presenti:

- ☞ nell'allegato 2 del decreto legislativo 102/2014 aggiornato nel luglio 2020 con il D.Lgs. 73/2020;
- ☞ nei chiarimenti del MISE [5];
- ☞ nelle linee guida generali elaborate da ENEA [6];
- ☞ nelle eventuali linee guida settoriali elaborate da ENEA (come ad esempio questo documento);
- ☞ nella normativa tecnica, pacchetto UNI CEI EN 16247 [7].



Come riportato nella norma tecnica EN 16247-1 l'esecuzione di una diagnosi energetica può essere suddivisa nelle seguenti fasi (vedi *Figura 4*):

- ✓ Contatti preliminari
- ✓ Incontro di avvio
- ✓ Raccolta dati
- ✓ Attività in campo
- ✓ Analisi dati ed individuazione delle opportunità di efficientamento energetico
- ✓ Rapporto
- ✓ Incontro finale

Nell'incontro di avvio vengono informate tutte le parti interessate su obiettivi, scopo, confini e accuratezza della diagnosi energetica e concordarne le disposizioni pratiche. Vengono pianificate le attività, nominate le persone dell'organizzazione che faranno da interfaccia all'auditor.

In fase di raccolta dati l'auditor, in cooperazione con l'organizzazione, deve raccogliere tutte le informazioni necessarie ed utili per comprendere il processo produttivo, le fonti di approvvigionamento energetico e di materie prime, le modalità di gestione del sito produttivo/impianto in termini energetici, economici e organizzazione del lavoro.

L'auditor energetico deve poi ispezionare in campo l'oggetto della diagnosi, valutarne gli usi energetici secondo le finalità, lo scopo ed accuratezza della diagnosi energetica, comprendere le modalità operative, i comportamenti degli utenti e il loro impatto sui consumi e l'efficienza energetica, formulare idee preliminari per le opportunità di miglioramento dell'efficienza energetica e redigere un elenco di aree e processi per i quali necessitino ulteriori dati quantitativi per successiva analisi.

L'auditor deve assicurarsi che **le misure ed i rilievi siano effettuati in maniera conforme a quanto previsto dal D.Lgs 102/2014, dai chiarimenti del MISE e dalle linee guida ENEA**, affidabile e in condizioni che siano rappresentative delle ordinarie condizioni di esercizio.

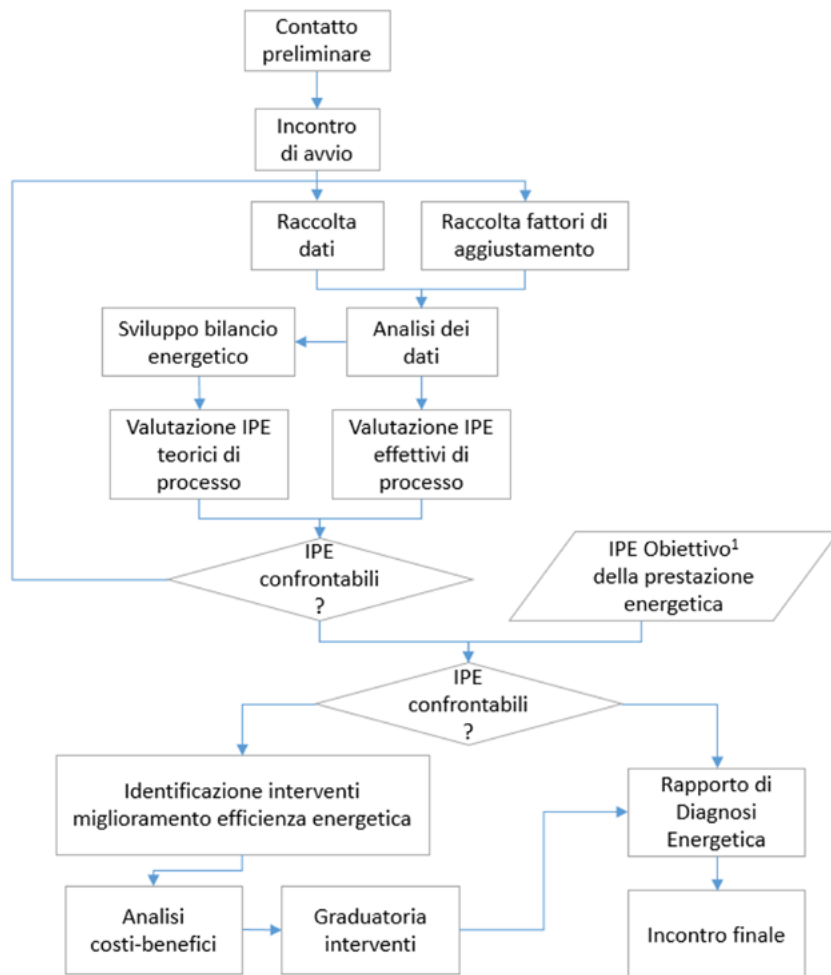


Figura 4 Schema esecuzione diagnosi energetica secondo la EN 16247-3  
 (1 media di settore, benchmark, riferimento di legge oppure un miglioramento quantitativo rispetto alla situazione ex ante).

In fase di raccolta dati l'auditor, in cooperazione con l'organizzazione, deve raccogliere tutte le informazioni necessarie ed utili per comprendere il processo produttivo, le fonti di approvvigionamento energetico e di materie prime, le modalità di gestione del sito produttivo/impianto in termini energetici, economici e organizzazione del lavoro.

L'auditor energetico deve poi ispezionare in campo l'oggetto della diagnosi, valutarne gli usi energetici secondo le finalità, lo scopo ed accuratezza della diagnosi

energetica, comprendere le modalità operative, i comportamenti degli utenti e il loro impatto sui consumi e l'efficienza energetica, formulare idee preliminari per le opportunità di miglioramento dell'efficienza energetica e redigere un elenco di aree e processi per i quali necessitano ulteriori dati quantitativi per successiva analisi.

L'auditor deve assicurarsi che le misure ed i rilievi siano effettuati in maniera conforme a quanto previsto dal D.Lgs 102/2014, dai chiarimenti del MISE e dalle linee guida ENEA, affidabile e in condizioni che siano rappresentative delle ordinarie condizioni di esercizio.

In fase di analisi l'auditor deve determinare il “livello di prestazione energetica” corrente dell'oggetto sottoposto a diagnosi. Questo rappresenta il riferimento sulla base del quale possono venire misurati i miglioramenti e deve comprendere:

- a. una scomposizione dei consumi energetici suddivisi per uso e fonte;
- b. i flussi energetici ed un bilancio energetico dell'oggetto sottoposto a diagnosi;
- c. i flussi di massa (prodotti, semilavorati, materie prime) dell'oggetto sottoposto a diagnosi
- d. il diagramma temporale della domanda di energia;
- e. le correlazioni tra consumo energetico e fattori di aggiustamento;
- f. uno o più indicatori di prestazione energetica adatti a valutare l'oggetto sottoposto a diagnosi.
- g. le opportunità di miglioramento dell'efficienza energetica sulla base della prestazione energetica corrente dell'oggetto sottoposto a diagnosi valutandone l'impatto sulla base dei risparmi economici ottenibili, degli investimenti necessari, del tempo di ritorno, dei vantaggi non energetici e delle interazioni tra le diverse misure di efficientamento proponibili. Le azioni di risparmio energetico devono essere elencate secondo una graduatoria basata sui criteri concordati con l'organizzazione. Nell'incontro finale l'auditor energetico deve:
- h. consegnare il rapporto di diagnosi energetica;
- i. presentare i risultati della diagnosi energetica in maniera da agevolare il

processo decisionale dell'organizzazione;

- j. essere in grado di spiegare i risultati.

Uno dei punti chiave nella valutazione delle prestazioni energetiche di un sito, di un processo, etc. è il confronto delle sue prestazioni con quelle di impianti/processi simili.

Questa fase di confronto però non può prescindere da una chiara standardizzazione delle caratteristiche del processo che permetta confronti omogenei con, ad esempio, Indici di prestazione energetica presenti in letteratura, o anche più semplicemente confronti con impianti simili di proprietà della stessa azienda.

## **5.2 La diagnosi energetica negli impianti di produzione del cemento**

In un'ottica di settorializzazione delle diagnosi energetiche ENEA, in collaborazione con FEDERBETON, ha redatto un foglio di calcolo di rendicontazione specifico per il settore [8], all'interno del quale la struttura energetica prevista dalle linee guida ENEA è calata sul settore del cemento. Questo ha permesso di individuare in maniera chiara tutte le fasi principali del processo produttivo, standardizzandone il lessico e associandone il corretto parametro di normalizzazione (es.  $t_{\text{materia prima}}$ ,  $t_{\text{clinker}}$ ,  $t_{\text{cemento}}$ , etc.). La struttura del foglio di calcolo di rendicontazione, per come è stato concepito, può essere utilizzato indifferentemente sia nel caso di impianti a ciclo completo che dalle officine di macinazione.

### **5.2.1 Il Ciclo di produzione del cemento**

Le fasi principali del ciclo di produzione completo del cemento sono 5:

- I. Estrazione e Frantumazione delle materie prime (calcari e marne) da cave o miniere.
- II. Macinazione (riduzione in polvere) delle materie prime ("crudo") e Omogeneizzazione della "farina" ottenuta.

- III. Cottura della farina in forno per ottenere il *clinker*, poi raffreddato bruscamente per mezzo di aria fredda. A questa fase sono attribuiti anche in consumi per il trasporto e trattamento dei combustibili.
- IV. Macinazione del *clinker* (“cotto”) e dei materiali correttivi (gesso, ceneri volanti, pozzolana, calcare) per la produzione del cemento.
- V. Stoccaggio e spedizione del cemento (sfuso o in sacchi).

In Figura 5 è schematizzato il ciclo completo di produzione del cemento. Nel caso di officine di macinazione si ritrovano solamente le fasi IV e V.

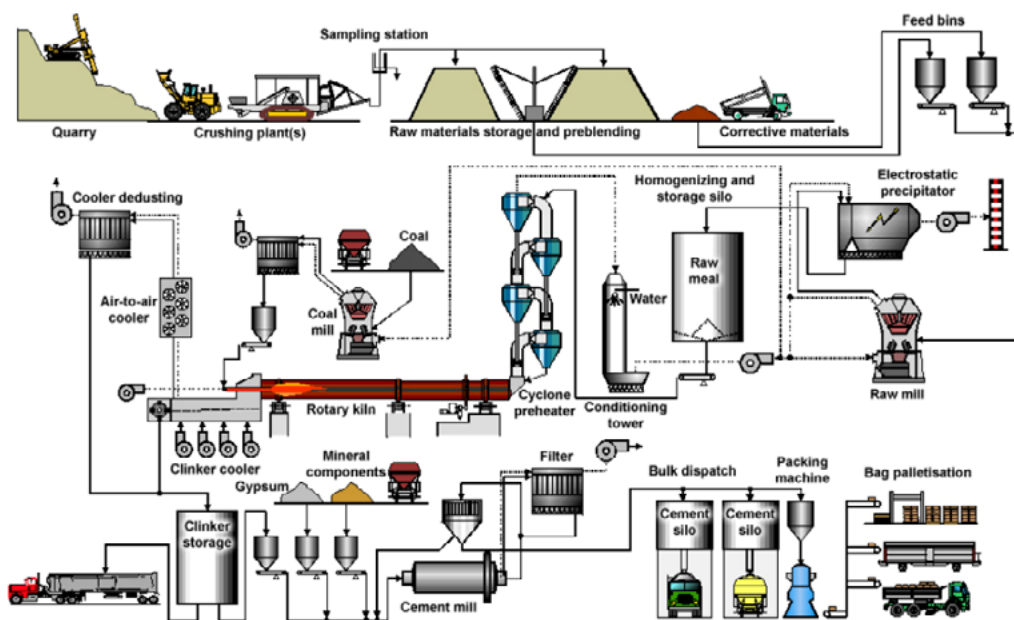


Figura 5 - Schema del processo completo di produzione del cemento (Fonte: CEMBUREAU, 2006)

## 5.2.2 Rendicontazione dei consumi energetici

Per la rendicontazione dei consumi energetici è necessario attenersi alla suddivisione sia per differenti vettori energetici che differenti aree funzionali e processi come illustrato nelle Linee Guida ENEA [6] (Figura 6). Inoltre ENEA, in accordo con FEDERBETON, ha sviluppato appositi strumenti, come ad esempio un foglio di calcolo, per facilitare ed uniformare la metodologia di

rendicontazione dei consumi energetici del sito produttivo.

La rendicontazione dei consumi si struttura su diversi livelli (*Figura 6*) [6].

- Livello A: dove devono essere riportate le informazioni principali del sito oggetto di analisi quali:
  - o Dati identificativi dello stabilimento e della diagnosi (es.: P.IVA, località, settore merceologico a sei cifre, periodo di riferimento, etc);
  - o Produzione annua;
  - o Vettori energetici in ingresso allo stabilimento nell'anno di riferimento, come da fatture di acquisto o contatori fiscali;
  - o Variazione delle scorte in magazzino.
- Livello A1: trasformazioni di energia o energia autoprodotta. In questo livello debbono essere inseriti sia riferimenti a sistemi di autoproduzione di energia come ad esempio impianti fotovoltaici ed eolici, ma anche trasformazioni dei vettori acquistati in altri vettori energetici, come ad esempio nel caso della cogenerazione (vettore in ingresso Gas Naturale, trasformato in Energia elettrica e calore).
- Livello B: qui vanno riportati i valori del consumo energetico, suddiviso per ciascun vettore energetico, effettivamente imputabili al sito produttivo. Si differenziano dal livello A nel caso vi siano sistemi di autoproduzione o trasformazione dell'energia (es. Cogenerazione).
- Livello C: prevede la suddivisione dei consumi energetici per vettore e per area funzionale (Attività Principali, Servizi Ausiliari, Servizi Generali).
- Livello D: riporta il dettaglio di come il consumo di ciascun vettore energetico si suddivide all'interno delle tre aree funzionali: attività principali, servizi ausiliari e servizi generali. Ad esempio, per la produzione del *clinker* e/o del cemento, nelle attività principali dovranno essere riportati tutti i consumi di tutte le fasi presenti nello stabilimento. Per semplificare la rendicontazione e rendere i dati omogenei sono riportate nel foglio di rendicontazione tutte le fasi che possono essere presenti in uno stabilimento, con le relative sotto-fasi:
  - **Attività principali:**

- Cava suddivisa in:
  - Escavazione + frantumazione calcare;
  - Escavazione +Frantumazione Marna;
  - Escavazione +Frantumazione Argilla;
  - Escavazione +Frantumazione Pozzolana;
  - Altro.
- Materie Prime suddivise in:
  - Trasporto e deposito materie prime;
  - Essiccazione materie prime;
  - Frantumazione materie prime (solo se effettuata in stabilimento);
  - Altro.
- Reparto Crudo suddiviso in:
  - Macinazione materie prime e omogeneizzazione farina;
  - Altro.
- Reparto Forno suddiviso in:
  - Riscaldamento Olio combustibile;
  - Trasporto e trattamento combustibili;
  - Forno di cottura - produzione clinker;
  - Cottura *Clinker*;
  - Altro.
- Reparto cotto suddiviso in:
  - Macinazione clinker;
  - Trasporto cemento ai sili di deposito;
  - Altro.

- Reparto spedizione suddiviso in:
  - Spedizione cemento Sfuso;
  - Insacco cemento e pallettizzazione;
  - Spedizione *clinker*.
- **Servizi Ausiliari:**
  - Aria compressa;
  - Macinazione coke;
  - Utenze varie FM;
  - Trasporti interni;
  - Altro.
- **Servizi Generali:**
  - Illuminazione;
  - Climatizzazione/Riscaldamento ambienti;
  - Acqua calda sanitaria;
  - Altro.

Per ciascun consumo è importante riportare il relativo parametro correttivo, ad esempio nella voce Forno di cottura produzione clinker riportare le tonnellate di clinker prodotto, o nella Macinazione farina riportare le tonnellate di farina prodotta, etc..

Come riportato sulle Linee Guida ENEA [6] è possibile trascurare nei livelli B, C e D i vettori energetici utilizzati in stabilimento che abbiano un'incidenza inferiore al 5% sui consumi globali, (tra questi ad esempio il gasolio per autotrazione, ecc..) i quali dovranno comunque essere sempre riportati almeno nel Livello A.



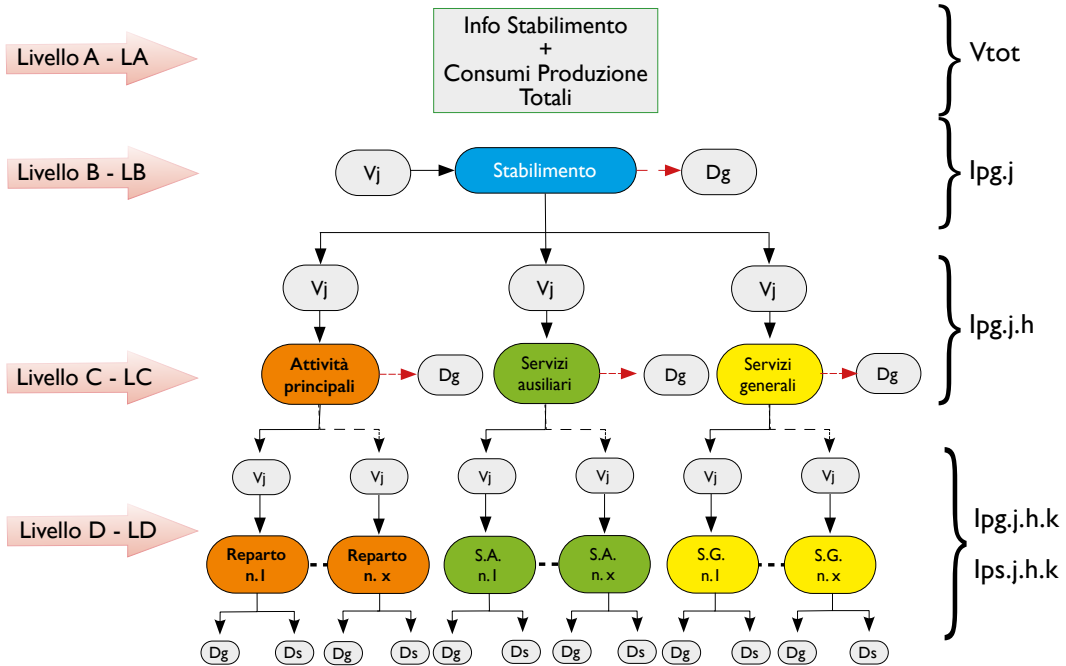


Figura 6 - Schematizzazione della struttura energetica aziendale

Per il settore di produzione del cemento, date le sue peculiari caratteristiche di standardizzabilità delle varie fasi del processo, è stato già elaborato da Enea in collaborazione con Federbeton, un File di Riepilogo dedicato, in cui è riportato il Modello energetico del sito, con tutte le fasi del processo specifico, per ognuna delle quali è prevista l'indicazione dei consumi di ciascun vettore energetico all'interno delle Aree Principali e della relativa destinazione d'uso specifica con le relative quantità [8].



RISULTANZE DELLE DIAGNOSI  
ENERGETICHE RIPARTIZIONE  
CONSUMI ED INDICI DI  
PRESTAZIONE ENERGETICA  
GENERALI (IPG)

6

## 6. Risultanze delle diagnosi energetiche ripartizione consumi ed Indici di prestazione energetica generali (IPEg) e specifici (IPEs)

Il 5 dicembre 2019, è stata la seconda grande scadenza per la realizzazione delle diagnosi energetiche obbligatorie ai sensi del D.Lgs. 102/2014. Per il sottogruppo Ateco 23.51.00, sono state presentate in 46 diagnosi coerenti con il sottogruppo ateco, di cui:

- 44 diagnosi erano relative a siti in cui si produce cemento grigio;
- 2 diagnosi erano relative, rispettivamente ad un sito in cui si produce cemento bianco e alla sezione di un sito sempre dedicata alla produzione di cemento bianco.

Delle 44 diagnosi relative a siti in cui si produce cemento grigio, 30 sono relative a cementifici in cui è presente il ciclo completo di produzione del cemento, comprese le fasi di Macinazione e di Cottura delle materie prime, mentre le restanti 14 sono relative ad altrettanti siti in cui si effettua solo la fase di Macinazione del *clinker*.

Dall'analisi ed elaborazione dei dati contenuti nelle diagnosi relative al processo completo di produzione del cemento grigio è stata per prima cosa valutata la ripartizione dei consumi energetici tra le differenti aree funzionali e all'interno delle stesse e, successivamente, sono stati determinati prima gli Indici di performance di primo livello dell'intero ciclo: Elettrico, Termico e Totale, e dopo gli indici specifici di secondo livello.

### 6.1 Distribuzione dei consumi nel processo del cemento grigio

La distribuzione dei consumi Elettrici e Termici per il processo completo di produzione del cemento grigio è riportata in *Figura 7*. Come è evidente dalla figura il consumo Termico rappresenta l'87% dei consumi totali. Pressoché la stessa distribuzione percentuale di consumi Elettrico e Termico si ritrova per le Attività principali, come è mostrato in *Figura 8*.

### Ripartizione dei consumi per l'intero ciclo produttivo

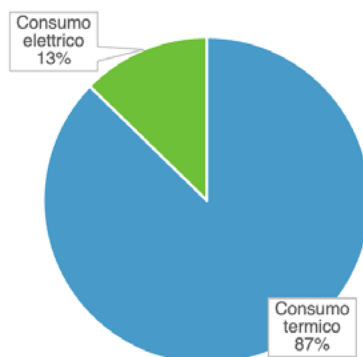


Figura 7 – Ripartizione del consumo elettrico e termico del ciclo completo per produzione del cemento grigio

### Ripartizione consumi nelle Attività Principali

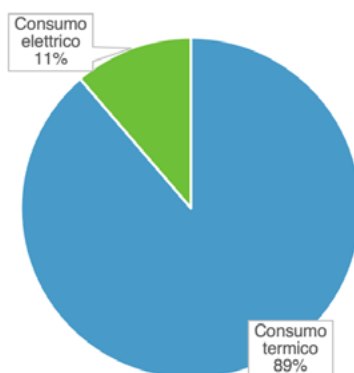


Figura 8 - Ripartizione del consumo elettrico e termico del ciclo completo per produzione del cemento grigio

Per quanto riguarda la distribuzione del consumo Elettrico nelle 3 Aree Principali, come si evince dalla Figura 9, questo si distribuisce per l'88% nelle Attività Principali, per il 10% nei Servizi Ausiliari, mentre, come tipicamente accade nelle attività produttive, la percentuale di consumo Elettrico dei Servizi Generali ricopre una percentuale molto bassa (il restante 2%).

### Ripartizione dei consumi elettrici nelle differenti aree funzionali

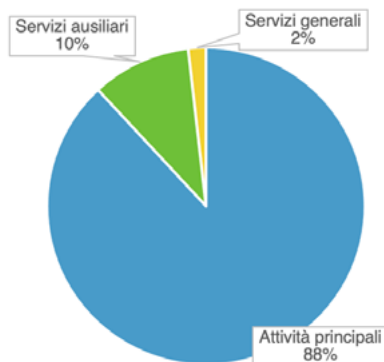


Figura 9 - Ripartizione consumi energetici totali del ciclo completo per produzione del cemento grigio tra le differenti aree funzionali

Il consumo Termico (Figura 10) è quasi totalmente imputabile alle Attività Principali, mentre i consumi termici dei Servizi Ausiliari e Generali sono trascurabili (rispettivamente ricoprono lo 0,04% e lo 0,16% dei consumi termici).

### Ripartizione dei consumi termici nelle differenti aree funzionali



Figura 10 – Ripartizione dei consumi termici per la produzione di cemento grigio tra le differenti aree funzionali

Infine, in Figura 11 è mostrata l'incidenza percentuale delle differenti tipologie di combustibile sul consumo Termico dell'intero processo. Come si può osservare dalla figura quasi  $\frac{3}{4}$  dei consumi termici sono legati all'utilizzo di coke di petrolio, mentre i combustibili da rifiuti e i pneumatici fuori uso coprono insieme il 16% dei consumi termici; il 5% invece è da imputare ai consumi di CAV o bitume.

Il restante 5% del consumo termico è invece da imputare per il 2% circa all'utilizzo di altri combustibili fossili (gas naturale, GPL, Gasolio, olio combustibile, carbon fossile) e per il restante 3% circa ad altri combustibili alternativi (olio fluido, farine animali, plastiche, gomme, fanghi essiccati, solventi, biomassa).

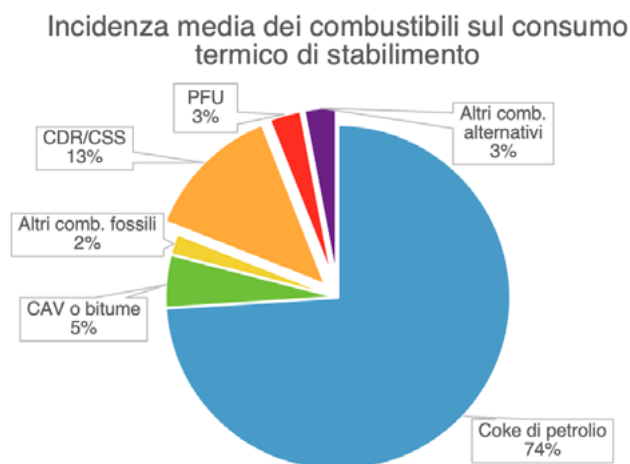
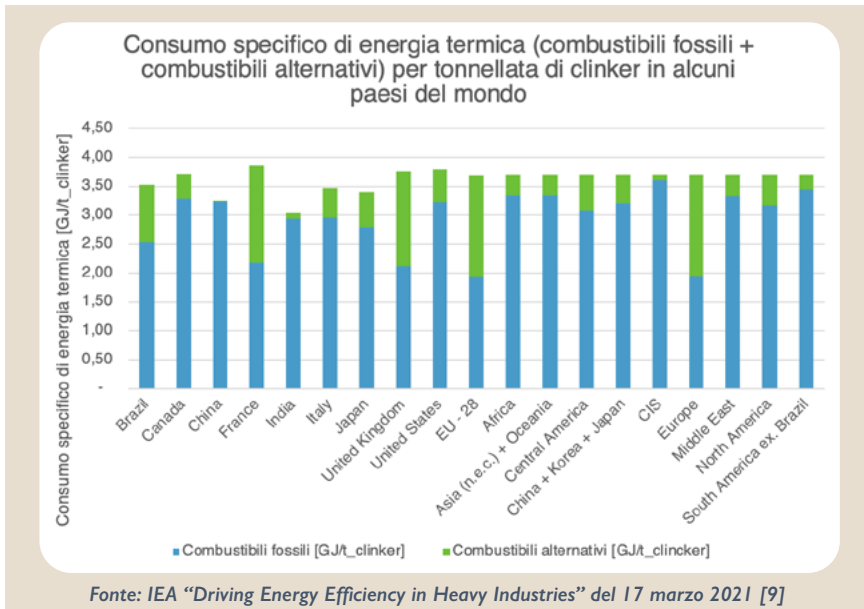


Figura 11 – Incidenza media delle differenti tipologie di combustibili utilizzate per la produzione di energia termica relativa al ciclo completo per la produzione di cemento grigio

Per la valutazione dei consumi globali e termici e globali non si può prescindere dalla conoscenza della tipologia di combustibile analizzato.

Infatti, come dimostra il grafico realizzato con i dati provenienti dalla pubblicazione della IEA “Driving Energy Efficiency in Heavy Industries” del 17 marzo 2021, l'utilizzo di combustibili alternativi incide in maniera determinante sul calcolo dell'indice di prestazione energetica termica per la produzione di clinker. Benchè infatti l'utilizzo di combustibili alternativi penalizzi in parte l'efficienza energetica, l'utilizzo di combustibili alternativi, si rivela un importante driver nella riduzione di emissioni climalteranti, in virtù del loro contenuto di biomassa compreso tra il 20 e il 60% in peso.

Il campione dei siti analizzati per la determinazione degli indici di prestazione energetica caratteristici presenta un'incidenza nell'utilizzo di combustibili alternativi di circa il 19% in linea con questo riportato nella pubblicazione dell'IEA.



In *Figura 12* è riportata la distribuzione percentuale del consumo Elettrico all'interno delle Attività Principali. Dalla figura si evince che la maggiore percentuale del consumo Elettrico è da imputare alla fase di Macinazione clinker (43% circa), mentre la fase di Macinazione materie prime e Omogeneizzazione farina e di Cottura delle materie prime ricoprono rispettivamente il 27 e il 26% circa del consumo Elettrico; la fase di Frantumazione delle MP rappresenta l'1,3%, mentre le fasi di Insacco cemento e Pallettizzazione e di Spedizione cemento



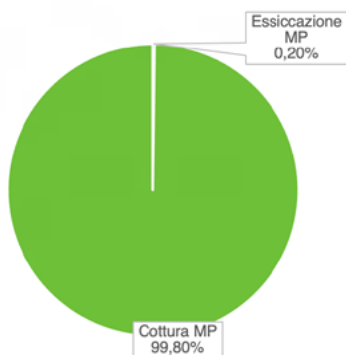
*Figura 12 – Ripartizione dei consumi medi elettrici per la produzione di cemento grigio tra le differenti fasi del processo produttivo all'interno delle attività principali*



sfuso rappresentano insieme circa l'2% dei consumi. Le restanti aree funzionali ricoprono percentuali del consumo Elettrico inferiori all'unità.

In *Figura 13* è riportata la distribuzione percentuale del consumo Termico nelle aree funzionali all'interno delle Attività Principali. Come si può osservare la quasi totalità del consumo Termico è da imputare alla fase di Cottura delle materie prime (99,8%), mentre la percentuale della fase di essiccazione delle materie prime è trascurabile (0,2%).

Attività Principali: ripartizione consumo termico



*Figura 13 - Ripartizione dei consumi medi termici per la produzione di cemento grigio tra le differenti fasi del processo produttivo all'interno delle attività principali*

La *Figura 14* mostra la distribuzione percentuale del consumo Totale nelle aree funzionali all'interno delle Attività Principali. Circa il 92% del consumo Totale è da imputare alla fase di Cottura delle materie prime, mentre le aree funzionali di Macinazione clinker e di Macinazione materie prime e Omogeneizzazione farina coprono rispettivamente il 4,8 e il 3% del consumo Totale della Attività Principali. Il restante 6% circa dei consumi è imputabile alle fasi di: Cava (0,06%), Frantumazione materie prime in stabilimento (0,14%), Insacco cemento e pallettizzazione (0,08%), Spedizione cemento sfuso (0,03%) Trasporto cemento ai silos di deposito (0,10%) e Essiccazione materie prime (0,18%).

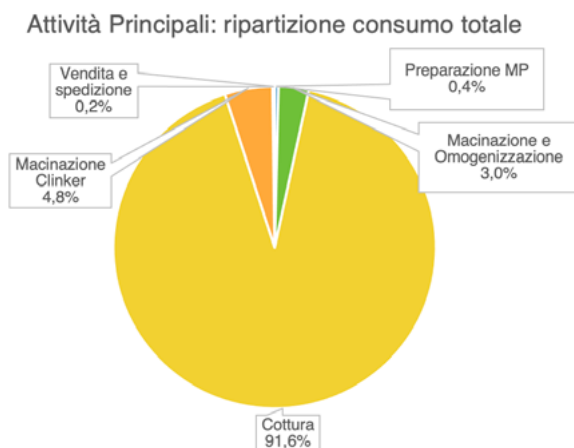


Figura 14 - Ripartizione dei consumi medi totali per la produzione di cemento grigio tra le differenti fasi del processo produttivo all'interno delle attività principali

In Figura 15 è mostrata la distribuzione percentuale del consumo Elettrico nei Servizi Ausiliari. Come si può osservare più della metà del consumo Elettrico dei Servizi Ausiliari è imputabile alla fase di Produzione di aria compressa, seguita dalla Macinazione *clinker* (circa il 33%), mentre i consumi della fase di Pompaggio dell'acqua di processo coprono il 12%.

### Servizi Ausiliari: ripartizione consumo elettrico

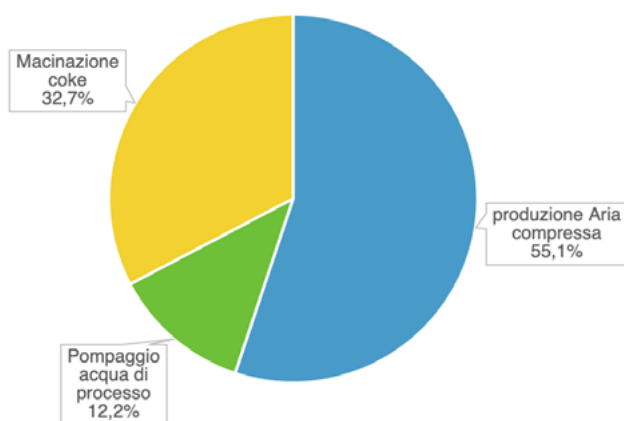


Figura 15 - Ripartizione dei consumi medi elettrici per la produzione di cemento grigio tra i Servizi Ausiliari

Per quanto riguarda il consumo termico dei Servizi Ausiliari, copre lo 0,37% dei consumi Totali Termici (compresi GPL e Gasolio) ed è quindi trascurabile e comunque per il 91% attribuibile al Gasolio (utilizzato per l'82% per i mezzi di cava (se presente) e per il restante 9% per gli automezzi) e per il 9% relativo ai consumi di gas naturale (per l'essiccazione carbone, caldaie a olio diatermico e macinazione coke).

## 6.2 Indice di prestazione energetica generali (IPEg) o IPE di primo livello

In questo paragrafo verranno illustrati gli indici di prestazione energetica di primo livello (IPEg) relativi al consumo Elettrico, Termico e Totale. Per quello termico verrà proposta una doppia elaborazione la prima relativa al calcolo dell'indice in funzione del *clinker* prodotto e la seconda relativa al calcolo dell'indici in funzione del "cemento virtuale" prodotto, cioè come se tutto il *clinker* prodotto fosse utilizzato per la produzione di cemento.

### 6.2.1 IPE Elettrico

Per la determinazione dell'IPE Elettrico di sito è stato preso in considerazione un campione costituito da 29 diagnosi relative a siti in cui si effettua il ciclo completo di produzione del cemento grigio, comprese quindi le fasi di macinazione materie prime e di cottura del *clinker*. Il campione, in relazione alla sua numerosità, è significativo.

Per tener conto del fatto che molti cementifici vendono o acquistano *clinker*, oppure lo prelevano dalle scorte o piuttosto lo mettono in scorta, è stata fatta una elaborazione del consumo Elettrico in modo da calcolare un consumo Elettrico "virtuale" relativo al ciclo completo di produzione di tutto il cemento effettivamente prodotto nel sito.

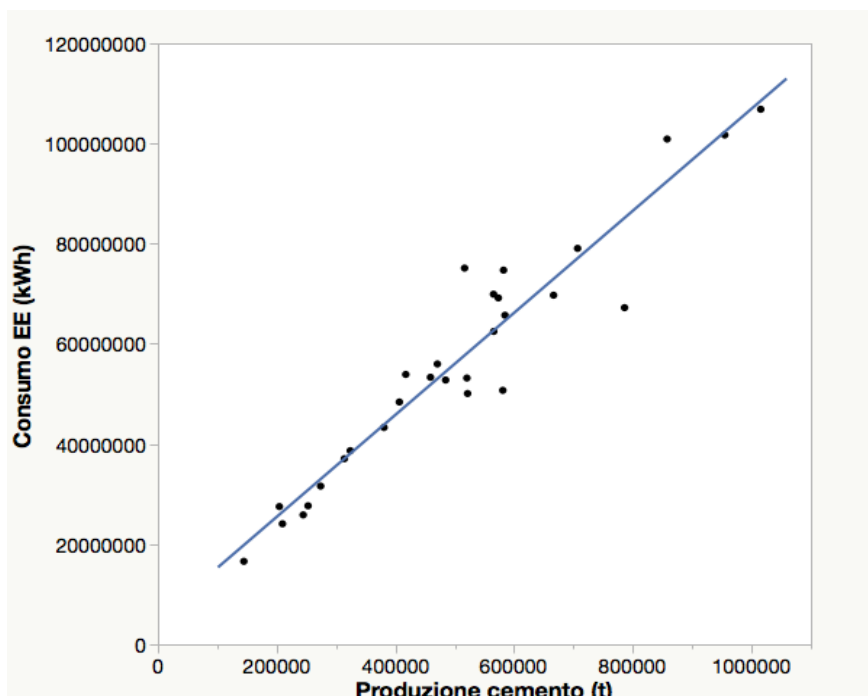
I consumi elettrici relativi alla cava e alla fase di Frantumazione delle materie prime in stabilimento, non sempre presenti, sono stati esclusi; sono stati anche esclusi i consumi elettrici della fase di Spedizione *clinker* (se presente), con lo scopo di considerare i consumi elettrici del Ciclo Completo di produzione del cemento.

Come destinazione d'uso per l'IPe Elettrico è stata considerata la produzione effettiva di cemento di ciascun sito, espressa in t. In caso di presenza di Cava o della fase di Frantumazione delle materie prime in stabilimento, per tenere conto di questo consumo, il valore dell'IPe elettrico che viene qui proposto deve essere incrementato del 2%

I consumi elettrici dei Servizi Ausiliari e dei Servizi Generali sono stati distribuiti per il 75% sul *clinker* e per il 25% sul cemento.

La retta di regressione ricavata dall'elaborazione dei dati di consumo elettrico dei 29 siti in funzione della produzione di cemento è mostrata in *Figura 16*, mentre nella *Tabella 2* sono riassunti i parametri della regressione stessa.

Va evidenziato che il consumo Elettrico di sito è influenzato sia dalla tipologia e durezza delle materie prime a disposizione, in funzione della quale la fase di Frantumazione delle stesse risulta più o meno energivora, che dalla tipologia di cementi prodotti che anch'essa può incidere sensibilmente sul consumo elettrico.



*Figura 16 – Analisi di regressione tra consumo Elettrico nel ciclo completo e produzione di cemento grigio*

Consumo EE (kWh) = 5.061.920 + 101,88 * Produzione cemento(t)						
Int. Confidenza = 99%						
	R <sup>2</sup>	R	P <sub>value</sub>	N	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> α=0,05	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> α=0,01
kWh (t_cemento)	0,917	0,958	<0,0001	29	0,3809	0,4869

Tabella 2 – Analisi di regressione tra consumo Elettrico nel ciclo completo e produzione di cemento grigio: Equazione della retta di regressione ed indici statistici

In Tabella 3 è riportato l'IPE medio del consumo Elettrico e la relativa deviazione standard per due intervalli di produzione.

Determinazione campo esistenza ed IPE reale: media +/- dev.stnd.				
Campo variazione produzione		IPE	Affidabilità	
Min	Max		Coeff di variazione	Livello di affidabilità
t	t	kWh/t		
145.000	521.000	119* ± 10	8%	ALTA
521.000	1.015.000	108* ± 13	12%	ALTA

Tabella 3 – Ciclo completo produzione cemento grigio: IPE elettrico

\*In caso di presenza di Cava o della fase di Frantumazione delle materie prime in stabilimento, il valore del consumo può essere incrementato del 2%.

## 6.2.2 IPE Termico

Per la determinazione dell'IPE Termico di sito è stato preso in considerazione un campione costituito da 29 diagnosi relative a siti in cui si effettua il ciclo completo di produzione del cemento, comprese quindi le fasi di Macinazione e Cottura delle materie prime. Il campione, in relazione alla sua numerosità, è significativo.

Dal consumo Termico sono stati esclusi i consumi di gasolio e GPL, destinati soprattutto all'autotrazione (sia dei mezzi normali, che dei mezzi di cava, se presente).

Per il consumo Termico è stata fatta una doppia elaborazione, calcolando l'IPe sia in funzione del clinker effettivamente prodotto che in funzione del cemento calcolato dal rapporto tra la quantità di *clinker* effettivamente prodotto e il parametro R (rapporto tra *clinker* e cemento specifico per ciascun sito).

### 6.2.2.1 Consumo Termico in funzione del *clinker* effettivamente prodotto in sito

La retta di regressione ricavata dall'elaborazione dei dati di consumo elettrico dei 28 siti in funzione della produzione di *clinker* è mostrata in *Figura 20*, mentre nella *Tabella 4* sono riassunti i parametri della regressione stessa.

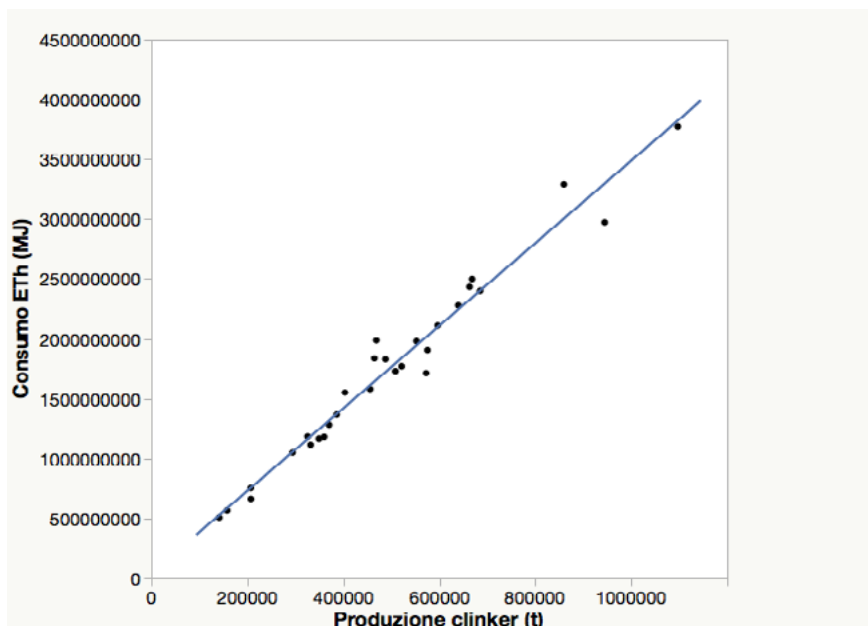


Figura 17 - Analisi di regressione tra consumo Termico nel ciclo completo e produzione di clinker

Consumo ETh (MJ) = 3,913 * 10 <sup>7</sup> + 3.448,72 * Produzione clinker (t)						
Int. Confidenza = 99%						
	R <sup>2</sup>	R	P <sub>value</sub>	N	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> α=0,05	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> α=0,01
MJ Tot (t_clinker)	0,969	0,984	<0,0001	29	0,3809	0,4869

Tabella 4 - Analisi di regressione tra consumo Termico nel ciclo completo e produzione di clinker:  
Equazione della retta di regressione ed indici statistici

In Tabella 5 è riportato l'IPE medio del consumo Termico e la relativa deviazione standard per due intervalli di produzione.

Determinazione campo esistenza ed IPE reale: media +/- dev.stnd.				
Campo variazione produzione		IPE	Affidabilità	
Min	Max		Coeff. di Variazione	Livello di affidabilità
t	t	MJ/t		
142.000	509.000	3.585 ± 264	16	ALTA
509.000	1.097.000	3.468 ± 230	13	ALTA

Tabella 5 - Ciclo completo produzione clinker: IPE termico

### 6.2.2.2 Consumo Termico in funzione del cemento virtualmente prodotto

*Il cemento virtualmente prodotto è calcolato dal rapporto tra il clinker effettivamente prodotto in sito e il parametro R (rapporto tra la quantità di clinker macinato in sito, e la quantità di cemento effettivamente prodotto).*

La retta di regressione ricavata dall'elaborazione dei dati di consumo elettrico dei 29 siti in funzione della quantità di cemento calcolato dal rapporto tra il clinker effettivamente prodotto in sito e il parametro R, è mostrata in Figura 18, mentre nella Tabella 6 sono riassunti i parametri della regressione stessa.

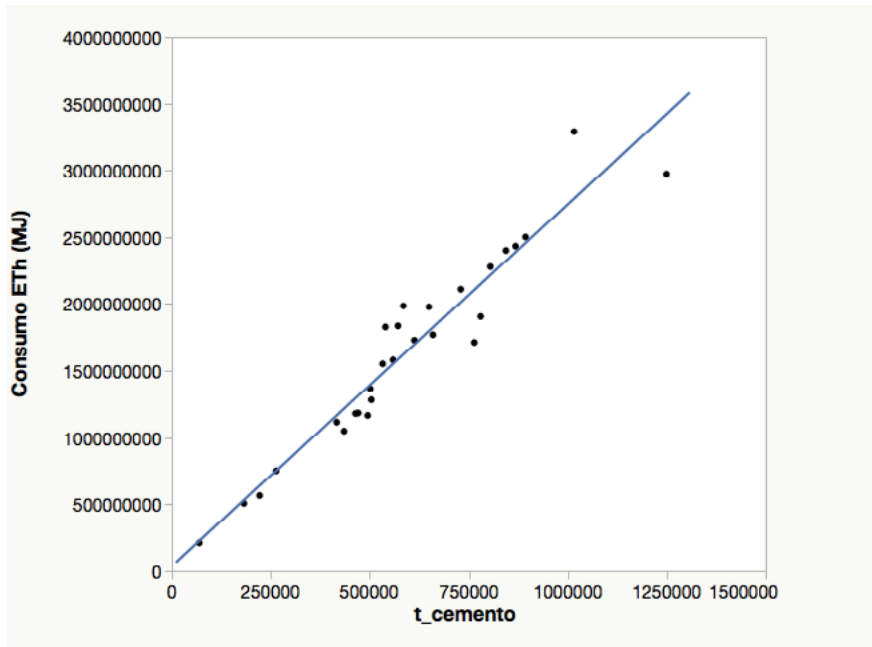


Figura 18 - Analisi di regressione tra consumo Termico nel ciclo completo e produzione di cemento grigio

Consumo ETh (MJ) = $3,955 \cdot 10^7 + 2.698,75 \cdot \text{Produzione cemento (t)}$ <b>Int. Confidenza = 99%</b>						
	R <sup>2</sup>	R	P <sub>value</sub>	N	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> α=0,05	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> α=0,01
MJ Tot (t_cemento)	0,933	0,966	< 0,0001	29	0,3809	0,4869

Tabella 6 - Analisi di regressione tra consumo Termico nel ciclo completo e produzione di cemento grigio: Equazione della retta di regressione ed indici statistici



In *Tabella 7* è riportato l' IPE medio del consumo Termico e la relativa deviazione standard.

Determinazione campo esistenza ed IPE reale: media +/- dev.stnd.				
Campo variazione produzione		IPE	Affidabilità	
Min	Max		Coeff.di Variazione	Livello di affidabilità
t	t	MJ/t		
182.000	1.396.000	2.757 ± 295	11%	<b>ALTA</b>

*Tabella 7 - Ciclo completo produzione cemento grigio: IPE termico*

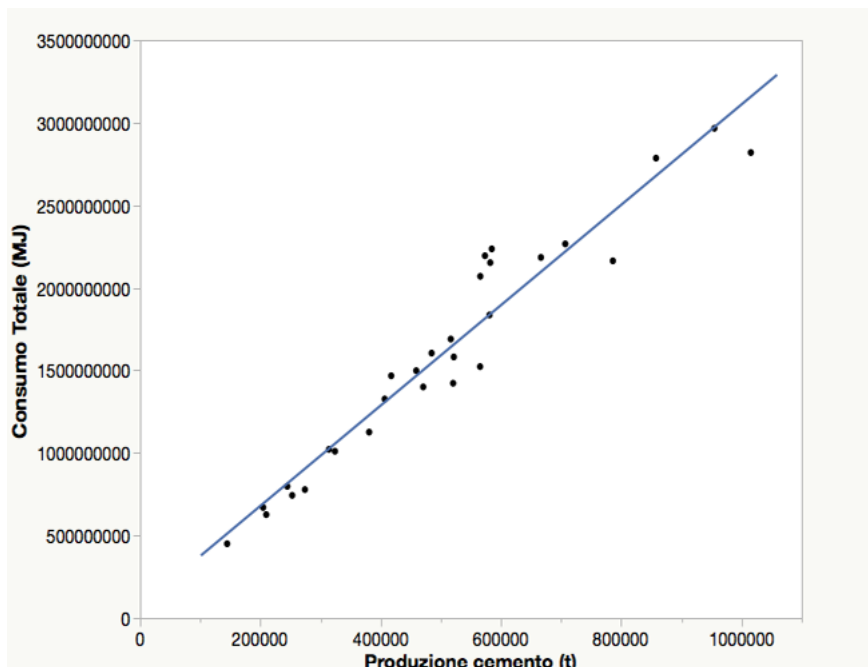
### 6.2.3 IPE Totale

Per la determinazione dell' IPE Totale di sito, è stato preso in considerazione un campione omogeneo costituito da 29 diagnosi. Il campione, in relazione alla sua numerosità, è significativo.

Anche in tale caso, come fatto per il consumo Elettrico, per tener conto del fatto che molti cementifici vendono o acquistano *clinker*, oppure lo prelevano dalle scorte o piuttosto lo mettono in scorta, è stata fatta una elaborazione del consumo Totale in modo da calcolare, per ogni sito, un consumo Totale "virtuale" relativo al ciclo completo di produzione di tutto il cemento effettivamente prodotto nel sito. In particolare come componente elettrica è stato considerato il consumo Elettrico "virtuale" determinato precedentemente, mentre come componente termica è stato considerato un consumo Termico "virtuale" relativo alla produzione di tutto il *clinker* necessario per la produzione del cemento effettivamente prodotto in ciascun sito.

Nel consumo Totale sono stati compresi sia i consumi elettrici di Cava e della fase di Frantumazione delle materie prime in stabilimento (quando presenti) che i consumi termici di GPL e gasolio utilizzati per l'autotrazione (sia dei mezzi normali che dei mezzi di cava, se presente), mentre sono stati esclusi quelli della fase di Spedizione *clinker*. Come destinazione d'uso per l' IPE Totale è stata considerata la produzione effettiva di cemento di ciascun sito, espressa in t.

La retta di regressione ricavata dall'elaborazione dei dati di consumo elettrico dei 29 siti in funzione della produzione di cemento è mostrata in *Figura 19*, mentre nella *Tabella 8* sono riassunti i parametri della regressione stessa.



*Figura 19 - Analisi di regressione tra il consumo Totale nel ciclo completo e la produzione di cemento grigio*

MJ tot = $7,05 \cdot 10^7 + 3.039,60 \cdot \text{Produzione cemento [t]}$						
<b>Int. Confidenza = 99%</b>						
		R	P <sub>value</sub>	N	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> $\alpha=0,05$	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> $\alpha=0,01$
MJ Tot (t_cemento)	0,933	0,966	<0,0001	29	0,3809	0,4869

*Tabella 8 - Analisi di regressione tra il consumo Totale nel ciclo completo e la produzione di cemento grigio: Equazione della retta di regressione ed indici statistici*

In *Tabella 9* è riportato l' IPE medio del consumo Totale e la relativa deviazione standard per due intervalli di produzione.

Determinazione campo esistenza ed IPE reale: media +/- dev.stnd.				
Campo variazione produzione		IPE	Affidabilità	
Min	Max		Coeff. di variazione	Livello di affidabilità
t_cemento	t_cemento	MJ/t_cemento		
144.803	566.000	3.197 ± 220	7%	ALTA
566.000	1.015.000	3.320 ± 384	12%	ALTA

*Tabella 9 - Ciclo completo produzione cemento grigio: IPE Totale*

### 6.3 Indici di prestazione energetica specifici (IPEs)

Dopo la determinazione degli IPE generali di sito o di primo livello, sono stati analizzati consumi delle diverse fasi del processo di produzione del cemento. Per ciascuna fase sono stati determinati l' IPE Elettrico e/o Termico (IPE di secondo livello o IPE specifici), in funzione della tipologia di consumi presenti, riferiti alla destinazione d'uso specifica della fase in esame.

#### 6.3.1 IPEs Elettrici - Attività principali

Le macro-aree principali di processo caratterizzate da consumi di tipo Elettrico sono le 6 seguenti:

1. **REPARTO CAVA:** in cui si svolge la fase di Escavazione e Frantumazione delle materie prime. Tale macro-area non sempre è presente nei cementifici.
2. **REPARTO MATERIE PRIME:** in cui si svolgono le fasi di:
  - A. Trasporto e deposito materie prime;
  - B. Essiccazione materie prime;
  - C. Frantumazione materie prime (se effettuata in stabilimento).
3. **REPARTO CRUDO:** in cui si svolge la fase di Macinazione delle materie prime ("crudo") e Omogeneizzazione della "farina" ottenuta.

4. **REPARTO FORNO:** in cui si svolgono le fasi di:

A. Trasporto e trattamento combustibili;

B. Cottura della farina per ottenere il *clinker*.

5. **REPARTO COTTO:** in cui si svolgono le fasi di:

A. Macinazione del *clinker*;

B. Trasporto cemento ai sili di deposito.

6. **REPARTO SPEDIZIONE:** in cui si svolgono le fasi di:

A. Spedizione cemento sfuso;

B. Insacco cemento e pallettizzazione;

C. Spedizione *clinker*.

Qui di seguito sono riportate le elaborazioni per le fasi comprese all'interno delle 6 macro-aree.

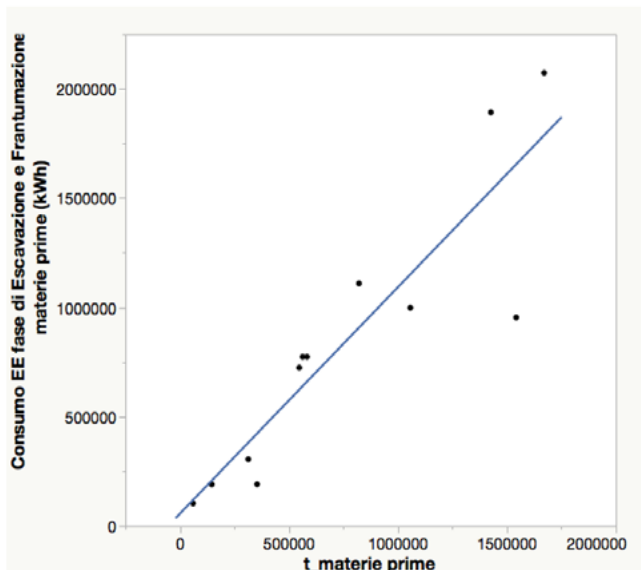
#### **6.3.1.1 REPARTO CAVA: fase di Escavazione e Frantumazione delle materie prime**

*Il cemento nasce da materie prime di origine naturale che sono costituite per l'80% da calcare e per il 20% da un materiale ricco in silice ed allumina, ad esempio argilla o caolino. Queste materie sono estratte da cave o miniere coltivate, situate generalmente in prossimità dei cementifici, tramite l'uso di esplosivo o per escavazione, a seconda della durezza. Ad esempio il calcare, che è un materiale duro, richiede l'utilizzo di esplosivo (circa 120 g per tonnellata), mentre l'argilla, tenera e plastica, viene estratta per escavazione.*

*L'attività estrattiva è accompagnata dallo studio di tecniche per il ripristino e recupero paesaggistico delle aree che possono essere destinate ad attività agricole, al rinverdimento e rimboschimento, alla creazione di aree ricreative, come parchi naturali o giardini, oppure all'insediamento di nuove aree di sviluppo industriale, artigianale o commerciale.*

Per la fase di Escavazione e Frantumazione delle materie prime effettuate in cava, il campione è costituito dai 13 siti che, tra tutti quelli oggetto di diagnosi energetica, sono dotati di cava. Il consumo da imputare a tale fase è solo di tipo Elettrico. La retta di regressione dei consumi Elettrici della fase di Escavazione e Frantumazione delle materie prime relativa al campione dei 12 siti è stata ricavata in funzione della quantità di materia prima frantumata, espressa in tonnellate ed

è mostrata in *Figura 20*, mentre nella *Tabella 10* sono riassunti i parametri della regressione stessa. La dispersione dei punti che vediamo riportati nella *Figura 20* è probabilmente legata all'eterogeneità della durezza delle materie prime di partenza, che si ripercuote sui consumi energetici.



*Figura 20 - Analisi di regressione tra consumo elettrico per la fase di Escavazione e Frantumazione e le tonnellate di materia prima*

kWh = 55.156 + 1,036 * Materie prime frantumate [t] Int. Confidenza = 99%						
	R <sup>2</sup>	R	P <sub>value</sub>	N	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> α=0,05	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> α=0,01
kWh (t_materia prima)	0,805	0,897	< 0,0001	12	0,5324	0,6614

*Tabella 10 - Analisi di regressione tra consumo elettrico per la fase di Escavazione e Frantumazione e le tonnellate di materia prima: Equazione della retta di regressione ed indici statistici*

In *Tabella 11* è riportato l'IPE medio del consumo Elettrico della fase di Escavazione e Frantumazione delle materie prime effettuata in cava e la relativa deviazione standard per due intervalli di produzione.

Determinazione campo esistenza ed IPE reale: media +/- dev.stnd.				
Campo variazione produzione		IPE	Affidabilità	
Min	Max		kWh/t_materie prime	Coeff. di variazione
t_materie prime	t_materie prime			
60.800	822.000	1,22 ± 0,36	30%	<b>MEDIA</b>
822.000	1.671.000	1,10 ± 0,31	28%	<b>MEDIA</b>

Tabella 11 - Analisi di regressione tra consumo elettrico per la fase di Escavazione e Frantumazione e le tonnellate di materia prima: Equazione della retta di regressione ed indici statistici

### 6.3.1.2 REPARTO MATERIE PRIME: fase di Frantumazione delle materie prime in stabilimento

La prima fase effettiva di lavorazione è costituita dalla Frantumazione delle materie prime estratte al fine di facilitarne la movimentazione e lo stoccaggio. In genere si utilizza un frantoio che riduce la pezzatura in un intervallo tra i 5 e i 10 cm.

Segue la fase di miscelazione che è un'operazione atta ad assicurare una composizione chimica costante alle materie prime e che viene effettuata depositando strati orizzontali dei diversi materiali e poi vengono prelevati in senso verticale, in modo da assicurare omogeneità alla miscela.

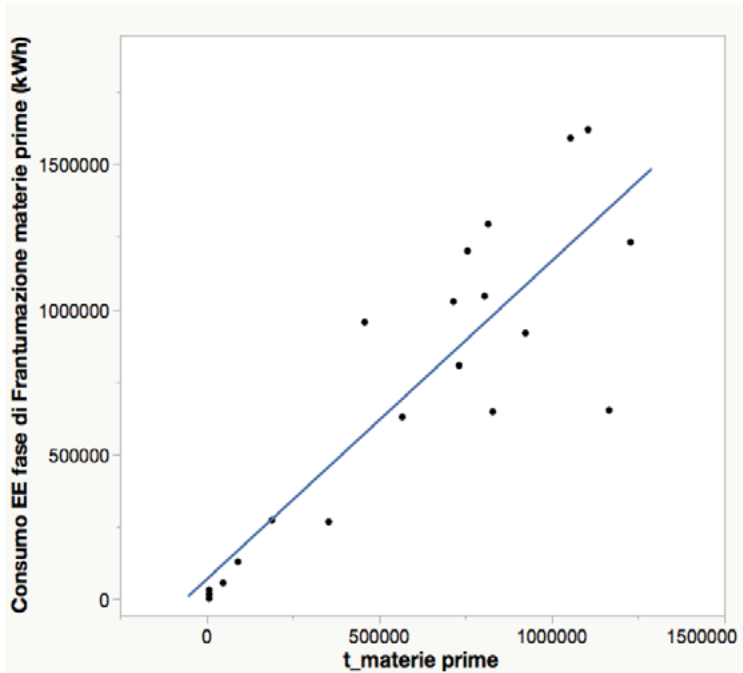
I materiali miscelati sono campionati e analizzati di continuo tramite apparecchi a raggi gamma. I risultati di queste analisi permettono di individuare le correzioni necessarie per ottenere una miscela ottimale ("crudo") da inviare come alimentazione alla fase successiva di macinazione. Ad esempio per compensare lo scarso tenore di silice si impiegano sabbia, argilla ad alto contenuto di silice, diatomea o altri materiali, mentre per aumentare il tenore di ossido di ferro si ricorre al ferro naturale oppure all'aggiunta di scaglie di laminazione provenienti dalla lavorazione dell'acciaio.

Per la fase di Frantumazione delle materie prime effettuata in stabilimento il campione è costituito da 20 siti. Il consumo da imputare a tale fase è solo di tipo Elettrico.

La retta di regressione dei consumi Elettrici della fase di Frantumazione delle materie prime effettuata in stabilimento, relativa al campione dei 20 siti è stata ricavata in funzione della quantità di materia prima frantumata, espressa in

tonnellate ed è mostrata in *Figura 21*, mentre nella *Tabella 12* sono riassunti i parametri della regressione stessa.

Va evidenziato che il consumo Elettrico di sito è influenzato dalla tipologia e durezza delle materie prime a disposizione, in funzione della quale la fase di Frantumazione delle stesse risulta più o meno energivora.



*Figura 21 - Analisi di regressione tra consumo elettrico per la fase di Frantumazione in situ e non in cava e le tonnellate di materia prima*

$kWh = 66.651 + 1,10 * \text{Materie prime frantumate [t]}$ <b>Int. Confidenza = 99%</b>						
	$R^2$	R	$P_{\text{value}}$	N	$R_{\text{crit}} \text{ (bidirezionale)}$ $\alpha=0,05$	$R_{\text{crit}} \text{ (bidirezionale)}$ $\alpha=0,01$
kWh (t_materia prima)	0,805	0,897	< 0,0001	12	0,5324	0,6614

*Tabella 12 - Analisi di regressione tra consumo elettrico per la fase di Frantumazione in situ e non in cava e le tonnellate di materia prima: Equazione della retta di regressione ed indici statistici*

In *Tabella 13* è riportato l'IPE medio del consumo Elettrico della fase di Frantumazione delle materie prime effettuata in stabilimento e la relativa deviazione standard per due intervalli di produzione. Nella tabella è riportata anche l'affidabilità dell'IPE Elettrico medio di tale fase del processo.

Determinazione campo esistenza ed IPE reale: media +/- dev.stnd.				
Campo variazione produzione		IPE	Affidabilità	
Min	Max		kWh/t_materie prime	Coeff. di variazione
t_materie prime	t_materie prime			
8.300	91.700	1,48 ± 0,80	54%	<b>MEDIA</b>
91.700	1.228.000	1,05 ± 0,37	35%	<b>MEDIA</b>

*Tabella 13 - Fase di Frantumazione in situ: IPE elettrico*

### 6.3.1.3 REPARTO CRUDO: fase di Macinazione delle materie prime e Omogeneizzazione della farina

*L'impianto di macinazione delle materie prime le riduce in farina molto fine, con dimensioni dei granelli inferiori ai 160 µm, e il molino che effettua tale operazione è indicato come "molino del crudo", proprio perché tratta un materiale non ancora cotto nel forno. L'impianto effettua contemporaneamente anche l'essiccazione per eliminare il contenuto di acqua che può arrivare al 7%.*

*I molini del crudo sono di due tipi:*

- *Molini a sfere,*
- *Molini a piste e rulli*

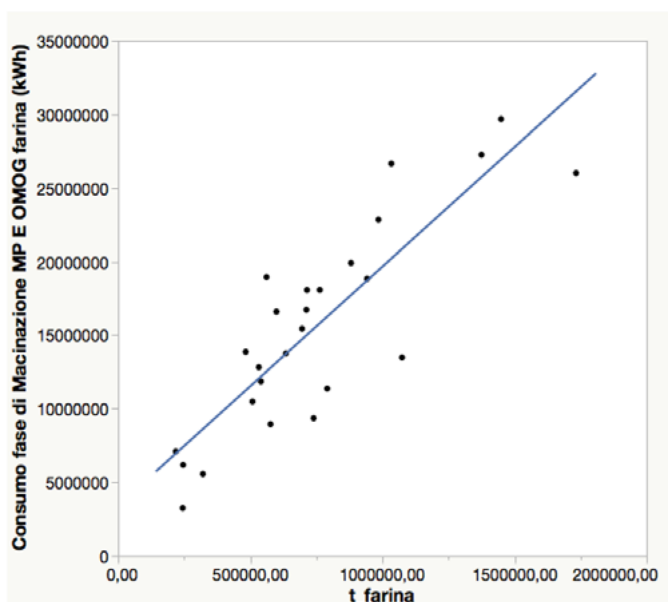
*I molini a sfere sono quelli più in uso e sono costituiti da un corpo cilindrico entro cui sono contenute delle sfere metalliche di diverso diametro che costituiscono i corpi macinanti. La materia prima entra nel molino dove delle corazze metalliche, montate all'interno del molino, sollevano le sfere facendole ricadere insieme alla materia prima che viene così ridotta di pezzatura per effetto dell'urto.*

*I molini a piste e rulli sono costituiti da rulli che premono su una pista di forma anulare che gira a bassa velocità. In tale caso la riduzione di pezzatura della materia prima avviene per compressione.*



Per la fase di Macinazione delle materie prime e Omogeneizzazione della farina il campione è costituito da 26 siti. Il consumo da imputare a tale fase è solo di tipo Elettrico.

La retta di regressione dei consumi Elettrici della fase di Macinazione delle materie prime e Omogeneizzazione della farina, relativa al campione dei 26 siti è stata ricavata in funzione della quantità di farina prodotta, espressa in tonnellate ed è mostrata in *Figura 22*, mentre nella *Tabella 14* sono riassunti i parametri della regressione stessa. Anche in questo caso malgrado gli indici statistici siano molto buoni, la dispersione dei punti è sicuramente imputabile alla natura della materia prima macinata.



*Figura 22 - Analisi di regressione tra consumo elettrico per la fase di Macinazione materie prime ed Omogeneizzazione farina e le tonnellate di farina*

kWh = 3.395.804 + 16,24 * farina prodotta [t] Int. Confidenza = 99%						
	R <sup>2</sup>	R	P <sub>value</sub>	N	R <sub>crit</sub> (bidirezionale) α=0,05	R <sub>crit</sub> (bidirezionale) α=0,01
kWh (t_farina)	0,730	0,854	< 0,0001	26	0,3809	0,4869

*Tabella 14 - Analisi di regressione tra consumo elettrico per la fase di Macinazione materie prime ed Omogeneizzazione farina e le tonnellate di farina: Equazione della retta di regressione ed indici statistici*

In *Tabella 15* è riportato l'IPE medio del consumo Elettrico della fase di Macinazione delle materie prime e Omogeneizzazione della farina e la relativa deviazione standard per due intervalli di produzione.

Determinazione campo esistenza ed IPE reale: media +/- dev.stnd.				
Campo variazione produzione		IPE	Affidabilità	
Min	Max		Coeff di variazione	Livello di affidabilità
t_farina	t_farina	kWh/t_farina		
219.000	740.000	23,51 ± 5,71	24%	<b>MEDIA</b>
740.000	1.733.000	19,09 ± 4,70	25%	<b>MEDIA</b>

*Tabella 15 - Fase di Macinazione materie prime ed Omogeneizzazione farina: IPE elettrico*

#### 6.3.1.4 REPARTO FORNO: fase di Trasporto e Trattamento combustibili

*Al reparto forno sono attribuiti anche i consumi inerenti il Trasporto e il Trattamento dei combustibili utilizzati nel forno di cottura. Da questi consumi sono esclusi i consumi relativi alla Macinazione del coke, che invece fanno parte dei Servizi Ausiliari.*

Per la fase di Trasporto e trattamento dei combustibili il campione è costituito da 10 siti che registrano dei consumi per tale fase.

La retta di regressione dei consumi Elettrici della fase di Trasporto e Trattamento combustibili relativa al campione dei 10 siti è stata ricavata in funzione della quantità di combustibile, espressa in tonnellate ed è mostrata in *Figura 23*, mentre nella *Tabella 16* sono riassunti i parametri della regressione stessa. Come fatto notare per la Frantumazione e Macinazione delle materie prime anche nel caso del petcoke delle differenze di consumo elettrico specifico possono essere dovute alla sua diversa macinabilità spesso legata al sito di provenienza.

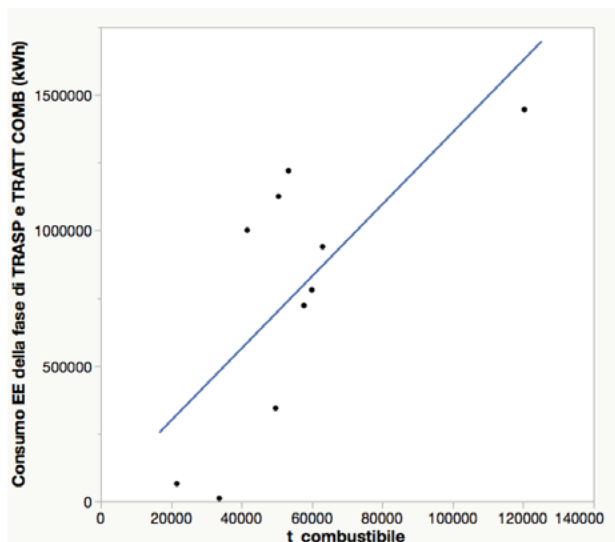


Figura 23 - Analisi di regressione tra consumo elettrico per la fase di Trasporto e Trattamento combustibili e le tonnellate di combustibile

kWh = 31.442 + 13,30 * combustibile [t] Int. Confidenza compreso tra il 95% e il 99%						
	R <sup>2</sup>	R	P <sub>value</sub>	N	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> α=0,05	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> α=0,01
kWh (t_combustibile)	0,513	0,716	0,0198	10	0,5760	0,7079

Tabella 16 - Analisi di regressione tra consumo elettrico per la fase di Trasporto e Trattamento combustibili e le tonnellate di combustibile: Equazione della retta di regressione ed indici statistici

In Tabella 17 è riportato l'IPE medio del consumo Elettrico della fase di Trasporto e Trattamento dei combustibili e la relativa deviazione standard di tale fase del processo.

Determinazione campo esistenza ed IPE reale: media +/- dev.stnd.				
Campo variazione produzione		IPE	Affidabilità	
Min	Max		Coeff di variazione	Livello di affidabilità
t_ combustibile	t_ combustibile	kWh/t_ combustibile		
22.000	120.000	13,19 ± 8,21	62%	<b>BASSA</b>

Tabella 17 - Fase di Trasporto e Trattamento combustibili: IPE elettrico

### 6.3.1.5 REPARTO FORNO: fase di Cottura delle materie prime

*L'impianto di cottura si compone di 3 fasi:*

- 1. La torre a cicloni.*
- 2. Il forno rotante.*
- 3. Il raffreddatore a griglia.*

*La torre a cicloni è composta da alcuni stadi o cicloni (in genere da 4 a 6). Lo stadio posto più in alto, che riceve la farina in arrivo dopo la fase di macinazione, è generalmente un doppio ciclone, ma possono trovarsi anche impianti che al primo stadio presentano o un solo ciclone al primo stadio o una doppia stringa di cicloni, cioè due cicloni per ogni stadio. Ogni ciclone è collegato alla condotta accendente dei gas caldi in uscita dal forno rotante che riscaldano la farina man mano che percorre i vari stadi. In questa fase si realizza la "decarbonatazione" della farina, cioè la separazione dell'anidride carbonica in essa contenuta sotto forma di carbonati, dagli ossidi che sono necessari per produrre il clinker.*

*Il forno rotante produce il clinker tramite la cottura della farina. A tale scopo la temperatura dei materiali all'interno del forno è innalzata fino a 1.450°C.*

*Il raffreddatore a griglia è costituito da una serie di piastre forate sovrapposte che si muovono in maniera alternata e trasportano il clinker all'uscita dal forno. Durante il passaggio il clinker viene raffreddato rapidamente ad opera dell'aria di raffreddamento proveniente da ventilatori posti sotto la griglia, così da stabilizzare la sua composizione chimica e la sua struttura.*

Per la fase di Cottura delle materie prime il campione è costituito da 29 siti in cui si svolge il processo completo di produzione del cemento. Il consumo di tale fase è di tipo Elettrico e Termico.

Per tale fase sono state fatte due elaborazioni, una riferendosi alla produzione effettiva di *clinker* e l'altra a quella di cemento calcolata dal rapporto tra il *clinker* effettivamente prodotto in sito e il parametro R (rapporto tra il *clinker* macinato e il cemento effettivamente prodotto in sito).

### 6.3.1.5.1 Consumo Elettrico della fase di Cottura delle materie prime in funzione del clinker effettivamente prodotto in sito

La retta di regressione dei consumi Elettrici della fase di Cottura delle materie prime relativa al campione di 29 siti è stata ricavata in funzione della quantità di clinker prodotto, espressa in tonnellate ed è mostrata in Figura 24, mentre nella Tabella 18 sono riassunti i parametri della regressione stessa.

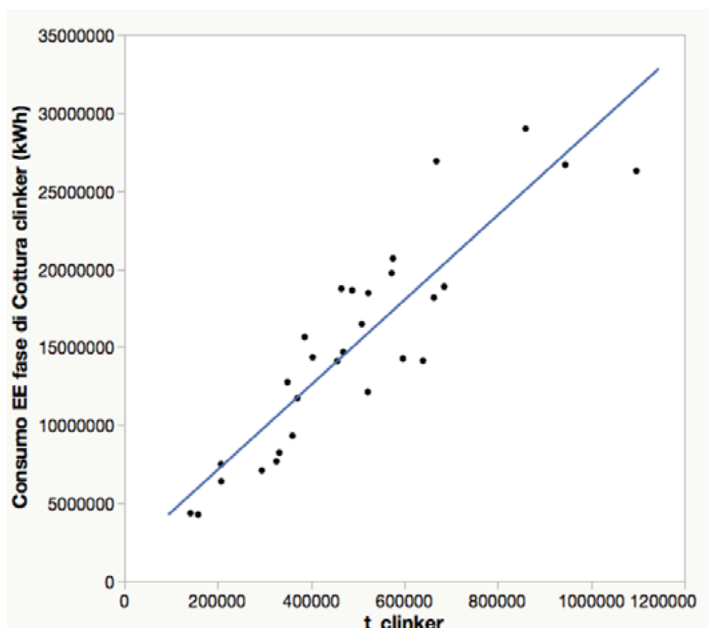


Figura 24 - Analisi di regressione tra consumo elettrico per la fase di Cottura delle materie prime e le tonnellate di clinker

kWh = 394.780 + 30,34 * clinker prodotto [t] Int. Confidenza 99%						
	R <sup>2</sup>	R	P <sub>value</sub>	N	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> α=0,05	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> α=0,01
kWh (t_clinker)	0,804	0,897	<0,0001	29	0,3809	0,4869

Tabella 18 - Analisi di regressione tra consumo elettrico per la fase di Cottura delle materie e le tonnellate di clinker: Equazione della retta di regressione ed indici statistici

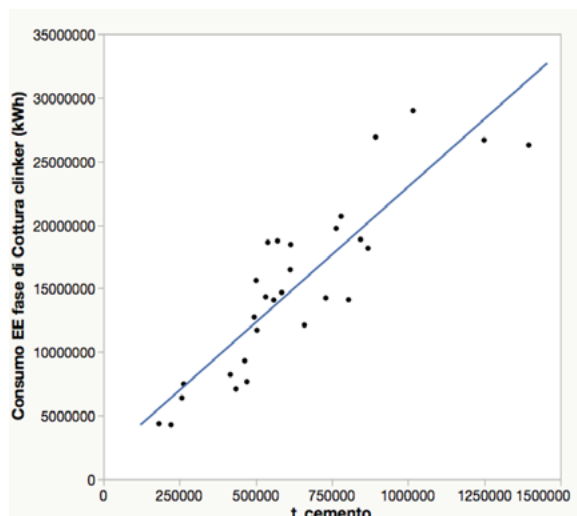
In *Tabella 19* è riportato l'IPE medio del consumo Elettrico della fase di Cottura delle materie prime e la relativa deviazione standard di tale fase del processo.

Determinazione campo esistenza ed IPE reale: media +/- dev.stnd.				
Campo variazione produzione		IPE	Affidabilità	
Min	Max		Coeff di variazione	Livello di affidabilità
t_clinker	t_clinker	kWh/t_clinker		
141.558	1.097.000	30,88 ± 5,71	18%	ALTA

*Tabella 19 - fase di Cottura delle materie prime: IPE elettrico*

### 6.3.1.5.2 Consumo Elettrico della fase di Cottura delle materie prime in funzione del cemento virtualmente prodotto

La retta di regressione dei consumi Elettrici della fase di Cottura delle materie prime relativa al campione di 29 siti è stata ricavata in funzione della quantità di cemento calcolata dal rapporto tra il *clinker* effettivamente prodotto in sito e il parametro R (rapporto tra il *clinker* macinato e il cemento prodotto in sito), espressa in tonnellate ed è mostrata in *Figura 25*, mentre nella *Tabella 20* sono riassunti i parametri della regressione stessa.



*Figura 25 - Analisi di regressione tra consumo elettrico per la fase di Cottura delle materie prime e le tonnellate di cemento prodotto*

kWh = 1.665.264 + 21,31 *cemento prodotto [t] Int. Confidenza 99%						
	R <sup>2</sup>	R	P <sub>value</sub>	N	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> α=0,05	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> α=0,01
kWh (t_cemento)	0,778	0,882	< 0,0001	29	0,3809	0,4869

Tabella 20 - Analisi di regressione tra consumo elettrico per la fase di Cottura delle materie prime e le tonnellate di cemento prodotto: Equazione della retta di regressione ed indici statistici

In Tabella 21 è riportato l'IPE medio del consumo Elettrico della fase di Cottura delle materie prime e la relativa deviazione standard per due intervalli di produzione di clinker.

Determinazione campo esistenza ed IPE reale: media +/- dev.stnd.				
Campo variazione produzione		IPE	Affidabilità	
Min	Max		Coeff di variazione	Livello di affidabilità
t_cemento*	t_cemento*	kWh/t_cemento*		
182.000	597.000	21,08 ± 4,27	20%	ALTA
597.000	1.396.000	25,29 ± 4,85	19%	ALTA

Tabella 21 - fase di Cottura delle materie prime: IPE elettrico

\*Calcolato dal rapporto tra il clinker effettivamente prodotto in sito e il parametro R (rapporto tra il clinker macinato e il cemento prodotto in sito).

### 6.3.1.6 REPARTO COTTO: fase di macinazione del clinker

Per la fase di macinazione del clinker il campione è costituito da 42 siti.

La retta di regressione dei consumi Elettrici della fase di Macinazione del clinker relativa al campione dei 42 siti è stata ricavata in funzione della quantità di cemento prodotto, espressa in tonnellate ed è mostrata in Figura 26, mentre nella Tabella 22 sono riassunti i parametri della regressione stessa.

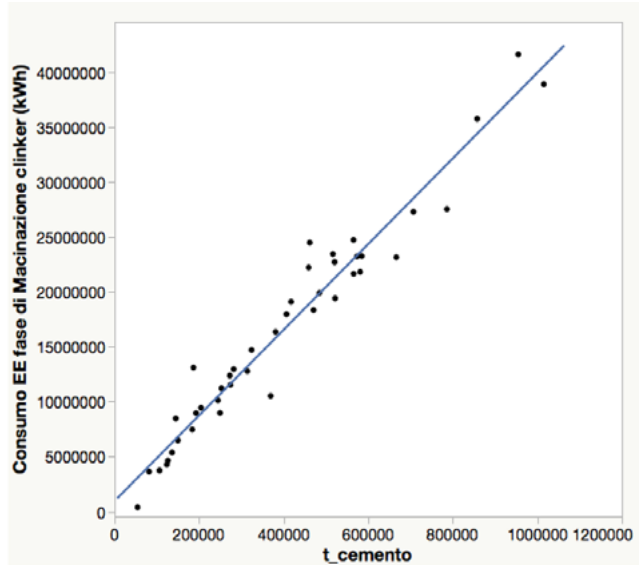


Figura 26 - Analisi di regressione tra consumo elettrico per la fase di Macinazione del clinker e le tonnellate di materia cemento prodotto

kWh = 946.440 + 38,98 *cemento prodotto [t] Int. Confidenza 99%						
	R <sup>2</sup>	R	P <sub>value</sub>	N	R <sub>crit (bidirezionale) α=0,05</sub>	R <sub>crit (bidirezionale) α=0,01</sub>
kWh	0,951	0,975	< 0,0001	42	0,3044	0,3932

Tabella 22 - Analisi di regressione tra consumo elettrico per la fase di Macinazione del clinker e le tonnellate di materia cemento prodotto: Equazione della retta di regressione ed indici statistici

In Tabella 23 è riportato l'IPE medio del consumo Elettrico della fase di Macinazione del clinker e la relativa deviazione standard per tale fase del processo.

Determinazione campo esistenza ed IPE reale: media +/- dev.stnd.				
Campo variazione produzione		IPE	Affidabilità	
Min	Max		Coeff di variazione	Livello di affidabilità
t_cemento*	t_cemento*	kWh/t_cemento*		
55.000	1.015.000	41,51 ± 8,74	21%	<b>MEDIA</b>
597.000	1.396.000	25,29 ± 4,85	19%	<b>ALTA</b>

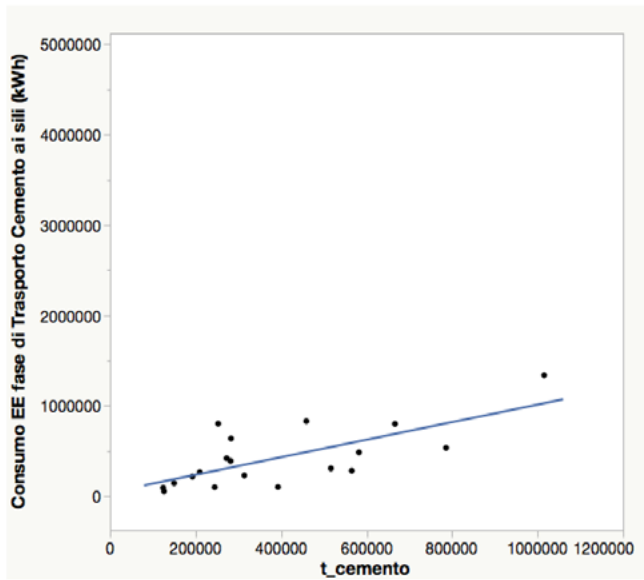
Tabella 23 - fase di Macinazione del clinker: IPE elettrico



### 6.3.1.7 REPARTO COTTO: fase di Trasporto cemento ai sili di deposito

Una volta effettuata la fase di Macinazione del clinker e ottenuto il cemento, questo deve essere trasportato ai sili di deposito, in attesa della successiva fase di spedizione.

Per la fase di trasporto del cemento ai sili di deposito, il campione è costituito da 19 siti. La retta di regressione dei consumi Elettrici della fase di Trasporto del cemento ai sili di deposito relativa al campione dei 19 siti è stata ricavata in funzione della quantità di cemento prodotto, espressa in tonnellate ed è mostrata in *Figura 27*, mentre nella *Tabella 24* sono riassunti i parametri della regressione stessa.



*Figura 27 - Analisi di regressione tra consumo elettrico per fase di Trasporto del cemento ai sili di deposito e le tonnellate di cemento prodotto*

kWh = 39.064 + 0,97 * cemento [t] Int. Confidenza compreso tra il 95 e il 99%						
	R <sup>2</sup>	R	P <sub>value</sub>	N	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> α=0,05	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> α=0,01
kWh (t_cemento)	0,496	0,704	0,0008	19	0,4329	0,5487

*Tabella 24 - Analisi di regressione tra consumo elettrico per fase di Trasporto del cemento ai sili di deposito e le tonnellate di cemento prodotto: Equazione della retta di regressione ed indici statistici*

In *Tabella 25* è riportato l'IPE medio del consumo elettrico della fase di Trasporto di cemento ai sili di deposito e la relativa deviazione standard per due intervalli di produzione.

Determinazione campo esistenza ed IPE reale: media +/- dev.stnd.				
Campo variazione produzione		IPE	Affidabilità	
Min	Max			
t_cemento	t_cemento	kWh/t_cemento	Coeff di variazione	Livello di affidabilità
124.000	314.000	1,31 ± 0,85	65%	<b>BASSA</b>
314.000	1.015.000	0,87 ± 0,48	55%	<b>MEDIA</b>

*Tabella 25 - fase di Trasporto del cemento ai sili di deposito: IPE elettrico*

### 6.3.1.8 REPARTO SPEDIZIONE

*Una volta prodotto, il cemento è stoccato in sili ed è pronto per essere insaccato oppure per essere venduto sfuso. A volte viene venduto anche parte del clinker prodotto.*

Per le 3 fasi che si svolgono nel reparto spedizione:

1. Spedizione cemento sfuso;
2. Insacco cemento sfuso;
3. Spedizione *clinker*;

non sono riportate le elaborazioni in quanto scarsamente affidabili e significative.

### 6.3.2 IPEs Termici - Attività principali

I consumi termici sono quelli di maggiore entità nel processo di produzione del cemento, anche se riguardano un numero di aree funzionali minore rispetto a quelli Elettrici.

Le macro-aree di processo caratterizzate da consumi di tipo Termico sono le seguenti:

1. REPARTO MATERIE PRIME, dove si svolge la fase di Essiccazione delle materie prime.
2. REPARTO FORNO: fase di Cottura delle materie prime.

### 6.3.2.1 REPARTO MATERIE PRIME: fase di Essiccazione delle materie prime

L'essiccazione delle materie prime (sia quelle che fanno parte della composizione del clinker, sia gli additivi del cemento) viene condotta in genere tramite utilizzo di gas naturale, ma sono utilizzati come combustibile anche coke di petrolio e bitume e altri combustibili.

Per la fase di essiccazione delle materie prime il campione è costituito da 8 siti. Il consumo di tale fase è solo di tipo Termico. La retta di regressione dei consumi Elettrici della fase di Essiccazione delle materie prime relativa al campione degli 8 siti è stata ricavata in funzione della quantità di cemento prodotto, espressa in tonnellate ed è mostrata in *Figura 28*, mentre nella *Tabella 26* sono riassunti i parametri della regressione stessa.

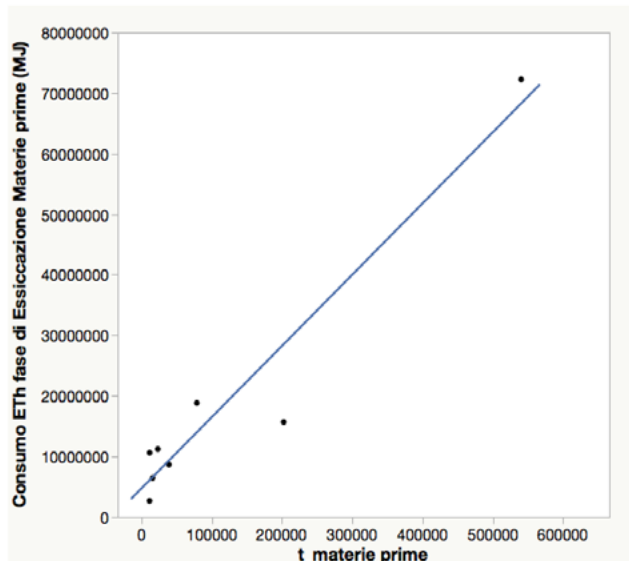


Figura 28 - Analisi di regressione tra consumo termico per la fase Essiccazione delle materie prime e le tonnellate di materie prime

$MJ = 4.720.150 + 117,55 * \text{materie prime [t]}$ <b>Int. Confidenza 99%</b>						
	R <sup>2</sup>	R	P <sub>value</sub>	N	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> α=0,05	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> α=0,01
kWh (t_materie prime)	0,929	0,964	<0,0001	8	0,6319	0,7646

Tabella 26 - Analisi di regressione tra consumo termico per la fase Essiccazione delle materie prime e le tonnellate di materie prime: Equazione della retta di regressione ed indici statistici

In Tabella 27 è riportato l'IPE medio del consumo termico della fase di Essiccazione delle materie prime e la relativa deviazione standard di tale fase del processo.

Determinazione campo esistenza ed IPE reale: media +/- dev.stnd.				
Campo variazione produzione		IPE	Affidabilità	
Min	Max			
t_materie prime	t_materie prime	MJ/ t_materie prime	Coeff di variazione	Livello di affidabilità
12.000	541.000	337 ± 266	79%	<b>BASSA</b>

Tabella 27 - Fase di Essiccazione delle materie prime: IPE termico

### 6.3.2.2 REPARTO FORNO: fase di cottura delle materie prime

La fase del processo di produzione del cemento fonte primaria di consumi termici è la fase di Cottura delle materie prime.

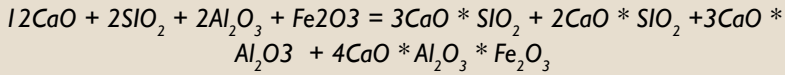
I combustibili principali utilizzati nel forno sono:

- gas naturale (quasi esclusivamente per la fase di accensione e per i transitori);
- coke di petrolio;
- carbon fossile;
- biomassa;
- combustibile solido secondario (CSS);
- combustibile da rifiuto (CDR)
- pneumatici fuori uso (PFU);
- olio combustibile ad alta viscosità (CAV) o bitume di petrolio;
- olio combustibile denso (OCD).

Nel forno rotante, la temperatura dei materiali arriva fino a 1.450 °C, in modo da permettere il verificarsi delle seguenti fasi:

1. Espulsione dell'acqua combinata ancora presente nella farina
2. Dissociazione del carbonato di magnesio
3. Dissociazione del carbonato di calcio

4. *Combinazione della calce con i minerali argillosi: formazione dei 4 minerali principali del clinker, secondo la seguente reazione:*



5. *Tempra del clinker.*

*I parametri del forno rotante sono:*

***Inclinazione del tubo rotante:*** con pendenze limitate (dal 2% al 4%) si riesce ad ottenere uno scambio termico maggiore per il materiale contenuto nel forno.

***Grado di riempimento:*** se ipoteticamente, in un determinato istante, si ricava una sezione trasversale di forno e si misura quanto di questa superficie circolare ottenuta è occupata da materiale in lavorazione, si ottiene il grado di riempimento del forno in percentuale.

***Velocità di rotazione:*** questo parametro influenza il tempo di permanenza del materiale all'interno del forno e quindi, in definitiva, lo scambio termico.

***Dilatazione termica:*** a causa delle elevate temperature che si raggiungono all'interno del forno rotante, il mantello subisce una dilatazione termica controllata.

Per la fase di Cottura delle materie prime il campione è costituito da 29 siti in cui si svolge il processo completo di produzione del cemento. Il consumo di tale fase è di tipo Elettrico e Termico.

Dai 29 siti esaminati è emerso che l'energia termica da combustibili alternativi nel forno di cottura delle materie prime è il 19% del totale. I combustibili alternativi utilizzati sono: biomassa, combustibile da rifiuto (CDR/CSS), pneumatici fuori uso (PFU) e, in misura minore, gomme, fanghi essiccati, solventi. Va evidenziato che l'utilizzo di combustibili alternativi in sostituzione di quelli tradizionali (che solo apparentemente è collegato ad una diminuzione dell'efficienza), rende il bilancio energetico estremamente favorevole e quindi è sempre da incoraggiare. La retta di regressione dei consumi termici della fase di cottura delle materie prime relativa al campione dei 29 siti è stata ricavata in funzione della quantità di clinker prodotto, espressa in tonnellate ed è mostrata in *Figura 29*, mentre nella *Tabella 28* sono riassunti i parametri della regressione stessa.

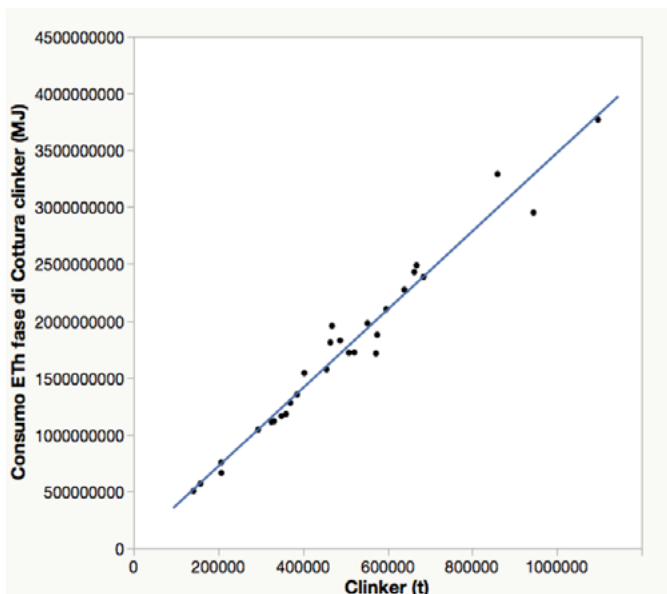


Figura 29 - Analisi di regressione tra consumo Termico per fase di Cottura delle materie prime e le tonnellate di clinker

$MJ = 2,749 * 10^7 + 3.447,57 * \text{clinker prodotto [t]}$ <b>Int. Confidenza 99%</b>						
	$R^2$	R	$P_{\text{value}}$	N	$R_{\text{crit}} \text{ (bidirezionale)} \alpha=0,05$	$R_{\text{crit}} \text{ (bidirezionale)} \alpha=0,01$
MJ (t_clinker)	0,929	0,964	<0,0001	29	0,3809	0,4869

Tabella 28 - Analisi di regressione tra consumo termico per fase di Cottura delle materie prime e le tonnellate di clinker: Equazione della retta di regressione ed indici statistici

In Tabella 29 è riportato l'IPE medio del consumo termico della fase di Cottura delle materie prime e la relativa deviazione standard di tale fase del processo.

Determinazione campo esistenza ed IPE reale: media +/- dev.stnd.				
Campo variazione produzione		IPE	Affidabilità	
Min	Max		Coeff di variazione	Livello di affidabilità
t_clinker	t_clinker	MJ/ t_clinker		
141.558	1.097.000	3.505 ± 247	7%	<b>ALTA</b>

Tabella 29 - fase di Cottura delle materie prime: IPE termico

### Numero di cicloni

Dei siti in cui è presente il Processo completo di produzione del cemento e quindi la fase di Cottura delle materie prime, solo 23 forniscono il numero di stadi o cicloni del forno di cottura. In particolare:

- in 11 dei 23 siti il numero di cicloni è pari a 4;
- in 12 dei 23 siti il numero di cicloni è pari a 5.

Nella *Tabella 30* sono mostrati i valori dell'IPE medio Termico della fase di Cottura delle materie prime (espresso in MJ/t\_clinker) in funzione del numero di cicloni: come si può osservare dalla tabella, l'IPE è inversamente proporzionale al numero di cicloni adottati.

Determinazione campo esistenza ed IPE reale: media +/- dev.stnd. Prodotto Finale					
Campo variazione produzione		IPE	Affidabilità		
Min	Max		Numero di cicloni	Coeff di variazione	Livello di affidabilità
t_clinker	t_clinker	MJ/ t_clinker			
142.000	860.000	3.609 ± 291	4	8%	ALTA
207.000	1.097.000	3.431 ± 214	5	6%	ALTA

*Tabella 30 - fase di Cottura delle materie prime: IPE Termico in funzione del numero di cicloni*

### **6.3.3 Indici di prestazione energetica specifici (IPEs) - Servizi Ausiliari**

Anche per le aree funzionali comprese all'interno dei Servizi Ausiliari si è proceduto alla determinazione della retta di regressione dei consumi rispetto alla produzione e dell'IPE medio.

#### **6.3.3.1 Produzione di aria compressa**

Per la fase di Produzione di aria compressa il campione è costituito da 6 siti. Il consumo di tale fase è di tipo elettrico. La retta di regressione dei consumi elettrici della fase di Produzione di aria compressa relativa al campione dei 6 siti è stata ricavata in funzione della quantità di aria compressa prodotta, espressa in Nm<sup>3</sup> ed è mostrata in *Figura 30*, mentre nella *Tabella 31* sono riassunti i parametri della regressione stessa.

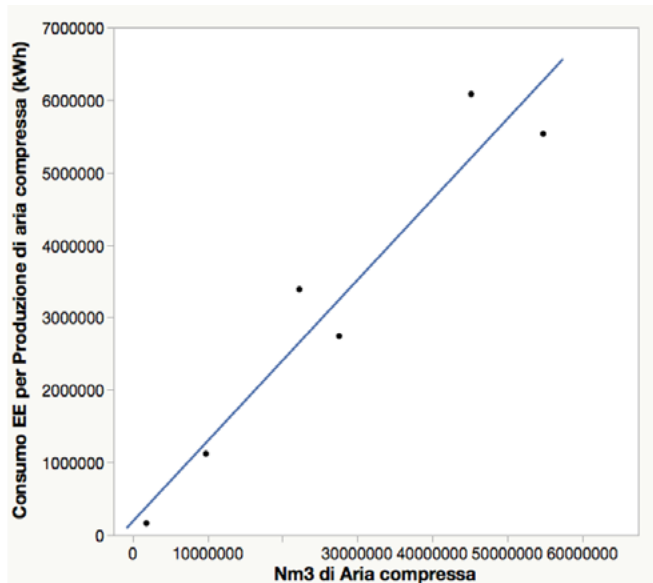


Figura 30 - Analisi di regressione tra consumo elettrico per la Produzione di aria compressa e l'aria compressa prodotta

kWh = 178.122 + 0,11 * aria compressa prodotta [Nm <sup>3</sup> ] Int. Confidenza 99%						
	R <sup>2</sup>	R	P <sub>value</sub>	N	R <sub>crit</sub> (bidirezionale) α=0,05	R <sub>crit</sub> (bidirezionale) α=0,01
kWh (Nm <sup>3</sup> _aria compressa)	0,921	0,960	0,0024	6	0,7067	0,8343

Tabella 31 - Analisi di regressione tra consumo elettrico per la Produzione di aria compressa e l'aria compressa prodotta: Equazione della retta di regressione ed indici statistici

In Tabella 32 è riportato l'IPE medio del consumo elettrico della fase di Produzione di aria compressa e la relativa deviazione standard.

Determinazione campo esistenza ed IPE reale: media +/- dev. stnd.				
Campo variazione produzione		IPE	Affidabilità	
Min	Max		Coeff di variazione	Livello di affidabilità
Nm <sup>3</sup> di aria compressa	Nm <sup>3</sup> di aria compressa	kWh/Nm <sup>3</sup> di aria compressa		
1.900.000	55.000.000	0,114 ± 0,025	22%	<b>MEDIA</b>

Tabella 32 - Produzione di aria compressa: IPE elettrico



### 6.3.3.2 Pompaggio acqua di processo

Per la fase di Pompaggio dell'acqua di processo il campione è costituito da 10 siti che forniscono il valore della quantità di acqua pompata. Il consumo di tale fase è di tipo Elettrico.

La retta di regressione dei consumi Elettrici della fase di Pompaggio dell'acqua di processo non è riportata in quanto poco affidabile e significativa.

Per la fase di Pompaggio dell'acqua di processo si riporta solo l'IPE medio (Tabella 33) del consumo Elettrico e la relativa deviazione standard.

Determinazione campo esistenza ed IPE reale: media +/- dev.stnd.				
Campo variazione produzione		IPE	Affidabilità	
Min	Max		Coeff di variazione	Livello di affidabilità
m <sup>3</sup> di acqua pompata	m <sup>3</sup> di acqua pompata	kWh/m <sup>3</sup> di acqua pompata		
12.000	174.000	14,56 ± 8,24	57%	<b>MEDIA</b>
174.000	961.000	2,05 +/- 1,43	70%	<b>BASSA</b>

Tabella 33 - Pompaggio acqua di processo: IPE elettrico

### 6.3.3.3 Macinazione coke

Per la fase di Macinazione coke il campione è costituito da 27 siti. Il consumo di tale fase è di tipo Elettrico.

La retta di regressione dei consumi Elettrici della fase di Macinazione coke relativa al campione dei 27 siti è stata ricavata in funzione della quantità di polverino prodotto, espressa in t ed è mostrata in *Figura 31*, mentre nella *Tabella 34* sono riassunti i parametri della regressione stessa.

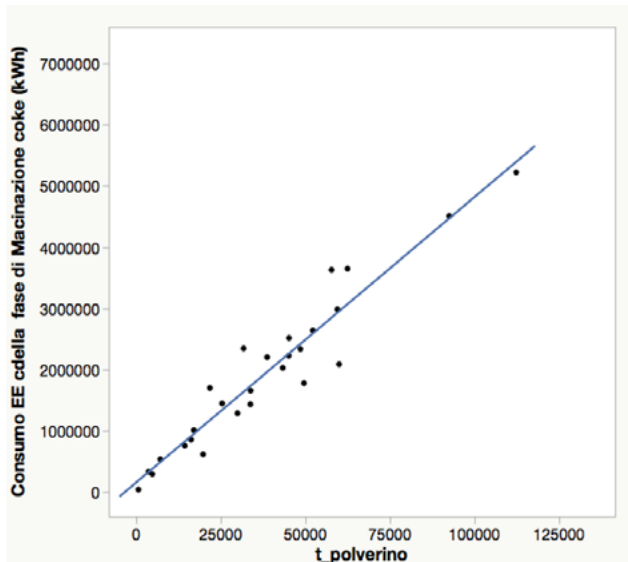


Figura 31 - Analisi di regressione tra consumo elettrico per la fase di Macinazione del coke e le tonnellate di polverino

kWh = 156.186 + 46,57 * t_ polverino Int. Confidenza 99%						
	R <sup>2</sup>	R	P <sub>value</sub>	N	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> α=0,05	R <sub>crit (bidirezionale)</sub> α=0,01
Mj (t_ polverino)	0,916	0,957	< 0,0001	27	0,3809	0,4869

Tabella 34 - Analisi di regressione tra consumo elettrico per la fase di Macinazione del coke e le tonnellate di polverino: Equazione della retta di regressione ed indici statistici

In Tabella 35 è riportato l'IPE medio del consumo Elettrico della fase di Macinazione coke e la relativa deviazione standard. Nella tabella è riportata anche l'affidabilità dell'IPE Elettrico medio di tale fase del processo.

Determinazione campo esistenza ed IPE reale: media +/- dev. stnd.				
Campo variazione produzione		IPE	Affidabilità	
Min	Max		Coeff di variazione	Livello di affidabilità
t_polverino	t_polverino	kWh/t_polverino		
553	16.000	69,74 ± 14,83	21%	<b>MEDIA</b>
16.000	112.000	51,37 +/- 11,34	22%	<b>MEDIA</b>

Tabella 35 - Macinazione coke: IPE elettrico

### 6.3.4 Indici di prestazione energetica specifici (IPEs) - Servizi Generali

Per quanto riguarda i Servizi Generali sono stati presi in considerazione i consumi elettrici per l'Illuminazione e quelli termici per il Riscaldamento ambienti di lavoro. Tuttavia per l'Illuminazione, nonostante 27 siti avessero fornito i dati di consumo Elettrico e superficie servita, non è stata ottenuta una elaborazione affidabile, mentre per il Riscaldamento ambienti di lavoro solo due siti forniscono il dato di superficie servita, quindi non si è potuto procedere all'elaborazione.

## 6.4 Il cemento bianco

La produzione di cemento bianco è poco diffusa nel territorio nazionale. La caratteristica peculiare del cemento bianco è l'assenza di colorazione che lo rende adatto ad applicazioni particolari, soprattutto in ambito architettonico.

La norma UNI 197/1, non contempla il colore tra le caratteristiche qualificanti di un cemento. I cementi bianchi quindi sono solo dei cementi, che garantiscono di possedere anche un determinato "colore", il quale richiede però un processo produttivo, a partire dalle materie prime utilizzate, differente da quello dei corrispondenti cementi grigi.

La produzione del cemento bianco parte dalla produzione di un *clinker* bianco, che differisce dal grigio in quanto materie prime impiegate devono essere "pure", soprattutto per quanto riguarda il loro contenuto in elementi di transizione, primi fra tutti Cromo e Ferro. Tale caratteristica rende la miscela di materie prime del bianco di minore cuocibilità determinando, nonostante l'aggiunta di fluorite come fondente, dei consumi Termici della fase di Cottura del *clinker* maggiori rispetto a quelli del cemento grigio. I maggiori consumi termici per la produzione del *clinker* bianco rispetto al grigio sono anche correlati con il fatto che, il repentino raffreddamento del *clinker* in uscita dal forno con la tempra in acqua, rende non recuperabile il calore latente del *clinker* stesso peggiorando quindi l'efficienza dell'intero processo rispetto al grigio.

Inoltre, a differenza del grigio, il *clinker* bianco deve subire un brusco raffreddamento, necessario per bloccare nella giusta forma cristallina i costituenti principali ed evitare l'ossidazione del ferro, così da garantire le necessarie caratteristiche cromatiche. A tale scopo il raffreddamento avviene tramite tempra in acqua con eccesso di acqua, in modo da garantire un raffreddamento omogeneo di tutte le particelle del *clinker* qualsiasi sia la loro distribuzione granulometrica. La necessità di tempra con eccesso di acqua comporta una successiva fase di essiccazione del *clinker* bianco per eliminare l'umidità in eccesso, con conseguente dispendio di energia termica.

Infine, la necessità di utilizzo di sabbia silicea in sostituzione del caolino, a causa della sua difficile reperibilità comporta:

- la necessità di una maggiore finezza della farina per garantire la cuocibilità, con un conseguente aumento del consumo Elettrico della fase di Macinazione delle MP;
- la perdita delle prestazioni meccaniche del *clinker* e di conseguenza un aumento del consumo Elettrico della fase di Macinazione del *clinker* per ottenere un cemento di pari caratteristiche.

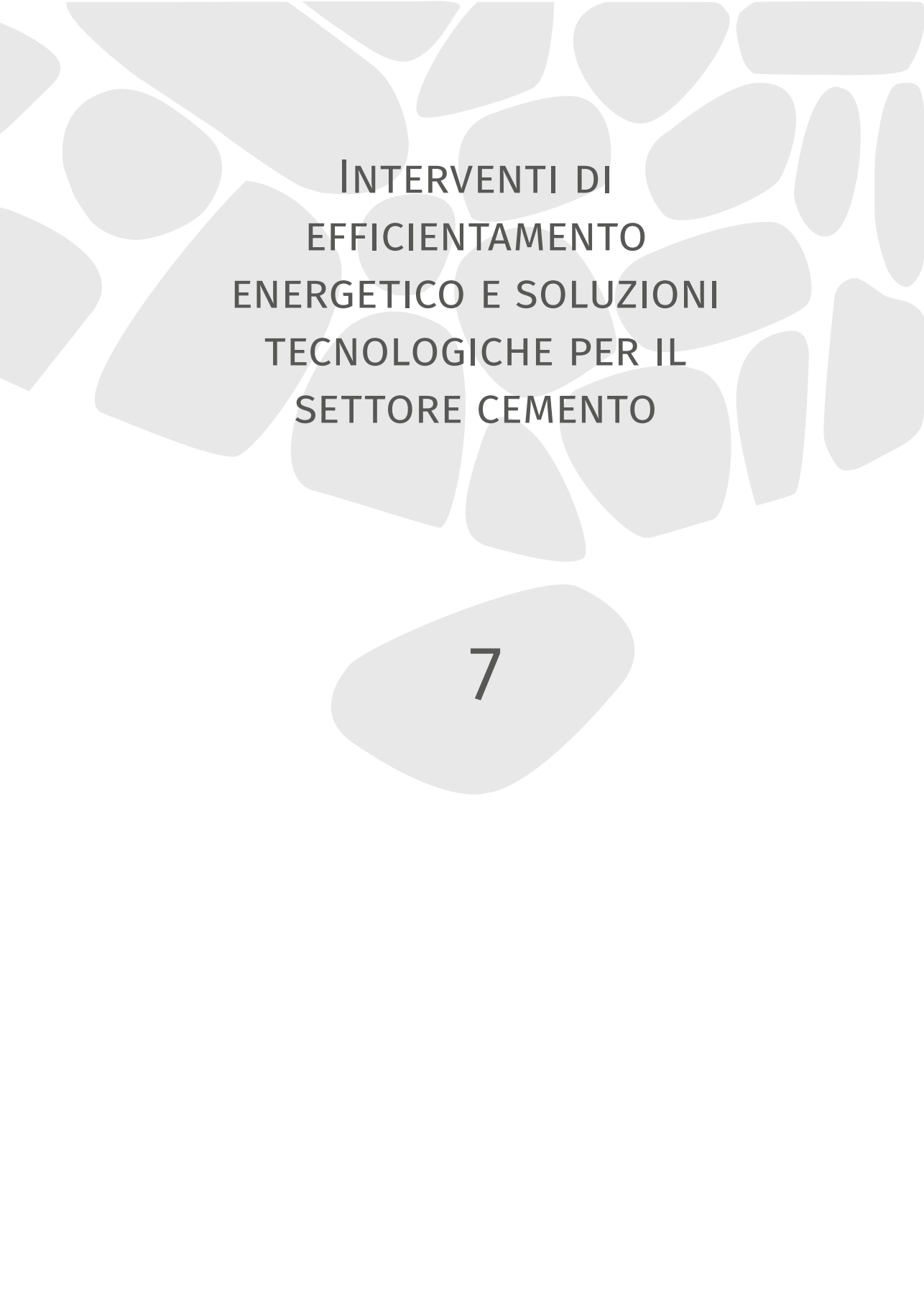
Per tutte queste peculiari caratteristiche il processo di produzione del cemento bianco comporta maggiori consumi sia Elettrici che Termici rispetto al grigio.

In particolare quindi i consumi per la produzione del cemento bianco (ciclo completo) risultano essere:

- del 70% circa maggiori per quanto riguarda il consumo Elettrico rispetto a quelli imputabili al ciclo completo di produzione del cemento grigio.
- del 50% circa maggiori per quanto riguarda il consumo Termico rispetto a quelli imputabili al ciclo completo di produzione del cemento grigio.

Attualmente l'unico impianto operativo in Italia usa una tempra a dosaggio stechiometrico di acqua che assicura ottime prestazioni energetiche e ha eliminato la necessità di essiccare il *clinker* prodotto.





INTERVENTI DI  
EFFICIENTAMENTO  
ENERGETICO E SOLUZIONI  
TECNOLOGICHE PER IL  
SETTORE CEMENTO

7

## 7 Interventi di efficientamento energetico e soluzioni tecnologiche per il settore del cemento

In questo capitolo vengono rappresentate le principali soluzioni tecnologiche di efficientamento energetico presenti oggi sul mercato.

Vengono quindi elencati i principali interventi di efficientamento energetico suddiviso per le principali fasi del processo.

Inoltre vengono proposti anche i principali interventi che potrebbero essere presi in considerazione per l'efficientamento degli impianti ausiliari.

Scopo del presente capitolo è quello di fornire un elenco il più completo possibile delle soluzioni tecnologiche che allo stato dell'arte potrebbero essere considerate per l'efficientamento energetico del sito. Ovviamente l'individuazione di un possibile intervento di efficientamento non può prescindere dalla peculiarità specifica del sito produttivo, da un'analisi di fattibilità ed un'analisi costo-beneficio.

Gli interventi proposti sono quindi suddivisi per le principali fasi di processo e rappresentati in tabelle dove ciascuna fase viene suddivisa ulteriormente nelle sue componentistiche caratteristiche principali (oggetto della soluzione) e per ciascuna di queste vengono proposte una o più soluzioni tecnologiche (Soluzione), accanto ad ogni soluzione tecnologica vengono riportati i riferimenti bibliografici utili per eventuali approfondimenti (Riferimenti) e infine eventuali note e contributi di esperti dell'associazione di categoria che forniscono ulteriori informazioni riguardo la soluzione individuata.

### 7.1 Preparazione delle materie prime

La preparazione delle materie prime prevede la riduzione delle dimensioni delle materie prime provenienti dalle cave e la successiva miscelazione per ottenere un impasto omogeneo e garantire così la giusta composizione chimica richiesta per la produzione del *clinker* e quindi del cemento. Le materie prime necessarie ad ottenere il cemento sono materie naturali contenenti carbonato di calcio (come

ad esempio il calcare) e silicati di alluminio (come l'argilla). Questa fase è responsabile di consumi di energia importanti in un cementificio [10]. All'interno della preparazione delle materie prime si possono individuare le seguenti sottofasi: 1) frantumazione, 2) controllo qualità 3) pre-omogeneizzazione, 4) produzione melma (tipica solamente dei processi umidi e semi-umidi) 5) macinazione materie prime e 6) omogeneizzazione. La presenza di alcune delle fasi dipende dalla tipologia di processo: secco, semi-secco, umido o semi-umido.

### 7.1.1 Frantumazione

Il primo processo a cui vengono sottoposte le materie prime è la frantumazione, infatti le materie prime provenienti dalle cave hanno dimensioni comprese tra i 50 ed i 100 mm [11] e dovranno pertanto inizialmente essere ridotte di dimensioni ai fini di essere sottoposte ad ulteriori processi. Le strategie per ridurre i consumi energetici delle tecnologie di frantumazione sono riepilogate in *Tabella 36*, nella quale la 1° colonna indica il macchinario su cui l'intervento agisce, la 2° fornisce una descrizione dell'intervento, mentre la 3° il riferimento bibliografico consultabile per avere ulteriori informazioni sull'intervento.

Frantumazione		
Oggetto della soluzione	Soluzione	Riferimento
Feeder	Installare moderni dosatori gravimetrici per una maggior efficienza di approvvigionamento del materiale al frantoio	[12]
Screening	Installare dei dispositivi per lo <i>screening</i> preliminare	[12]
	Migliorare l'efficienza dei dispositivi di <i>screening</i> tramite design efficienti	[13]
Frantoio	Installare un frantoio a martelli (preferibilmente con un contenuto di umidità della materia prima in ingresso inferiore al 10%)	[12]
	Installazione di un frantoio a martelli birotore (umidità inferiore al 10% è preferibile) con o senza griglia	[14]
	Installazione di un frantoio a impatto compatto (anche detto monorotore a urto)	[14] [15]



Frantumazione		
Frantoio	Installazione di un frantoio a impatto (anche detto birotore a urto)	[12]
	Installazione di un frantoio a mascelle (anche detto a ginocchiera)	[12]
	Installazione di un frantoio a doppia ginocchiera	[14]
	Installazione di un frantoio rotativo	[12]
	Installazione di un frantoio a rulli (cilindrica), consumo stimato per azionarli pari a 0,2-0,3 kWh/ton	[12]
	Installazione di un frantoio a rulli dentato (i denti garantiscono una miglior distribuzione delle forze in gioco)	[14]
	Installazione di un frantoio mono-rullo dentato	[14]
	Installazione di un frantoio semi-mobile o mobile	[12]

Tabella 36 - Soluzioni tecnologiche relative alla fase di frantumazione

### 7.1.2 Controllo qualità

Prima di inserire la materia prima all'interno del forno, l'impasto presente all'interno dei silos e dei serbatoi di omogeneizzazione viene sottoposto a controlli di qualità per verificarne la corretta uniformità e composizione chimica. Oltre a questa fase di controllo, nella maggior parte degli impianti produttivi, vengono effettuati ulteriori controlli intermedi alle varie fasi di processo (frantumazione, macinazione e così via). Si differenzia inoltre un controllo di tipo continuo da un controllo di tipo discontinuo [16]. Le principali strategie per il controllo di qualità sono riepilogate in Tabella 37.

Controllo qualità		
Oggetto della soluzione	Soluzione	Riferimento
Laboratorio raggi x Screening	Installazione di un laboratorio XRF (x-ray fluorescence)	[16]
	Installazione di un laboratorio XRF (x-ray fluorescence) automatizzato	[16]
	Installazione di un laboratorio con spettrometro EDXRF robotizzato e automatizzato per campionamento della miscela di materiale in ingresso al mulino	[16]

Controllo qualità		
Spettrometro raggi x	Installazione di uno spettrometro EDXRF di tipo <i>cross-belt XRF</i> sul nastro trasportatore dal sito di pre-omogeneizzazione al mulino	[16]
Laboratorio raggi $\gamma$	Installazione di un laboratorio con spettrometro a raggi gamma ( <i>Batch g-ray</i> )	[16]
Spettrometro raggi $\gamma$	Installazione di uno spettrometro a raggi gamma in uscita dal frantoio ( <i>Chute g-ray</i> )	[16]
	Installazione di uno spettrometro a raggi gamma di tipo <i>cross-belt g-ray</i> sul nastro trasportatore dal sito di pre-omogeneizzazione al mulino	[16]
	Installazione di uno spettrometro a raggi gamma <i>slurry g-ray</i> in uscita dal frantoio	[16]

Tabella 38 - Soluzioni tecnologiche relative alla fase di pre-omogeneizzazione

### 7.1.3 Pre-omogeneizzazione

La pre-omogeneizzazione è una fase di produzione tipica dei processi secchi e semi-secchi, che viene effettuata nel caso in cui le materie prime vengano lavorate separatamente in diversi frantoi. Questa fase ha lo scopo di garantire maggiore omogeneità nella composizione delle materie prime al fine di avere una minore deviazione nella farina prodotta per le fasi successive. Le strategie per ridurre i consumi energetici delle tecnologie di pre-omogeneizzazione sono riepilogate in Tabella 38.

Controllo qualità		
Oggetto della soluzione	Soluzione	Riferimento
Stacker	Installazione di uno <i>stacker</i> circolare	[15]
	Installazione di uno <i>stacker</i> longitudinale	[15]
Reclaimer	Installazione di un <i>reclaimer</i> circolare	[15]
	Installazione di un <i>reclaimer</i> longitudinale	[15] [17]

Tabella 37 - Soluzioni tecnologiche relative alla fase di controllo qualità

### 7.1.4 Essiccazione

Tipica del processo a secco. Può avvenire separatamente, oppure all'interno del mulino di macinazione. In quest'ultimo caso si utilizzano i gas derivanti dal processo di cottura ed è per questo che i mulini necessitano di una sezione

trasversale più ampia. Separando le due fasi ciascuna operazione risulta più efficace ed efficiente, garantendo un minor consumo energetico [15]. Le strategie per ridurre i consumi energetici delle tecnologie di essiccazione sono riepilogate in *Tabella 39*.

Essiccazione		
Oggetto della soluzione	Soluzione	Riferimento
Essiccatore	Installazione di un essiccatore rotante ( <i>rotatory drum dryer</i> ) a flusso parallelo	[19]
	Installazione di un essiccatore rotante ( <i>rotatory drum dryer</i> ) a flusso contrapposto	[19]
	Installazione di un essiccatore solare	[20]
	Installazione di un essiccatore rapido	[15]
	Installazione di un pre-essiccatore prima di un mulino a sfere o a tubo	[15]
	Installazione di un filtro pressa (per processi umidi e semi-umidi)	[10]
	Installazione di un <i>dryer-pulverizer</i> : apposito macchinario per frantumazione ed essiccazione	[15]
	Installazione di un essiccatore a impatto	[15]
	Installazione di un <i>tandem drying grinding</i> (combinazione di mulino a martelli e mulino a sfere ventilato)	[15]
	Installazione di separatori ad aria meccanici	[15]

### 7.1.5 Macinazione materie prime

La macinazione ha lo scopo di ridurre in polvere il materiale proveniente dai frantoi ed è pertanto una delle fasi con il maggior consumo di energia elettrica [10]. La macinazione riduce la farina fino a farla diventare polvere. Il principale macchinario impiegato in questa fase è denominato mulino.

La soluzione più comune è costituita da un solo mulino operante a circuito chiuso con separatore dinamico. Il rifiuto del separatore viene rimandato al mulino per la successiva raffinazione. Meno comune la soluzione con due molini di cui uno sgrossatore ed uno finitore. Le principali tecnologie utilizzate nella fase di macinazione delle materie prime sono riepilogate in *Tabella 40*.

Macinazione materie prime		
Oggetto della soluzione	Soluzione	Riferimento
Sistemi di trasporto	Installazione di un nastro pesatore per le materie prime in ingresso al mulino	[10]
Mulino	Installazione di un mulino tubolare a scarico centrale	[10]
	Installazione di un mulino tubolare a circuito chiuso con scarico finale	[10]
	Installazione di un mulino a sfere	[10]
	Installazione di un mulino a sfere ventilato	[10]
	Installazione di un mulino a sfere a scarico centrale	[10]
	Installazione di un mulino a sfere a circuito chiuso con scarico finale	[10]
	Installazione di un mulino a rulli orizzontale	[10] [18] [21]
	Installazione di un mulino autogeno	[12]
	Installazione di un mulino a rulli ad alta pressione	[12]
	Installazione di pista e mulino verticale a sfere	[14]
	Installazione di un mulino a rulli verticale	[22] [23] [24]
	Macinare separatamente i materiali in ingresso al mulino in base alla loro durezza	[23]
	Sostituire e migliorare il materiale abrasivo delle sfere	[22]
	Installare una pressa a rulli in aggiunta ad un mulino a sfere	[22] [23]
	Macinare separatamente i materiali in ingresso al mulino in base alla loro finezza	[23]
	Installazione di un mulino <i>dopplerotator</i>	[25]
Installazione di un mulino <i>aereofoll</i>	[15]	
Installazione di un mulino ventilato	[15]	
Mulino/Separatore	Installazione di un mulino con un separatore dinamico e cicloni con filtro di processo	Soluzione estratta dalle diagnosi energetiche

Macinazione materie prime		
Separatore	Installazione di un separatore a gabbia rotante ad alta efficienza	[10] [12] [23]
	Installazione di un separatore ad aria ad alta efficienza	[10] [22] [26]
	Installazione di un separatore a griglia statica	[15]
Ventola del mulino	Installare un Sistema a tre ventole, di cui una in carica delle operazioni del mulino a rulli verticale	[21]
Caldaie	Sostituire le caldaie con caldaie più efficienti	Soluzione estratta dalle diagnosi energetiche
Mulino e cicloni	Eliminazione di 2 cicloni a seguito dell'introduzione di un elettrofiltro ed un filtro a maniche per il mulino	Soluzione estratta dalle diagnosi energetiche

Tabella 40 - Soluzioni tecnologiche relative alla fase di macinazione materie prime

### 7.1.6 Omogeneizzazione

Il processo di omogeneizzazione è comune a tutti gli impianti di produzione del cemento e si rende necessario per ottenere in ingresso al forno una miscela cruda il più uniforme possibile [15]. È infatti necessaria a garantire le caratteristiche chimico-fisiche finali del cemento prodotto. Una farina non uniforme in ingresso al forno genererebbe, inoltre, maggior costi legati al processo di cottura stesso in quanto si registra un aumento del combustibile necessario alla combustione, con conseguente maggiore usura dei materiali refrattari tipici del forno. Le strategie per ridurre i consumi energetici delle tecnologie di omogeneizzazione delle materie prime sono riepilogate in *Tabella 41*.

Omogeneizzazione		
Oggetto della soluzione	Soluzione	Riferimento
Silo di miscelazione	Rimuovere le perdite nel circuito dell'aria compressa	[10] [27]
	Dimensionare correttamente il circuito dell'aria	[10]

Omogeneizzazione		
Silo di miscelazione	Installazione di un silo di miscelazione a flusso controllato a multi-uscita	[25]
	Installazione di un silo di miscelazione a flusso controllato a cono	[25]
	Installazione di un silo di miscelazione a turbolenza	[25]
	Ripristinare l'integrità strutturale del silo di miscelazione ed eliminare le perdite nella sua struttura	[27]
	Installazione di un silo di miscelazione gravitazionale	[18] [24]
Serbatoio di miscelazione	Installazione di un serbatoio di miscelazione	[10]
Agitatore del serbatoio di miscelazione	Installazione di agitatori ad alta efficienza	[10]
Soffiante del silo di miscelazione	Sostituire soffianti con compressori a vite dotati di inverter	Soluzione estratta dalle diagnosi energetiche

Tabella 41 - Soluzioni tecnologiche relative alla fase di omogeneizzazione

## 7.2 Cottura e raffreddamento

La farina cruda ottenuta durante le precedenti lavorazioni subisce con un progressivo riscaldamento i processi di calcinazione e de-carbonatazione. Una volta raggiunta una temperatura di circa 1400-1500°C, si completa la decarbonatazione e ha inizio il processo di sinterizzazione, ossia la formazione dei minerali del *clinker*.

### 7.2.1 Preriscaldamento

La fase di cottura viene preceduta da un preriscaldamento per i processi secchi, semi-secchi e semi-umidi. In questi processi l'impasto viene riscaldato mediante flusso di aria calda in uscita dal forno. Le strategie per ridurre i consumi energetici delle tecnologie di preriscaldamento sono riepilogate in Tabella 42.

Preriscaldamento			
Oggetto della soluzione	Soluzione	Riferimento	Commenti da esperti di Federbeton
Preriscaldatore	Installazione di un preriscaldatore a cicloni con calcinatore	[10]	
	Installazione di un preriscaldatore a griglia con calcinatore	[10]	
	Installazione di un preriscaldatore a cicloni	[10]	
	Installazione di un preriscaldatore a griglia	[10]	
	Recupero gas caldi dalla torre di preriscaldamento	[10]	
Cicloni	Incrementare il numero dei cicloni nella torre di preriscaldamento	[18] [21] [23]	Soluzione trovata in letteratura, ma attualmente obsoleta
	Ottimizzare il numero di cicloni in funzione delle caratteristiche delle materie prime e del combustibile utilizzati	[10]	
	Ridurre il numero di cicloni da 16 a 12 nel preriscaldatore a griglia Lepol	Soluzione estratta dalle diagnosi energetiche	
	Sostituire il preriscaldatore a cicloni con un preriscaldatore a cicloni a bassa caduta di pressione	[18] [21] [23] [28]	
	Installazione di ventole ad alta efficienza nel preriscaldatore	[18] [21]	
Ventola del preriscaldatore	Sostituire il calcinatore con un calcinatore più efficiente	[29]	
Calcinatore	Installazione di un calcinatore con un alto rapporto solido/gas	[12] [27]	
Bruciatori	Sostituire i bruciatori del calcinatore	[12]	

Tabella 42 - Soluzioni tecnologiche relative alla fase di preriscaldamento

## 7.2.2 Cottura

La cottura è la fase principale del processo di produzione del cemento ed avviene per mezzo di un forno. Esistono due tipologie principali di forno denominate forno a condotto orizzontale e forno a condotto verticale, anche se questi ultimi utilizzati in passato risultano ormai obsoleti. Il forno rappresenta l'organo più energivoro dell'impianto produttivo. Si può quindi intuire come una corretta progettazione e adozione di soluzioni costruttive mirate al risparmio energetico sia fondamentale per questo macchinario. Le strategie per ridurre i consumi energetici delle tecnologie di cottura sono riepilogate in *Tabella 43*.

Preriscaldamento			
Oggetto della soluzione	Soluzione	Riferimento	Commenti da esperti di Federbeton
Dosatori	Installazione di dosatori gravimetrici per un approvvigionamento efficiente della farina al forno	[10]	
Forno	Installazione di un forno rotatorio	[10]	
	Installazione di un forno verticale	[10]	
	Migliorare il materiale refrattario del rivestimento del forno	[12] [24] [28]	
	Installazione di un forno per cemento a letto fluido	[29]	Soluzione emergente
	Migliorare il sistema di combustione	[12] [29]	
	Minimizzare le perdite d'aria e l'ingresso di aria/gas non voluti all'interno del forno. In alternativa sostituire le guarnizioni in ingresso e uscita dal forno	[10] [28]	
	Stabilizzare il rivestimento esterno del forno	[12] [29]	
	Minimizzare il flusso di bypass	[12] [29]	
Installazione di un sistema di combustione indiretta	[12] [29]		



Preriscaldamento			
Forno	Ridurre la pressione del gas proveniente dalla rete nazionale per mezzo di una turbina. La turbina può essere connessa a un generatore per produrre energia elettrica.	[12]	
	Sostituire il forno esistente con uno a capacità maggiore	[23] [24]	
	Installazione di un sistema di conduzione automatica del forno	Soluzione estratta dalle diagnosi energetiche	
Ventole del forno	Installazione di ventole di raffreddamento del forno caratterizzate da un diametro maggiore	[10]	
Sistema di trasporto del combustibile	Installazione di dosatori gravimetrici per approvvigionare in modo efficiente il combustibile solido	[12]	
	Installazione di pompe per combustibile liquido	[12]	
Bruciatori	Installazione di bruciatori a singolo canale	[12]	
	Installazione di bruciatori multi-canale	[12]	
	Installazione di un sistema di dosaggio avanzato in ingresso al bruciatore principale per ottimizzare i consumi	Soluzione estratta dalle diagnosi energetiche	
	Installazione di esaustori con inverter per ottimizzare la potenza erogata durante il processo di cottura	Soluzione estratta dalle diagnosi energetiche	

Tabella 43 - Soluzioni tecnologiche relative alla fase di cottura

### 7.2.3 Raffreddamento

In uscita dal forno il *clinker* viene raffreddato mediante uno o più raffreddatori, fino a raggiungere temperature comprese tra 120 e 200°C. Questo passaggio si rende necessario per consolidare la microstruttura del *clinker* e recuperare la maggior quantità possibile di calore. Per raffreddare il *clinker* si utilizza generalmente un flusso d'aria, che, spostandosi controcorrente rispetto al *clinker*, scambia calore

con quest'ultimo. In uscita al raffreddatore l'aria riscaldata può essere poi utilizzata come comburente per i vari bruciatori del forno o dei calcinatori (se presenti), oppure per preriscaldare l'impasto prima dell'ingresso nel forno. La quantità di aria che passa per i raffreddatori è solitamente determinata dalla quantità di aria comburente che serve al processo di combustione. Le strategie per ridurre i consumi energetici delle tecnologie di raffreddamento sono riepilogate in *Tabella 44*.

Raffreddamento			
Oggetto della soluzione	Soluzione	Riferimento	Commenti da esperti di Federbeton
Raffreddatore	Installazione di un refrigeratore a tubo	[12]	Soluzione trovata in letteratura, ma attualmente obsoleta
	Installazione di un refrigeratore planetario	[12]	Soluzione trovata in letteratura, ma attualmente obsoleta
	Installazione di un refrigeratore a grata itinerante	[12]	
	Installazione di un refrigeratore a grata oscillante	[12]	
	Sostituire il sistema di ventilazione del refrigeratore con uno più efficiente	[12] [23] [24]	Soluzione emergente
	Aggiungere una griglia statica ad una grata itinerante	[12] [23] [24]	
	Installazione di un refrigeratore verticale	[12]	
	Sostituire i refrigeratori a grata esistenti con refrigeratori più efficienti	[12]	
	Ottimizzare il recupero di energia nel refrigeratore per mezzo di una griglia statica	[12]	
	Installazione di un disco rotante di raffreddamento	[12]	
	Installazione di un raffreddatore rapido (solo per cemento bianco)	[12]	

Raffreddamento			
Raffreddatore	Installazione di un telaio a pendolo per le grate oscillanti	[17]	
Griglia	Sostituire le grate esistenti con grate più moderne ed efficienti	[12]	
	Sostituire le grate del refrigeratore oscillante con grate di seconda generazione	[12] [23]	
Tempra <i>Clinker Bianco</i>	Tempra stechiometrica ed eliminazione essiccazione <i>clinker bianco</i>	Soluzione estratta dalle diagnosi energetiche	Permette un sensibile risparmio di energia termica

Tabella 44 - Soluzioni tecnologiche relative alla fase di raffreddamento

### 7.3 Macinazione del cemento

La macinazione finale rappresenta una fase cruciale della produzione di qualsiasi tipo di cemento, infatti in quest'ultima parte il *clinker* in uscita dal refrigeratore viene macinato assieme a degli additivi per ottenere il cemento con le caratteristiche desiderate. In questa fase vengono usati macchinari e tecnologie simili alla precedente fase di macinazione dell'impasto delle materie prime, infatti, i vari additivi vengono inseriti in dosi precise all'interno dei mulini con il *clinker*. A differenza della precedente macinazione, la macinazione finale, se i costituenti molto umidi come pozzolana e loppa siano stati preventivamente essiccati (in caso contrario è necessario un certo apporto di calore anche nella macinazione), non richiede alcun apporto di calore in quanto il contenuto di acqua all'interno delle varie sostanze è trascurabile ed i mulini provvedono in autonomia all'essiccazione. Le strategie per ridurre i consumi energetici delle tecnologie della macinazione finale sono riepilogate in Tabella 45.

Macinazione finale			
Oggetto della soluzione	Soluzione	Riferimento	Commenti da esperti di Federbeton
Dosatori	Installazione di dispositivo dosatore per il materiale in ingresso al mulino	Soluzione estratta dalle diagnosi energetiche	

Macinazione finale			
Feeder	Ottimizzare il <i>feeding system</i> , installando sistemi più avanzati e efficienti	Soluzione estratta dalle diagnosi energetiche	
	Installazione di nastri dosatori per le materie in ingresso al mulino	[12]	
	Installazione di un regolatore di flusso di <i>clinker</i> in ingresso al mulino tubolare	[12] [29]	
Mulino	Installazione di un mulino a sfere a scarico finale con circuito chiuso	[12]	
	Installazione di un mulino a sfere a scarico finale con circuito aperto	[12]	
	Installazione di un mulino a rulli verticale	[12]	
	Installazione di un mulino a rulli orizzontale	[24]	
	Installazione di una pressa a rulli ad alta pressione	[12]	
	Installazione di un nastro pesatore per ciascun materiale in ingresso al mulino	[12]	
	Sostituzione delle ventole dei mulini con ventole ad alta efficienza	[12] [29]	
	Installazione di un mulino a rulli verticale prima del mulino a sfere	[12] [29]	Soluzione poco comune
	Installazione di una pressa a rulli prima del mulino a sfere	[12] [29]	
	Installazione di un <i>liner</i> di classificazione per il mulino a sfere in ingresso alla seconda camera	[12] [29]	
	Installazione di tecnologia al plasma	[29]	Soluzione emergente
	Installazione di tecnologia a ultrasuoni	[29]	Soluzione emergente
	Installazione di un sistema di conduzione automatica per il mulino a sfere	Soluzione estratta dalle diagnosi energetiche	
Ventole del mulino	Sostituire i ventilatori del mulino con modelli più efficienti	[21]	

Tabella 45 - Soluzioni tecnologiche relative alla fase di macinazione finale

## 7.4 Macinazione combustibile

La macinazione del combustibile è un processo che sfrutta tecnologie simili ai processi di macinazione delle materie prime e del *clinker*. La differenza principale rispetto ai due processi già descritti deriva dal fatto che in questa fase viene macinato il combustibile necessario al processo di cottura. Le strategie per ridurre i consumi energetici delle tecnologie della macinazione combustibile sono riepilogate in *Tabella 46*.

Macinazione combustibile		
Oggetto della soluzione	Soluzione	Riferimento
Sistema di trasporto del combustibile	Installazione di un nastro dosatore per le materie in ingresso al mulino	[12]
Mulino	Installazione di un mulino ventilato per il combustibile solido	[12]
	Installazione di un mulino a rulli verticale per il combustibile solido	[12]
	Installazione di una pressa a rulli per il combustibile solido	[18]
	Installazione di un mulino a urto per il combustibile solido	[12]
Separatore	Installazione di un separatore/classificatore ad alta efficienza	[24]

*Tabella 46 - Soluzioni tecnologiche relative alla fase di macinazione combustibile*

## 7.5 Trattamento e depolverizzazione dei gas di scarico

I gas di scarico in uscita dal forno, dal raffreddatore, dal preriscaldatore o dai mulini di macinazione delle materie prime hanno al loro interno sia ceneri che prodotti sviluppati nella combustione e pertanto non possono essere scaricati direttamente nell'ambiente in quanto produrrebbero un forte impatto ambientale. Prima di poter disperdere i fumi nell'ambiente è necessario trattarli rimuovendo le polveri e le sostanze inquinanti. Inoltre, a queste, non devono essere trascurate le polveri derivanti dalle sezioni del processo di produzione e che non producono gas di scarico (ad esempio: trasporto e deposito prodotti intermedi e finiti o la stessa macinazione del cemento), soggette anche queste a trattamenti di

depolverizzazione. Le tecnologie che possono essere prese in considerazione per il trattamento e depolverizzazione sia dei gas di scarico che delle polveri di processo sono rispettivamente riepilogate in *Tabella 47* e *Tabella 48*.

Trattamento dei gas di scarico			
Oggetto della soluzione	Soluzione	Riferimento	Commenti da esperti di Federbeton
Torre di raffreddamento	Installazione di una torre di raffreddamento	[12]	
SNCR	Installazione di un SNCR (difficile per forni lunghi)	[12]	Non possono essere considerate tecnologie che inducono un risparmio energetico
	Sostituire gli SNCR esistenti con SNCR più efficienti	[12]	
SCR	Installazione di un SCR di tipo "low dust"	[12]	Non possono essere considerate tecnologie che inducono un risparmio energetico
	Installazione di un SCR di tipo "high dust"	[12]	
	Sostituire gli SCR esistenti con SCR più efficienti	[12]	
Carboni attivi	Installazione di un sistema di riduzione delle emissioni a carboni attivi	[12]	
Scrubber umido	Installazione di un sistema a scrubber umido	[12]	

*Tabella 47 - Soluzioni tecnologiche relative alla fase di trattamento dei gas di scarico*

Trattamento dei gas di scarico			
Oggetto della soluzione	Soluzione	Riferimento	Commenti da esperti di Federbeton
Precipitatore elettrostatico	Installazione di un precipitatore elettrostatico (ESP)	[12]	

Trattamento dei gas di scarico			
Sistema di vibrazione ESP	Sostituire il sistema di vibrazione dell'ESP con uno più moderno ed efficiente	[12]	
Generatore del campo elettrostatico ESP	Sostituire il sistema generatore del campo elettrostatico dell'ESP con uno più moderno ed efficiente	[12]	
Sistema di pulizia	Installazione di un sistema di pulizia	[12]	
	Installazione di un sistema di pulizia a getto a bassa pressione per i filtri	[12]	
ESP e filtri	Installazione di un Sistema di filtraggio ibrido	[12]	
Sistema filtraggio polveri	Installazione di un elettrofiltro	Soluzione estratta dalle diagnosi energetiche	
	Installazione di un sistema di filtraggio polveri con filtri in tessuto a maniche cilindriche orizzontali	[12]	
	Installazione di un sistema di filtraggio polveri con filtri in tessuto a tasca orizzontali	[12]	I filtri a tasca orizzontale sono poco utilizzati
Separatore	Installazione di un separatore ad aria ad alta efficienza sull'uscita dei gas di scarico dal refrigeratore	[12]	

Tabella 48 - Soluzioni tecnologiche relative alla fase di depolverizzazione

## 7.6 Sistemi di trasporto

I sistemi di movimentazione e trasporto costituiscono un'importante parte di un impianto di produzione del cemento ed è pertanto possibile agire su questi per ottenere una riduzione dei consumi energetici. Le strategie per ridurre i consumi energetici delle tecnologie dei sistemi di trasporto sono riepilogate in *Tabella 49*.

Sistemi di trasporto		
Oggetto della soluzione	Soluzione	Riferimento
Sistemi di trasporto	Installazione di un elevatore a tazza per alimentare la materia prima al mulino	[18]
	Installazione di un elevatore a tazza per alimentare le materie prime al serbatoio di miscelazione	[21]
	Installazione di un sistema di trasporto efficiente per le materie in ingresso e in uscita al frantoio	[28]
	Installazione di un sollevatore a tazza per alimentare la farina al forno	[18] [24]
Sistemi di trasporto a nastro	Installazione di un nastro trasportatore per alimentazione essiccatore	[10]
	Installazione di un nastro trasportatore per alimentare il lavatoio (wash mill)	[10]
	Installazione di un nastro trasportatore per alimentare il serbatoio di miscelazione	[10]
	Installazione di un nastro trasportatore per alimentazione forno	[10]
	Installazione di un nastro trasportatore per alimentazione pelletizer	[10]
	Installazione di un nastro trasportatore per alimentazione preriscaldatore/calcinatore	[10]

Tabella 49 - Soluzioni tecnologiche relative ai sistemi di trasporto

## 7.7 Recupero calore

Il calore presente nei gas di scarico in uscita dal forno viene generalmente impiegato per l'essiccazione dei materiali. In generale tanto maggiore è il contenuto di umidità all'interno dei materiali e tanto meno calore si avrà in uscita al processo. Nel caso la disponibilità di potenza termica recuperata dal forno superi il fabbisogno per l'essiccazione della materia prima, si può recuperare il calore in eccesso ed utilizzarlo per altri processi, è possibile prevedere alcune ulteriori misure per recuperare il calore dei gas di scarico tramite l'installazione di varie tecnologie. Le strategie adottabili per il recupero calore sono riepilogate in *Tabella 50*.



Recupero calore		
Oggetto della soluzione	Soluzione	Riferimento
Sistema di recupero calore	Installazione di un separatore ad aria ad alta efficienza per scambio di calore con i fumi in uscita dal refrigeratore	[12]
	Installazione di una turbina a vapore per produzione di energia elettrica	[23]
	Installazione di una turbina ORC per produzione di energia elettrica	[23]
	Installazione di una turbina a ciclo Kalina per produzione di energia elettrica	[23]
Forno	Installazione di uno scambiatore di calore per recuperare energia termica dai fumi in uscita dal forno e pre-riscaldare l'olio diatermico per riscaldare il combustibile	Soluzione estratta dalle diagnosi energetiche
	Installazione di un Sistema di recupero calore per sfruttare i fumi in uscita dal forno e essiccare le materie prime	[10]
Refrigeratore	Installazione di un sistema per recuperare calore dai cascami termici del refrigeratore (utile per riscaldare gli uffici)	[12]

Tabella 50 - Soluzioni tecnologiche relative al recupero calore

## 7.8 Combustibili alternativi

Per ottenere dei vantaggi in termini di consumo energetico è possibile utilizzare fonti combustibili differenti rispetto a quelle standard. Le strategie adottabili in termini di combustibili alternativi sono riepilogate in *Tabella 51*.

Combustibili alternativi		
Oggetto della soluzione	Soluzione	Riferimento
Combustibile Forno	Sostituire petcoke di petrolio con combustibili solidi secondari (contenuto di biomassa dal 20% al 60%)	[23]
	Utilizzare pneumatici fuori uso come combustibile per il forno	[29]
	Utilizzare oli esausti come combustibile per il forno	[29]

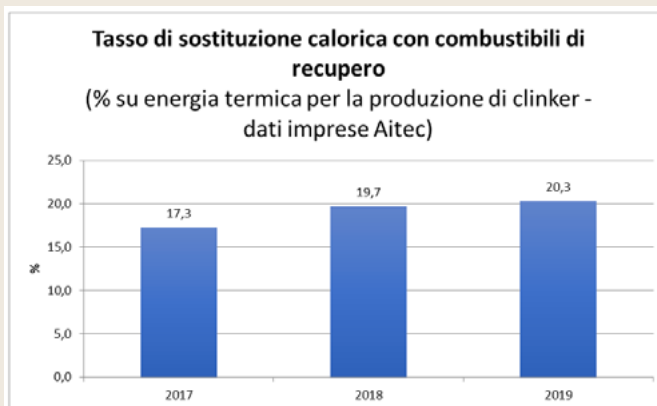
Tabella 51 - Soluzioni relative ai combustibili alternativi

## Potenzialità inespresse e vantaggi ambientali ed energetici nell'utilizzo del CSS.

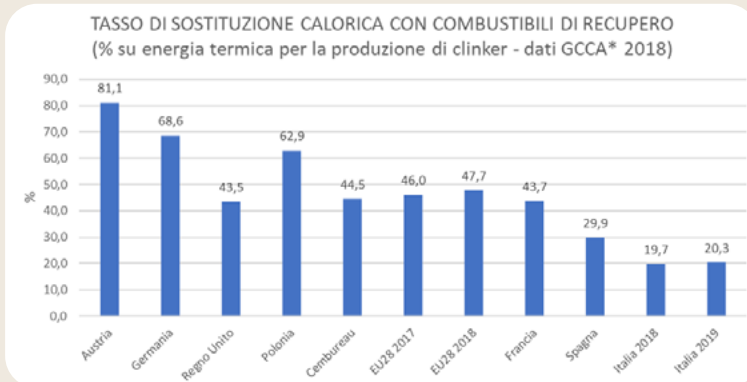
*Il CSS è il combustibile solido prodotto dal trattamento dei rifiuti non pericolosi urbani e speciali. Le caratteristiche di classificazione e di specificazione del CSS sono definite dalla norma tecnica UNI EN 15359[34] .*

*Il CSS-Combustibile è un CSS che ha cessato di essere rifiuto, divenendo un prodotto (un End of Waste), poiché conforme a criteri e requisiti definiti dal Decreto c.d. Clini (DM 22/2013). Pertanto è presente, insieme ad altri combustibili tradizionalmente utilizzati, nell'Allegato X alla Parte V del Codice dell'Ambiente. Il parco produttivo dell'industria cementiera italiana si compone attualmente di 27 cementerie a ciclo completo; meno della metà è attualmente autorizzata all'utilizzo di CSS. Nel 2019 sono state co-incenerite oltre 420.000 tonnellate di combustibili di recupero (pari ad un tasso di sostituzione del 20,3% a fronte del 48% medio europeo), cui ha corrisposto un totale di oltre 311.000 tonnellate di CO2 evitata grazie alla biomassa contenuta in tali combustibili di recupero. Di questo quantitativo, circa 283 mila tonnellate sono costituite da CSS e solo una quota irrisoria (circa 6.800 tonnellate, pari all'1,6%) è rappresentata da CSS-Combustibile utilizzato in sole due cementerie.*

*Le cementerie italiane potrebbero assorbire ben oltre queste quantità se venissero incrementati i volumi attualmente autorizzati, anche attraverso il rilascio delle autorizzazioni a quegli impianti ai quali finora è stata negata la possibilità di co-incenerire, soprattutto a causa dell'opposizione delle comunità locali, che condizionano l'operato delle amministrazioni.*



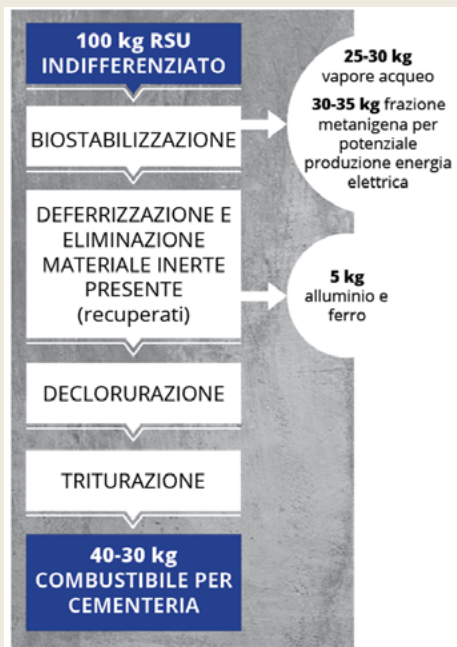
Fonte: Aitec



Fonte: \* Global Cement and Concrete Association (<https://gccassociation.org/gnrl>).

In base ad una stima effettuata da Federbeton, le potenzialità inesprese di utilizzo di CSS offerte dal settore del cemento sarebbero pari a 1 milione di tonnellate, che corrisponderebbero a 2,5 milioni di tonnellate di rifiuti non riciclabili (RSU indifferenziati, plasmix) da cui il CSS si origina. I rifiuti vengono infatti fortemente ridotti in quantità a seguito dei trattamenti fisico-meccanici subiti per diventare CSS e CSS-Combustibile (si confronti il diagramma di flusso seguente, sulla cui base è stata calcolata la riduzione in quantità dei rifiuti trattati per diventare CSS, che rappresenta un esempio indicativo, anche se non applicabile ad ogni tipologia di CSS prodotto).

Tali quantità, per le quali non esistono attualmente forme di gestione preferibili in base alla gerarchia europea, come riuso o riciclo, potrebbero pertanto essere sottratte al conferimento in discarica, all'export o all'incenerimento, riducendo nello stesso tempo la CO2 emessa dagli stabilimenti di produzione di cemento, grazie al contenuto di biomassa presente nei CSS (in media 30-40%), nonché le emissioni di ossidi di azoto e di ossidi zolfo, per le limitate quantità in peso di azoto e di zolfo presenti nel CSS rispetto ad un combustibile fossile.



Come mostrato nelle due infografiche seguenti, se si continuassero infatti a destinare i rifiuti non altrimenti riciclabili unicamente alla termovalorizzazione o peggio al conferimento in discarica, alle emissioni di CO<sub>2</sub> derivanti dalla combustione del fossile in cementeria, si aggiungerebbe la CO<sub>2</sub> emessa dal termovalorizzatore o la CO<sub>2</sub> e il metano provenienti dalla degradazione della componente organica dei rifiuti in discarica.



La co-combustione del CSS in cementeria dunque:

- sottrae la quota di CO<sub>2</sub> emessa dalla cementeria legata alla componente di biomassa presente nel CSS.
- evita completamente le emissioni di CO<sub>2</sub> e di tutti gli altri inquinanti derivanti dalla termovalorizzazione o dalla degradazione del rifiuto in discarica, per ogni quantitativo di rifiuto trasformato in CSS e destinato alla cementeria.

A supporto di quanto espresso, si fa riferimento ad un recente studio del Laboratorio REF Ricerche, il quale ha effettuato una stima dei vantaggi che si avrebbero in Italia applicando un tasso di sostituzione del combustibile fossile con CSS - Combustibile del 66%, in linea con quello avuto nel 2017 dalla Germania. Lo studio ha dimostrato che si eviterebbe l'emissione in atmosfera di 6,8 milioni di tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalenti grazie alla biomassa in essi contenuta e alle emissioni di metano evitate, grazie al fatto che gli scarti, invece di essere conferiti in discarica, verrebbero valorizzati energeticamente dall'industria cementiera.

## 7.9 Impianti ausiliari

Tutte le fasi di processo prevedono l'impiego di impianti ausiliari, le cui strategie per ridurre i consumi energetici delle tecnologie sono riepilogate in *Tabella 52*. Le strategie di riduzione dei consumi di impianti ausiliari sono state prima sottoposte al controllo di esperti di Federbeton, in un secondo luogo, incluse in *Tabella 52*.

Impianti ausiliari		
Oggetto della soluzione	Soluzione	Riferimento
Motori	Installare motori a velocità variabile con inverter	[18] [21] [22]
	Installare motori elettrici ad alta efficienza (IE2, IE3, IE4)	[18] [21] [22]
	Resettare il pretensionamento delle cinghie	[30]
	Rifasare i motori trifase in modo che i carichi su ciascun capacitore siano bilanciati	[28]
	Sostituire le cinghie dei motori con cinghie più moderne ed efficienti per ottimizzare le tensioni. Ad esempio, sostituire le cinghie a V con cinghie dentate (preferibili per alte coppie)	[28] [30]
	Riavvolgere i motori elettrici	[28]
	Installazione di inverter su motori esistenti	[28]
	Sostituire i motori a cinghia con motori idraulici e riduttori	[28]
	Ricablare i motori	[10]
	Installare motori correttamente dimensionati rispetto alle potenze richieste	[28] [29]
Sistemi a pressione, compressori e pompe	Sostituire i compressori, sistemi d'adduzione aria e sistemi frigoriferi con macchinari più avanzati (revamping) ed efficienti (ad es. compressori multistadio anziché a singolo stadio)	[28] [31]
	Installazione di inverter su compressori, pompe o ventole	[28] [31]
	Selezionare turbomacchine con potenze adeguate alle richieste dell'impianto	[12] [27]
	Installazione sistemi di stoccaggio dell'aria in eccesso	[12] [33]
	Sostituire i compressori necessari a pulire o rimuovere detriti con spazzole, pompe a vuoto o soffiatori	[28] [31]
	Isolare tubazioni, valvole e pompe e installare guarnizioni per ridurre le perdite di aria	[12]

Impianti ausiliari		
Sistemi a pressione, compressori e pompe	Installazione di guarnizioni o altri dispositivi o rimuovere i componenti danneggiati per ridurre le perdite di aria in corrispondenza delle giunzioni delle tubazioni	[12] [28] [31] [33] [34]
	Sostituire i compressori necessari a pulire o rimuovere detriti con spazzole, pompe o soffianti	[28] [31]
	Sostituire i compressori necessari a muovere componenti con motori elettrici o attuatori idraulici	[28] [31]
	Sostituire i compressori necessari a creare il vuoto con pompe a vuoto	[28] [31]
	Sostituire i compressori necessari ad azionare macchine, dispositivi e attuatori con motori elettrici	[28] [31]
	Installazione di compressori azionati ad energia elettrica, per i quali i costi di manutenzione sono più bassi, si ha una maggiore vita utile e meno down-time	[12] [27]
	Installazione di compressori alimentati a gas per i quali è più semplice ottenere velocità variabile e abbassare così i costi operativi	[12] [27]
	Dimensionare correttamente filtri, raccordi e manichette per ridurre le perdite	[33]
	Montare le valvole e regolatori di pressione nei sistemi di distribuzione dell'aria compressa per regolare l'afflusso di aria o interromperlo quando non viene usato dai macchinari	[28] [31]
	Installazione di tubazioni con diametro più grande possibile per ridurre le perdite	[12] [27]
Sostituire e rinnovare gli ugelli dei compressori (possono essere usurati, corrosi o intasati)	[12] [27]	
Sistema di ventilazione	Sostituire i ventilatori devoti alla movimentazione dei gas con ventole più efficienti	[28] [31] [32]
Scambiatore di calore	Installazione di scambiatori di calore per recuperare energia termica dai compressori	[32] [34]
Silo	Sostituire le pompe con rotocelle	Soluzione estratta dalle diagnosi energetiche
Sistema di distribuzione acqua di raffreddamento	Installazione di valvole di intercettazione sui rami dell'acqua di raffreddamento (spinta da pompe), per bloccare i flussi quando l'impianto è fermo	Soluzione estratta dalle diagnosi energetiche

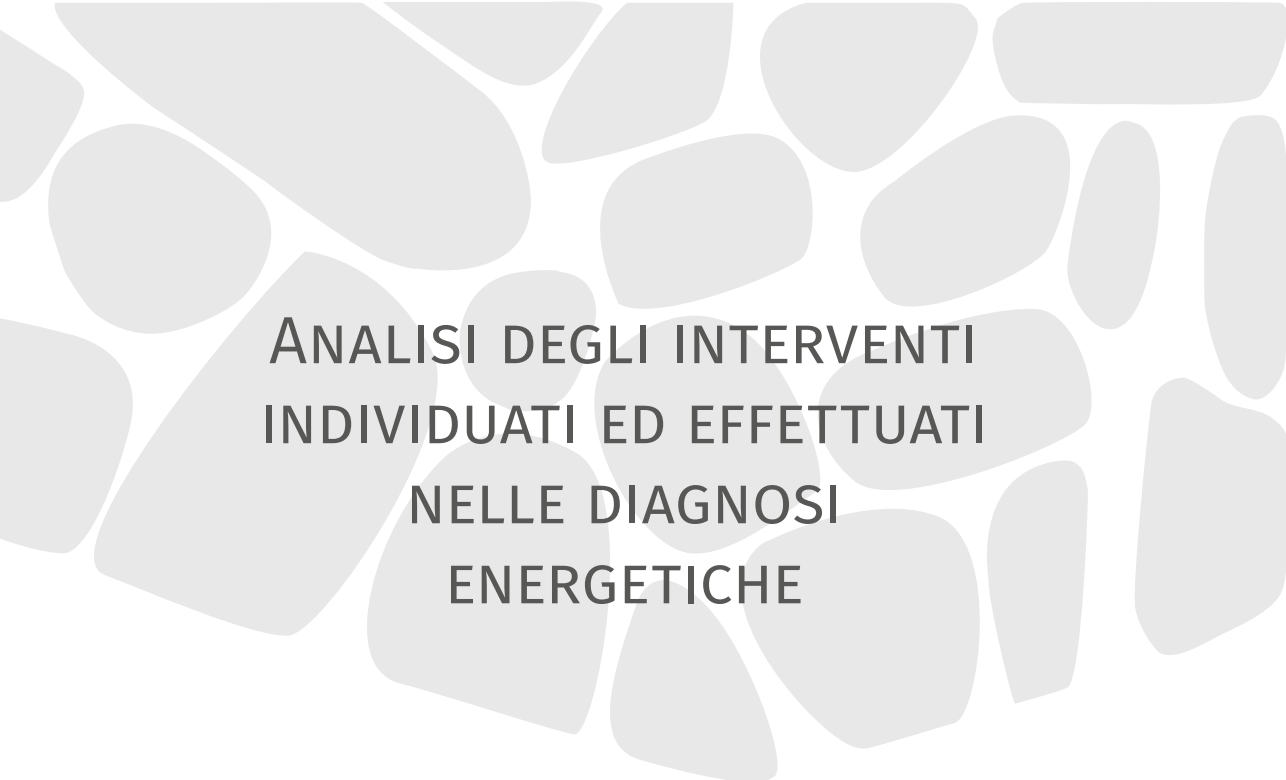
Impianti ausiliari		
Trasformatore	Ottimizzare le perdite del trasformatore	[28] [31]
	Rinnovare i trasformatori nelle cabine elettriche (preferibilmente installare trasformatori k-factor)	Soluzione estratta dalle diagnosi energetiche
	Sostituire trasformatori a olio con trasformatori a resina (sono caratterizzati da meno perdite)	Soluzione estratta dalle diagnosi energetiche

Tabella 52 - Soluzioni tecnologiche relative agli impianti ausiliari









ANALISI DEGLI INTERVENTI  
INDIVIDUATI ED EFFETTUATI  
NELLE DIAGNOSI  
ENERGETICHE



8

## 8. Analisi degli interventi individuati ed effettuati nelle diagnosi energetiche

Questo capitolo conclusivo ha lo scopo di mettere a fattor comune le soluzioni che esperti del settore hanno individuato per efficientare i siti produttivi del settore del cemento. Viene pertanto riportata un'analisi degli interventi di efficientamento energetico proposti o realizzati all'interno delle diagnosi energetiche suddivisi per aree di intervento.

### 8.1 Metodologia di analisi

L'obiettivo della metodologia qui sviluppata è stato la sistematizzazione dell'analisi degli interventi effettuati e individuati riportati nelle diagnosi, elaborando un approccio metodologico replicabile per ogni Ateco e aggiornabile nel tempo. Tale approccio è diretto a monitorare i risparmi conseguiti e potenziali e fornire informazioni utili agli operatori del settore e ai policy makers.

Le informazioni caricate sul portale Audit 102 e automaticamente raccolte in un unico database hanno costituito una fondamentale base di partenza per elaborare le informazioni di seguito presentate. Le informazioni non sono state utilizzate tal quali, ma è stata applicata una metodologia di analisi che ha previsto alcuni step di riorganizzazione dei dati e verifica della loro coerenza.

Gli step metodologici applicati possono essere così sintetizzati:

1. Ricodifica di circa 300 aree di intervento individuali in 16 principali, descritte in *Tabella 53*<sup>7</sup>
2. Individuazione degli indicatori di interesse, così elencabili
  - Risparmio totale di energia finale
  - Risparmio totale di energia primaria
  - Risparmi per tipologia: risparmi di energia elettrica, risparmi di energia termica, risparmi di carburante, altri risparmi
  - Tempo di ritorno semplice
  - Investimento
  - Costo efficacia, definito come Investimento/risparmio di energia finale o primaria
3. Definizione e calcolo delle variabili che non erano presenti nel database,

<sup>7</sup> L'elenco di interventi riportato nella seconda intende avere un carattere esemplificativo e non esaustivo di tutti i possibili interventi. Chiaramente ogni area di intervento sarà più o meno rilevante a seconda delle specificità del codice Ateco esaminato e anche del sito produttivo oggetto di diagnosi.

come risparmi totali e costo efficacia; in questo step è stata effettuata la conversione in tep dei risparmi elettrici e termici in tep di energia finale o primaria

4. Eliminazione dei duplicati dei risparmi elettrici, termici o di carburante rispetto ai valori riportati alla voce altri risparmi
5. Definizione delle aree di intervento con risparmi di energia primaria e correzione dei relativi risparmi, ove necessario
6. Riallocazione dei risparmi di carburante nelle categoria di appartenenza rilevante di caso in caso, individuabile tra risparmi elettrici, termici e altri risparmi
7. Analisi delle singole diagnosi per specifici codici Ateco e verifica/integrazione delle informazioni relative agli interventi caricate sul portale.

In particolare, relativamente al punto 5, le aree di intervento con risparmi di energia primaria sono state identificate in Cogenerazione/Trigenerazione e Produzione da fonti rinnovabili. Il risparmio di energia elettrica associato all'autoproduzione di energia elettrica è considerato un risparmio di energia primaria, in quanto tale energia elettrica non viene più prelevata dalla rete e quindi prodotta dal sistema di generazione nazionale. Nel caso dell'area Cogenerazione/Trigenerazione, o di alcuni interventi nell'area Produzione da fonti rinnovabili associati alla produzione di energia termica, un discorso analogo può essere applicato alla produzione di calore.

Area intervento	Descrizione
Altro	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interventi non altrove classificati</li> <li>• Interventi di natura mista, appartenenti a diverse categorie (per esempio la riqualificazione globale, con interventi ricadenti nelle aree Climatizzazione, Involucro edilizio e Illuminazione)</li> </ul>
Aria compressa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sostituzione di compressori</li> <li>• Ricerca ed eliminazione delle perdite</li> <li>• Installazione di sistemi di misura</li> <li>• Ottimizzazione degli impianti</li> <li>• Installazione di inverter</li> </ul>
Aspirazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sostituzione di motori usati per aspirazione con nuovi di categoria più efficiente (IE3 o superiore)</li> <li>• Installazione di inverter</li> <li>• Ottimizzazione degli impianti</li> </ul>

Area intervento	Descrizione
Centrale termica/Recuperi termici	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sostituzione dell'impianto di generazione calore con modelli più efficienti</li> <li>• Recupero termico, tra cui anche sistemi ORC</li> <li>• Sostituzione dei bruciatori</li> </ul>
Climatizzazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sostituzione dell'impianto di riscaldamento e/o raffrescamento con modelli più efficienti</li> </ul>
Cogenerazione/Trigenerazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Installazione di un impianto di cogenerazione o trigenerazione</li> <li>• Miglioramento di impianti esistenti</li> </ul>
Freddo di processo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sostituzione di gruppi frigo</li> <li>• Sostituzione di ventilatori di raffreddamento</li> <li>• Ottimizzazione della gestione</li> </ul>
Generale/Gestionale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introduzione o miglioramento del sistema di monitoraggio</li> <li>• Interventi di tipo organizzativo, come lo spegnimento programmato nelle ore notturne o nel weekend</li> <li>• Corsi di formazione in ambito efficienza energetica</li> <li>• Adozione della certificazione ISO 50001</li> <li>• Installazione di contatori</li> <li>• Adozione di nuovi strumenti software</li> <li>• Interventi di natura comportamentale</li> </ul>
Illuminazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introduzione di LED in aree specifiche</li> <li>• Relamping dello stabilimento</li> <li>• Installazione di rilevatori di presenza</li> </ul>
Impianti elettrici	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Installazione di un sistema power quality</li> <li>• Sostituzione di trasformatori</li> <li>• Installazione di economizzatori di rete</li> </ul>
Involucro edilizio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rifacimento del cappotto esterno</li> <li>• Coibentazione della copertura</li> <li>• Installazione o sostituzione di schermature solari</li> <li>• Sostituzione degli infissi</li> </ul>
Linee produttive	<p>Interventi relativi ai processi nell'area attività principale, come ad esempio:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sostituzione del forno fusorio</li> <li>• Revamping dello stabilimento</li> <li>• Ottimizzazione della gestione dei forni</li> <li>• Interventi sui nastri trasportatori</li> <li>• Sostituzione dei carica batteria muletti</li> </ul>
Motori elettrici/Inverter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sostituzione di motori elettrici con nuovi di categoria più efficiente (IE3 o superiori)</li> <li>• Installazione di inverter</li> </ul>
Produzione da fonti rinnovabili	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Installazione di un impianto fotovoltaico, solare termico o di una centrale a biomassa</li> </ul>
Rifasamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rifasamento degli impianti</li> <li>• Installazione di nuovi rifasatori</li> </ul>
Trasporti	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mobilità elettrica e altri interventi di conversione del parco veicoli con modelli a maggiore efficienza</li> <li>• Corsi di formazione su eco-driving</li> </ul>

Area intervento	Descrizione
Reti di distribuzione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ricerca delle perdite di distribuzione</li> <li>• Verifica dello stato della rete vapore</li> <li>• Verifica delle coibentazioni nella rete di trasporto calore</li> <li>• Sostituzione di scaricatori di condensa</li> </ul>

Tabella 53 – Aree di classificazione degli interventi e relativa descrizione

## 8.2 Risultati complessivi e Divisione ATECO 23

Le diagnosi energetiche inviate ad ENEA e caricate sul portale Audit 102 riportano 7.513 interventi effettuati, da parte di 2.429 imprese. Gli interventi individuati attraverso le diagnosi energetiche sono invece 31.261 e si riferiscono a 5.870 imprese, di cui 2.801 imprese che si dichiarano energivore.

Secondo quanto dichiarato nelle diagnosi, gli interventi effettuati hanno consentito il raggiungimento di un risparmio di energia finale di 475 ktep/anno e di un risparmio di energia primaria di 193 ktep/anno, associato a interventi nelle categorie Cogenerazione/Trigenerazione e Produzione da fonti rinnovabili. Gli interventi individuati, se realizzati, sarebbero associati a un risparmio di energia finale di circa 1,690 Mtep/anno, suddiviso in diverse tipologie: risparmi di energia elettrica (23% del totale), di energia termica (14%), di carburante (4%) e altri risparmi (59%). La categoria altri risparmi può contenere diverse tipologie di risparmi, ad esempio risparmi associati a vettori energetici non altrove classificati o risparmi di energia finale o primaria relativi a più di un vettore energetico (ad esempio calore ed energia elettrica negli interventi di cogenerazione)<sup>8</sup>. Gli interventi individuati sarebbero inoltre associati ad un risparmio di energia primaria di circa 0,859 Mtep/anno, riconducibile alle aree di intervento Cogenerazione/Trigenerazione e Produzione da fonti rinnovabili. Sette divisioni ATECO, appartenenti ai settori C (Attività manifatturiere) e G (Commercio all'ingrosso e al dettaglio; Riparazione di autoveicoli e motocicli) arrivano a rappresentare circa la metà del totale degli interventi complessivi individuati. La Divisione Ateco 23, Fabbricazione di altri prodotti della lavorazione di minerali non metalliferi, la quinta in ordine decrescente di importanza, con

<sup>8</sup> La categoria è attualmente oggetto di approfondimento. Per l'Ateco 23, sulla base delle informazioni eventualmente disponibili in diagnosi energetica, si è proceduto a riallocare i risparmi categorizzati come altri risparmi nelle altre tre categorie più specifiche. In questo modo la categoria "Altri risparmi" è rimasta una categoria residuale.

una quota pari al 5,9% del totale (1.852 interventi).

Per la Divisione Ateco 23 sono state esaminate le diagnosi di 12 codici Ateco<sup>9</sup> per integrare e, ove necessario, correggere le informazioni relative agli interventi caricate sul portale, come da step 7 della metodologia descritta nel paragrafo precedente. L'esito di questa analisi è stato anche la produzione della scheda per l'Ateco 23.51.00 – Produzione di cemento, riportata in *Appendice*.

La scheda elaborata contiene tabelle e grafici di sintesi degli indicatori calcolati, di cui è riportata un'idea della struttura in *Figura 32*. Le tabelle relative agli interventi effettuati sono proposte anche relativamente agli interventi individuati e in questo caso l'analisi è corredata da informazioni relative al tempo di ritorno semplice, elaborate per classi e combinate con i valori cumulati di risparmio potenziale e investimenti corrispondenti. La scheda relative al codice Ateco 23.51.00 può essere consultata in *Appendice*. È inoltre proposta una scheda per la Divisione 23, con le informazioni complessive relative a tutti i codici Ateco ad essa appartenenti.

---

<sup>9</sup> Si tratta dei seguenti codici: 23.11.00 Fabbricazione di vetro piano; 23.12.00 Lavorazione e trasformazione del vetro piano; 23.13.00 Fabbricazione di vetro cavo; 23.31.00 Fabbricazione di piastrelle in ceramica per pavimenti e rivestimenti; 23.32.00 Fabbricazione di mattoni, tegole ed altri prodotti per l'edilizia in terracotta; 23.51.00 Produzione di cemento; 23.52.10 Produzione di calce; 23.61.00 Fabbricazione di prodotti in calcestruzzo per l'edilizia; 23.69.00 Fabbricazione di altri prodotti in calcestruzzo, gesso e cemento; 23.70.10 Segazione e lavorazione delle pietre e del marmo; 23.70.30 Frantumazione di pietre e minerali vari non in connessione con l'estrazione; 23.99.00 Fabbricazione di altri prodotti in minerali non metalliferi nca.



A partire dalle informazioni raccolte nelle schede elaborate per i 12 codici Ateco esaminati, può essere fornita una rappresentazione combinata di investimento e risparmio energetico, suddividendo i punti, rappresentativi dei singoli interventi, in quattro quadranti. I quadranti sono definiti in base alla mediana della distribuzione di risparmio di energia finale o primaria (linea orizzontale) e investimento (linea verticale), in ogni specifica area di intervento esaminata. Ricordando che il costo efficacia è definito come il rapporto tra investimento e risparmio energetico, il quadrante in alto a sinistra rappresenta gli interventi con migliore costo efficacia (interventi più convenienti) e quello in alto a destra gli interventi efficaci. Nel caso della *Figura 33* viene rappresentata l'aria compressa, un'area di intervento trasversale ai codici Ateco esaminati della Divisione 23, che arriva a rappresentare un terzo degli interventi individuati nel codice Ateco 23.13<sup>10</sup>. Il gruppo Ateco 23.5, comprensivo del codice 23.51.00 e anche del 23.52.10 – Produzione di calce<sup>11</sup>, viene confrontato con gli altri gruppi Ateco, come indicato in legenda.

Di seguito sono proposti due ulteriori grafici sul costo efficacia, di confronto degli interventi individuati tra diversi gruppi Ateco. La *Figura 34*, relativa agli interventi nell'area Generale/Gestionale mostra un quadrante di interventi a migliore costo efficacia molto popolato, in particolare da interventi che a parità di costo di investimento forniscono risparmi di energia finale variabili a seconda della dimensione e del processo del sito produttivo esaminato. La *Figura 35* rappresenta i risparmi di energia primaria associati agli interventi individuati nell'area Produzione da fonti rinnovabili, e mostra un loro andamento lineare al costo di investimento.

---

<sup>10</sup> Prendendo a riferimento le diagnosi pervenute a ENEA da parte di tutti i codici Ateco, l'aria compressa rappresenta il 15% sul totale degli interventi effettuati e il 17% sul totale degli interventi individuati.

<sup>11</sup> Il codice Ateco 23.52.10 comprende un minor numero di diagnosi pervenute a Enea e di conseguenza un numero relativamente più contenuto di interventi effettuati e individuati.



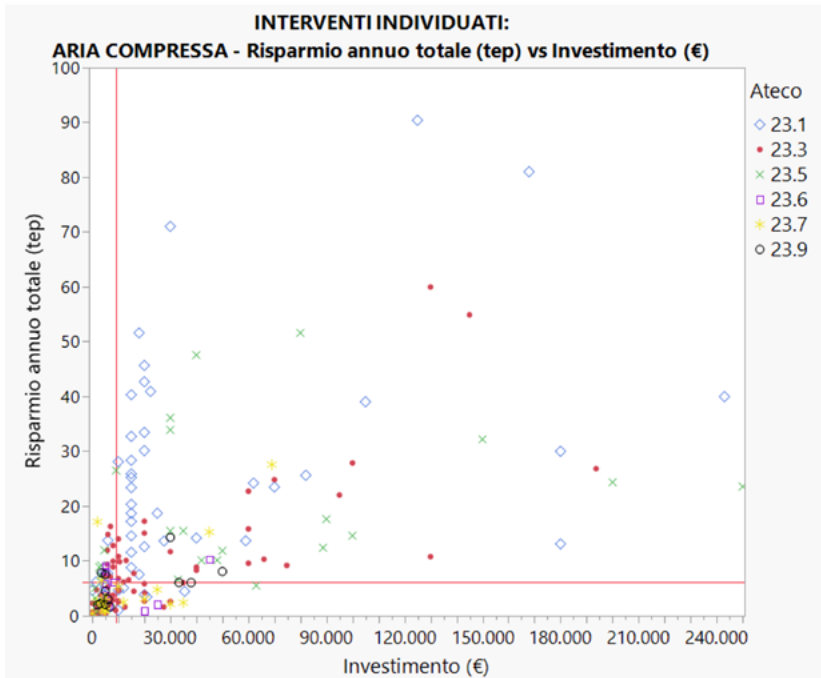
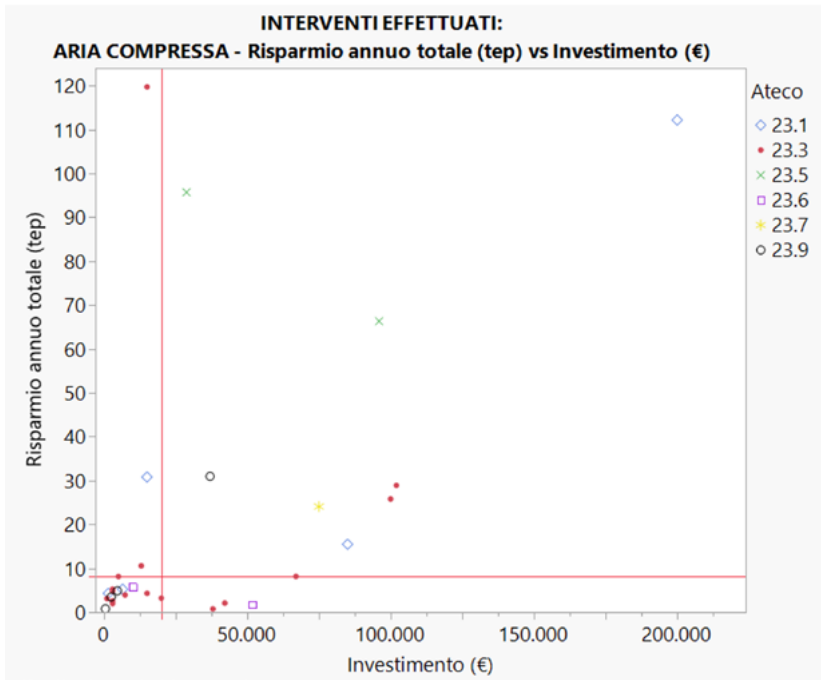


Figura 33 – Costo efficacia degli interventi effettuati e individuati nella categoria Aria compressa

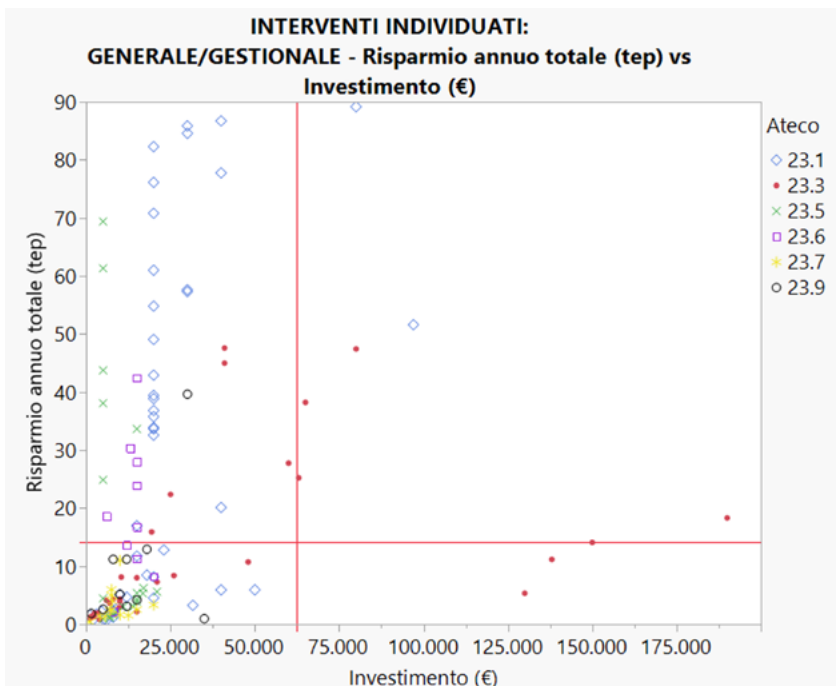


Figura 34 – Costo efficacia degli interventi individuati nell'area Generale/Gestionale

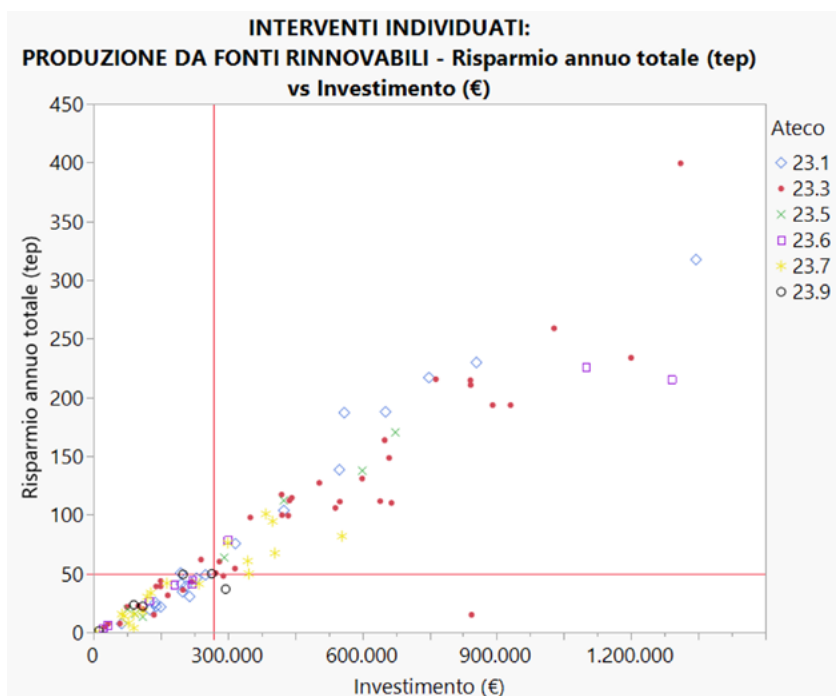





Figura 35 – Costo efficacia degli interventi individuati nell'area Produzione da fonti rinnovabili

### 8.3 Risultati per il settore cemento

Le informazioni contenute nella scheda possono essere organizzate in tabelle qualitative e quantitative di sintesi. La *Tabella 54* sintetizza la presenza di interventi effettuati e individuati nelle diverse aree per il codice Ateco 23.51.00. Si fa riferimento agli interventi con informazioni, cioè descritti in termini di risparmio conseguito o potenziale e di costo di investimento. Una scala di colori indica la numerosità degli interventi, che chiaramente è dipendente dal numero di diagnosi pervenute per il codice Ateco esaminato ma anche dalla qualità delle diagnosi stesse.

	23.51.00
<b>Aria compressa</b>	○●
<b>Aspirazione</b>	
<b>Centrale termica/Recuperi termici</b>	○●
<b>Climatizzazione</b>	●
<b>Cogenerazione/Trigenerazione</b>	●
<b>Freddo di processo</b>	
<b>Generale/Gestionale</b>	○●
<b>Illuminazione</b>	○●
<b>Impianti elettrici</b>	●
<b>Involucro edilizio</b>	
<b>Linee produttive</b>	○●
<b>Motori elettrici/Inverter</b>	○●
<b>Produzione da fonti rinnovabili</b>	●
<b>Rifasamento</b>	●
<b>Trasporti</b>	
area presente in interventi effettuati con informazioni	○
area presente in interventi individuati con informazioni	●
se interventi individuati >20	
se interventi effettuati e individuati >20	
se interventi effettuati >20	

*Tabella 54 – Quadro di sintesi del numero interventi effettuati ed individuati*

La *Tabella 55* fa riferimento agli interventi effettuati e sintetizza la presenza di risparmi elettrici e termici per ogni area di intervento e codice Ateco. Anche in questo caso una scala di colori indica se il valore dei risparmi totali conseguito in quel codice Ateco è superiore a una soglia, individuata in 50 tep sulla base della distribuzione osservata. Il valore dei risparmi è strettamente collegato al numero di diagnosi pervenute a ENEA ma anche a specificità settoriali e di sito produttivo.

	23.51.00
<b>Aria compressa</b>	◇
<b>Aspirazione</b>	
<b>Centrale termica/Recuperi termici</b>	◇□
<b>Climatizzazione</b>	
<b>Cogenerazione/Trigenerazione</b>	
<b>Freddo di processo</b>	
<b>Generale/Gestionale</b>	◇
<b>Illuminazione</b>	◇
<b>Impianti elettrici</b>	
<b>Involucro edilizio</b>	
<b>Linee produttive</b>	◇□
<b>Motori elettrici/Inverter</b>	◇
<b>Produzione da fonti rinnovabili</b>	
<b>Rifasamento</b>	
<b>Trasporti</b>	
interventi effettuati con risparmi di energia elettrica	◇
interventi effettuati con risparmi di energia termica	□
se risparmi elettrici >50 tep	
se risparmi termici >50 tep	
se risparmi elettrici e termici >50 tep	

Tabella 55 – Quadro di sintesi dei risparmi da interventi effettuati

Nella *Tabella 56* sono fornite maggiori informazioni, in termini quantitativi, relativamente ai risparmi di energia finale conseguiti dagli interventi effettuati per area di intervento e codice Ateco. In particolare si riportano i risparmi elettrici e termici attraverso due indicatori per ogni area di intervento:

1. risparmi totali rapportati al consumo elettrico o termico totale del codice Ateco;
2. risparmi medi della specifica area di intervento rapportati al consumo elettrico o termico totale del Ateco.

	RISPARMI ELETTRICI		RISPARMI TERMICI	
	TOTALI	MEDI	TOTALI	MEDI
<b>Aria compressa</b>	162,0 (0,04%)	33,2 (0,01%)		
<b>Aspirazione</b>				
<b>Centrale termica/Recuperi termici</b>	1.843,9 (0,47%)	368,8 (0,09%)	279,0 (0,02%)	55,8 (0,00%)
<b>Climatizzazione</b>				
<b>Freddo di processo</b>				
<b>Generale/Gestionale</b>	15,5 (0,00%)	15,5 (0,00%)		
<b>Illuminazione</b>	179,9 (0,05%)	30,0 (0,01%)		
<b>Impianti elettrici</b>				
<b>Involucro edilizio</b>				
<b>Linee produttive</b>	86,6 (0,02%)	28,9 (0,01%)	3.952,0 (0,32%)	988,0 (0,08%)
<b>Motori elettrici/Inverter</b>	13,2 (0,00%)	6,6 (0,00%)		
<b>Rifasamento</b>				
<b>Trasporti</b>				

Tabella 56 – Risparmi elettrici e termici da interventi effettuati (tep e %)

La *Tabella 57* sintetizza la presenza di interventi individuati nelle diverse aree di intervento per i codici Ateco oggetto di analisi. Gli interventi individuati sono generalmente in numero maggiore rispetto agli interventi effettuati per ogni codice Ateco e sito esaminato. È opportuno ricordare che gli interventi individuati sono un set di proposte contenuto in diagnosi energetica: in quanto tali non saranno attuati tutti e la loro eventuale implementazione sarà dilazionata nel tempo.

Il risparmio è quindi da intendersi come un risparmio potenziale, ragion per cui in questo caso non si è ritenuto opportuno identificare una soglia di risparmio.

	<b>23.51.00</b>
<b>Aria compressa</b>	◇
<b>Aspirazione</b>	
<b>Centrale termica/Recuperi termici</b>	◇□
<b>Climatizzazione</b>	◇□
<b>Cogenerazione/Trigenerazione</b>	
<b>Freddo di processo</b>	
<b>Generale/Gestionale</b>	◇
<b>Illuminazione</b>	◇
<b>Impianti elettrici</b>	◇
<b>Involucro edilizio</b>	
<b>Linee produttive</b>	◇□
<b>Motori elettrici/Inverter</b>	◇
<b>Produzione da fonti rinnovabili</b>	
<b>Rifasamento</b>	◇
<b>Trasporti</b>	

interventi individuati con risparmi di energia elettrica	◇
interventi individuati con risparmi di energia termica	□

*Tabella 57 – Risparmi elettrici e termici da interventi effettuati (tep e %)*

In modo analogo agli interventi effettuati, in *Tabella 58* sono fornite informazioni quantitative relativamente ai risparmi potenziali di energia finale associati agli interventi individuati, per tipologia di risparmio (elettrico o termico) e area di intervento.

	RISPARMI ELETTRICI		RISPARMI TERMICI	
	TOTALI	MEDI	TOTALI	MEDI
<b>Aria compressa</b>	445,6 (0,11%)	23,5 (0,01%)		
<b>Aspirazione</b>				
<b>Centrale termica/Recuperi termici</b>	12.545,6 (3,19%)	1.394,0 (0,35%)	29,1 (0,00%)	
<b>Climatizzazione</b>			19,6 (0,00%)	5,8 (0,00%)
<b>Freddo di processo</b>				4,9 (0,00%)
<b>Generale/Gestionale</b>	4,3 (0,00%)	4,3 (0,00%)		
<b>Illuminazione</b>	277,7 (0,07%)	17,4 (0,00%)		
<b>Impianti elettrici</b>	718,9 (0,00%)	239,6 (0,00%)		
<b>Linee produttive</b>	525,8 (0,13%)	27,7 (0,00%)	5.295,3 (0,43%)	
<b>Motori elettrici/Inverter</b>	279,2 (0,07%)	23,3 (0,01%)		311,5 (0,03%)
<b>Rifasamento</b>	103,2 (0,03%)	103,2 (0,03%)		
<b>Trasporti</b>				

Tabella 58 – Risparmi elettrici e termici da interventi individuati (tep e %)



## **APPENDICE**

**Schede settoriali degli interventi  
effettuati e individuati**



## APPENDICE - INDICE

Ateco 23: FABBRICAZIONE DI ALTRI PRODOTTI DELLA LAVORAZIONE DI MINERALI NON METALLIFERI	126
Ateco 23.51.00 PRODUZIONE DI CEMENTO	132
6. BIBLIOGRAFIA	137

## Ateco 23: FABBRICAZIONE DI ALTRI PRODOTTI DELLA LAVORAZIONE DI MINERALI NON METALLIFERI

INQUADRAMENTO GENERALE					
Numero diagnosi (siti)			Numero P.IVA		
513			362		
Numero grandi imprese			Numero grandi imprese energivore		
197			299		
Numero siti ISO 50001			Numero siti sottoposti a monitoraggio		
36			353		
INTERVENTI EFFETTUATI			INTERVENTI INDIVIDUATI		
Numero medio interventi per sito		1,2	Numero medio interventi per sito		3,6
Quota di diagnosi contenenti interventi		52%	Quota di diagnosi contenenti interventi		98%
N° interventi	Risparmio annuo di energia finale (tep/anno)	Risparmio medio di energia finale per intervento (tep)	N° interventi	Risparmio annuo di energia finale (tep/anno)	Risparmio medio di energia finale per intervento (tep)
636	41.580,2	65,4	1.852	74.843,7	40,4
INTERVENTI EFFETTUATI PER AREA			INTERVENTI EFFETTUATI PER AREA		
Area di intervento		N° interventi	Area di intervento		N° interventi
Altro		4	Altro		8
Aria compressa		100	Aria compressa		324
Aspirazione		15	Aspirazione		26
Centrale termica/Recuperi termici		37	Centrale termica/Recuperi termici		103
Climatizzazione		16	Climatizzazione		28
Cogenerazione/Trigenerazione		11	Cogenerazione/Trigenerazione		63
Freddo di processo		6	Freddo di processo		16
Generale/Gestionale		83	Generale/Gestionale		305
Illuminazione		142	Illuminazione		309
Impianti elettrici		6	Impianti elettrici		70
Involucro edilizio		5	Involucro edilizio		1
Linee produttive		129	Linee produttive		140
Motori elettrici/Inverter		58	Motori elettrici/Inverter		243
Produzione da fonti rinnovabili		11	Produzione da fonti rinnovabili		168
Trasporti		2	Trasporti		15
Rifasamento		10	Rifasamento		33
Reti di distribuzione		1	Reti di distribuzione		0
Totale		636	Totale		1.852

ANALISI DEGLI INTERVENTI EFFETTUATI							
INVESTIMENTI			COSTO EFFICACIA DEGLI INTERVENTI CON RISPARMI DI ENERGIA FINALE				
Area di intervento	N° interventi con informazioni	Investimento totale (€)	Investimento totale (€)	Investimento medio (€)	Area di intervento	N° interventi con informazioni	
						Costo efficacia (€/top di energia finale)	
Altro	3	37.809.000,9	11,3%	12.603.000,3	Altro	2	3.659,3
Aria compressa	55	2.651.001,0	0,8%	49.092,6	Aria compressa	36	4.830,0
Aspirazione	12	195.000,0	0,1%	16.250,0	Aspirazione	12	1.322,9
Centrale termica/Recuperi termici	22	23.642.800,0	7,1%	1.074.672,7	Centrale termica/Recuperi termici	14	6.390,3
Climatizzazione	11	1.030.341,0	0,3%	93.667,4	Climatizzazione	9	8.640,5
Cogenerazione/Trigenerazione	8	12.865.000,0	3,8%	1.608.125,0	Freddo di processo	3	25.514,6
Freddo di processo	4	50.000,0	0,0%	12.500,0	Generale/Gestionale	13	9.664,1
Generale/Gestionale	56	1.833.235,0	0,5%	32.736,3	Illuminazione	62	6.869,5
Illuminazione	84	5.692.508,3	1,7%	69.420,8	Impianti elettrici	2	6.178,7
Impianti elettrici	3	215.000,0	0,1%	71.666,7	Involucro edilizio	3	3.694,1
Involucro edilizio	3	320.000,0	0,1%	106.666,7	Linee produttive	49	9.976,5
Linee produttive	68	245.545.151,4	73,3%	3.610.958,1	Motori elettrici/Inverter	20	4.595,5
Motori elettrici/Inverter	27	1.189.179,0	0,4%	45.737,7	Rifasamento	3	1.849,6
Produzione da fonti rinnovabili	5	1.887.700,0	0,6%	377.540,0	Trasporti	0	0,0
Rifasamento	5	69.148,0	0,0%	13.829,6	Reti di distribuzione	0	0,0
Trasporti	1	0,0	0,0%	0,0	Totale *(media)	228	7.168,1*
Reti di distribuzione	0	0,0	0,0%	0,0	<b>COSTO EFFICACIA DEGLI INTERVENTI CON RISPARMI DI ENERGIA PRIMARIA</b>		
Totale	367	334.995.064,6	100%	1.319.057,6	Cogenerazione/Trigenerazione	6	4.309,5
					Produzione da fonti rinnovabili	5	8.363,6
					Totale *(media)	11	6.336,6*

**INTERVENTI EFFETTUATI**

**RISPARMI DI ENERGIA FINALE**

Area di intervento	N° interventi con informazioni	Risparmio annuo totale (tep/anno)	Risparmio annuo totale (%)	Risparmio annuo totale medio (tep/anno)	Risparmio annuo di energia elettrica (tep/anno)	Risparmio annuo di energia termica (tep/anno)	Risparmio annuo di carburante (tep/anno)	Altri risparmi annui (tep/anno)
Altro	2	72,7	0,2%	36,3	72,7	0,0	0,0	0,0
Aria compressa	43	1.148,8	2,8%	27,4	1.053,1	0,0	0,0	0,0
Aspirazione	12	249,2	0,6%	20,8	249,2	0,0	0,0	0,0
Centrale termica/Recuperi termici	16	5.579,9	13,4%	347,4	1.879,7	3.194,7	0,0	483,5
Climatizzazione	10	534,6	1,3%	53,5	20,7	513,9	0,0	0,0
Freddo di processo	4	14,3	0,0%	3,6	14,3	0,0	0,0	0,0
Generale/Gestionale	14	467,0	1,1%	33,4	78,3	146,0	0,0	242,7
Illuminazione	68	1.088,8	2,6%	16,5	1.088,8	0,0	0,0	0,0
Impianti elettrici	2	26,4	0,1%	13,2	26,4	0,0	0,0	0,0
Involucro edilizio	4	116,6	0,3%	29,2	110,1	6,5	0,0	0,0
Linee produttive	60	32.044,1	77,1%	534,1	3.923,8	22.687,6	0,0	5.432,7
Motori elettrici/Inverter	22	244,4	0,6%	11,6	244,4	0,0	0,0	0,0
Rifasamento	3	15,5	0,0%	5,2	15,5	0,0	0,0	0,0
Trasporti	0	0,0	0,0%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Reti di distribuzione	0	0,0	0,0%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Totale</b>	<b>260</b>	<b>41.580,2</b>	<b>100%</b>	<b>75,5</b>	<b>8.776,9</b>	<b>26.548,7</b>	<b>0,0</b>	<b>6.158,9</b>

**RISPARMI DI ENERGIA PRIMARIA**

Area di intervento	N° interventi con informazioni	Risparmio annuo totale (tep/anno)	Risparmio annuo totale (%)	Risparmio annuo totale medio (tep/anno)	Risparmio annuo di energia elettrica (tep/anno)	Risparmio annuo di energia termica (tep/anno)	Risparmio annuo di carburante (tep/anno)	Altri risparmi annui (tep/anno)
Cogenerazione/Trigenerazione	6	3.440,1	93%	573,3	253,3	0,0	0,0	3.186,8
Produzione da fonti rinnovabili	5	243,0	7%	48,6	243,0	0,0	0,0	0,0
<b>Totale</b>	<b>11</b>	<b>3.683,1</b>	<b>100%</b>	<b>311,0</b>	<b>496,4</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>3.186,8</b>

<b>INTERVENTI INDIVIDUATI</b>				
<b>ANALISI DEGLI INVESTIMENTI</b>				
<b>Area di intervento</b>	<b>N° interventi con informazioni</b>	<b>Investimento totale (€)</b>	<b>Investimento totale (%)</b>	<b>Investimento medio (€)</b>
Altro	7	92.500,0	0,0%	13.214,3
Aria compressa	289	9.758.836,8	3,2%	33.651,2
Aspirazione	24	586.606,0	0,2%	24.441,9
Centrale termica/Recuperi termici	78	66.570.006,0	22,0%	853.461,6
Climatizzazione	23	1.288.069,0	0,4%	56.003,0
Cogenerazione/Trigenerazione	55	62.814.764,0	20,8%	1.121.692,2
Freddo di processo	14	807.510,0	0,3%	57.679,3
Generale/Gestionale	236	4.936.507,0	1,6%	20.917,4
Illuminazione	298	12.873.300,1	4,3%	43.199,0
Impianti elettrici	62	9.836.770,2	3,3%	156.139,2
Involucro edilizio	1	1.100,0	0,0%	1.100,0
Linee produttive	112	56.319.000,0	18,6%	502.848,2
Motori elettrici/Inverter	224	10.794.813,5	3,6%	48.191,1
Produzione da fonti rinnovabili	160	64.637.128,4	21,4%	403.982,1
Rifasamento	28	587.931,0	0,2%	20.273,5
Trasporti	14	288.000,0	0,1%	20.571,4
<b>Totale</b>	<b>1.625</b>	<b>302.192.841,9</b>	<b>100%</b>	<b>211.085,3</b>
<b>COSTO EFFICACIA DEGLI INTERVENTI CON RISPARMI DI ENERGIA FINALE</b>				
<b>Area di intervento</b>	<b>N° interventi con informazioni</b>	<b>Costo efficacia (€/top di energia finale)</b>	<b>Tempo di ritorno medio (anni)</b>	
Altro	7	8.829,0	4,0	
Aria compressa	275	3.466,5	2,8	
Aspirazione	23	4.419,5	3,6	
Centrale termica/Recuperi termici	77	3.147,1	4,7	
Climatizzazione	21	3.626,9	7,6	
Freddo di processo	13	5.196,5	3,6	
Generale/Gestionale	182	2.720,7	1,9	
Illuminazione	284	7.970,8	4,3	
Impianti elettrici	60	8.472,6	5,8	
Involucro edilizio	1	6.502,6	3,5	
Linee produttive	99	8.361,3	4,7	
Motori elettrici/Inverter	211	5.228,3	4,0	
Rifasamento	15	28.252,1	4,0	
Trasporti	12	5.723,3	5,6	
<b>Totale *(media)</b>	<b>1.280</b>	<b>7.279,8*</b>	<b>4,3</b>	
<b>COSTO EFFICACIA DEGLI INTERVENTI CON RISPARMI DI ENERGIA PRIMARIA</b>				
<b>Area di intervento</b>	<b>N° interventi con informazioni</b>	<b>Costo efficacia (€/top di energia finale)</b>	<b>Tempo di ritorno medio (anni)</b>	
Cogenerazione/Trigenerazione	52	3.626,9	5,3	
Produzione da fonti rinnovabili	150	5.685,0	8,1	
<b>Totale *(media)</b>	<b>202</b>	<b>4.656,0*</b>	<b>6,7</b>	

**INTERVENTI INDIVIDUATI**

**RISPARMI DI ENERGIA FINALE**

Area di intervento	N° interventi con informazioni	Risparmio annuo totale (tep/anno)	Risparmio annuo totale (%)	Risparmio annuo totale medio (tep/anno)	Risparmio annuo di energia elettrica (tep/anno)	Risparmio annuo di energia termica (tep/anno)	Risparmio annuo di carburante (tep/anno)	Altri risparmi annui (tep/anno)
Altro	7	12,8	0,0%	1,8	12,8	0,0	0,0	0,0
Aria compressa	291	3.910,2	5,2%	13,4	3.840,9	35,9	0,0	33,6
Aspirazione	25	355,8	0,5%	14,2	332,1	23,7	0,0	0,0
Centrale termica/ Recuperi termici	84	31.912,1	42,6%	379,9	15.343,5	15.740,2	0,0	828,4
Climatizzazione	21	417,9	0,6%	19,9	192,4	210,2	0,0	15,3
Freddo di processo	14	231,4	0,3%	16,5	216,6	14,8	0,0	0,0
Generale/Gestionale	187	5.961,4	8,0%	31,9	1.611,8	3.070,0	0,0	1.279,5
Illuminazione	288	2.355,9	3,1%	8,2	2.298,6	0,0	0,0	57,3
Impianti elettrici	62	1.817,2	2,4%	29,3	1.817,2	0,0	0,0	0,0
Involucro edilizio	1	0,2	0,0%	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0
Linee produttive	117	24.855,2	33,2%	212,4	8.045,2	14.125,0	0,0	2.685,0
Motori elettrici/Inverter	214	2.704,2	3,6%	12,6	2.693,2	0,0	0,0	11,0
Rifasamento	15	299,2	0,4%	19,9	214,2	0,0	0,0	85,0
Trasporti	12	10,2	0,0%	0,8	5,1	0,0	5,1	0,0
<b>Totale</b>	<b>1.338</b>	<b>74.843,7</b>	<b>100%</b>	<b>54,4</b>	<b>36.623,8</b>	<b>33.219,9</b>	<b>5,1</b>	<b>4.995,1</b>

**RISPARMI DI ENERGIA PRIMARIA**

Area di intervento	N° interventi con informazioni	Risparmio annuo totale (tep/anno)	Risparmio annuo totale (%)	Risparmio annuo totale medio (tep/anno)	Risparmio annuo di energia elettrica (tep/anno)	Risparmio annuo di energia termica (tep/anno)	Risparmio annuo di carburante (tep/anno)	Altri risparmi annui (tep/anno)
Cogenerazione/ Trigenerazione	53	34.572,8	66%	652,3	19.704,9	7.087,4	0,0	7.685,5
Produzione da fonti rinnovabili	150	17.466,1	34%	116,4	13.043,8	3.999,7	0,0	422,5
<b>Totale</b>	<b>203</b>	<b>52.038,9</b>	<b>100%</b>	<b>384,4</b>	<b>32.748,7</b>	<b>11.087,2</b>	<b>0,0</b>	<b>8.108,0</b>

## INTERVENTI INDIVIDUATI

### ANALISI PER CLASSE DI TEMPO DI RITORNO

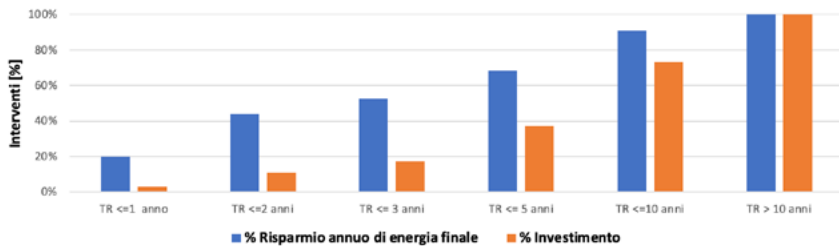
Classi tempo di ritorno	N° interventi	Risparmio annuo (tep/anno)	Investimento (€)
TR <= 1 anno	239	11946,3	4.501.955,6
1 < TR <= 2 anni	244	14264,6	11.604.752,0
2 < TR <= 3 anni	228	5023,3	10.126.896,0
3 < TR <= 5 anni	331	9335,1	29.887.877,6
5 < TR <= 10 anni	287	13311,5	54.509.046,3
TR > 10 anni	50	5471,4	39.932.672,1
<b>Totale</b>	<b>106</b>	<b>20.240,9</b>	<b>48.966.156,0</b>



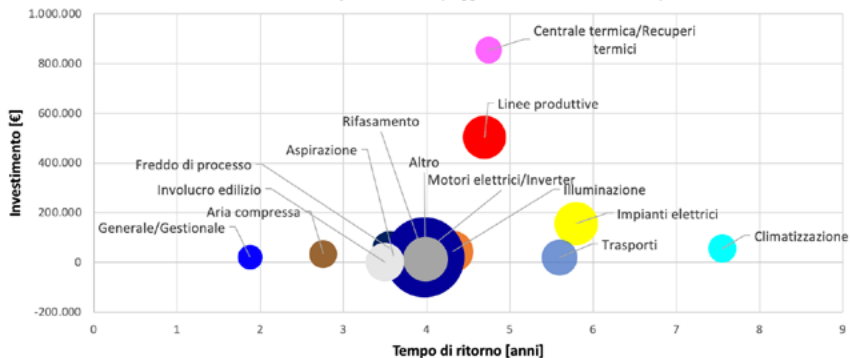
### ANALISI CUMULATA PER CLASSE DI TEMPO DI RITORNO

Classi tempo di ritorno	N° interventi	% Interventi	Risparmio annuo (tep/anno)	% Risparmio annuo di energia finale	Investimento (€)	% Investimento
TR <= 1 anno	239	17,3%	11.946,3	20,1%	4.501.955,6	3,0%
TR <= 2 anni	483	35,0%	26.210,9	44,2%	16.106.707,6	10,7%
TR <= 3 anni	711	51,6%	31.234,2	52,6%	26.233.603,6	17,4%
TR <= 5 anni	1042	75,6%	40.569,3	68,4%	56.121.481,2	37,3%
TR <= 10 anni	1329	96,4%	53.880,8	90,8%	110.630.527,5	73,5%
TR > 10 anni	1379	100,0%	59.352,2	100,0%	150.563.199,5	100,0%

**Investimenti e risparmi cumulati per classe di tempo di ritorno**  
Numero interventi con informazioni = 1.379



**Investimento e tempo di ritorno (raggio bolla = costo efficacia)**



## ATECO 23.51.00 PRODUZIONE CEMENTO

INQUADRAMENTO GENERALE					
Numero diagnosi (siti)			Numero P.IVA		
47			17		
Numero grandi imprese			Numero grandi imprese energivore		
0			2		
Numero siti ISO 50001			Numero siti sottoposti a monitoraggio		
0			6		
INTERVENTI EFFETTUATI			INTERVENTI INDIVIDUATI		
Numero medio interventi per sito		0,9	Numero medio interventi per sito		2,4
Quota di diagnosi contenenti interventi		36%	Quota di diagnosi contenenti interventi		96%
N° interventi	Risparmio annuo di energia finale (tep/anno)	Risparmio medio di energia finale per intervento (tep)	N° interventi	Risparmio annuo di energia finale (tep/anno)	Risparmio medio di energia finale per intervento (tep)
42	6.532,2	155,5	114	20.240,9	177,6
6,6%	15,7%	Quote sul totale Ateco 23	6,2%	27,0%	Quote sul totale Ateco 23
Risparmio annuo totale/ Consumo totale	Risparmio annuo di energia elettrica / Consumo elettrico totale	Risparmio annuo di energia termica / Consumo termico totale	Risparmio annuo totale/ Consumo totale	Risparmio annuo di energia elettrica / Consumo elettrico totale	Risparmio annuo di energia termica/ Consumo termico totale
0,4%	0,6%	0,3%	1,2%	3,8%	0,4%
INTERVENTI EFFETTUATI PER AREA			INTERVENTI INDIVIDUATI PER AREA		
Area di intervento		N° interventi	Area di intervento		N° interventi
Aria compressa		5	Aria compressa		22
Centrale termica/Recuperi termici		5	Centrale termica/Recuperi termici		17
Climatizzazione		0	Climatizzazione		4
Cogenerazione/Trigenerazione		1	Cogenerazione/Trigenerazione		1
Generale/Gestionale		2	Generale/Gestionale		4
Illuminazione		7	Illuminazione		18
Impianti elettrici		0	Impianti elettrici		3
Linee produttive		18	Linee produttive		23
Motori elettrici/Inverter		3	Motori elettrici/Inverter		14
Produzione da fonti rinnovabili		0	Produzione da fonti rinnovabili		7
Rifasamento		0	Rifasamento		1
Freddo di processo		1	Freddo di processo		0
Totale		42	Totale		114



## ANALISI DEGLI INTERVENTI EFFETTUATI

INVESTIMENTI				COSTO EFFICACIA DEGLI INTERVENTI, CON RISPARMI DI ENERGIA FINALE			
Area di intervento	N° interventi con informazioni	Investimento totale (€)	Investimento totale (%)	Investimento medio (€)	Area di intervento	N° interventi con informazioni	Costo efficacia (€/top di energia finale)
Aria compressa	2	124.798,0	0,4%	62.399,0	Aria compressa	2	874,2
Centrale termica/Recuperi termici	3	16.220.000,0	52,5%	5.406.666,7	Centrale termica/Recuperi termici	3	16.075,8
Cogenerazione/Trigenerazione	1	1.880.000,0	6,1%	1.880.000,0	Freddo di processo	0	0,0
Freddo di processo	0	0,0	0,0%	0,0	Generale/Gestionale	1	0,0
Generale/Gestionale	1	7.000,0	0,0%	7.000,0	Illuminazione	3	452,2
Illuminazione	5	596.559,0	1,9%	119.311,8	Linee produttive	4	5.743,1
Linee produttive	4	11.430.000,0	37,0%	2.857.500,0	Motori elettrici/Inverter	0	10.940,1
Motori elettrici/Inverter	1	646.349,0	2,1%	646.349,0	Totale complessivo	13	6.817,1*
Totale	17	30.904.706,0	100%	1.568.460,9			
RISPARMI DI ENERGIA FINALE							
Area di intervento	N° interventi con informazioni	Risparmio annuo totale (tep/anno)	Risparmio annuo totale (%)	Risparmio annuo totale medio (tep/anno)	Risparmio annuo di energia elettrica (tep/anno)	Risparmio annuo di energia termica (tep/anno)	Altri risparmi annui (tep/anno)
Aria compressa	2	162,0	2,5%	81	162,0	0,0	0,0
Centrale termica/Recuperi termici	5	2.122,9	32,5%	424,6	1.843,9	279,0	0,0
Freddo di processo	0	0,0	0,0%	0,0	0,0	0,0	0,0
Generale/Gestionale	1	15,5	0,2%	15,5	15,5	0,0	0,0
Illuminazione	4	179,9	2,8%	45,0	179,9	0,0	0,0
Linee produttive	4	4.038,6	61,8%	1.009,7	86,6	3.952,0	0,0
Motori elettrici/Inverter	2	13,2	0,2%	6,6	13,2	0,0	0,0
Totale	18	6.532,2	100%	226,0	2.301,1	4.231,0	0,0

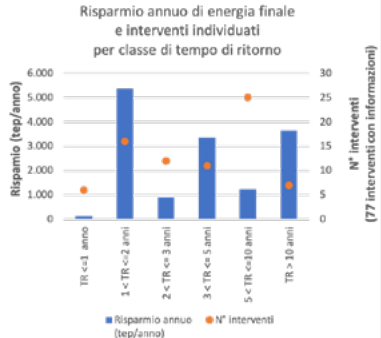
<b>INTERVENTI INDIVIDUATI</b>				
<b>ANALISI DEGLI INVESTIMENTI</b>				
<b>Area di intervento</b>	<b>N° interventi con informazioni</b>	<b>Investimento totale (€)</b>	<b>Investimento totale (%)</b>	<b>Investimento medio (€)</b>
Aria compressa	18	1.392.025,0	2,7%	77.334,7
Centrale termica/ Recuperi termici	4	34.540.000,0	66,3%	8.635.000,0
Climatizzazione	4	238.000,0	0,5%	59.500,0
Cogenerazione/ Trigenerazione	1	1.700.000,0	3,3%	1.700.000,0
Generale/Gestionale	1	15.000,0	0,0%	15.000,0
Illuminazione	16	1.600.712,0	3,1%	100.044,5
Impianti elettrici	3	4.955.000,0	9,5%	1.651.666,7
Linee produttive	18	3.941.626,0	7,6%	218.979,2
Motori elettrici/Inverter	12	1.1990.793,0	3,8%	165.899,4
Produzione da fonti rinnovabili	4	1.410.187,0	2,7%	352.546,8
Rifasamento	1	293.000,0	0,6%	293.000,0
<b>Totale</b>	<b>82</b>	<b>52.076.343,0</b>	<b>100%</b>	<b>1.206.270,1</b>
<b>COSTO EFFICACIA DEGLI INTERVENTI CON RISPARMI DI ENERGIA FINALE</b>				
<b>Area di intervento</b>	<b>N° interventi con informazioni</b>	<b>Costo efficacia (€/top di energia finale)</b>	<b>Tempo di ritorno medio (anni)</b>	
Aria compressa	17	4.490,8	5,0	
Centrale termica/ Recuperi termici	4	3.787,5	5,8	
Climatizzazione	3	12.236,1	9,7	
Generale (monitoraggio, organizzazione, formazione, ISO 50001)	1	3.488,4	1,8	
Illuminazione	16	6.997,2	1,5	
Impianti elettrici	3	5.803,8	4,1	
Linee produttive	16	2.649,0	5,1	
Motori elettrici/Inverter	12	7.496,9	3,5	
Rifasamento	1	2.839,1	8,6	
<b>Totale</b> <i>*(media)</i>	<b>73</b>	<b>5.532,10*</b>	<b>5,0</b>	
<b>COSTO EFFICACIA DEGLI INTERVENTI CON RISPARMI DI ENERGIA PRIMARIA</b>				
<b>Area di intervento</b>	<b>N° interventi con informazioni</b>	<b>Costo efficacia (€/top di energia finale)</b>	<b>Tempo di ritorno medio (anni)</b>	
Cogenerazione/ Trigenerazione	1	60.606,1	4,8	
Produzione da fonti rinnovabili	5	4.665,6	4,4	
<b>Totale</b> <i>*(media)</i>	<b>6</b>	<b>32.635,8*</b>	<b>4,6</b>	

INTERVENTI INDIVIDUATI									
RISPARMI DI ENERGIA FINALE									
Area di intervento	N° interventi con informazioni	Risparmio annuo totale (tep/anno)	Risparmio annuo totale (%)	Risparmio annuo totale medio (tep/anno)	Risparmio annuo di energia elettrica (tep/anno)	Risparmio annuo di energia termica (tep/anno)	Risparmio annuo di carburante (tep/anno)	Altri risparmi annui (tep/anno)	
Aria compressa	18	445,6	2,2%	24,8	445,6	0,0	0,0	0,0	
Centrale termica/ Recuperi termici	10	12.574,7	62,1%	1.257,5	12.545,6	29,1	0,0	0,0	
Climatizzazione	3	19,6	0,1%	6,5	0,0	19,6	0,0	0,0	
Generale/Gestionale	1	4,3	0,0%	4,3	4,3	0,0	0,0	0,0	
Illuminazione	16	277,7	1,4%	17,4	277,7	0,0	0,0	0,0	
impianti elettrici	3	718,9	3,6%	239,6	718,9	0,0	0,0	0,0	
Linee produttive	19	5.821,1	28,8%	306,4	525,8	5.295,3	0,0	0,0	
Motori elettrici/Inverter	12	279,2	1,4%	23,3	279,2	0,0	0,0	0,0	
Rifasamento	1	103,2	0,5%	103,2	103,2	0,0	0,0	0,0	
<b>Totale</b>	<b>83</b>	<b>20.244,4</b>	<b>100%</b>	<b>220,3</b>	<b>14.900,4</b>	<b>5.344,0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	
RISPARMI DI ENERGIA PRIMARIA									
Area di intervento	N° interventi con informazioni	Risparmio annuo totale (tep/anno)	Risparmio annuo totale (%)	Risparmio annuo totale medio (tep/anno)	Risparmio annuo di energia elettrica (tep/anno)	Risparmio annuo di energia termica (tep/anno)	Risparmio annuo di carburante (tep/anno)	Altri risparmi annui (tep/anno)	
Cogenerazione/ Trigenerazione	1	28,1	8%	28,1	28,1	0,0	0,0	0,0	
Produzione da fonti rinnovabili	4	329,2	92%	82,3	329,2	0,0	0,0	0,0	
<b>Totale</b>	<b>5</b>	<b>357,3</b>	<b>100%</b>	<b>55,2</b>	<b>357,3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	

## INTERVENTI INDIVIDUATI

### ANALISI PER CLASSE DI TEMPO DI RITORNO

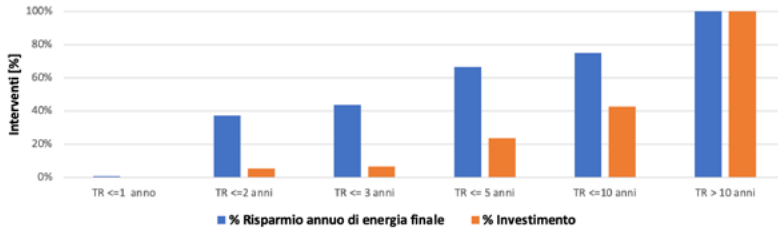
Classi tempo di ritorno	N° interventi	Risparmio annuo (tep/anno)	Investimento (€)
TR <= 1 anno	6	134,4	89.897,0
1 < TR <= 2 anni	16	5.361,3	2.542.426,0
2 < TR <= 3 anni	12	919,5	672.294,0
3 < TR <= 5 anni	11	3.359,7	8.323.000,0
5 < TR <= 10 anni	25	1.245,6	9.224.190,0
TR > 10 anni	7	3.657,1	28.114.349,0
<b>Totale</b>	<b>106</b>	<b>20.240,9</b>	<b>48.966.156,0</b>



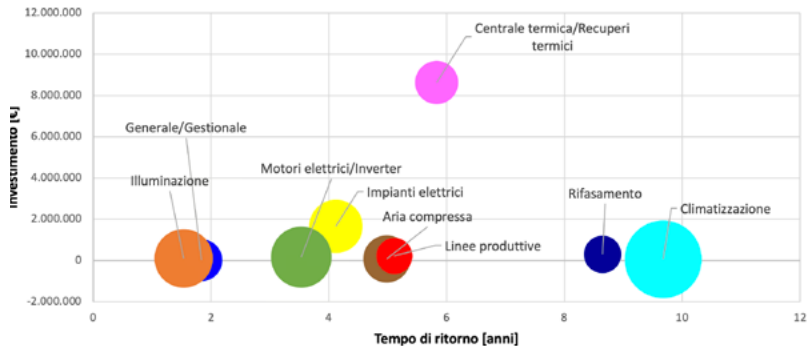
### ANALISI CUMULATA PER CLASSE DI TEMPO DI RITORNO

Classi tempo di ritorno	N° interventi	% Interventi	Risparmio annuo (tep/anno)	% Risparmio annuo di energia finale	Investimento (€)	% Investimento
TR <= 1 anno	6	7,8%	134,4	0,9%	89.897,0	0,2%
TR <= 2 anni	22	28,6%	5.495,6	37,4%	2.632.323,0	5,4%
TR <= 3 anni	34	44,2%	6.415,1	43,7%	3.304.617,0	6,7%
TR <= 5 anni	45	58,4%	9.774,8	66,6%	11.627.617,0	23,7%
TR <= 10 anni	70	90,9%	11.020,4	75,1%	20.851.807,0	42,6%
TR > 10 anni	77	100,0%	14.677,5	100,0%	48.966.156,0	100,0%

**Investimenti e risparmi cumulati per classe di tempo di ritorno**  
Numero interventi con informazioni = 77



**Investimento e tempo di ritorno (raggio bolla = costo efficacia)**





# BIBLIOGRAFIA

9

## 9. Bibliografia

- [1] Federbeton Confindustria, “Rapporto di sostenibilità”, 2019.
- [2] AITEC, <https://www.aitecweb.com/>
- [3] Federbeton Confindustria, “Rapporto di filiera 2019”.
- [4] AITEC, <https://www.aitecweb.com/LAssociazione/Le-Aziende-Associate>.
- [5] Chiarimenti in materia di Diagnosi Energetica nelle imprese ai sensi dell’articolo 8 del Decreto Legislativo N. 102 del 2014, novembre 2016, MISE
- [6] Diagnosi Energetiche art 8 del D.Lgs. 102/2014 Linee Guida e Manuale Operativo Clusterizzazione, il rapporto di diagnosi ed il piano di monitoraggio, ENEA, 2019.
- [7] UNI CEI EN 16247:1-4.
- [8] Foglio di rendicontazione dei consumi energetici per le Cementerie.
- [9] Takahiro Oki, Hugo Salamanca, “Driving Energy Efficiency in Heavy Industries - Global energy efficiency benchmarking in cement, iron & steel”, IEA, 17 marzo 2021.
- [10] Madloul, N., et al., An overview of energy savings measures for cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013. 19: p. 18-29.
- [11] Zegna, A., Le malte di cemento con inerti polimerici= The cement mortars with polymer aggregates. 2017, Politecnico di Torino.
- [12] Schorcht, F., et al., Best available techniques (BAT) reference document for the production of cement, lime and magnesium oxide. European Commission Joint Research Centre Institute for Prospective Technological Studies, Luxembourg, 2013.
- [13] Moray, S., et al. Energy efficiency opportunities in the stone and asphalt industry. in *Proceedings of the Twenty-Eighth Industrial Energy Technology Conference*. 2006.
- [14] Pozzetti, A., *Appunti di tecnologie industriali. Rielaborazione delle lezioni del prof. Pozzetti*. 2002, Milan: CUSL.
- [15] Cement Equipment corp, ‘INFINITY FOR CEMENT EQUIPMENT’,

cementequipment.org, 2021. <https://www.cementequipment.org/home-page/> (accessed Jan. 11, 2021).

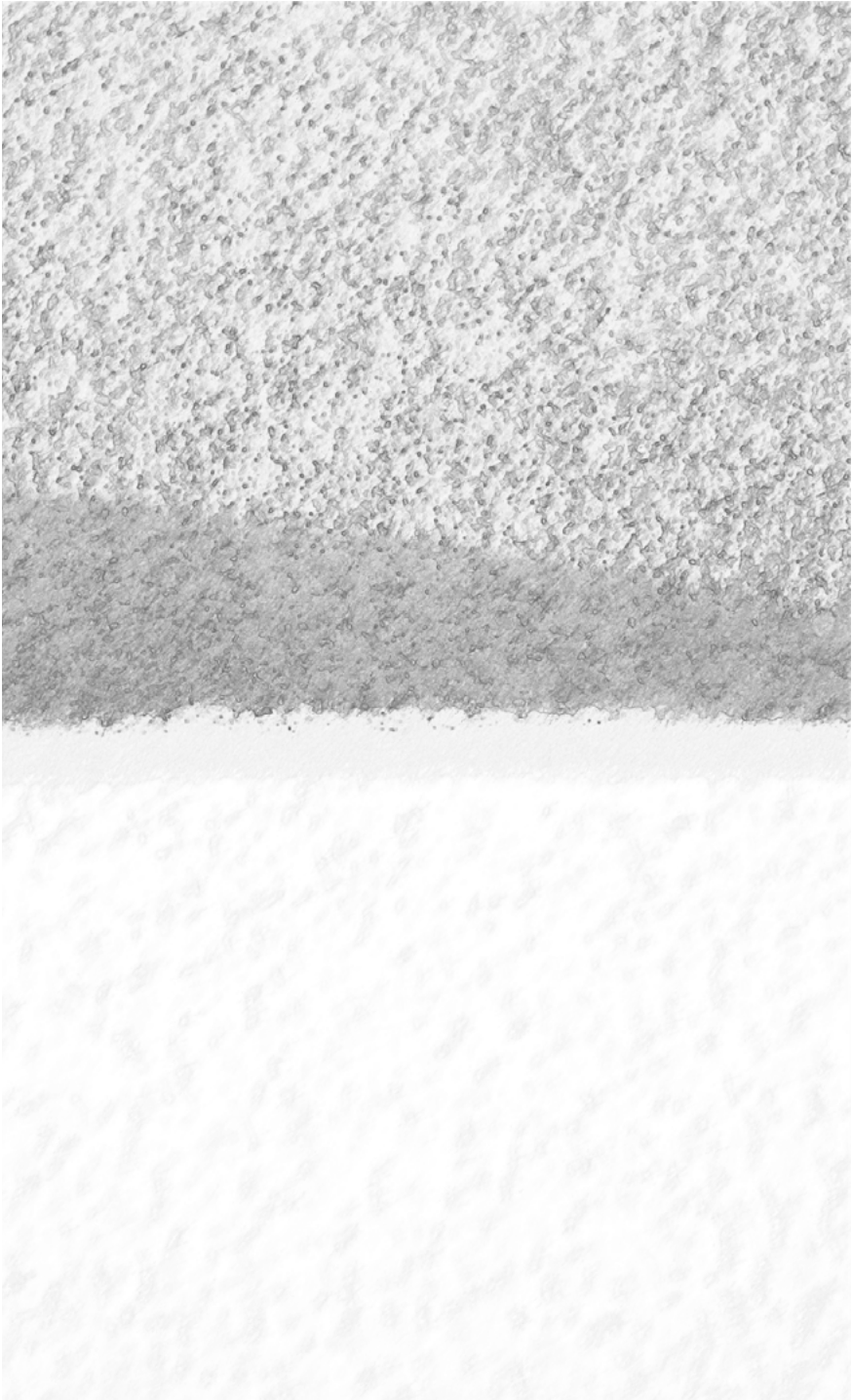
- [16] Bond, J.E., R. Coursaux, and R.L. Worthington, Blending systems and control technologies for cement raw materials. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2000. 6(6): p. 49-59.
- [17] Alsop, P.A., *Cement plant operations handbook: for dry process plants*. 2007: Tradeship Publications Ltd.
- [18] Hasanbeigi, A., et al., Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China: A case study of 16 cement plants. *Energy*, 2010. 35(8): p. 3461-3473.
- [19] Van Puyvelde, D.R., Modelling the hold up of lifters in rotary dryers. *Chemical Engineering Research and Design*, 2009. 87(2): p. 226-232.
- [20] Shanmugam, V. and E. Natarajan, Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer. *Renewable energy*, 2006. 31(8): p. 1239-1251.
- [21] Hasanbeigi, A., C. Menke, and A. Therdyothin, The use of conservation supply curves in energy policy and economic analysis: the case study of Thai cement industry. *Energy Policy*, 2010. 38(1): p. 392-405.
- [22] Hasanbeigi, A., et al., Energy efficiency improvement and CO<sub>2</sub> emission reduction opportunities in the cement industry in China. *Energy Policy*, 2013. 57: p. 287-297.
- [23] European Cement Research Academy (ECRA), 'Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead', in *CSI/ECRA-Technology Papers 2017*, Dusseldorf, Geneva, Mar. 2017, pp. 1-190, [Online]. Available: <https://www.wbcscement.org/index.html>.
- [24] Brunke, J.-C. and M. Blesl, Energy conservation measures for the German cement industry and their ability to compensate for rising energy-related production costs. *Journal of Cleaner Production*, 2014. 82: p. 94-111.
- [25] Duda, W., *La fabbricazione del cemento*. 1976, Milano, ET Edizioni Tecniche, parte\_I.
- [26] Hasanbeigi, A., L. Price, and E. Lin, Emerging energy-efficiency and CO<sub>2</sub> emission-reduction technologies for cement and concrete production: A

- technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012. 16(8): p. 6220-6238.
- [27] Lynskey, G. Blending/Homogenizing Silos--All They're Cracked up to Be? in 2019 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Conference (IAS/PCA). 2019. IEEE.
- [28] Worrell, E., C. Galitsky, and L. Price, Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for cement making. LBNL-54036-Revision. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, March, 2008.
- [29] Institute for Industrial Productivity, 'Explore energy efficiency technologies across the industrial sectors.', [iipinetwork.org](http://www.iipinetwork.org/), 2016. <http://www.iipinetwork.org/> (accessed Jan. 11, 2021).
- [30] Fischer, R. Crusher and Screen Drives for the Mining, Aggregate and Cement Industries. in IEEE Cement Industry Technical Conference. 1992. IEEE.
- [31] Worrell, E., et al., Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the glass industry. Berkeley National Laboratory, 2008.
- [32] Benedetti, M., et al., Explorative study on Compressed Air Systems' energy efficiency in production and use: First steps towards the creation of a benchmarking system for large and energy-intensive industrial firms. *Applied Energy*, 2018. 227: p. 436-448.
- [33] European Commission, 'Best Available Techniques Reference Document (BREF) for the Manufacture of Glass', p. 485, 2013.
- [34] P. Radgen and E. Blaustein, 'Compressed air systems in the European Union', Stuttgart: LOG\_X, 2001.
- [35] Benfante Relife Group, 'Produrre il "carbone di plastica", Csa Combustibile solido secondario è una opportunità per le aziende italiane: il combustibile da rifiuti plastici è utilizzato per accendere i forni dei cementifici italiani per la produzione del cemento.', [Benfante.it](https://www.benfante.it/news/item/combustibile-da-rifiuti-plastici-per-cementifici/). <https://www.benfante.it/news/item/combustibile-da-rifiuti-plastici-per-cementifici/> (accessed Apr. 09, 2021).
- [36] M. Merlini, 'Combustibili Solidi Secondari: un'opportunità per il futuro'. AITEC, 2013, Accessed: Apr. 09, 2021. [Online]. Available: [https://www.aitecweb.com/Portals/1/Repository/Pubblico/Area%20Tecnica/Pubblicazioni/Combustibili\\_Solidi\\_Secondari\\_un'opportunit%C3%A0\\_per\\_il\\_futuro](https://www.aitecweb.com/Portals/1/Repository/Pubblico/Area%20Tecnica/Pubblicazioni/Combustibili_Solidi_Secondari_un'opportunit%C3%A0_per_il_futuro).



pdf?ver=2018-06-18-163752-647.

- [37] Associazione Italiana Tecnico Economica Cemento, 'L'utilizzo dei Combustibili Solidi Secondari (CSS) nell'industria del cemento'. AITEC, 2013, Accessed: Apr. 09, 2021. [Online]. Available: [https://www.aitecweb.com/Portals/1/Repository/Pubblico/Area%20Tecnica/Pubblicazioni/L'utilizzo\\_dei\\_Combustibili\\_Solidi\\_Secondari\\_CSS\\_nell'industria\\_del\\_cemento.pdf?ver=2013-11-08-151205-243](https://www.aitecweb.com/Portals/1/Repository/Pubblico/Area%20Tecnica/Pubblicazioni/L'utilizzo_dei_Combustibili_Solidi_Secondari_CSS_nell'industria_del_cemento.pdf?ver=2013-11-08-151205-243).
- [38] R. Filippini, 'Circolare è bello, ma solo a parole'. l'Astrolabio, Sep. 26, 2018, Accessed: Apr. 09, 2021. [Online]. Available: [https://www.aitecweb.com/Portals/1/RassegnaStampa/Pubblica/2018/20180926\\_Circolare\\_%C3%A8\\_bello\\_ma\\_solo\\_a\\_parole\\_CSS\\_nei\\_cementifici\\_perch%C3%A9\\_no.pdf?ver=2018-09-26-183314-027](https://www.aitecweb.com/Portals/1/RassegnaStampa/Pubblica/2018/20180926_Circolare_%C3%A8_bello_ma_solo_a_parole_CSS_nei_cementifici_perch%C3%A9_no.pdf?ver=2018-09-26-183314-027).
- [39] R. T. Fischer, «Crusher and Screen Drives for the Mining, Aggregate and Cement Industries», in IEEE Cement Industry Technical Conference, Dallas, USA, mag. 1992, pagg. 108–147, doi: 10.1109/CITCON.1992.687613.



# ENEA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO

TOR VERGATA



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI ROMA



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI DELLA  
TUSCIA



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,  
CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE



Federbeton  
CONFINDUSTRIA

**RdS**  
RICERCA DI SISTEMA

La presente pubblicazione è stata realizzata nell'ambito della Ricerca di Sistema PTR 2019-2021, progetto I.6 "Efficienza Energetica dei prodotti e dei processi industriali", finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico