



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in INGEGNERIA MECCANICA

**IMPLEMENTAZIONE DI UN SISTEMA WHRS PER IL RECUPERO
DI CALORE IN ESUBERO PROVENIENTE DAL PROCESSO
PRODUTTIVO DI UN CEMENTIFICIO**

**IMPLEMENTATION OF A WHRS SYSTEM FOR HEAT EXCESS
RECOVERY IN A CEMENT PLANT PRODUCTION PROCESS**

Relatore:

Prof. Gabriele Comodi

Tesi di Laurea di:

Simone Cerbella

A.A. 2023/2024

A Claudia,

per essere sempre presente,

anche nei momenti più difficili.

Ringrazio la  *che mi ha*

permesso di intraprendere questo percorso.

Indice

Introduzione	1
1 Colacem	3
1.1 Gruppo Financo e struttura societaria	3
1.1.1 Storia Colacem ed evoluzione	5
1.1.2 Colacem e sostenibilità aziendale	6
1.1.3 Colacem e gli standard ambientali serie ISO 14000	12
1.1.3.1 Normativa UNI EN ISO 14001	13
1.1.4 Colacem e applicazione normativa 14001	14
1.1.5 Impianti produttivi Colacem in Italia e nel mondo	16
1.2 Principi ESG e loro applicazione	18
2 Processo di produzione del cemento	20
2.1 Chimica del cemento	20
2.1.1 Materie prime e costituenti	28
2.1.1.1 Cave e miniere	29
2.1.2 Frantumazione, trasporto e pre-omogeneizzazione	33
2.1.3 Macinazione miscela cruda e omogeneizzazione farina	36
2.1.4 Dosaggio costituenti e macinazione del cotto	37
2.2 Impianto di cottura e relativo audit energetico	39
2.2.1 Torre di preriscaldamento	39
2.2.1.1 I cicloni	41
2.2.1.2 Il calcinatore	42
2.2.2 Il forno	43
2.2.3 Griglia raffreddamento clinker	46
2.2.3.1 Bilancio griglia	47
3 Dimensionamento impianto ORC	51
3.1 Impostazione layout impianto	51

3.1.1	Definizione caso studio	52
3.1.2	Schema circuiti Aspen Hysys	53
3.2	Parametri della simulazione	57
3.3	Analisi dei risultati	60
	Conclusioni	64
	Bibliografia	67
	Sitografia	68

Indice delle figure

Figura 1 – Suddivisione del gruppo	4
Figura 2 – Logo e vision Colacem	5
Figura 3 – Trend recupero rifiuti non pericolosi	8
Figura 4 – Ripartizione utilizzo combustibili	9
Figura 5 – Colacem in Italia	16
Figura 6 – Colacem nel mondo	17
Figura 7 – Fasi mineralogiche al variare della temperatura	23
Figura 8 – Percentuale idratazione e andamento resistenza meccanica delle fasi	23
Figura 9 – Tipologie di cemento	27
Figura 10 – Contrasto parte in lavorazione e parte recuperata di un sito estrattivo	30
Figura 11 – Torre di preriscaldamento	40
Figura 12 – Flow sheet linea cottura Sesto Campano	47
Figura 13 – Istantanea programma gestione impianto forno e griglia di raffreddamento	49
Figura 14 – Griglia raffreddamento clinker modello Aspen Hysys	53
Figura 15 – Circuito olio diatermico modello Aspen Hysys	54
Figura 16 – Circuito ciclopentano modello Aspen Hysys	55
Figura 17 – Diagramma T-s fluido secco	56
Figura 18 – Modello completo Aspen Hysys	56
Figura 19 – Grafico T-q scambiatore olio-ciclopentano caso 1	60
Figura 20 – Grafico T-q scambiatore olio-ciclopentano caso 2	61
Figura 21 – Grafico T-q scambiatore olio-ciclopentano caso 3	62
Figura 22 – Impianto produttivo Colacem Sesto Campano	63

Indice delle tabelle

Tabella 1 – Dati di processo	49
Tabella 2 – Dati bilancio griglia	50
Tabella 3 – Dati input simulazioni	52
Tabella 4 – Riepilogo dati scambiatori caso 1	57
Tabella 5 – Riepilogo dati scambiatori caso 2	58
Tabella 6 – Riepilogo dati scambiatori caso 3	58

INTRODUZIONE

Nel presente progetto di tesi verranno trattati i benefici legati all'installazione di un sistema WHRS (Waste Heat Recovery System) nell'impianto di produzione del cemento di Colacem a Sesto Campano, con lo scopo di produrre energia elettrica attraverso il recupero del calore residuo in esubero dal suddetto processo di produzione. Questo sistema permette l'utilizzo di una turbina funzionante con ciclo ORC (Organic Rankine Cycle), sfruttando come fluido di lavoro organico il ciclopentano. Il trasferimento di calore tra i fumi di uscita dell'impianto ed il fluido di lavoro della turbina è garantito da un circuito ad olio diatermico interposto tra due scambiatori di calore: fumi-olio diatermico e olio diatermico-ciclopentano.

Con ORC si intendono impianti che convertono calore in energia elettrica mediante un ciclo Rankine che utilizza una sostanza organica ad alto peso molecolare come fluido di lavoro. Le caratteristiche di questi fluidi di lavoro permettono di sfruttare piccoli salti entalpici a temperature medio-basse laddove il ciclo Rankine a vapor d'acqua incontrerebbe limiti nella progettazione.

Questo tipo di intervento è fondamentale anche per sostenere i principi ESG (Environmental, Social and Governance); si tratta di tre dimensioni per verificare l'impegno in termini di sostenibilità di un'azienda. Il settore del

cemento viene da sempre riconosciuto come altamente energivoro e caratterizzato da alti livelli di emissioni di CO₂ ma “Hard-to-Abate” ovvero di difficile penetrazione da parte di fonti energetiche alternative e rinnovabili, principalmente a causa dell’utilizzo di calore ad elevata temperatura. Più della metà delle emissioni di CO₂ prodotte da una cementeria non sono, però, legate alle varie combustioni insite nel processo stesso; infatti, esse sono dovute alla decarbonatazione, reazione chimica fondamentale nella formazione del clinker costituente base delle varie tipologie di cemento. Questo intervento mira, dunque, ad una riduzione di una parte delle emissioni indirette dovute all’acquisto di energia elettrica (scope 2 – emissioni indirette di gas ad effetto serra derivanti da energia acquistata fuori sede e consumata dall’azienda), sfruttando una parte di calore che altrimenti andrebbe persa.

La tesi si compone di tre capitoli suddivisi come segue: un primo capitolo in cui si affronta la realtà aziendale e le sue attenzioni nei confronti della sostenibilità ambientale; un secondo capitolo in cui si tratta il processo produttivo del cemento e si discutono alcuni dati utili per comprendere come effettuare il recupero di calore per l’implementazione dell’ORC; un terzo capitolo in cui si effettua il dimensionamento energetico del sopracitato impianto mediante modello in Aspen Hysys.

Capitolo 1**COLACEM*****1.1 Gruppo Financo e struttura societaria***

Financo è la holding delle famiglie Colaiacovo con sede a Gubbio (PG) e attiva nel core-business della produzione e commercializzazione di cemento e calcestruzzo. Conta oltre 2000 dipendenti.

La controllata Colacem è il terzo produttore italiano nel settore del cemento così come Colabeton nel calcestruzzo. Oltre alle società di trasporti Tracem e Inba, che si sono sviluppate per seguire il core-business dell'azienda, Financo è impegnata in settori diversificati come quello delle energie rinnovabili con Greenfin Energy, turistico-alberghiero, assicurativo, radio televisivo, fino al settore sportivo con il Misano World Circuit "Marco Simoncelli".

Dopo la rapida espansione in Italia, il Gruppo ha esteso la propria presenza industriale in tre continenti, con gli impianti per la produzione di cemento in Tunisia, Albania, Repubblica Dominicana e Haiti, ed i terminal in Spagna e Giamaica.

L'approccio industriale del gruppo è improntato alla sostenibilità tramite conoscenze organizzative e tecnologiche di rilievo nella progettazione, realizzazione e gestione degli impianti produttivi.



Figura 1 – Suddivisione del gruppo

1.1.1 Storia Colacem ed evoluzione

Colacem S.p.a. è una realtà industriale attiva nella produzione di cemento. Creata dalla famiglia Colaiacovo nel 1966, si è sviluppata sullo slancio di una cultura d'impresa moderna ed innovativa. La società è presente in Italia con 6 stabilimenti a ciclo completo, 4 terminal e 3 depositi. Gli impianti di Tunisi (Tunisia), Sabana Grande de Palenque (Repubblica Dominicana), Lafiteau (Haiti), Balldre (Albania), insieme ai terminal di Alicante e Cartagena (Spagna), Kingston (Giamaica) e Lafiteau (Haiti), rappresentano la realtà internazionale del Gruppo. La Direzione Generale è a Gubbio, in provincia di Perugia.

Colacem fa dell'innovazione tecnologica e della sostenibilità i suoi punti di forza. In un settore industriale con una forte incidenza dei costi energetici, è risultato un fattore di successo la disponibilità di stabilimenti estremamente efficienti, capaci di ridurre al massimo gli sprechi di combustibili e di materie prime naturali. Tutto questo grazie alla volontà di puntare da sempre sulle migliori tecnologie disponibili e sul continuo ammodernamento degli impianti, che oggi possono essere considerati tra i più avanzati d'Europa.

Figura 2 – Logo e vision Colacem



1.1.2 Colacem e sostenibilità aziendale

L'attenzione alla cura dell'ambiente sta diventando un fattore di forza competitiva sul mercato, oltre che un obbligo da un punto di vista legale. Colacem crede che la sostenibilità debba essere perseguita tramite chiari obiettivi ambientali, tecnici, oltre che economici e sociali.

La produzione di cemento viene considerata un'attività industriale strategica per il nostro Paese, aggregatore di obiettivi come la messa in sicurezza del territorio, la rigenerazione urbana, il completamento delle infrastrutture per un paese moderno ed un ruolo attivo nell'attuazione della transizione energetica.

La ricerca verso prodotti a basso contenuto di CO₂ è una consapevolezza che guida agli obiettivi europei di "Net Zero" del 2050, tramite l'impiego delle migliori tecnologie disponibili. Ruolo sociale ed economico sono correlate in questo bilancio, con una serie di progetti e impegni nei confronti delle comunità nelle quali sono presenti impianti produttivi.

In questa direzione non sono mancati investimenti, nel solo 2022 con oltre 18 milioni di euro, per impiantistica finalizzata alla protezione dell'ambiente. In un settore industriale che muove grandi volumi, con una forte incidenza dei costi energetici, è risultato un fattore di successo disporre di stabilimenti estremamente efficienti, capaci di ridurre al massimo gli sprechi. Oggi più che mai, con tutti i settori industriali europei coinvolti nella sfida alla

decarbonizzazione, sostenibilità è sinonimo di competitività. Sostenibilità anche nell'uso delle risorse senza dover rinunciare ad attività necessarie, producendo con la massima efficienza disponibile, riducendo al minimo gli sprechi di combustibili e di materie prime non rinnovabili, prevenendo e limitando al massimo gli impatti sull'ambiente.

La produzione di cemento viene effettuata a partire da una miscela di marna, calcare, argilla e sabbie siliciche, macinata e cotta a 1450°C; vengono utilizzati questi materiali caratterizzati dall'essere estratti in natura. Otteniamo in questo modo un semilavorato chiamato clinker, base della produzione del cemento stesso; quest'ultimo viene ottenuto dopo opportune attività di macinazione ed aggiunta di ulteriori componenti (gesso, calcare, loppa, pozzolana) a seconda delle caratteristiche che si vogliono ottenere. Stando ai principi dell'economia circolare, Colacem riesce a limitare l'utilizzo di materie prime naturali utilizzando nel processo produttivo materiali non pericolosi che sono scarti di lavorazione di altri settori industriali, altrimenti diretti in discarica (processo incentivato dalla stessa Unione Europea). Nel 2022 Colacem ha utilizzato 5,5 milioni di tonnellate di materie prime, con un trend decrescente di anno in anno pur restando in linea con la produzione, aumentando negli anni l'utilizzo dei rifiuti non pericolosi recuperati come materia.



Figura 3 – Trend recupero rifiuti non pericolosi

Da un punto di vista del consumo energetico, la produzione del cemento è un'attività fortemente energivora. Il costo della componente energetica, sia essa termica che elettrica, rappresenta più del 50% del costo di tutti gli acquisti. Da un punto di vista termico, oltretutto, rientra in quei settori denominati “Hard to Abate”. Si tratta di settori industriali che necessitano di fonti di calore ad alta temperatura e di difficile penetrazione da parte delle fonti energetiche alternative e/o rinnovabili, più economiche e più inclini al processo di decarbonizzazione.

Nel 2022 il consumo totale di energia elettrica, per gli impianti in Italia, è stato di 1.579.279 GJ, che corrisponde ad un consumo di 0,52 GJ per tonnellata di cemento prodotto. In quest'ottica, è possibile implementare sistemi di recupero del calore in esubero, proveniente dalla linea di cottura, per la produzione di energia elettrica per autoconsumo oppure guardare alle energie rinnovabili tramite l'installazione di impianti fotovoltaici (sempre per autoconsumo).

Per produrre energia termica viene utilizzato principalmente il coke da petrolio, combustibile fossile che l'azienda cerca di sostituire, seppur parzialmente, con i CSS (Combustibili Solidi Secondari) derivati da rifiuti non pericolosi appositamente selezionati e trattati. Nel 2022, su un totale di 10.952.532 GJ totali di energia termica, il 15,9% è stato recuperato dai rifiuti. Questa pratica è molto incentivata da un punto di vista dell'Unione Europea ma trova spesso difficoltà ad affermarsi in Italia, anche per motivi di politica locale. In alcuni paesi europei lo sfruttamento calorico dei CSS supera il 50%.



Figura 4 – Ripartizione utilizzo combustibili

Il costante impegno di Colacem nel ridurre le emissioni ha mostrato la sua efficacia negli anni. Le emissioni di polveri, SO₂ e NO_x hanno raggiunto negli ultimi anni una certa stabilità oscillando su valori minimi, di molto inferiori ai limiti di norma in tutti gli stabilimenti.

Per le emissioni di CO₂ Colacem, per la propria attività industriale, è autorizzata ad emetterne determinate quote, decise dall'autorità nazionale competente sulla base del Protocollo di Kyoto per la lotta ai cambiamenti

climatici. Il processo fa riferimento alla politica dell'Unione Europea, con il sistema di scambio di quote di emissione di gas a effetto serra (Emission Trading System). Questo fissa un tetto alla quota di CO₂ che possono emettere determinati impianti produttivi, tra cui le cementerie. A certe aziende vengono assegnate delle quote gratuite di emissioni di CO₂ che, se in eccesso, possono essere scambiate o vendute. Alla fine di ogni anno le imprese devono restituire un numero di quote sufficiente a coprire le loro emissioni, anche acquistandole, se non vogliono subire pesanti sanzioni. La nuova Direttiva Europea ETS 2018/410/UE modifica il sistema di assegnazione delle quote di CO₂ fissando come riferimento le 10 migliori cementerie europee in termini di efficienza energetica. Si crea un enorme gap con gli impianti del nord Europa, non in termini di tecnologie impiegate, bensì in relazione alle percentuali di CSS usate che là superano il 50%, mentre in Italia si fatica ad arrivare al 20%. Questi combustibili alternativi sono di fondamentale importanza in quanto, prevedendo una significativa frazione di biomassa, il loro utilizzo, continuando ad affiancare quello del carbone, porterà ad una riduzione delle emissioni complessive.

Altro fattore di emissione di CO₂ del cemento dipende dalla percentuale di clinker contenuta in esso; maggiore sarà il suo contenuto, maggiore sarà il fattore di emissione. Per questo motivo, in linea con l'obiettivo di

decarbonizzazione, si sta cercando di sviluppare una gamma di cementi con minor contenuto di clinker utilizzando loppe o pozzolane che offrono comunque ottime prestazioni. A fronte di questi accorgimenti negli ultimi anni la produzione di CO₂ si è ridotta drasticamente, per attestarsi intorno al valore di 819 FEM (Fattore di Emissione Lineare, kg CO₂/ton clinker).

1.1.3 Colacem e gli standard ambientali serie ISO 14000

Le norme della serie ISO 14000 rappresentano un accordo globale sulle migliori pratiche ambientali, applicabile a qualsiasi tipo di organizzazione. Questa serie fornisce strumenti di gestione per le imprese che vogliono valutare e gestire con successo il loro impatto ambientale, al fine di migliorare le proprie performance. Questi standard SGA (Sistemi di Gestione Ambientale) non stabiliscono obiettivi di miglioramento delle prestazioni in modo rigido, ma indicano le modalità per gestire le attività in modo da perseguire gli obiettivi di prestazione autonomamente determinati. Caratteristica chiave di questa serie di norme è la loro natura volontaria; ciò significa che la loro adozione è una scelta strategica dell'impresa e non una costrizione legislativa. Scelta dettata non da obiettivi di breve periodo ma dalla volontà di maggiore controllo del rispetto dei regolamenti ambientali, dalla ricerca di efficienza nei processi, dalle pressioni della comunità locale o dalla volontà di un comportamento responsabile. Il gruppo di norme, certificabili e no, della serie 14000 comprende tematiche generali di sistemi di gestione ambientali e propone tre tipologie di strumenti utili per la sua attuazione: LCA (Life Cycle Assessment), EPE (Environmental Performance Evaluation) ed Environmental Labelling.

1.1.3.1 Normativa UNI EN ISO 14001

La ISO 14001 è una norma internazionale, di carattere volontario, che specifica i requisiti di un sistema di gestione ambientale. È riconosciuto come standard per la certificazione di SGA per organizzazioni di tutte le dimensioni. Si basa sulla metodologia “Plan-Do-Check-Act” (PDCA) e fornisce un metodo per l’attuazione di pratiche a protezione dell’ambiente, prevenendo l’inquinamento, riducendo l’entità dei rifiuti, il consumo di energia e dei materiali. Contribuisce, inoltre, a rafforzare la fiducia nei propri clienti e a tenere sotto controllo le proprie responsabilità nei confronti dell’ambiente e della sostenibilità. Lo sviluppo di un SGA secondo la norma UNI EN ISO 14001, consente di gestire in modo sistemico gli aspetti ambientali inerenti ai processi, in ottica di efficienza e miglioramento delle performance ambientali, permettendo di ottenere diversi vantaggi come la riduzione dei costi gestionali attraverso la razionalizzazione delle materie prime, riduzione di rifiuti ed emissioni, diminuzione dei costi energetici, agevolazione al rilascio di autorizzazioni da parte delle autorità preposte, tutela dell’ambiente e uso consapevole delle risorse. È stata realizzata, inoltre, per essere completamente integrata con le norme ISO 9001 e 45001, dando alle aziende la possibilità di creare un Sistema di Gestione Integrato conforme ai requisiti di qualità, sicurezza e ambiente.

1.1.4 Colacem e applicazione normativa 14001

Colacem si impegna a promuovere la normativa UNI EN ISO 14001 su due fronti: lato produzione e lato fornitura.

A partire dal 1997 sono state ottenute le prime certificazioni ISO 9001 per la Sede Centrale di Gubbio e lo Stabilimento di Ghigiano, dando il via ad un percorso di evoluzione sia in Italia che negli stabilimenti esteri. Nello specifico della ISO 14001 va detto che, per la suddetta certificazione ambientale, viene data priorità alle unità produttive a ciclo completo. Ad ogni modo, anche i terminal sono dotati di Sistemi di Gestione Ambientale ispirati ai principi della stessa norma sopra citata. È presente, inoltre, un processo di gestione di richieste/segnalazioni (reclami fondati) sia da parte della comunità esterna sia dalle parti interessate interne, in merito agli aspetti ambientali del sito. La Sede Centrale, tutte le unità produttive in Italia e, per l'estero, Albania e Tunisia sono dotate di questa certificazione.

Lato fornitura Colacem si compone di circa 2700 fornitori tra energia, trasporto, materie prime, semilavorati, packaging e servizi vari. Una catena di fornitura sostenibile è fondamentale per un modello di business che fa dell'Economia Circolare il proprio punto di forza. I fornitori, ritenuti idonei a erogare il prodotto o servizio, sono periodicamente sottoposti ad una "valutazione per l'ambiente" tramite: verifica di adesione volontaria a

politiche ambientali mediante applicazione SGA secondo norma UNI EN ISO 14001, disponibilità ad attenersi alle disposizioni di Colacem in merito al rispetto all'ambiente e capacità di fornire la documentazione prescritta in materia ambientale.

1.1.5 Impianti produttivi Colacem in Italia e nel mondo

Colacem è il terzo produttore italiano di cemento, con una produzione nazionale di circa 3,7 milioni di tonnellate. L'azienda è presente anche a livello internazionale, con vari stabilimenti e terminal in tre continenti. La Direzione Generale si trova a Gubbio. I 6 stabilimenti a ciclo completo per la produzione di cemento in Italia sono: Caravate (VA), Rassina (AR), Ghigiano di Gubbio (PG), Sesto Campano (IS), Galatina (LE) e Ragusa; ad affiancarli si trovano anche 4 terminal portuali e 3 depositi.



Figura 5 – Colacem in Italia

Gli stabilimenti esteri sono: Tunisi (Tunisia) e Sabana Grande de Palenque (Repubblica Dominicana) a ciclo completo, Balldre (Albania) e Lafiteau (Haiti) con solo impianti di macinazione e quattro terminal portuali suddivisi tra Spagna, Giamaica e Haiti. La produzione estera complessiva annuale è di circa 2,8 milioni di tonnellate di cemento.



Figura 6 – Colacem nel mondo

1.2 Principi ESG e loro applicazione

Tutti gli impianti produttivi a ciclo completo sono caratterizzati dallo stesso flusso di lavorazioni. La fase cruciale, e maggiormente energivora, di tutto il processo è rappresentata dalla cottura del clinker che necessita di alte temperature (circa 1450°C con temperature di fiamma che raggiungono i 2000°C). Nell’ottica della sostenibilità, ampiamente discussa nei paragrafi precedenti, ciò che si può migliorare è la gestione del recupero del calore in esubero dai vari processi, altrimenti perso, e del conseguente riutilizzo.

Nel dettaglio, già si vanno a recuperare gas caldi dalla linea di cottura del clinker per l’essiccazione della “miscela cruda” e del carbone, viene recuperata l’aria calda dalla griglia di raffreddamento del clinker per essere usata come comburente sia nella testata del forno (aria secondaria) per la combustione principale sia nel precalcinatore e nella camera calcinante (aria terziaria) per le combustioni ausiliarie. Un ulteriore recupero di calore può essere fatto, sempre sulla griglia di raffreddamento del clinker, per essere inviato ad un impianto di produzione di energia elettrica. Proprio su questo si incentrerà la restante parte del progetto di tesi, con uno studio sull’implementazione di questo sistema sull’impianto produttivo Colacem di Sesto Campano. Si tratta di un sistema WHRS con il quale si potrà recuperare calore in esubero dalla linea di cottura per la produzione di energia elettrica. Il

sistema prevede di utilizzare tale calore in un sistema a turbina di tipo ORC; sono impianti che utilizzano sostanze organiche ad alto peso molecolare come fluido di lavoro e, quindi, consentono di sfruttare piccoli salti entalpici con basse temperature che l'equiparabile ciclo Rankine con vapore d'acqua non consentirebbe.

L'implementazione di questo impianto, così come altre migliorie precedentemente descritte, sono azioni volte al raggiungimento degli obiettivi collegati ai principi ESG. Le misure da implementare sono riassumibili in tre categorie: misure ambientali come riduzione emissioni di CO₂ (scope1, scope2, scope3), riduzione consumo energetico, maggior utilizzo di energia da fonti rinnovabili, evitare sprechi di acque e rifiuti; misure di sostenibilità in ottica gestione del personale, sicurezza, formazione e sviluppo; misure di governance e quindi certificazioni, Sustainable Development Goals (Agenda 2030), rapporti di sostenibilità, ISO 14001 e molto altro. Questi sono solo alcuni aspetti di un concetto ben più ampio che permettono, alle aziende che li integrano, di beneficiare di opportunità di risparmio, di riduzione del consumo energetico, di minimizzare gli sprechi delle risorse per ottenere una riduzione dei costi operativi complessivi.

Capitolo 2**PROCESSO DI PRODUZIONE DEL CEMENTO****2.1 *Chimica del cemento***

I leganti sono prodotti inorganici che ridotti in polvere e miscelati con acqua generano una massa inizialmente plastica che poi rapprende e si indurisce. Si suddividono in due categorie: leganti aerei e leganti idraulici. I conglomerati che si ottengono con i primi rapprendono ed induriscono solo se rimangono a contatto con l'aria, gli altri, invece, rapprendono dopo essere stati idratati ed induriscono sia in aria che a contatto con acqua. La loro idratazione origina prodotti meccanicamente resistenti e chimicamente stabili anche sott'acqua. Il cemento è un legante idraulico formato dalla miscelazione di clinker, gesso e altri costituenti come calcare, pozzolana, loppa, ecc. (sulla base delle caratteristiche che si vogliono ottenere).

Le materie prime utilizzate per la produzione di clinker sono materiali di origine naturale contenenti gli elementi principali (espressi come ossidi) costituenti il clinker. I principali ossidi sono: CaO (ossido di Calcio), SiO₂ (ossido di Silicio), Al₂O₃ (ossido di Alluminio) e Fe₂O₃ (ossido di Ferro). Essendo molto difficile trovare in natura un materiale che abbia un corretto rapporto tra questi elementi bisogna creare una perfetta miscela tra le diverse materie prime. Il portatore principale di calcio è il calcare (ossido basico), i

portatori di ossidi acidi sono principalmente le argille, le marne, le arenarie, sabbie silicee, bauxiti e piriti.

Nel tempo sono stati elaborati dei parametri, detti moduli, che servono per caratterizzare la miscela cruda in funzione delle caratteristiche che si vogliono ottenere nel clinker: il modulo idraulico (MI) (non più utilizzato), con valore che oscilla tra 1,7 e 2,2, rappresenta il rapporto tra la componente basica (CaO) e quella acida del cemento (SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3); il modulo silicico (MS), con valore che oscilla tra 2,4 e 2,7, rappresenta il rapporto tra i cementanti (SiO_2) e i fondenti (Al_2O_3 e Fe_2O_3): più è alto questo valore più difficile sarà la cottura e la successiva clinkerizzazione a causa delle temperature maggiori e, inoltre, un modulo silicico alto comporta una maggiore polverosità del clinker, con conseguente minor rendimento del forno; il modulo dei fondenti (MF), ovvero il rapporto tra Al_2O_3 e Fe_2O_3 con valore che oscilla tra 0,64 e 3, indica che se basso durante la cottura si formeranno C_4AF e C_2F (cemento ferrico), se alto prevarrà Al_2O_3 e si necessiterà di temperature maggiori (cemento alluminoso); il grado di saturazione in calcio (GSC) (che va a sostituire il modulo idraulico) fornisce il rapporto tra ossido basico e ossido acido e tiene conto delle proporzioni stechiometriche con cui gli ossidi acidi reagiscono con il calcio per formare i quattro costituenti fondamentali del clinker (Alite C_3S , Belite C_2S , Celite C_3A

e Brownmillerite C_4AF); il limite di saturazione (LSF), simile al GSC, tiene conto del CaO non disponibile alla formazione del clinker perché destinato a legarsi con SO_3 a causa dello zolfo contenuto nei combustibili (nella farina, dove non ho ancora avuto combustione, $LSF=GSC$) e, quindi, un basso LSF indica una buona attitudine alla cottura e un basso valore di calce libera; il modulo calcareo (MC), che fornisce già in partenza un'idea sull'idraulicità del clinker, indica quanto calcio può combinarsi con SiO_2 : se ottengo un valore maggiore di 2,8 sarà presente calce libera con un cemento che risulterà espansivo (aumento di volume nella fase di presa), altrimenti, se inferiore, si avrà un cemento meno idraulico con prevalenza di formazione di C_2S .

La miscela cruda che si ottiene dalla miscelazione delle materie prime in funzione dei moduli appena descritti genera, in fase di cottura a circa $1450^{\circ}C$ (temperatura di sinterizzazione), una serie di reazioni che portano alla formazione del clinker con le seguenti fasi mineralogiche: Silicato tricalcico (Alite, C_3S), Silicato bicalcico (Belite, C_2S), Alluminato tricalcico (Celite, C_3A) e Ferro Alluminato tetracalcico (Brownmillerite, C_4AF). Il processo di cottura è così suddiviso: $100^{\circ}C$ evaporazione dell'acqua igroscopica; $400-500^{\circ}C$ disidratazione dell'acqua di cristallizzazione delle argille; $800-1000^{\circ}C$ decarbonatazione del calcare e inizio formazione C_2S ; $1000-1100^{\circ}C$

formazione C_3A ; 1100-1200°C formazione C_4AF ed inizio fase liquida; 1300-1450°C formazione C_3S .

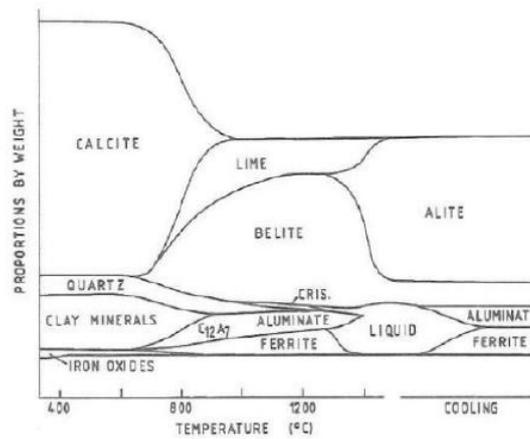


Figura 7 – Fasi mineralogiche al variare della temperatura

I due alluminati (C_3A e C_4AF) contribuiscono, per reazione con l'acqua, al fenomeno della presa; infatti, dopo qualche ora la pasta cementizia comincia a perdere la sua lavorabilità con conseguente aumento di consistenza. I due silicati (C_3S e C_2S) determinano l'indurimento del cemento; infatti, dopo qualche giorno questa miscela diviene così rigida da assumere l'aspetto di una pietra.

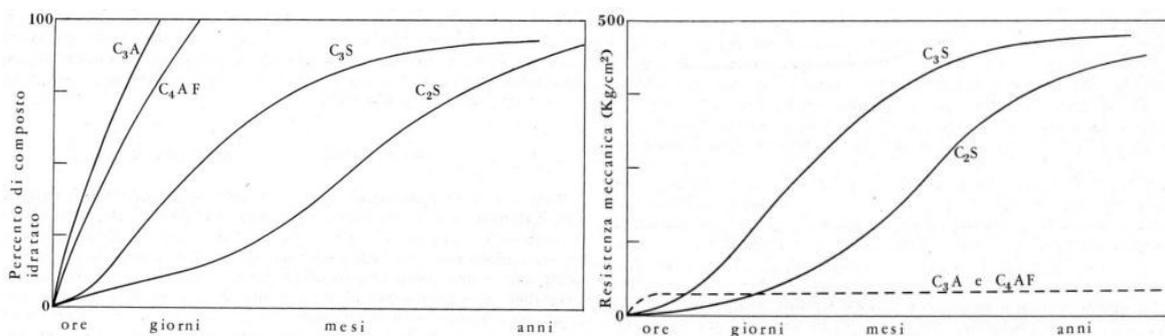


Figura 8 – Percentuale idratazione (sinistra) e andamento resistenza meccanica (destra) delle fasi

L'idratazione, come accennato, produce effetti diversi nel caso dei silicati e degli alluminati. Nel caso dei silicati (C_3S e C_2S) si vengono a formare due prodotti: un silicato di calcio idrato (CSH) e l'idrossido di calcio ($Ca(OH)_2$):



Mentre il CSH è determinante per l'indurimento, la calce contribuisce in modo trascurabile al processo. La reazione fa sì che le fibre di CSH che si formano sui granuli di C_3S e C_2S prima si tocchino e poi si intreccino. Nel momento della presa, ad indurimento avvenuto, si possono notare tra le fibre delle micro-cavità diffuse che influiscono negativamente sia sulla resistenza meccanica che sulla durabilità del materiale: maggiore porosità significa maggiore penetrabilità da parte di agenti corrosivi come solfati e cloruri. Per ridurre questa capillarità si può ridurre, a parità di cemento, il quantitativo d'acqua o, a parità di acqua, aumentare il quantitativo di cemento andando a diminuire il rapporto acqua/cemento, creando un intreccio più fitto di fibre.

Gli alluminati (C_3A e C_4AF), la cui funzione è quella di diminuire la temperatura di cottura del clinker, hanno un ruolo importante nelle prime ore di reazione tra acqua e cemento:



Questi non contribuiscono significativamente allo sviluppo della resistenza meccanica, ad eccezione di un piccolo incremento nelle prime ore. La

reazione degli alluminati con acqua genera un'immediata perdita di plasticità, senza un incremento rilevante della resistenza meccanica. Il tutto dipende dalla morfologia dei cristalli di CAH che non favorisce l'aumento di resistenza come nel caso delle fibre di CSH.

Per impedire un'eccessiva perdita di lavorabilità, a causa dei fenomeni descritti, nella fase di macinazione del clinker si aggiunge solfato di calcio (gesso) che permette la formazione di ettringite. L'ettringite svolge un ruolo fondamentale nella regolazione della presa del cemento Portland. Esso è costituito dal clinker e dal gesso aggiunto, per circa un 5%, nel molino di macinazione del cemento. In assenza di gesso il clinker provocherebbe una presa così rapida da rendere impraticabile la lavorazione del cemento. La funzione del gesso è quella di favorire il deposito di ettringite e ritardare l'ulteriore idratazione del C₃A e la formazione di CAH:



Il risultato è quello di far avvenire la presa del cemento in un tempo più lungo consentendo tutte le operazioni di gestione intermedia. Questa ettringite, detta ettringite primaria, genera però un aumento di volume dato dal fatto che è più voluminosa dei prodotti che la generano. Ovviamente, se la formazione di ettringite si dovesse prolungare nel tempo, l'aumento di volume potrebbe provocare tensioni e conseguenti fessurazione dei manufatti cementizi. Per

questo va dosata in maniera molto precisa la quantità di gesso aggiunto durante la macinazione. Un altro effetto indesiderato potrebbe essere dovuto al fatto che una parte di C_3A rimanga al di sotto della pellicola di ettringite; tramite una lenta diffusione dell'acqua attraverso la pellicola si potrebbe incorrere in una seconda formazione di CAH, che porterebbe ad una nuova formazione di ettringite, detta secondaria, che potrebbe essere ulteriormente alimentata da gesso formato in sito per ingresso di solfati presenti nell'ambiente. Questa ettringite può provocare danni severi sotto forma di fessurazioni e distacchi del calcestruzzo, fenomeno noto con il nome di attacco solfatico. Tutto il processo può essere schematizzato con una successione di tre eventi: ingresso nell'ambiente di ioni solfatici SO_4^{2-} nel cemento; reazione dello ione solfato con la calce $Ca(OH)_2$; reazione del gesso con gli idro-alluminati di calcio e conseguente formazione di ettringite secondaria. Questi meccanismi andrebbero bloccati per evitare la formazione di ettringite secondaria.

Le tipologie di cemento normate dalla UNI EN 197-1 sono: cemento Portland (CEM I), cemento Portland con aggiunta di altri elementi (CEM II), cemento d'altoforno con loppa dal 36% al 95% (CEM III), cemento pozzolanico con materiale pozzolanico dall'11% al 55% (CEM IV) e cemento composito con aggiunta sia di loppa che di materiale pozzolanico (CEM V). Inoltre, si

Capitolo 2

Processo di produzione del cemento

possono includere in questo elenco anche dei cementi speciali come: il Portland ferrico, i cementi bianchi ed il cemento alluminoso. Alla sopracitata norma, che rimane comunque valida, vanno aggiunte le seguenti due estensioni: la UNI EN 197-5 e la UNI EN 197-6. La prima descrive un tipo di cemento Portland-composito CEM II/C-M e un tipo di cemento composito CEM VI non trattati nella UNI EN 197-1. La seconda descrive tipologie di cemento con materiali da costruzione riciclati.

Tipi principali	Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune)		Composizione (percentuale in massa) [®]										Costituenti secondari
			Costituenti principali										
			Clinker K	Loppa di altoforno S	Fumi di silice D [®]	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato T	Calcare		
			naturale P	naturale calcinata Q	silicea V	calcica W		L	LL				
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento Portland alla loppa	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland ai fumi di silice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alla pozzolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alle ceneri volanti	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Cemento Portland allo scisto calcinato	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Cemento Portland al calcare	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Cemento Portland composito [®]	CEM II/A-M	80-94	← 6-20 →									0-5
CEM II/B-M		65-79	← 21-35 →									0-5	
CEM III	Cemento d'altoforno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cemento pozzolanico [®]	CEM IV/A	65-89	-	← 11-35 →					-	-	-	0-5
		CEM IV/B	45-64	-	← 36-55 →					-	-	-	0-5
CEM V	Cemento composito [®]	CEM V/A	40-64	18-30	-	← 18-30 →			-	-	-	-	0-5
		CEM V/B	20-38	31-50	-	← 31-50 →			-	-	-	-	0-5

Figura 9 – Tipologie di cemento

2.1.1 Materie prime e costituenti

Una grande quantità di materie prime è impiegata nella fase di realizzazione della “farina cruda”, ovvero una miscela finemente macinata di materiali dalla quale, tramite cottura, si ricava il clinker. In questa fase i materiali di interesse sono: calcare, argilla, marna e marna da cemento. Una distinzione a livello chimico e mineralogico viene fatta tramite l’indice di idraulicità:

$$\frac{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}{CaO}$$

Se questo valore è compreso tra 0,3 e 0,7 allora si avrà una Marna da Cemento e la miscela si dice a Titolo. Se il valore è maggiore di 2 si avrà argilla, se minore di 0,3 si avrà calcare. Per produrre clinker non serve per forza marna da cemento, si può anche avere più materiale argilloso o calcareo, ed andare a compensare con altri prodotti per creare la giusta dose secondo la “ricetta” della cementeria. Su questa base si può fare una distinzione tra miscela a titolo già pronta per l’utilizzo, una a basso titolo argillosa ed una ad alto titolo calcarea.

Successivamente vengono impiegati altri costituenti, macinati assieme al clinker, per la produzione delle varie tipologie di cemento. Tra le più utilizzate ci sono il gesso, la pozzolana ed il calcare: il primo serve per regolare la presa, il secondo conferisce resistenza in ambienti corrosivi e

l'ultimo serve per lo sviluppo iniziale della resistenza meccanica nel cemento.

In ottica efficientamento delle risorse e nell'ottica dell'economia circolare e della sostenibilità, sia nel crudo che nel cotto è in aumento la sostituzione delle materie prime con rifiuti non pericolosi recuperabili e provenienti da altre lavorazioni industriali di cui ne sono scarti come: scaglie di laminazione (contengono ferro e sono usate per la produzione di clinker), gessi chimici e loppe d'altoforno. Non tutti i calcari, le argille, le pozzolane, ecc. sono adatti alla produzione del cemento; essi debbono rispettare precise caratteristiche chimiche a seconda dell'utilizzo che se ne vuole fare ed i giacimenti, seppure si tratti di materiali comuni, sono confinati in poche e ristrette aree estrattive, soggette ad autorizzazioni specifiche rilasciate dagli enti preposti.

2.1.1.1 Cave e miniere

Le materie prime vengono estratte da due tipologie di siti estrattivi: le cave e le miniere. A stabilire la distinzione è il regio decreto N° 1443/27 tra minerali di 1^a e di 2^a categoria. I primi vengono estratti dalle miniere, che sono di interesse statale, i secondi dalle cave, che sono di interesse regionale. La differenza non si basa quindi sulla tipologia di attività estrattiva (sotterranea o a cielo aperto) ma sul minerale estratto, così come non si basa sulla procedura dell'attività estrattiva, identica per cave e miniere, regolata da leggi regionali. Appartengono alla prima categoria minerali utilizzabili per l'estrazione di

metallo, combustibili, pietre preziose, rocce asfaltiche, marna da cemento, ecc. Appartengono alla seconda categoria torbe, materiale per costruzioni edilizie, sabbie silicee, ecc. Verrà rilasciata una concessione per quello che riguarda le miniere, mentre per quanto riguarda le cave un'autorizzazione. Per poter ottenere questi permessi è necessario presentare un progetto al quale si devono allegare tutte le fasi che delineano il lavoro all'interno dei siti estrattivi, con particolare riguardo alle due fasi fondamentali che sono la coltivazione ed il recupero.



Figura 10 – Contrasto parte in lavorazione e parte recuperata di un sito estrattivo

Normalmente queste due fasi avvengono in simultanea: una volta terminata la coltivazione da un punto del sito si passa alla parte successiva per quanto riguarda l'estrazione e, nella parte già lavorata, si procede con il riporto di

terra e successiva semina di essenze erbacee prima, arbustive poi ed infine arboree autoctone fino all'ottenimento di un completo recupero dell'area. Anche la fase di coltivazione avviene con un preciso schema che può variare in base alla conformazione naturale del luogo estrattivo; infatti, si hanno: coltivazioni di monte, coltivazioni di colle e coltivazioni di pianura. Le prime due, seppur differenziate da quote di lavoro diverse, attualmente hanno uno schema molto simile fatto da fasi di escavazione per fette orizzontali discendenti, metodo che, rispetto ad altri usati in precedenza, permette sia di lavorare in sicurezza sia di effettuare un lavoro simultaneo di coltivazione e recupero, garantendo anche un basso impatto visivo.

La fase di coltivazione prevede inizialmente abbattimento della roccia, normalmente eseguita tramite esplosivi. È una fase molto delicata in quanto il loro acquisto, consegna ed esplosione viene supervisionato da guardie giurate e la loro movimentazione può essere effettuata solo da ditte specializzate.

Il processo di esplosione è riassumibile in questo modo: si procede forando inizialmente la roccia, con un foro di diametro variabile in funzione del tipo di roccia e di esplosivo (tra i 60-90 mm) e con una profondità di 7-8 m, successivamente si vanno ad inserire dei salsicciotti esplosivi (il foro è suddiviso in tre stadi: carico al piede nel livello più basso dove è posto anche il detonatore, carico in colonna nel livello intermedio e livello di

borraggiatura, che serve solo per evitare ripercussioni all'esterno nella fase di esplosione, rimettendo nel foro la roccia scavata in precedenza), poi si collegano tramite circuito elettrico tutti gli esplosivi inseriti generando una maglia ed inserendo dei dispositivi ritardanti tra i nodi (per evitare di avere un'esplosione contemporanea di tutta la maglia). Il segnale per l'esplosione viene inviato tramite un esploditore. Dopo questo si provvede, se necessario, ad un ulteriore abbattimento tramite mezzi meccanici di pezzi di grandi dimensioni prima della movimentazione all'interno del sito estrattivo, con successivo carico di mezzi per trasportare il materiale dalla cava all'impianto produttivo.

2.1.2 Frantumazione, trasporto e pre-omogeneizzazione

Entrando nel processo produttivo di Sesto Campano si ha una fase iniziale nella quale si provvede a ricevere, frantumare e stoccare le materie prime in arrivo dai siti estrattivi per formare la miscela cruda dalla cui successiva macinazione, essiccazione e omogeneizzazione si ottiene la farina che viene poi cotta nel forno per ottenere il clinker da cemento.

Le materie prime arrivano nello stabilimento in pezzatura di dimensioni varie; il calcare può essere scaricato o nella tramoggia di alimentazione dell'impianto di frantumazione (frantoio a barre) o nella parte anteriore al frantoio ed essere inserito, tramite pala gommata, automaticamente al suo interno quando necessario (a causa di manutenzione o rottura dell'impianto il frantoio potrebbe non essere operativo). Successivamente viene immesso su dei nastri trasportatori che convogliano il materiale al capannone del calcare frantumato dove, tramite un ulteriore nastro trasportatore, viene distribuito uniformemente all'interno del deposito per ottenere una precisa pre-omogeneizzazione. Analoghi i processi subiti dall'argilla (la cui frantumazione avviene tramite frantoio a lame controrotanti) e dalle terre e rocce da scavo appositamente suddivise in base alla loro natura calcarea o argillosa ed inviate alla zona di pertinenza al loro arrivo nello stabilimento. Il capannone per lo stoccaggio post-frantumazione è di fondamentale

importanza, nel processo, per due motivi: garantisce circa dieci giorni di autonomia e permette di pre-omogeneizzare il materiale sia nella fase di accumulo al suo interno che di successiva ripresa per l'invio al molino. Il grado di pre-omogeneizzazione è molto influenzato sia da queste fasi appena descritte ma anche dal numero di mezzi che scaricano materiale nell'arco di una giornata (oltre che dal metodo utilizzato per il recupero del materiale dal capannone di stoccaggio). Più è alto questo numero maggiore sarà il grado della pre-omo dato che, per avere una composizione chimica del materiale il più possibile costante e con valori vicini a quelli di riferimento, occorre che la materia prima in arrivo al molino sia costituita da tante piccole quantità di materiale provenienti dal maggior numero di mezzi possibili. La ripresa del calcare (comprese terre e rocce calcaree) viene effettuata da questi capannoni di deposito tramite linee estrattive caratterizzate da frese carrellate. La ripresa dell'argilla (comprese terre e rocce argillose), invece, viene effettuata tramite grattatrici a tazze.

Una volta ripresi questi materiali vengono caricati sul nastro di alimentazione del molino di macinazione del crudo. In questa fase di trasporto possono essere aggiunti i cosiddetti "correttivi per la miscela cruda" che nello specifico sono sabbie e rifiuti non pericolosi recuperabili in conformità all'AIA (Autorizzazione Integrata Ambientale). La sabbia viene stoccata in

apposite aree e, successivamente, inserita sulla tramoggia di alimentazione dei “correttivi” ed immessa nel nastro che trasporta la “miscela cruda” al molino, tramite nastri dosatori volumetrici. I rifiuti non pericolosi, invece, possono essere scaricati sia nella tramoggia del frantoio dell’argilla sia nella tramoggia di alimentazione dei “correttivi”, seguendo i rispettivi percorsi per arrivare al nastro di alimentazione del molino di macinazione della “miscela cruda”. Tutte le attività sono automatizzate e controllate a distanza dalla sala centrale; l’avvio dell’impianto necessita di alcuni minuti mentre la fermata è immediata.

2.1.3 Macinazione miscela cruda e omogeneizzazione farina

La “miscela cruda” frantumata e con pezzatura, ora, omogenea viene inserita nel molino di macinazione del crudo che provvede a macinare ed essiccare il materiale tramite una quota parte di calore recuperato dalla torre di preriscaldamento. Il molino attualmente utilizzato è del tipo tubolare a sfere (orizzontale) ed è prevista l’installazione, a breve, di un nuovo molino a pista e rulli (verticale e più efficiente).

Il materiale, finemente macinato ed essiccato in uscita da questo ciclo di lavorazioni, prende il nome di “farina” e viene convogliato, attraverso appositi sistemi di trasporto, nel corrispondente silo dove avviene lo stoccaggio e la sua omogeneizzazione tramite sistema pneumatico.

2.1.4 Dosaggio costituenti e macinazione del cotto

Tralasciando per un momento la fase di cottura della farina che verrà trattata in seguito, si arriva alla fase di dosaggio dei costituenti del cemento e macinazione del cotto. In questa fase di lavorazione le principali materie utilizzate sono costituenti del cemento come: clinker, calcare, gesso, pozzolana, rifiuti non pericolosi recuperabili come materia e additivi liquidi quali coadiuvanti di macinazione per migliorare le caratteristiche del cemento, solfato ferroso o additivi liquidi quali agenti riducenti del cromo VI.

Normalmente il clinker usato durante questa fase è quello ottenuto dalle lavorazioni precedentemente descritte ma, in caso di necessità, potrebbe essere utilizzato anche clinker proveniente da altri stabilimenti. Il calcare che viene utilizzato può essere lo stesso già frantumato e stoccato nel capannone delle materie prime oppure può provenire dall'esterno già frantumato; nel primo caso il calcare viene ripreso dall'area di stoccaggio delle materie prime, trasportato (con un camion) e scaricato nella zona delle tramogge di alimentazione dei costituenti del cemento. Il gesso che arriva nello stabilimento può essere scaricato sia nella specifica tettoia pavimentata adibita al suo stoccaggio, sia nelle tramogge di alimentazione dei costituenti del cemento. Per i rifiuti non pericolosi recuperabili, in conformità a quanto previsto dall'AIA, che possono essere utilizzati come costituenti del cemento

valgono le stesse considerazioni viste in precedenza per il gesso. Tutti questi costituenti, tramite un sistema di prelievo e trasporto automatizzato, vengono inviati ai rispettivi molini di macinazione del cemento. All'uscita dai molini, il cemento sotto forma di polvere, viene inviato ai separatori che hanno il compito di:

- Inviarlo ai sili di deposito del suddetto sfuso per tutte quelle particelle di materiale al di sotto di una dimensione prefissata;
- Rimandare ai molini le particelle di materiale con dimensione superiore a quella prefissata.

La cementeria di Sesto Campano produce anche cementi pozzolanici. La pozzolana può essere aggiunta, una volta macinata ed essiccata, direttamente nelle canalette che trasportano il prodotto finito in uscita dai molini di macinazione del cotto o inserita, insieme agli altri costituenti, nello stesso.

Una volta stoccato negli appositi sili il cemento può uscire dall'impianto sfuso oppure essere impacchettato tramite un apposito sistema e spedito.

2.2 *Impianto di cottura e relativo audit energetico*

In questa fase di lavorazione viene trattata la “farina” ed il materiale in questione attraversa le seguenti sezioni: torre di preriscaldamento, precalcinatore e camera calcinante, forno e griglia di raffreddamento del clinker (con recupero di calore). Nella linea di cottura possono essere utilizzati i seguenti combustibili: coke da petrolio, carbone fossile, CSS (EER 191210) e, solo per la fase di avvio della suddetta per motivi di costo, metano. È presente, inoltre, un Sistema di Riduzione Selettiva Non Catalitica (SNCR) impiegato per abbattere le emissioni in atmosfera degli ossidi di azoto (NOx) della linea di cottura utilizzando come agente riducente soluzione ammoniacale o soluzione ureica.

2.2.1 *Torre di preriscaldamento*

La torre è costituita da cinque stadi di cicloni a cascata che permettono lo scambio di calore tra la farina, proveniente dal silo di omogeneizzazione, immessa dalla sommità della torre in discesa e i gas in ascesa provenienti dal forno. Lo scambio di calore avviene per convezione ed irraggiamento tra gas e farina e per conduzione tra la superficie esterna delle singole particelle di materiale verso l'interno delle stesse. Anche se complessivamente i due flussi sono contrapposti, lo scambio avviene in equicorrente visto che la farina scaricata dal ciclone n-esimo viene presa in carico dal gas in uscita dal ciclone

(n+2)-esimo per essere trasportata dal ciclone (n+1)-esimo. Successivamente attraversa il precalcinatore e la camera calcinante dove, grazie a bruciatori ausiliari e aria terziaria, riceve parte dell'apporto calorico necessario al processo di decarbonatazione. La farina può raggiungere fino a 1200°C in ingresso al forno.

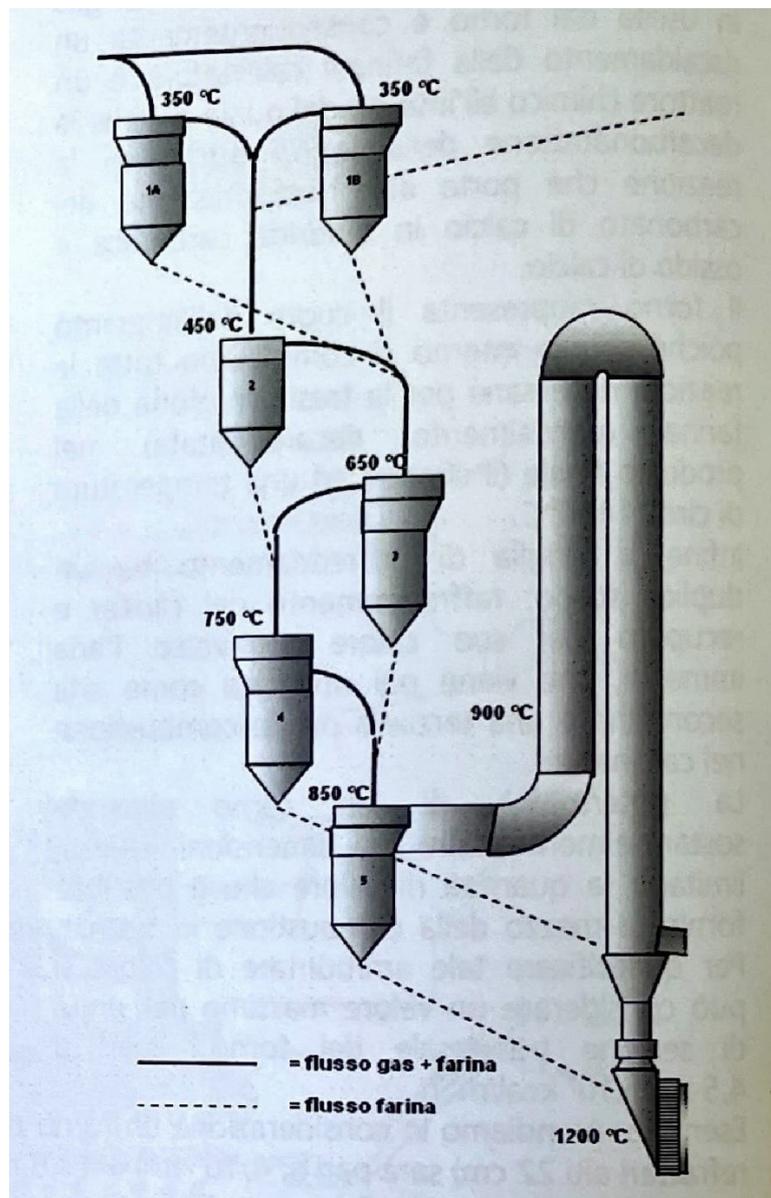


Figura 11 – Torre di preriscaldamento

2.2.1.1 I cicloni

Il ciclone è costituito da una chiocciola nella parte superiore, da una parte cilindrica centrale e una tronco-conica inferiore. La miscela entra tangenzialmente nel tubo di ingresso della chiocciola, mentre nella parte tronco conica è presente un tubo che permette lo scarico della farina separata dai gas. Quest'ultimi, invece, fuoriescono mediante un tubo di immersione inserito nella parte centrale della chiocciola (detto tuffante). I cicloni sono caratterizzati da un rendimento che diminuisce avanzando da stadio a stadio; questa diminuzione è dovuta al fatto che, per evitare torri troppo elevate, la parte cilindrica del ciclone viene diminuita in altezza. Al diminuire del rendimento aumenta la quantità di farina contenuta nei gas in uscita dai cicloni e di conseguenza si riduce l'efficienza dello scambio termico. Nella tubazione di scarico dei cicloni è presente una valvola di tenuta che deve essere sempre in battuta sul materiale e posizionata il più vicino possibile allo scarico del ciclone stesso per aumentare la velocità di caduta della farina e migliorarne lo spandimento nel tubo sottostante. Da un lato i cicloni trovano impiego come separatori veri e propri delle polveri dai gas; dall'altro lato esercitano una funzione di preriscaldamento nella cottura del cemento per via secca.

2.2.1.2 *Il calcinatore*

La farina scaricata dal 4° ciclone, in ingresso al calcinatore, subisce la prima reazione fondamentale nel processo di formazione del cemento: la decarbonatazione. È una reazione che consiste nella decomposizione del carbonato di calcio in ossido di calcio e anidride carbonica a circa 900°C:



Il calore di decarbonatazione in condizioni standard è $Q=4.038 \times 10^3$ kJ/kg_{CO2}. All'inizio del calcinatore è presente una strozzatura che consente di aumentare la velocità dei gas in arrivo dal forno, facilitando la risalita nel calcinatore della farina scaricata dal 4° ciclone e facilitando il tiraggio dell'aria terziaria che contribuirà, anch'essa, al sollevamento della farina. L'aria terziaria funge da comburente al processo di combustione che in questa evenienza sfrutta sia carbone che CSS (EER 191210). Il processo di decarbonatazione è il principale problema in relazione alla produzione di CO₂; si può considerare un 60% di emissioni dovute a questo processo e la restante parte, 40%, dovuta ai processi di combustione. Per questo motivo, oltre a adottare combustibili alternativi, si sta cercando di usare materie prime differenti che permettano di ridurre le emissioni di CO₂ in relazione al processo sopra descritto.

2.2.2 Il forno

La “farina” entra nel forno rotante che è costituito essenzialmente da una camera fumo, una testata di scarico e un mantello con anelli. All’interno la superficie è rivestita con dei mattoni refrattari che hanno una duplice funzione: resistere all’azione chimica dei componenti in cottura (acidi e basici) e alle altissime temperature alle quali avvengono le reazioni di “clinkerizzazione” (1400-1500°C). Per consentire l’avanzamento dei materiali all’interno del forno, questo risulta inclinato di circa il 3%; inoltre, associando l’inclinazione al movimento rotatorio (3-4 rpm) si avrà come effetto una traslazione del forno lungo la direzione assiale. Per far risalire il forno si adotta un sistema reggispinga composto da pistoni associati a rulli che riporta il forno nella sua posizione iniziale; questo fenomeno di discesa e risalita ha una frequenza di 3-4 volte al giorno. La farina in uscita dal quinto ciclone entra nel forno tramite un condotto rivestito da calcestruzzo refrattario (detto pigiata). La “pigiata” viene sorretta da delle corazzette in acciaio che presentano un’intercapedine raffreddata con aria che viene garantita da una serie di ventilatori che la inviano, a temperatura ambiente, tramite fori posti sulle corazzette stesse. La tenuta a labirinto presente tra culla (elemento fisso) e forno (elemento rotante) serve ad impedire l’ingresso di “aria falsa”. Per non ostacolare l’ingresso della farina dall’ultimo stadio della torre nel

forno sono necessarie basse velocità dei gas di combustione che altrimenti tenderebbero a far rientrare la stessa su per il calcinatore. Il moto rotatorio viene trasmesso, al forno, tramite un accoppiamento corona-pignone. La corona è fissata alla virola tramite delle balestre che possono essere montate tangenzialmente al mantello o longitudinalmente; il materiale di cui sono composte è acciaio armonico, in grado di garantire una certa flessione. Tutto il sistema di trasmissione del moto è racchiuso da un carter e lubrificato. Per evitare eccessive dilatazioni della corona, con successive interferenze tra i denti delle due ruote, devono essere previste delle aperture che consentano l'ingresso di aria di raffreddamento. Il pignone, inoltre, deve avere una larghezza maggiore rispetto alla corona visto che quest'ultima, essendo vincolata al forno, presenta degli spostamenti anche in direzione assiale. Per fornire il calore necessario alla cottura della farina e ottenere la formazione di tutte le fasi mineralogiche del clinker, allo scarico del forno è presente un bruciatore policombustibile nel quale vengono convogliati il combustibile oltre ad aria primaria e secondaria. Di fatto l'aria primaria viene utilizzata con il fine di disperdere il combustibile nel comburente, ovvero l'aria secondaria più calda. L'aria primaria si divide in assiale e radiale: quella assiale serve per conferire una maggiore lunghezza alla fiamma mentre quella radiale serve per conferire alla fiamma una forma divergente. Si vuole ottenere una fiamma

stretta e fortemente irradiante. Per introdurre aria primaria vengono usati ventilatori ad elevata prevalenza.

Lo scambio di calore avviene in controcorrente tra la farina che avanzando subisce le varie reazioni e il calore generato dalla combustione che risale il forno nel senso opposto.

2.2.3 Griglia raffreddamento clinker

Il materiale in uscita dal forno diventa clinker dopo essere stato repentinamente raffreddato con aria in un raffreddatore a griglia, che funge anche da trasportatore. L'aria di raffreddamento, a temperatura ambiente, viene insufflata tramite dei ventilatori posti al di sotto della stessa (nel caso di Sesto Campano nove ventilatori). La griglia funge anche da recuperatore di calore visto che l'aria, acquistando calore ceduto dal materiale, lo ripartisce nel seguente modo: una parte viene inviata al forno (aria secondaria), una parte viene inviata al calcinatore (aria terziaria) e una parte esce come aria in eccesso (aria di esubero). L'aria terziaria, prima di essere inviata al calcinatore, viene fatta passare in un condotto cilindrico simile ad un ciclone per evitare di introdurre polveri di clinker, le quali vengono poi scaricate in una specifica sezione della griglia. Analogamente, anche l'aria di esubero viene ciclonata per favorire il recupero delle polveri. L'aria di esubero griglia, a questo punto, può essere impiegata per l'essiccazione del carbone nell'apposito molino, per l'essiccazione della pozzolana oppure può essere inviata ad un impianto di produzione di energia elettrica WHRS (Waste Heat Recovery System) funzionante tramite una turbina con ciclo ORC (Organic Rankine Cycle). La parte di esubero griglia che non viene impiegata negli scopi sopra indicati viene inviata nella torre di condizionamento dei fumi e

successivamente convogliata nell'elettrofiltro della linea di cottura del clinker. Questo flusso di aria (esubero griglia) sarà il fulcro del presente progetto di tesi volto al recupero del calore, dal suddetto flusso, tramite WHRS che, altrimenti, andrebbe perso.

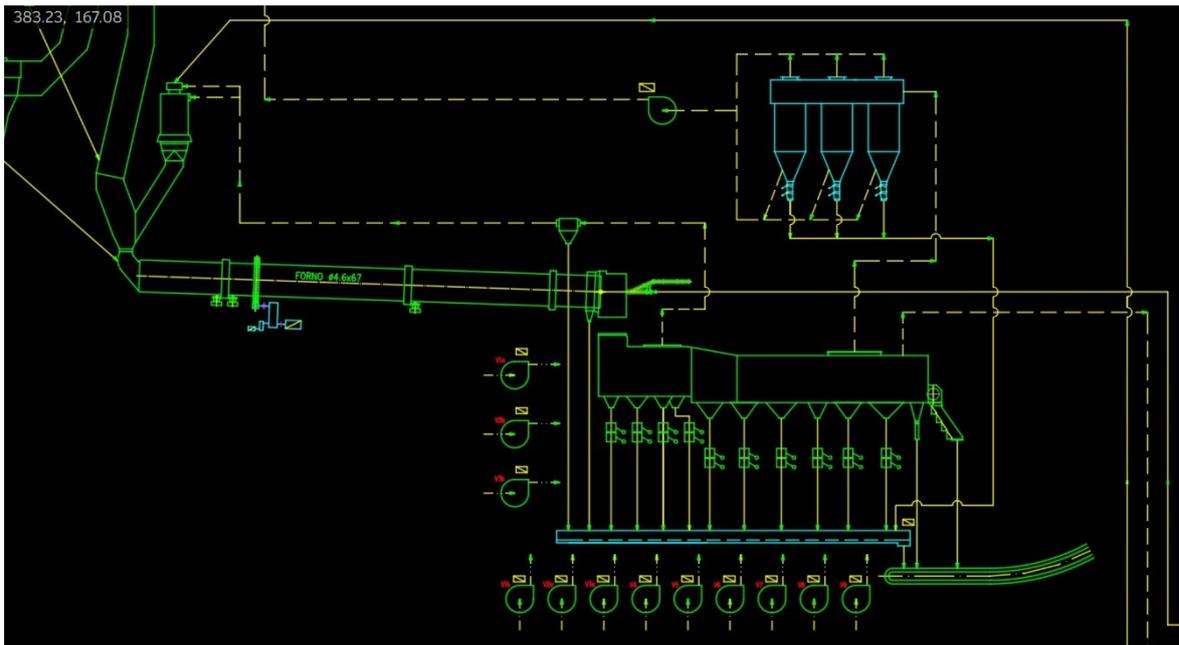


Figura 12 – Flow sheet linea cottura Sesto Campano (dettaglio forno rotante e griglia raffreddamento)

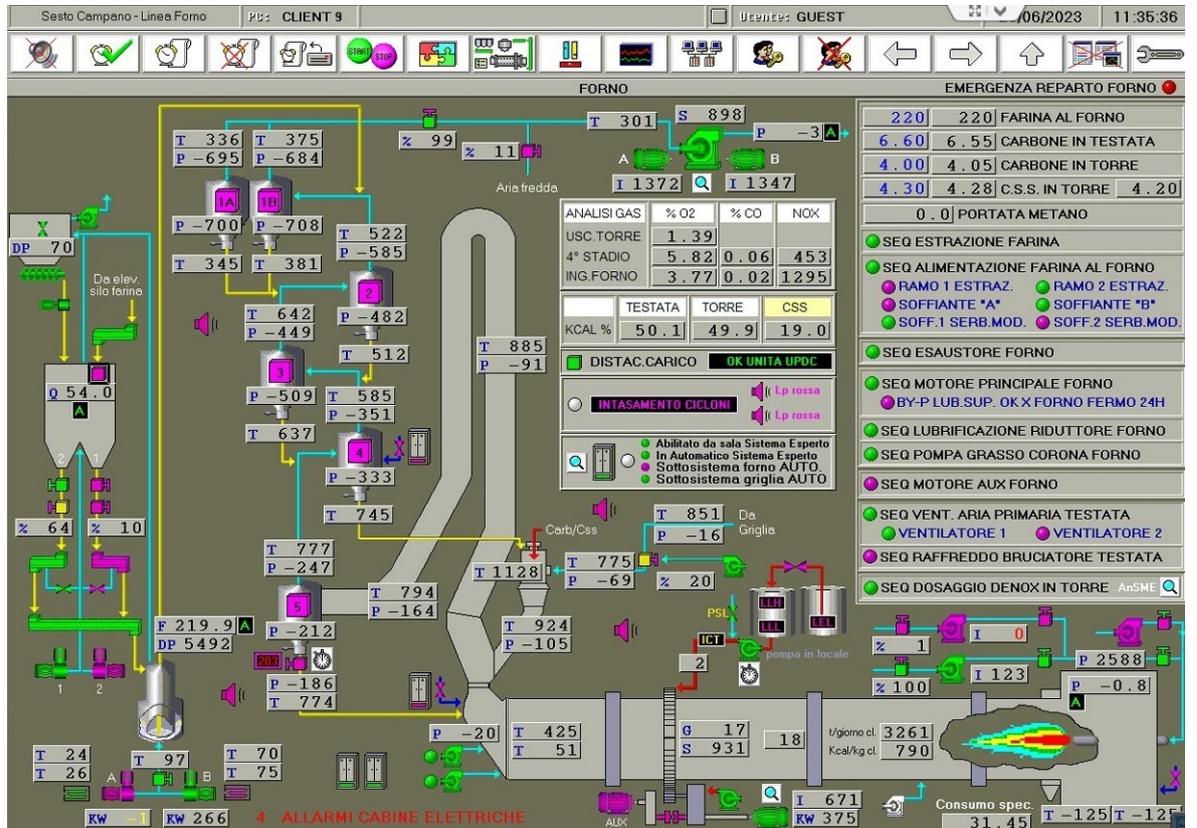
2.2.3.1 Bilancio griglia

Il bilancio termico dell'intera linea di produzione è un documento che viene redatto periodicamente (normalmente annualmente) con l'obiettivo di far emergere eventuali anomalie (entrate di aria falsa, perdite per irraggiamento, polverosità del clinker, efficienza dei vari stadi, ecc.). Il bilancio così fatto illustra questi valori in un determinato istante di tempo e non una media di valori nel tempo. L'importanza risiede nel fatto che, in questo modo, si

riescono a vedere i benefici di migliorie o interventi di manutenzione svolti.

Nello specifico si tratterà la parte di bilancio eseguita sulla griglia di raffreddo per andare a comprendere le varie portate e temperature dei flussi di aria recuperati, focalizzando l'attenzione sulla voce di esubero griglia rappresentante il flusso di aria che verrà inviato ad uno scambiatore di calore collegato ad un impianto di recupero del calore funzionante con una turbina a ciclo ORC.

Tutto il processo produttivo risulta automatizzato e monitorabile da remoto, con i dati delle grandezze significative consultabili direttamente dal programma utilizzato per la gestione:



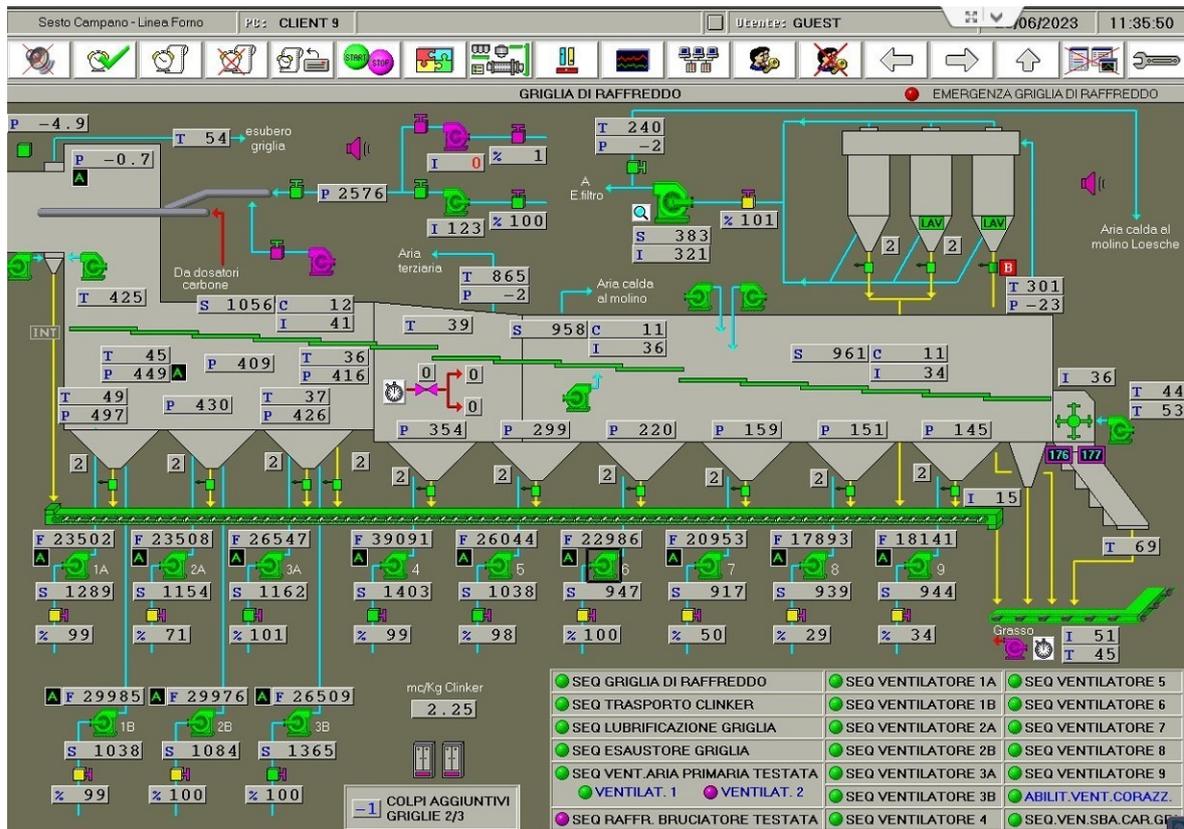


Figura 13 – Istantanea programma gestione impianto forno (sopra) e griglia di raffreddo (sotto)

Dove possibile i valori necessari possono essere direttamente o indirettamente misurati in loco, altrimenti vengono stimati o calcolati a partire da quelli disponibili. In questa situazione sono stati ottenuti i seguenti dati:

Dati di processo					
Alimentazione farina forno	61.11	kg/s	CSS torre	1.19	kg/s
Polveri ad elettrofiltro	4.28	kg/s	PCI coke	34.31	MJ/kg
Clinker pesato	36.67	kg/s	PCI CSS	22.59	MJ/kg
Polverino coke testata	1.90	kg/s	Consumo specifico	3.51	MJ/kg
CSS testata	0	kg/s	Rapporto farina/clinker	1.667	
Polverino coke torre	1.11	kg/s	Fase liquida clinker a 1450°C	28.6	%

Tabella 1 – Dati di processo

Bilancio griglia				
Ingressi	T _{med} (K)	kg/s	kW	kJ/kg _{cli}
Aria ventilatori sottogriglia	303	101.25	3103	84.56
Clinker	1653	36.67	53715	1463.98
Totale		137.92	56818	1548.54
Uscite				
Aria secondaria e terziaria	1109.50	42.42	36251	988
Esubero griglia	573	58.83	18029	491.37
Clinker pesato	353	36.67	2284	62.26
Dispersioni convezione e irraggiamento			581.50	15.86
Totale		137.92	57145.5	1557.49
Rendimento griglia	63.2	%		
Perdita di calore	5694.4	kJ/kg _{cli}		
Aria per forno	3.2x10 ⁻⁴	kg/s		
Perdita di calore standard (Smidth)	418.4	kJ/kg _{cli}		

Tabella 2 – Dati bilancio griglia

I dati sopra esposti sono indicativi dell'andamento dei parametri che saranno poi utilizzati per svolgere i conti nel dimensionamento dell'impianto ORC, con le dovute precauzioni. Saranno esposti tre casi di cui il primo lo potremmo definire nominale, ovvero con portata d'aria dall'esubero griglia e temperatura della stessa rappresentanti l'impianto in funzionamento a regime, un secondo caso variando la portata e mantenendo inalterata la temperatura ed un terzo caso nel quale si mantiene la portata nominale e si riduce la temperatura. Queste prove permettono di comprendere quanta potenza elettrica sia ricavabile in funzione della potenza termica recuperata dal flusso di aria di esubero griglia.

Capitolo 3**DIMENSIONAMENTO IMPIANTO ORC****3.1 Impostazione layout impianto**

Come accennato nel capitolo precedente, dalla griglia di raffreddamento del clinker si va a spillare il flusso denominato “Aria esubero griglia” che, dopo essere stato ciclonato, risulta essere a tutti gli effetti aria (composizione: 79% azoto [N₂], 21% ossigeno [O₂]) con un basso contenuto di “polvere” dovuto al fatto che i cicloni hanno un certo rendimento che non consente di ottenere in uscita aria pura. Questo flusso verrà trattato da un impianto WHR (Waste Heat Recovery) suddiviso in tre circuiti: un circuito “fumi” in cui è presente uno scambiatore di calore che permette il passaggio della potenza termica contenuta da questi ad un olio diatermico; un circuito ad olio diatermico (Therminol 66) che permette il trasferimento di calore tra i fumi ed il fluido di lavoro evolvente nell’impianto ORC (ciclopentano, proprio per la sua infiammabilità alle basse temperature ed esplosività si è deciso di interporre questo circuito); un circuito a fluido organico dove il fluido evolvente, dopo avere ricevuto il calore trasmesso dai fumi all’olio tramite un nuovo scambiatore di calore, espande in una turbina producendo una certa potenza elettrica. Il vantaggio che si ottiene nello sfruttare questo tipo di impianto è che non si modificano i livelli di emissione in atmosfera dello stabilimento né

in termini quantitativi né in termini qualitativi, visto che si tratta di un recupero di calore.

3.1.1 Definizione caso studio

Sono state effettuate tre simulazioni mantenendo lo stesso layout di impianto e variando i dati di input sulla base di imprevisti che, seppur rari, potrebbero verificarsi:

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	Fumi	Fumi	Fumi
Portata	64.65 kg/s	55.67 kg/s	64.65 kg/s
Temperatura ingresso	583 K	583 K	523 K

Tabella 3 – Dati input simulazioni

Il caso 1 si riferisce alla cementeria che marcia in condizioni nominali, ovvero circa 145 t/h di clinker prodotto. I casi 2 e 3 si riferiscono rispettivamente a:

- Portata dei fumi in ingresso al primo scambiatore ridotta (ma temperatura invariata) a causa di una riduzione di alimentazione di farina nel forno della cementeria, con conseguente riduzione di clinker prodotto e minore quantità di aria insufflata dai ventilatori nella griglia di raffreddamento del clinker;
- Temperatura dei fumi in ingresso al primo scambiatore ridotta (ma portata invariata) che potrebbe essere causata dalla maggior polverosità del clinker presente nel forno che ne ridurrebbe, di conseguenza, il

rendimento o da un processo di combustione non ottimale, generando nel complesso temperature minori.

3.1.2 Schema circuiti Aspen Hysys

In tutte e tre le prove effettuate è stato utilizzato lo stesso modello di Aspen Hysys riassumibile come segue:

- Prima parte con lo scopo di simulare la griglia di raffreddamento del clinker ed i tre flussi principali che si diramano a partire da essa, ovvero: aria secondaria, aria terziaria ed esubero griglia. Le portate di esubero griglia indicate nella Tabella 3 rappresentano a tutti gli effetti aria con un basso contenuto di polvere di clinker. Per semplificare il modello nel programma, non si è tenuto conto di questo residuo visto che l'influenza dello stesso, rispetto alla potenza termica scambiata complessivamente, era di pochi Watt.

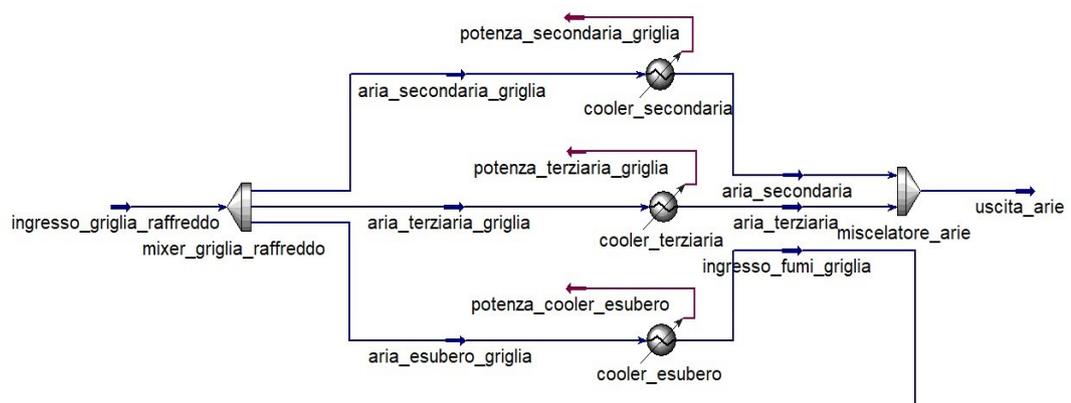


Figura 14 – Griglia raffreddamento clinker modello Aspen Hysys

- Parte centrale costituita dal circuito ad olio diatermico delimitato da due scambiatori di calore: a sinistra uno scambiatore fumi-olio diatermico (si utilizza la parola fumi per indicare l'aria di esubero griglia in uscita dall'impianto), a destra uno scambiatore olio diatermico-ciclopentano che, fondamentalmente, rappresenta la caldaia dell'ORC.

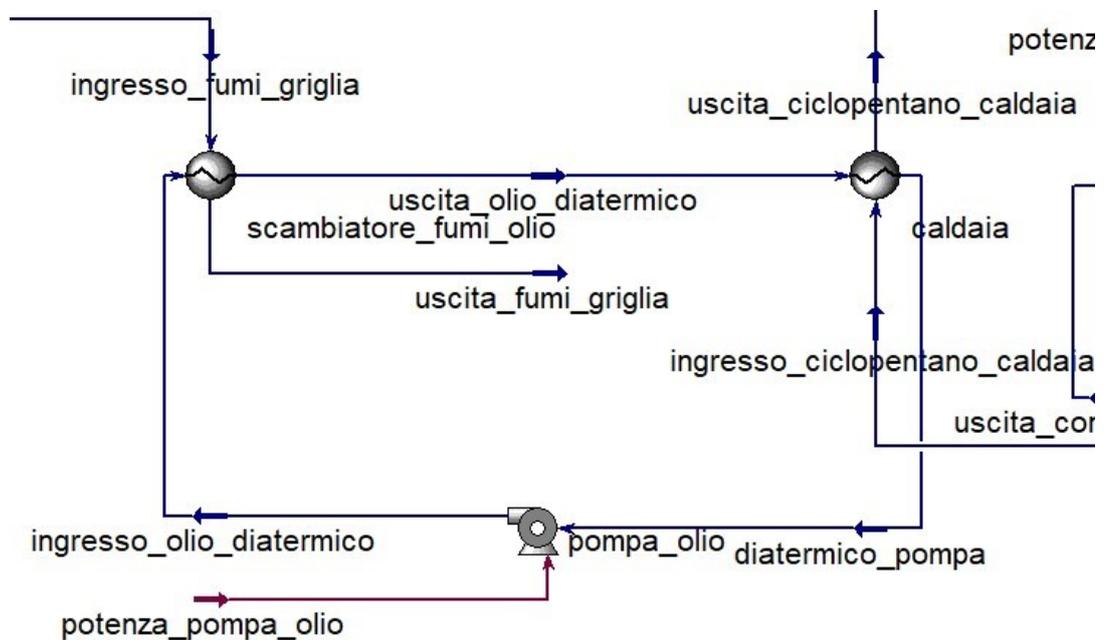


Figura 15 – Circuito olio diatermico modello Aspen Hysys

Oltre ai due scambiatori, in questa parte è presente anche una pompa per mantenere in pressione l'olio nel circuito.

- Parte finale costituita dal circuito con ciclopentano nel quale lo scambiatore olio diatermico-ciclopentano costituisce, di fatto, la caldaia dell'impianto. Il rigeneratore presente all'uscita della turbina

permette di recuperare parte del calore latente dal vapore di scarico non sfruttato per la generazione di energia elettrica, aumentando l'efficienza del turbogeneratore ORC.

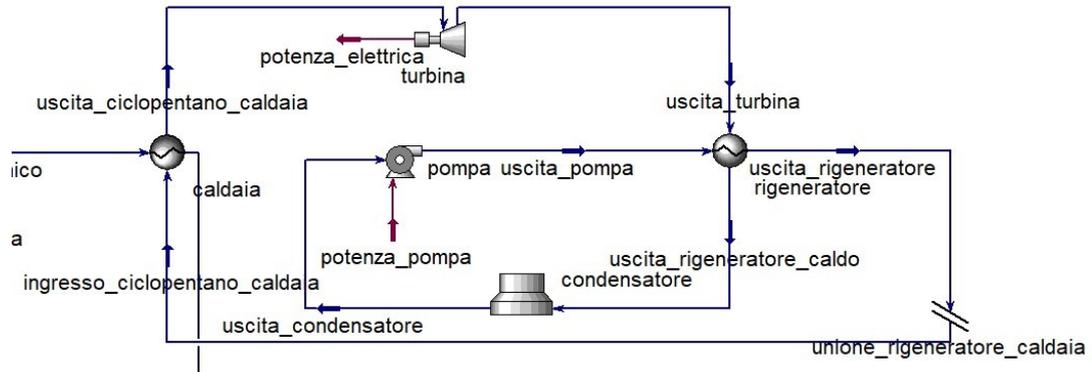


Figura 16 – Circuito ciclopentano modello Aspen Hysys

Si è scelto un condensatore ad aria per evitare un consumo di acqua e dover prevedere delle utility per il suo trattamento. Inoltre, è presente una pompa di alimentazione per mantenere il fluido di lavoro in pressione e permettere il recupero del calore latente descritto in precedenza.

Il ciclopentano appartiene alla categoria dei fluidi “secchi”, fluidi che in fase di vapore non necessitano di surriscaldamento. Inoltre, non costituiscono il problema dato dall'impatto di goccioline di liquido sulle palette della turbina, in quanto all'uscita dall'espansore si ha vapore surriscaldato e per questo è conveniente utilizzarli in questo tipo di impianti. Le caratteristiche appena descritte sono facilmente comprensibili dalla loro campana dei vapori saturi:

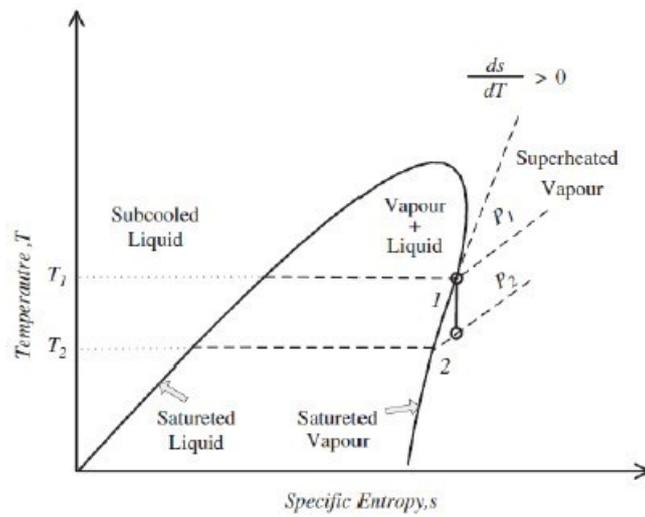


Figura 17 – Diagramma T-S fluido secco

Il modello complessivo in Aspen Hysys risulta essere il seguente:

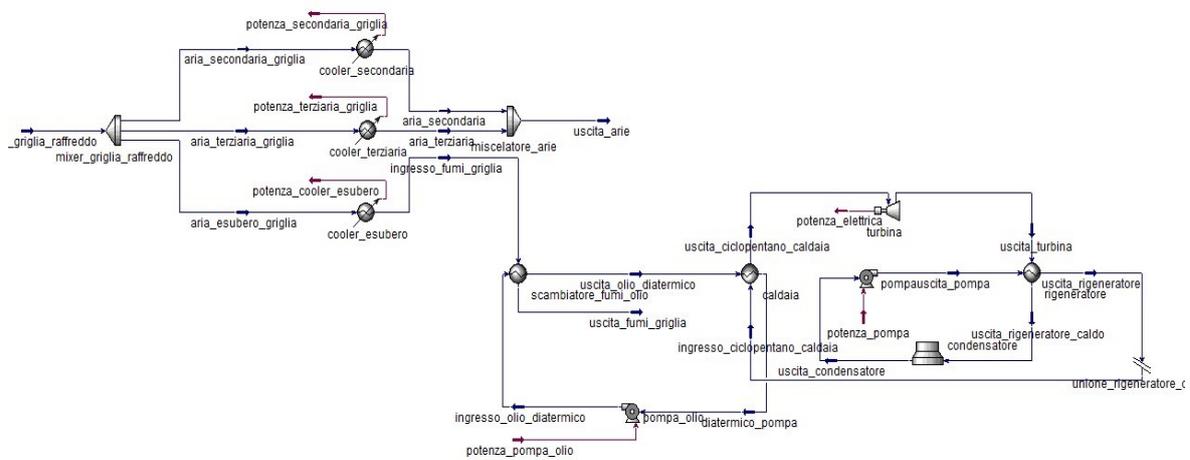


Figura 18 – Modello completo Aspen Hysys

3.2 Parametri della simulazione

Per i tre casi studiati si è cercato di mantenere una serie di parametri invariati per permettere, a tutti gli effetti, di conoscere la potenza elettrica risultante al variare dei dati di input. Tra i parametri rimasti costanti al variare delle simulazioni, merita particolare attenzione il valore di pinch point adoperato nello scambiatore olio diatermico-ciclopentano impostato pari a $\Delta T_{pp} = 5/15$ K, risultando essere la miglior configurazione possibile sia da un punto di vista economico che da un punto di vista tecnico per poter sfruttare al massimo le potenzialità di questo fluido di lavoro.

Nel caso 1 i parametri principali sono riassumibili nel seguente modo:

	Scambiatore			Scambiatore	
	Fumi	Olio		Olio	Ciclopentano
Portata	64.65 kg/s	22 kg/s	Portata	22 kg/s	17.5 kg/s
T _{in}	583 K	363 K	T _{in}	559 K	323 K
T _{out}	418 K	559 K	T _{out}	363 K	483 K
P _{in}	9.94x10 ⁴ Pa	5.1x10 ⁵ Pa	P _{in}	1.7x10 ⁵ Pa	1.6x10 ⁶ Pa
P _{out}	9.91x10 ⁴ Pa	1.7x10 ⁵ Pa	P _{out}	1.7x10 ⁵ Pa	1.6x10 ⁶ Pa
ΔP _{ca}	300 Pa	3.4x10 ⁵ Pa	ΔP _{ca}	Trascurabili	
P _{T estratta}	10900 kW _t				
			T _{cond}		313 K
			P _{cond}		7.4x10 ⁴ Pa

Tabella 4 – Riepilogo dati scambiatori caso 1

A partire da questi dati, in seguito all’espansione del ciclopentano nella turbina a 406 K, si è ottenuta una potenza elettrica pari a: P_{el} = 2070 kW_{el}.

Nel caso 2 i parametri principali sono riassumibili nel seguente modo:

	Scambiatore			Scambiatore	
	Fumi	Olio		Olio	Ciclopentano
Portata	55.67 kg/s	19.3 kg/s	Portata	19.3 kg/s	17.5 kg/s
T _{in}	583 K	363 K	T _{in}	558 K	323 K
T _{out}	412 K	558 K	T _{out}	363 K	452 K
P _{in}	9.94x10 ⁴ Pa	5.1x10 ⁵ Pa	P _{in}	1.7x10 ⁵ Pa	1.6x10 ⁶ Pa
P _{out}	9.91x10 ⁴ Pa	1.7x10 ⁵ Pa	P _{out}	1.7x10 ⁵ Pa	1.6x10 ⁶ Pa
ΔP _{ca}	300 Pa	3.4x10 ⁵ Pa	ΔP _{ca}	Trascurabili	
P _T estratta	9700 kW _t				
			T _{cond}		313 K
			P _{cond}		7.4x10 ⁴ Pa

Tabella 5 – Riepilogo dati scambiatori caso 2

A partire da questi dati, in seguito all'espansione del ciclopentano nella turbina a 371 K, si è ottenuta una potenza elettrica pari a: P_{el} = 1870 kW_{el}.

Nel caso 3 i parametri principali sono riassumibili nel seguente modo:

	Scambiatore			Scambiatore	
	Fumi	Olio		Olio	Ciclopentano
Portata	64.65 kg/s	30.67 kg/s	Portata	30.67 kg/s	20 kg/s
T _{in}	523 K	363 K	T _{in}	493 K	323 K
T _{out}	373 K	493 K	T _{out}	363 K	408 K
P _{in}	9.94x10 ⁴ Pa	5.1x10 ⁵ Pa	P _{in}	1.7x10 ⁵ Pa	8.5x10 ⁵ Pa
P _{out}	9.91x10 ⁴ Pa	1.7x10 ⁵ Pa	P _{out}	1.7x10 ⁵ Pa	8.5x10 ⁵ Pa
ΔP _{ca}	300 Pa	3.4x10 ⁵ Pa	ΔP _{ca}	Trascurabili	
P _T estratta	8585 kW _t				
			T _{cond}		313 K
			P _{cond}		7.4x10 ⁴ Pa

Tabella 6 – Riepilogo dati scambiatori caso 3

A partire da questi dati, in seguito all'espansione del ciclopentano nella turbina a 346 K, si è ottenuta una potenza elettrica pari a: $P_{el} = 1590 \text{ kW}_{el}$.

Il motivo per cui le perdite di carico lato scambiatore olio diatermico-ciclopentano sono state trascurate è, in prima approssimazione, dovuto alle dimensioni degli stessi scambiatori. Le dimensioni dello scambiatore fumi-olio diatermico sono circa 12x9x3.5 m, generando perdite di carico maggiori rispetto all'altro.

3.3 *Analisi dei risultati*

Nel complesso sono stati ottenuti risultati in linea con le aspettative. Nel primo caso analizzato a fronte di 10900 kW_t di potenza termica sono stati ottenuti 2070 kW_{el} di potenza elettrica. Il rendimento elettrico risultante è di $\eta_{el} = 19\%$. Andando ad analizzare il grafico T-q dello scambio di calore tra olio diatermico e ciclopentano ciò che otteniamo è il seguente risultato:

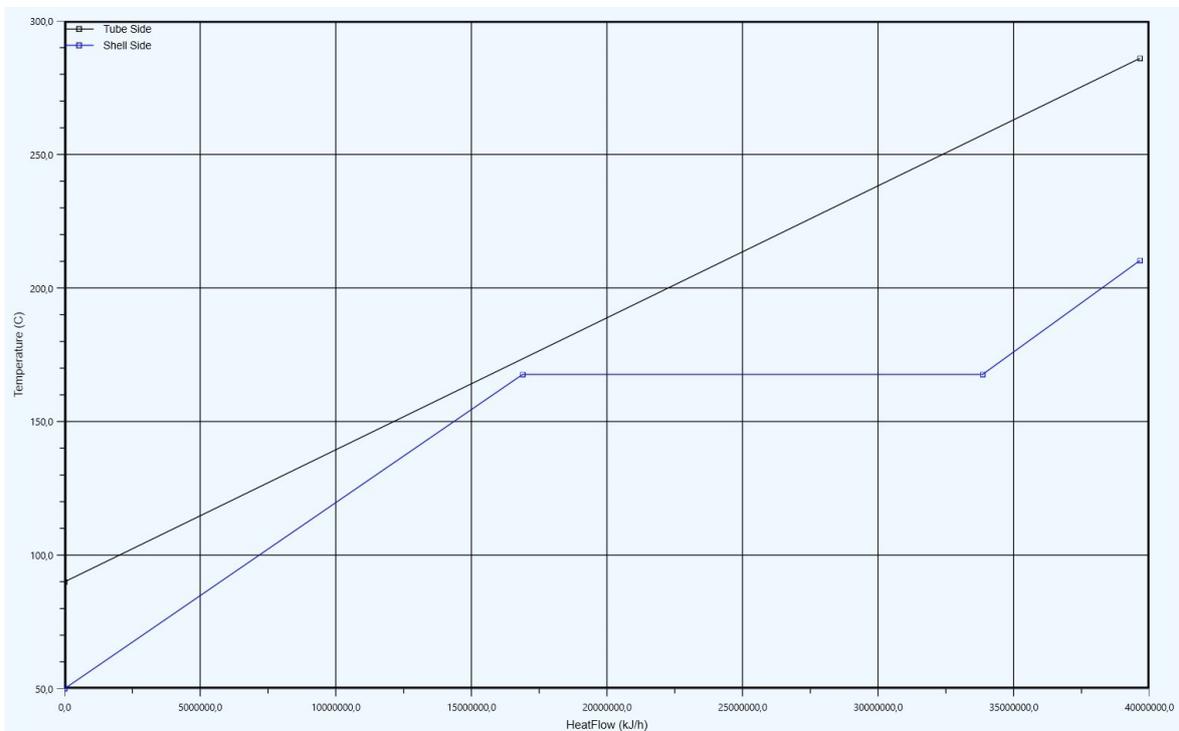


Figura 19 – Grafico T-q scambiatore olio-ciclopentano caso 1

Si può notare come alle fasi di preriscaldamento ed evaporazione del fluido di lavoro, si è ottenuta una zona di surriscaldamento abbastanza evidente. Questa zona ci assicura che all'uscita dalla turbina ho ancora 100% di fase di vapore surriscaldato, evidenziando i vantaggi legati a questo fluido organico.

Nel secondo caso analizzato a fronte di 9700 kW_t di potenza termica sono stati ottenuti 1870 kW_{el} di potenza elettrica. Il rendimento elettrico risultante è di $\eta_{el} = 19.28\%$. Andando ad analizzare il grafico T-q dello scambio di calore tra olio diatermico e ciclopentano ciò che otteniamo, in questo caso, è il seguente risultato:

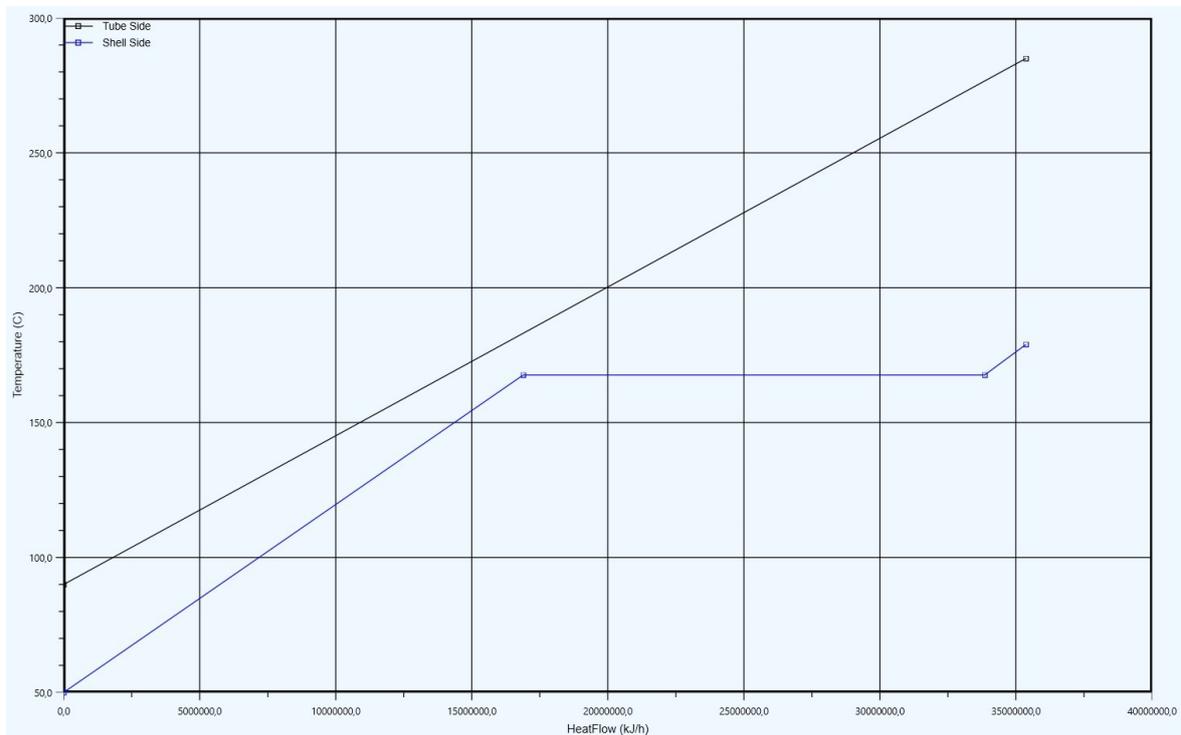


Figura 20 – Grafico T-q scambiatore olio-ciclopentano caso 2

Anche qui si può notare che alle fasi di preriscaldamento ed evaporazione del fluido di lavoro segue una zona di surriscaldamento, seppur meno marcata rispetto al caso precedente. Questa zona ci assicura, comunque, che all'uscita dalla turbina si abbia ancora vapore surriscaldato che permette di non aver fase liquida, post espansione, che possa intaccare le palette della turbina.

Nel terzo, ed ultimo, caso analizzato a fronte di 8585 kW_t di potenza termica sono stati ottenuti 1590 kW_{el} di potenza elettrica. Il rendimento elettrico risultante è di $\eta_{el} = 18.52\%$. Andando ad analizzare il grafico T-q dello scambio di calore tra olio diatermico e ciclopentano ciò che otteniamo è il seguente risultato:

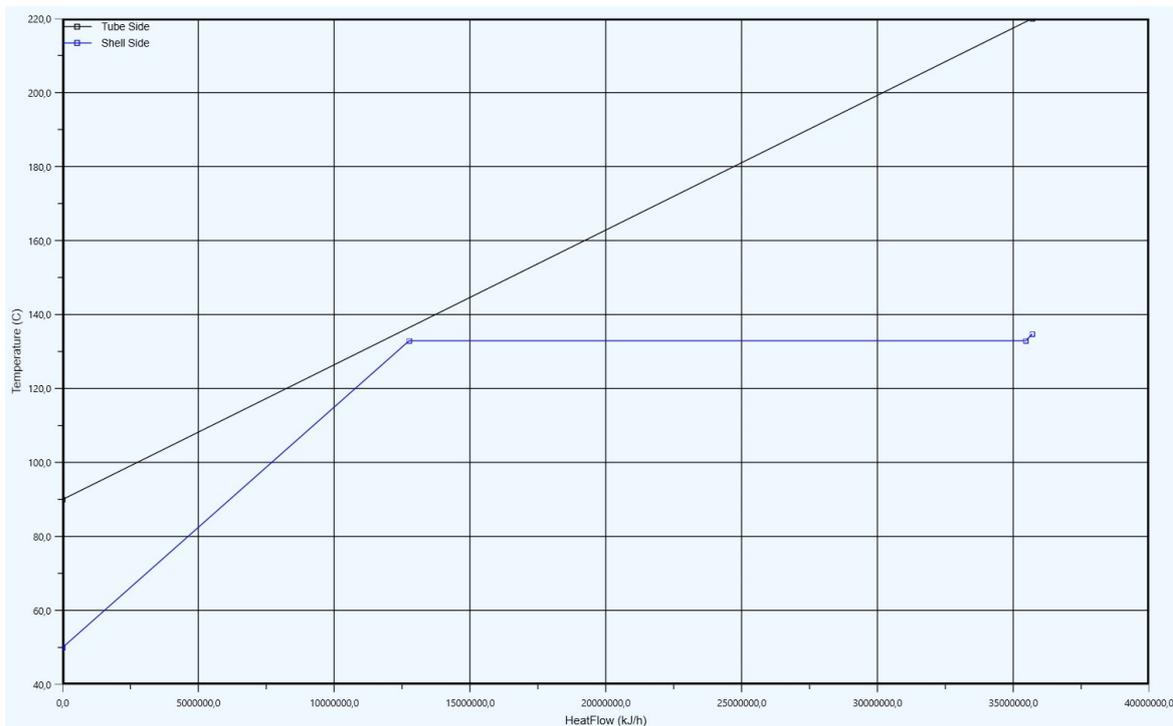


Figura 21 – Grafico T-q scambiatore olio-ciclopentano caso 3

Per quest'ultimo caso alle fasi di preriscaldamento ed evaporazione segue una leggerissima fase di surriscaldamento che continua ad assicurarci vapore surriscaldato in uscita dalla turbina, permettendo di evitare il fenomeno del "pitting". Questi tre grafici, seppure semplici, sono molto significativi in quanto confermano che questi fluidi organici, come appunto il ciclopentano,

siano molto indicati per essere usati con fonti di calore a temperatura medio-bassa e, quindi, per il recupero di calore di scarto come nel caso descritto in questa tesi. Inoltre, dalle tre immagini sopra viene anche giustificata la scelta di un fluido “secco” come fluido di lavoro il quale, grazie alle sue proprietà ben visibili dalla campana dei vapori saturi deformata riportata nella Figura 17, permette di avere ancora vapore surriscaldato al termine dell’espansione. I rendimenti elettrici ottenuti nei tre casi sono tutti conformi a quelli tipici per questo tipo di impianti e compresi tra il 18% e il 20%. Dalle suddette foto è, infine, dimostrata anche la scelta già citata in partenza di mantenere un ΔT_{pp} tra i 5 e i 15 K nella fase di evaporazione in caldaia.



Figura 22 – Impianto produttivo Colacem Sesto Campano

CONCLUSIONI

Gli obiettivi prefissati in partenza legati al perseguimento dei principi ESG tramite il riutilizzo dei fumi di scarico della cementeria per produrre energia elettrica e ridurre le emissioni di CO₂ indirette (scope 2) sono stati raggiunti. Nel complesso sono stati ottenuti risultati in linea con le aspettative. Tenendo in considerazione che i fumi recuperati per l'attuazione di questo impianto sarebbero andati altrimenti persi ed immessi in atmosfera, possiamo comprenderne i vantaggi sia da un punto di vista economico che da un punto di vista ambientale di questo investimento. La cementeria di Sesto Campano marcia in condizionali nominali per 320 giorni all'anno; questo significa un

recupero, in questo lasso di tempo, dai gas di scarico di circa 2 MW_{el}, pari ad un valore compreso tra il 10/15% dell'assorbimento totale dell'impianto.

L'investimento per la costruzione di questo sistema di recupero con ORC è di circa 12.5 M€, al quale va aggiunto un costo di circa 100 k€/anno per la manutenzione ordinaria dell'impianto; l'investimento non è proibitivo considerando una durata di circa 25/30 anni dell'impianto, se ben operato.

Considerando, inoltre, il risparmio sull'energia che altrimenti dovrebbe essere acquistata, considerando i certificati bianchi che si ottengono da questo specifico intervento (il valore dei certificati bianchi è di circa 247.71 €/tep, tep = tonnellata equivalente di petrolio → tep = 5347 kWh) complessivamente servirebbero meno di 10 anni per rientrare nell'investimento, pari a meno della metà della vita utile dell'impianto. Sicuramente questo studio risulterà essere una buona baseline per la futura implementazione di impianti simili in altre cementerie del gruppo, con l'obiettivo di ottenere impianti sempre più efficienti dal punto di vista energetico.

Bibliografia

Colacem e Deloitte, *Rapporto di Sostenibilità*, settembre 2023

Ing. Franco Antonelli, *Tecnologie del cemento*, dicembre 2009

Andrea Ballabio, *Decarbonizzazione a “costo zero”: il caso del combustibile da rifiuti*, novembre 2019

Alessandra Stella, *Ottimizzazione di un Organic Rankine Cycle per applicazione geotermica al variare della temperatura della fonte*, 2016

Matteo Pettinari, *Configuration of Organic Rankine Cycle for Geothermal Applications: An Industrial Perspective*, luglio 2024

Sitografia

<https://www.financo.it/it>

<https://www.colacem.com/it/it>

<https://www.agendadigitale.eu/smart-city/principi-esg-quando-unazienda-puo-dirsi-sostenibile-criteri-di-valutazione-e-impatti/>

<https://www.agendadigitale.eu/industry-4-0/limportanza-delle-certificazioni-e-degli-standard-nel-rating-esg/>

<https://www.aitecweb.com/>

https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Servizi%20per%20te/CERTIFICATI%20BIANCHI/MANUALI/Tabella%20tipologie%20interventi%20aggiornata%20dal%20Decreto%20Direttoriale%20del%202013%20ottobre%202023.pdf

