



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI SALERNO

Analisi e caratterizzazione energetica del settore Vetro e Cemento

S. Miranda, A. Tagliafierro, R. Iannone, S. Riemma, A. Lambiase

Report RdS/PTR2020/092

ANALISI E CARATTERIZZAZIONE ENERGETICA DEL SETTORE VETRO E CEMENTO

S. Miranda, A. Tagliaferro, R. Iannone, S. Riemma, A. Lambiase
(UNIFI)

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo : N.1 - Tecnologie

Progetto: 1.6 – Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali

Work package: 4 – Definizione di best practices e di indicatori di performance per interventi di efficienza energetica

Linea di attività: LA4.8 - Analisi e caratterizzazione energetica di due settori produttivi fortemente energy intensive

Responsabile del Progetto: Miriam Benedetti, ENEA

Responsabile del Work package: Fabrizio Martini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *“Determinazione analitica dei consumi energetici per unità di prodotto dei principali settori energivori italiani”*

Responsabile scientifico ENEA: Fabrizio Martini

Responsabile scientifico per l'Università di Salerno: Salvatore Miranda

Si ringraziano le associazioni di categoria che hanno partecipato ai tavoli di lavoro ENEA, in particolare relativamente all'attività riportata in questa pubblicazione: ASSOVETRO e FEDERBETON

Sommario

1. Introduzione.....	4
2. Caso Studio: Il settore Vetro	6
2.1 Processo produttivo del vetro cavo	6
2.2 Mappatura ed Analisi Energetica.....	17
2.3 Produzione del vetro piano.....	27
2.4 Mappatura ed Analisi Energetica.....	33
2.5 Realizzazione del cruscotto di monitoraggio	40
3. Caso Studio: Il settore Cemento	48
3.1 Analisi del processo produttivo	48
3.2 Mappatura ed Analisi energetica.....	62
3.3 Realizzazione del cruscotto di monitoraggio	73
4. Conclusioni	81
Bibliografia	83
Indice Figure.....	84

1. Introduzione

Il lavoro presentato in questa relazione è associato ad una specifica linea di attività per il 2020 relativa al progetto di ricerca inquadrato nel Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021, che vede la collaborazione tra l'Unità Tecnica Efficienza Energetica dell'ENEA e il Centro per l'Innovazione Tecnologica e lo Sviluppo del Territorio (CINTEST) a cui afferisce anche l'Università degli Studi di Salerno.

Il Work Package nell'ambito del quale si inquadra il presente progetto ha come macro-obiettivo quello di contribuire all'efficientamento energetico di diversi settori industriali italiani attraverso attività di ricerca finalizzate allo sviluppo di strumenti di supporto alle decisioni aziendali e realizzate grazie alla collaborazione di ENEA, diverse Università italiane e con il coinvolgimento di diverse aziende ed associazioni di categoria.

Lo specifico progetto nasce dalle analisi dei risultati dei progetti di ricerca portati avanti da ENEA e terminati nei periodi precedenti che hanno portato alla definizione di indicatori di prestazione energetica e alla loro valutazione per oltre 15.000 siti in Italia attraverso i dati di consumo raccolti sul campo per mezzo della campagna di diagnosi energetiche del 2015 ai sensi del D.Lgs 102/2014. L'analisi di questi dati consente il calcolo di valori medi di prestazione utili a caratterizzare i singoli settori e fornire una rappresentazione affidabile del settore produttivo italiano. Nel quadriennio 2015-2018 un significativo lavoro di analisi degli indicatori e standardizzazione delle modalità di raccolta dei dati è stato effettuato allo scopo di rendere ancora più affidabili i risultati ottenibili dall'approccio proposto.

Il lavoro di ricerca della presente linea di attività si inquadra quindi come una sezione dell'intero progetto che ha l'obiettivo finale di sviluppare degli indicatori attraverso l'analisi dei processi produttivi dei settori selezionati e la loro mappatura, effettuata secondo la metodologia definita nell'annualità precedente.

Gli indicatori di riferimento ricercati, affiancati agli indicatori di prestazione valutati con i dati raccolti dalle diagnosi del 2019, consentiranno inoltre di avere un quadro di riferimento delle prestazioni energetiche di alcuni importanti settori produttivi italiani. Analizzati e trattati i dati reperiti sarà mostrata la realizzazione dello strumento di calcolo reso disponibile a ciascuna azienda del settore e presente in allegato. Grazie ad esso la rappresentazione ed il calcolo degli indicatori risultano semplificati, questo cruscotto rappresenta una risorsa necessaria alle singole realtà produttive in quanto permette loro di potersi auto-valutare in maniera critica, confrontando i consumi teorici con quelli ideali ed essendo uno strumento di supporto agli esperti del settore per la scelta di interventi di efficientamento.

Gli obiettivi dell'attività di ricerca prevedono:

1. Caratterizzazione energetica del settore Vetro: esecuzione di sopralluoghi nelle aziende del settore ove possibile, (altrimenti sostituiti da incontri tematici con le aziende e scambio di fogli di raccolta dati di consumo e/odi processo) al fine di individuare e valutare i loro usi energetici. Mappatura dei processi produttivi al fine di identificare ed analizzare i flussi energetici più significativi e definire un quadro della gestione energetica dell'intero stabilimento o di una qualunque attività. Individuazione delle fasi dei processi produttivi o delle macchine maggiormente energivore.
2. Caratterizzazione energetica del settore Cemento: esecuzione di sopralluoghi nelle aziende del settore ove possibile, (altrimenti sostituiti da incontri tematici con le aziende e scambio di fogli di raccolta dati di consumo e/odi processo) al fine di individuare e valutare i loro usi energetici. Mappatura dei processi produttivi al fine di identificare ed analizzare i flussi energetici più significativi e definire un quadro della gestione energetica dell'intero stabilimento o di una qualunque attività. Individuazione delle fasi dei processi produttivi o delle macchine maggiormente energivore.
3. La realizzazione di un cruscotto di monitoraggio al fine di trasferire alle associazioni di categoria un quadro della gestione energetica dei settori Vetro e Cemento, che permetta alle aziende del settore di controllare costantemente le proprie performance, confrontando i propri consumi con i benchmark di fase, stabiliti dagli indicatori teorici ed operativi. Gli strumenti di cui sopra sono presenti in allegato al documento;

La linea di attività relativa al secondo anno (2020), descritta in questo rapporto, ha visto il gruppo impegnato nell'analisi dei processi produttivi aziendali e nello studio dei software di monitoraggio dei dati.

Il lavoro svolto risulta essere simile per entrambi i settori scelti e si struttura come segue:

1. Introduzione al settore di riferimento con contestualizzazione del lavoro;
2. Analisi del processo produttivo e mappatura dello stesso, secondo le metodologie prestabilite. Analisi dei vettori energetici maggiormente utilizzati ed individuazione delle fasi maggiormente energivore
3. Sviluppo del cruscotto di monitoraggio ad hoc per il settore.

L'analisi del processo produttivo ed in particolare, dell'utilizzo dei vettori energetici, ha consentito di individuare quelle fasi del processo su cui porre maggiore attenzione. In questo modo è stato possibile, grazie alla collaborazione dell'Università della Tuscia, definire degli indicatori di prestazione specifici per ogni fase critica. La parte di sviluppo del cruscotto di monitoraggio risulta fondamentale per rendere i dati fruibili alle aziende, garantendo loro una facile comprensione dei risultati ottenuti.

2. Caso Studio: Il settore Vetro

L'Industria italiana del vetro è costituita da aziende operanti nei settori della produzione primaria e della trasformazione secondaria del vetro. In Italia il settore della produzione primaria del vetro (compresi i settori produttivi di lampade e di display) conta 38 aziende, con 69 stabilimenti dislocati sul territorio nazionale, che impiegano circa 14.000 addetti. Tra questi 30 aziende sono associate ad Assovetro, per un totale di 61 stabilimenti. Il 73% della produzione si riferisce al vetro cavo meccanico (bottiglie, vasi, flaconi, articoli per uso domestico), il 19% al vetro piano (lastre di vetro per l'edilizia e per uso automobilistico), il 2% alle lane (impiegati per l'isolamento termico) ed ai filati di vetro, ed il 6% è destinato ad altri lavori di vetro.[6]

Nell'accezione più generale del termine il vetro è un materiale ottenuto tramite la solidificazione di un liquido non accompagnata dalla cristallizzazione. Tuttavia, nel linguaggio comune definiamo il vetro come un materiale ottenuto per fusione ad alta temperatura e successivo lento raffreddamento di una miscela di materie prime: silice, carbonato di sodio e carbonato di calcio.

Il vetro è una sostanza solida amorfa, il che significa che allo stato solido non si aggrega in struttura di cristallo, non possiede un reticolo ordinato ma una struttura disordinata composta da atomi legati da legami covalenti. Tale struttura fa sì che possano essere presenti degli interstizi nel reticolo in cui possono esserci impurezze, spesso desiderate, date dai metalli. Il processo di formazione di questa sostanza risulta essere molto dispendioso in termini di consumo di energia ed acqua.

In generale si possono distinguere tre differenti produzioni di vetro:

- *Vetro Cavo*: produzione di contenitori in vetro, in particolare bottiglie, flaconeria, bicchieri, calici, vasi alimentari e altri articoli per uso domestico. Trova impiego prevalentemente nell'industria alimentare, farmaceutica e cosmetica.
- *Vetro Piano*: produzione di lastre di vetro per i più disparati scopi, a partire dall'uso architettonico, all'uso per autoveicoli e trasporti, fino al settore marittimo e aerospaziale e alla realizzazione di vetri di sicurezza, resistenti al fuoco o isolanti acustici.
- *Lana e filati di vetro*: produzione di lana di vetro, materiale che per le sue caratteristiche naturali consente un ottimale isolamento termico e filati di vetro, che rappresentano il rinforzo di gran lunga più utilizzato nella fabbricazione di materiali compositi.

Sulla base della disponibilità di dati e dei consumi del settore in Italia, sono stati studiati i processi produttivi del vetro cavo e del vetro piano che verranno analizzati nei paragrafi successivi separatamente.

2.1 Processo produttivo del vetro cavo

Il processo di fabbricazione del vetro, in genere, si articola in 5 fasi:

1. Preparazione delle materie prime;
2. Fusione;
3. Formatura;
4. Ricottura e trattamenti superficiali;
5. Controllo qualità e imballaggio.

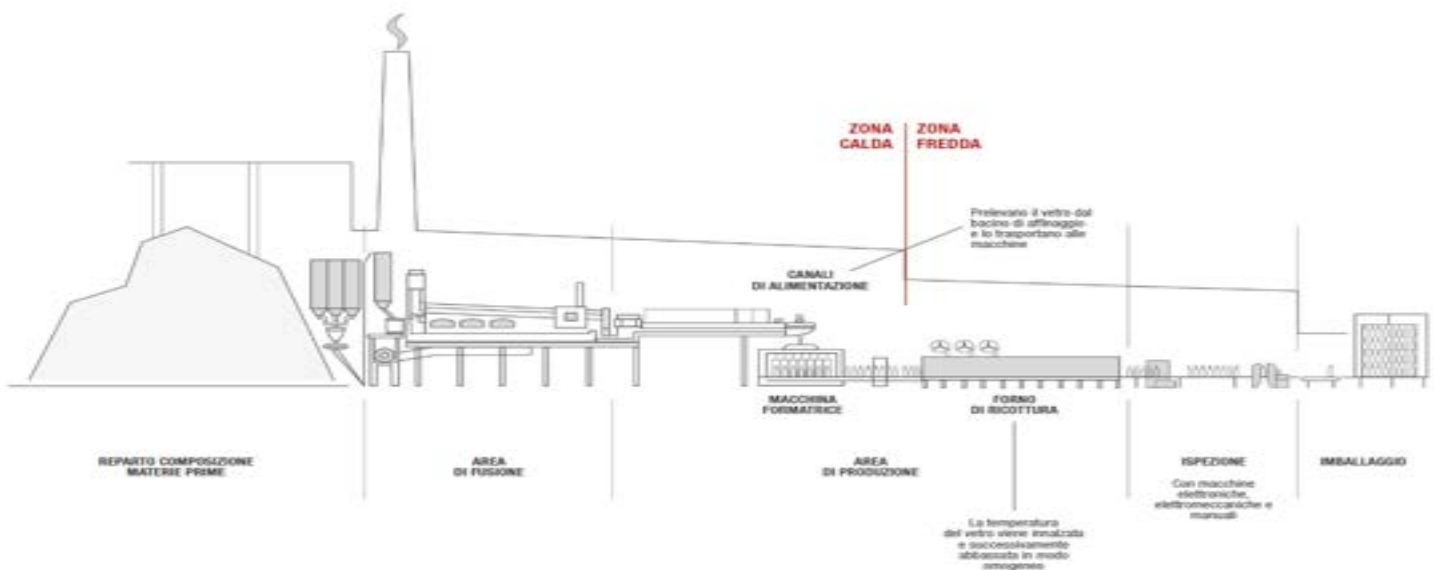


Figure 1- Processo produttivo vetro cavo

In particolare, il processo di fabbricazione del vetro cavo si differenzia rispetto a quello di altre tipologie di vetro soprattutto nella fase di formatura, esso è schematizzato in figura 1.

Preparazione delle materie prime

Il vetro da imballaggio è composto da materie prime abbondanti e naturali:

- ~70% di silice, che è il vetrificante (fonde ad alta temperatura);
- ~15% di soda sotto forma di carbonato di sodio, che è il fondente (abbassa la temperatura di fusione della silice);
- ~10% di calcio (carbonato di calcio) che è l'elemento stabilizzatore (rende il vetro resistente agli attacchi chimici);
- ~5% di componenti vari, per la colorazione del vetro o per ottenere altre particolari proprietà.

A tale miscela si aggiunge il rottame di vetro (detto anche "cullet"), vetro frantumato proveniente dagli scarti di fabbricazione e dalla raccolta differenziata dei rifiuti. L'utilizzo del rottame di vetro consente di valorizzare il rifiuto d'imballaggio e di risparmiare energia e materie prime (il rottame di vetro abbassa il punto di fusione della miscela vetrificabile con conseguente risparmio energetico). L'utilizzo del rottame di vetro consente di valorizzare il rifiuto d'imballaggio e di risparmiare energia e materie prime; il rottame di vetro abbassa il punto di fusione della miscela vetrificabile con conseguente risparmio energetico calcolabile con la formula seguente [9].

$$IPES0\% = \frac{\frac{\text{Consumo energetico totale}}{1 + \frac{(50 - \text{percentuale cavato}) \cdot 0,025}{10}}}{\text{Cavato}}$$

Il CoReVe¹ ha stimato per il 2018, per l'Italia, un riciclo di 1,89 milioni di tonnellate pari al 76,3% dell'immesso al consumo, con grandi benefici per la collettività in termini di riduzione del consumo delle risorse materiali, riduzione dell'impatto ambientale e riduzione delle emissioni dai forni fusori. Il recupero del rottame interno, proveniente dagli scarti di fabbricazione, è completamente automatizzato tramite l'ausilio di nastri trasportatori, presenti in ogni sezione in cui sia possibile lo scarto di bottiglie; gli scarti goccia, roventi, prima di passare al nastro trasportatore sono convogliati in apposite vasche di raffreddamento.

La miscela vetrificabile viene preparata da un impianto di composizione completamente automatico in cui i vari componenti vengono pesati e, tramite trasportatori a nastri o a coclea completamente chiusi per evitare lo spolverio, vengono inviati ad una mescolatrice che li miscela per alcuni minuti.

Dopo la miscelazione, alla composizione così ottenuta, viene aggiunto del rottame di vetro in ragione del 20-80% indicativamente, onde agevolare il processo di fusione; da 1 Kg di rottame di vetro si ottiene nuovo vetro per stessa quantità. In caso di utilizzo di rottame di diversa composizione, vi possono essere problemi di colore ed omogeneità. La miscela così ottenuta è inviata, tramite nastri trasportatori, alla tramoggia di infornaggio e, successivamente, alle infornatrici, controllate in base al livello del vetro presente nel forno. Queste ultime, essendo a diretto contatto con il forno, sono dotate di sistema di raffreddamento ad acqua. Successivamente, quando il livello del vetro in fusione lo consente, la miscela passa al forno di fusione.

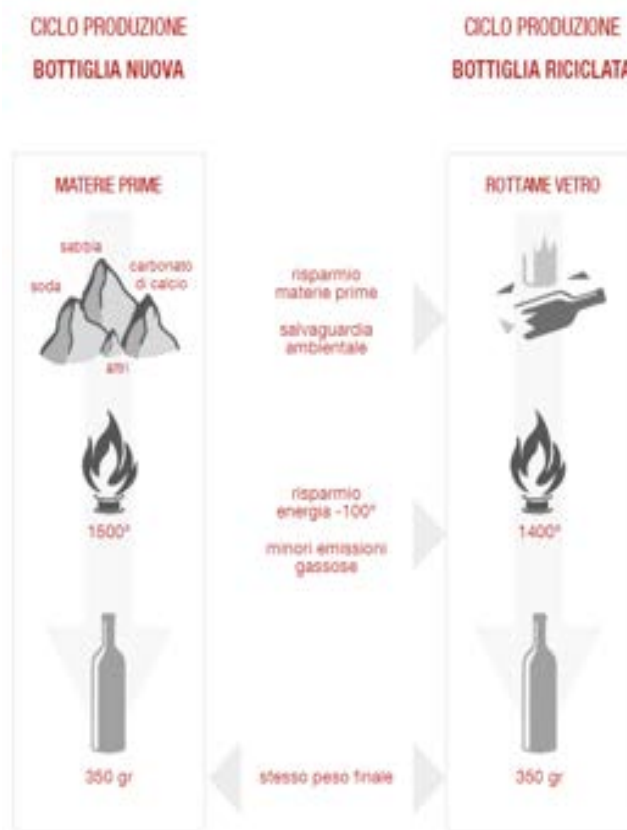


Figure 2- Differenza tra cicli produttivi

Fusione

La fusione della miscela avviene in un forno a due vasche, a funzionamento continuo. La massa in fusione è contenuta nella vasca principale (bacino di fusione) che è seguita da una vasca più piccola di condizionamento (avanforno o bacino di affinaggio).

¹ Consorzio nazionale per la raccolta, il riciclo e il recupero dei rifiuti di imballaggio in vetro prodotti sul territorio nazionale

La semplice fusione delle materie prime, infatti, non è sufficiente. Prima di convogliare il vetro fuso alla lavorazione è altresì necessaria la fase di affinaggio, ossia l'eliminazione delle bolle di gas intrappolate nel vetro fuso per rendere lo stesso conforme alle specifiche di produzione.

Le due vasche sono separate ed il vetro fluisce dal bacino di fusione a quello di lavorazione attraverso una gola.

La combustione avviene grazie ad appositi bruciatori a gas. La superficie del bacino di fusione generalmente varia da 30 a 100 m² e la profondità o altezza del bagno di vetro è variabile in dipendenza del colore vetro (più profondo per il vetro chiaro, meno profondo per il vetro scuro). Tutte le superfici esterne del forno sono rivestite con materiali isolanti per contenere le dispersioni di calore.

Il vetro fuso ed affinato a temperature di circa 1550°C viene inviato tramite canali di condizionamento alle macchine formatrici. [7]

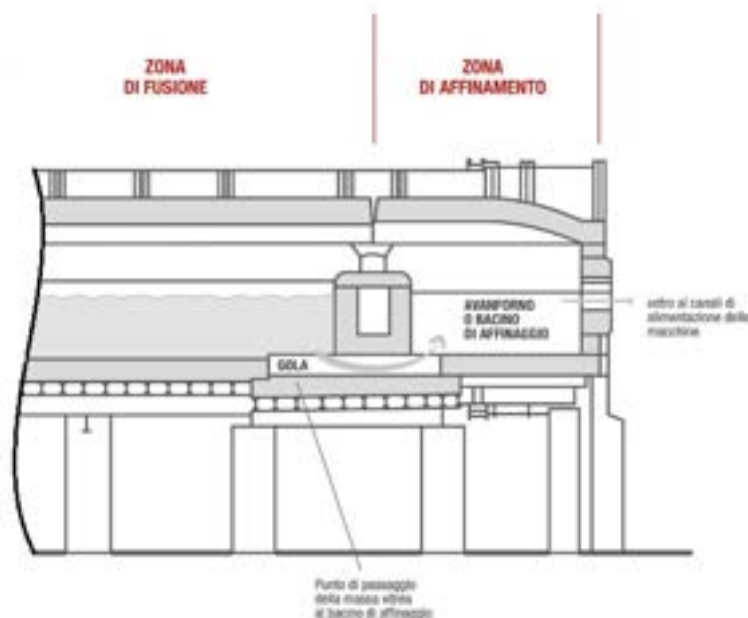


Figure 3- Forno fusorio

Oltre ai bruciatori a gas, nel forno possono essere presenti dei booster elettrici, ossia degli elettrodi posti alla base del forno e immersi nel bagno di vetro, che scaldano il fuso per effetto Joule. La base degli elettrodi necessita di raffreddamento continuo per evitarne la fusione; il raffreddamento è ad acqua, a circuito chiuso.

L'immissione dell'aria comburente è di tipo forzato e realizzata con l'impiego di ventilatori elettrici. Questi sono alimentati attraverso un variatore di frequenza, regolato in modo automatico in base al rapporto aria/gas impostato e alla portata del gas metano.

L'estrazione dei fumi di combustione dal forno può essere effettuata in due modi. In condizioni nominali, gli off-gas sono convogliati prima al sistema di trattamento delle emissioni inquinanti, e successivamente alla ciminiera. Data l'elevata perdita di carico imposta dall'elettrofiltro, l'estrazione dei fumi avviene in modo forzato tramite ventilatore elettrico.

In condizioni di emergenza o manutenzione dell'elettrofiltro i fumi possono essere convogliati direttamente alla ciminiera. In questo caso, dato l'elevato effetto camino della ciminiera, i fumi vengono estratti senza l'ausilio di ventilatori.

Il forno, completamente automatico, è dotato di varie apparecchiature di controllo, regolazione e misura come:

ACCORDO DI PROGRAMMA MISE (OGGI MITE)-ENEA

- un apparecchio a funzionamento automatico per il controllo del livello del bagno fuso, collegato con uno strumento regolatore e registratore;
- un indicatore e regolatore del rapporto Aria/Metano;
- un indicatore di portata del Metano;
- un indicatore di portata dell'Aria;
- un indicatore e regolatore della pressione;
- un indicatore delle temperature nelle diverse zone del forno;
- un indicatore delle temperature nelle diverse zone del rigeneratore;

Nella quasi totalità dei casi il forno è dotato di un sistema di recupero di calore, con camere di rigenerazione in materiale refrattario o mediante scambiatore di calore metallico, per il preriscaldamento dell'aria comburente.

I forni dotati di camera di rigenerazione in refrattario sono di due tipologie:

- end-port
- side-port
-

End-port

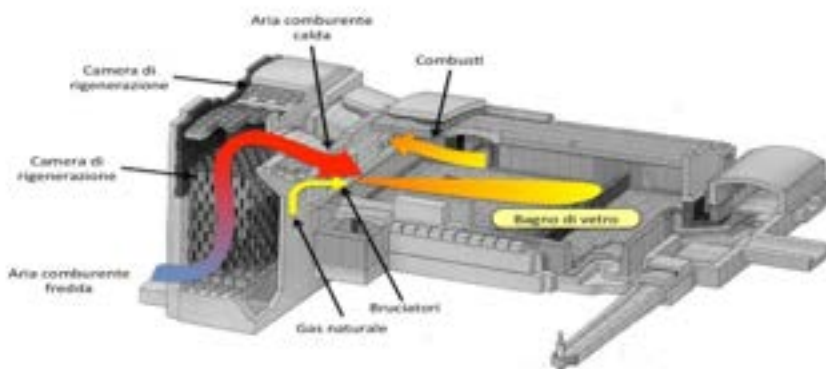


Figure 4- Forno End Port

Nella prima tipologia l'aria, preriscaldata dal contatto con gli impilaggi (mattoni refrattari che si riscaldano acquistando calore dall'aria in uscita e si raffreddano cedendo calore all'aria in entrata) o mediante lo scambiatore metallico, entra nel forno da un apposito condotto, detto torrino, e si miscela con il gas metano proveniente dai bruciatori, posti al di sotto di questo.

I prodotti della combustione escono dalla camera di fusione attraversando un secondo torrino ed attraversano la camera di rigenerazione, riscaldano gli impilaggi, permettendo un sensibile recupero energetico. Il recupero di calore avviene entro due camere verticali in cui sono contenuti pezzi di materiale refrattario (impilaggi), aventi speciali caratteristiche. Il passaggio dei fumi attraverso i caminelli degli impilaggi riscalda il materiale refrattario portandolo ad alta temperatura; ogni 20-25 minuti si inverte il ciclo con una apposita valvola di inversione automatica, facendo entrare l'aria comburente. I fumi in uscita, normalmente, hanno una temperatura di circa 250-300° C.

Side-port

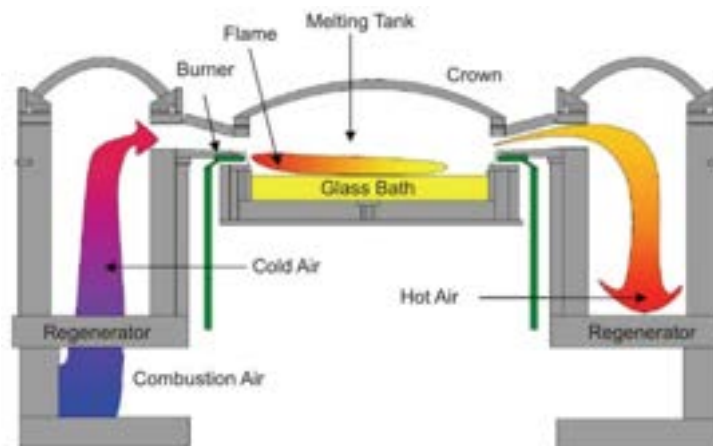


Figure 5- Forno Side-Port

Nella tipologia side-port le camere di rigenerazione sono collocate ai due lati del bacino di fusione. I bruciatori sono posti ai lati del forno, in corrispondenza e al di sotto delle aperture di comunicazione (dette torrini) con le camere rigenerative. L'intero sistema forno-rigeneratore funziona in modo alternato, ovvero "a inversioni": per un tempo di circa 20 minuti l'aria di combustione ed il combustibile vengono alimentati dal lato destro del forno, mentre i fumi di combustione escono da quello sinistro e vanno a riscaldare gli impilaggi refrattari della camera; scaduti i 20 minuti, avviene l'inversione, ed il funzionamento del sistema viene completamente invertito, così che l'aria possa preriscaldarsi a spese del calore degli impilaggi caldi di sinistra, ed i fumi possano riscaldare nuovamente gli impilaggi di destra, raffreddatisi durante i 20 minuti precedenti a favore dell'aria.

Formatura

Per ottenere la forma finale del prodotto sono necessari vari step intermedi. In primis dal vetro fuso si ottengono "gocce" aventi peso e forma dimensionati in base al prodotto finale che si vuole ottenere. In seguito, si passa alla formazione dell'"abbozzo" (detto anche "parison"), una "tasca" cava di forma intermedia rispetto al contenitore finale, ma con l'imboccatura già formata. Solo a seguito di queste due fasi è possibile poi realizzare la forma finale desiderata. Si va ora ad analizzare in dettaglio il passaggio tra queste 3 fasi.

La temperatura dell'abbozzo, per non inficiare la qualità dell'oggetto finito, deve essere la più uniforme possibile. Per questo motivo lo stampo in cui si realizza la "parison" deve essere alimentato con una pasta di vetro a temperatura uniforme e che corrisponda alla viscosità desiderata per la lavorazione. Tenendo presente che il vetro appena uscito dal forno ha una temperatura superiore ai 1300°C, mentre la temperatura di alimentazione può variare da 1050 a 1250°C, risulta evidente la necessità di "condizionare la temperatura del vetro".

A ciò serve il feeder, un canale posto alla fine del forno. Esso è costituito da più zone: la prima di raffreddamento, una seconda di condizionamento ed infine una vaschetta forata che permette la fuoriuscita della goccia.

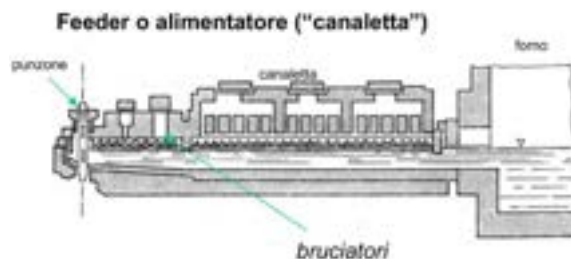


Figure 6- Alimentatore

La prima zona consente al vetro di raffreddarsi di circa 150-200°C. A questo scopo, il canale è munito sia di dispositivi per immettere aria fredda (ventilatori), sia di piccoli bruciatori a gas (per regolare la temperatura), disposti secondo la lunghezza. La temperatura del bagno di vetro è rilevata con apposite sonde ad immersione (termocoppie), collegate al sistema automatico di regolazione. Il sistema di regolazione gestisce sia i bruciatori che i ventilatori aumentando o diminuendo la pressione dell'aria di combustione e quella dell'aria di raffreddamento in modo da mantenere il valore ottimale di temperatura. Nella zona di condizionamento, munita anch'essa di numerosi, piccoli bruciatori e ventilatori, il vetro deve riacquistare l'omogeneità termica, perduta nel precedente raffreddamento, aumentandone la temperatura. Nel feeder il vetro può essere colorato, aggiungendo dei vetri bassofondenti intensamente colorati (fritta). In questo caso nel feeder vengono sistemati anche degli agitatori (due o tre) che contribuiscono alla rapida dispersione ed omogeneizzazione del colore. In questo modo è possibile, da un unico forno, ottenere oltre al vetro incolore, anche due o tre colori diversi. L'alimentatore è costituito da una vaschetta collegata al canale di condizionamento, munita di uno o più fori (cuvettes) per l'uscita della goccia che è regolata dal movimento verticale alternativo di un pistone in refrattario. Coassiali al pistone si trovano uno o due cilindri rotanti in materiale refrattario, mossi da un motore elettrico, che contribuiscono a mantenere uniforme la temperatura del vetro. Infine, sotto il foro, sono disposte le forbici per staccare la goccia, che vengono raffreddate con una miscela di acqua e olio in emulsione per evitarne il surriscaldamento.

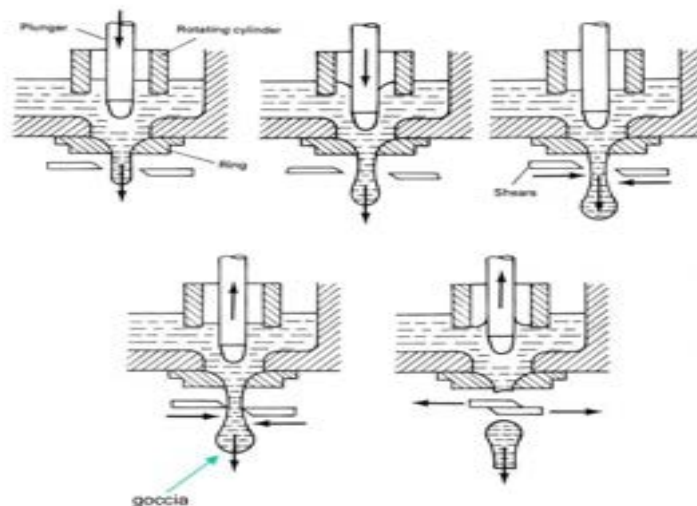


Figure 7- Formazione della goccia

Le gocce incandescenti per caduta verticale guidata, grazie ad appositi canali cadono nello stampo della macchina formatrice. È nello stampo che il contenitore prende forma con il tradizionale processo "soffio-soffio" o con l'innovativo processo "presso-soffio".

Processo "soffio-soffio"

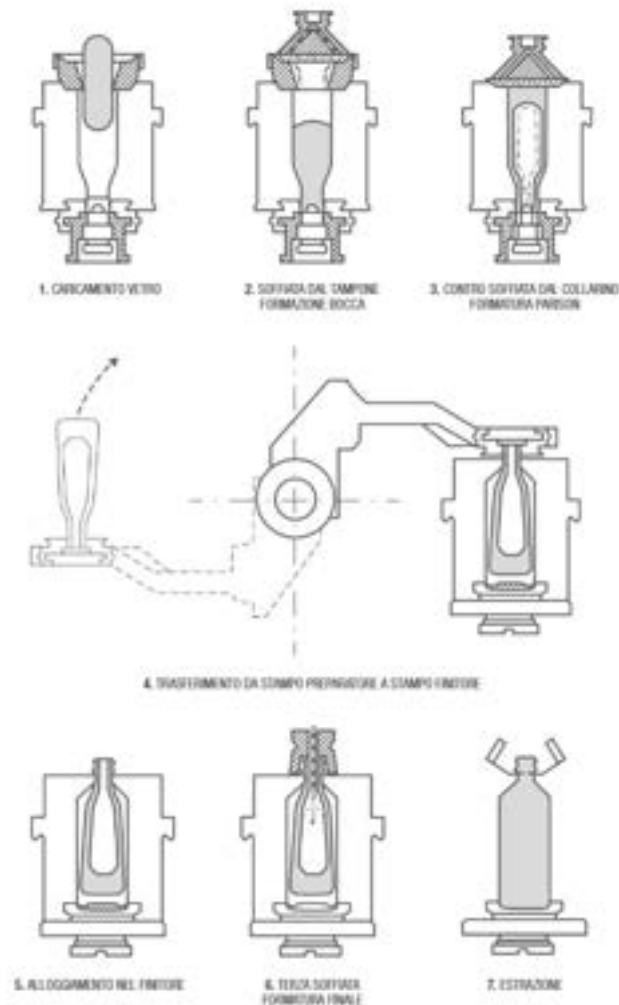


Figure 8- Fasi di formatura per processo Soffio-Soffio

1. La goccia cade, per gravità, nello stampo preparatore. Il preparatore è montato nella macchina con l'imboccatura del futuro contenitore rivolta verso il basso e, sulla sua parte superiore, viene posizionato un imbuto di guida (funnel) attraverso il quale passa la goccia per raggiungere la cavità dello stampo.
2. Dopo la caduta della goccia, sulla parte superiore dell'imbuto, a sede conica, va a collocarsi, con accoppiamento perfetto ed a goccia introdotta, il tampone (baffle). Il tampone è dotato di fori per il passaggio dell'aria compressa che sospingerà la goccia di vetro verso il basso in completa aderenza con il collarino (neck-ring) ed il punzone (plunger). Viene così formata l'imboccatura con l'apertura rivolta verso il basso ed il resto della goccia soprastante.
3. Successivamente l'insieme tampone ed imbuto viene spostato, ed il tampone, riposizionato nella sede precedentemente occupata dall'imbuto, chiude così la cavità dello stampo preparatore; contemporaneamente il punzone viene ritirato. Dopo un breve intervallo di tempo, dall'apertura dell'imboccatura viene introdotta una determinata quantità di aria (fase definita "contro-soffiata") per formare la cosiddetta "parison", o abbozzo del contenitore, che si ottiene rigonfiando la goccia di vetro fino a portarla a completo contatto con le superfici dello stampo preparatore e del tampone. Trascorso il tempo sufficiente, la "contro-soffiata" viene interrotta, il tampone ritirato e lo stampo preparatore aperto lasciando così la "parison" (ancora rovesciata) sostenuta dal solo collarino.

4. A questo punto la “parison”, che viene trattenuta per l’imboccatura dal collarino (neck-ring mechanism) a sua volta solidale con un braccio denominato “invert”, viene ribaltata nella posizione “in piedi” per mezzo di una rotazione di 180° e trasferita nel finitore.

Durante questa operazione la “parison” non si deforma grazie allo stato superficiale del vetro leggermente indurito a seguito del contatto con lo stampo preparatore. Questo stato indurito, che rende possibile l’inversione, potrebbe ostacolare la soffiata finale all’interno dello stampo finitore, se durante il tempo di inversione, in cui la “parison” non è a contatto con lo stampo, non acquistasse nuovamente la viscosità adatta a ricevere la soffiata finale per effetto del calore trasmesso dalla massa interna del vetro.

5. Raggiunto il lato finitore, il collarino (in due parti) si apre, rilasciando la “parison” nel momento in cui le due metà dello stampo finitore si sono chiuse attorno al collo dell’articolo, sotto l’imboccatura. Successivamente esso ritorna alla stazione dello stampo preparatore per cominciare la formatura di una nuova “parison”.

6. Nella stazione finitore interviene una testa soffiante (blowhead) che, posizionandosi sopra all’imboccatura del contenitore in perfetta aderenza con la superficie superiore dello stampo, introduce aria compressa all’interno dell’abbozzo, espandendola fino a riempire completamente la cavità dello stesso finitore.

In questa fase viene asportata una notevole quantità di calore ed il recipiente assume una rigidità tale da mantenere la sua forma dopo il ritiro dello stampo. Durante la soffiata attraverso il fondello viene applicato anche il vuoto al fine di estrarre l’aria intrappolata nelle nicchie, così da migliorare la precisione dimensionale del prodotto.

7. Un meccanismo di trasferimento (take-out mechanism) blocca con le pinze il collo della bottiglia, la solleva e la trasporta su di un piattello (dead-plate) raffreddato che ha la funzione di realizzare una ulteriore estrazione di calore e di sostenere il recipiente quando viene lasciato dal trasferitore per essere spinto sul nastro trasportatore (conveyor). Le attrezzature stampo sono raffreddate mediante aria forzata proveniente da un sistema di ventilatori dedicati.

Processo “presso-soffio”

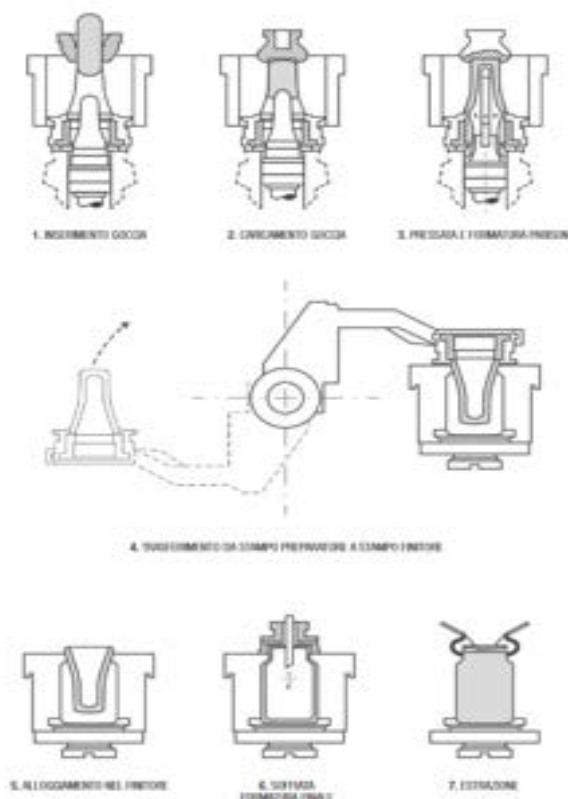


Figure 9- Fasi di formatura per processo Presso-Soffio

Il processo “presso-soffio” è identico al processo “soffio-soffio”, eccetto che per il metodo di formatura della “parison” nello stampo preparatore.

1. La goccia viene introdotta nello stampo preparatore attraverso l’imbuto e cade direttamente sulla punta di un maschio che raggiunge l'interno dello stampo attraverso il collarino. L'altezza del maschio è regolata in modo che la goccia, entrando nello stampo, ne riempia la cavità fin quasi a livello del preparatore.
2. Immediatamente dopo, l’imbuto si sposta e viene sostituito dal tampone che chiude la parte superiore del preparatore come nel processo soffio-soffio.
3. A questo punto il maschio preparatore si muove verso l’alto tramite un cilindro regolato da aria compressa, e distribuisce il vetro nelle cavità dello stampo e del collarino, in modo da riempire completamente lo spazio disponibile. Trascorso un prestabilito periodo di contatto maschio-vetro, tale da permettere un sufficiente raffreddamento della “parison” perfettamente formata, il maschio si ritira nella propria sede, il tampone ritorna in posizione di riposo e lo stampo preparatore viene aperto.

4. La "parison" è quindi trasferita nello stampo finitore.

5-6-7. Il ciclo di formatura continua come nel processo soffio-soffio.

In questo processo è indispensabile il mantenimento del peso della goccia entro limiti stabiliti. La forma dello stampo preparatore e del maschio hanno un ruolo essenziale nell'ottenimento della distribuzione finale del vetro.

Il processo presso-soffio è particolarmente indicato per produrre contenitori ad imboccatura larga (vasi), tuttavia con una forma del preparatore che permetta un facile caricamento della goccia ed una buona regolazione della temperatura dello stampo e del maschio, il processo "pressato-soffiato" per contenitori a "bocca larga" si svolge regolarmente senza troppi inconvenienti sia per contenitori a bocca larga che a bocca stretta.

Ricottura e trattamenti superficiali

Trattamento a caldo

I prodotti, dopo la fase di formatura, passano attraverso la cappa di trattamento a caldo, in cui vengono investiti da una nebulizzazione di SnCl_4 (cloruro stannico), con lo scopo di ricoprirne le superfici esterne di un sottilissimo film di SnO (monossido di stagno), che fungerà da “primer di adesione” per il trattamento protettivo anti-frizione (trattamento a freddo), depositato successivamente.

Ricottura

L'articolo, successivamente, viene fatto passare in forni di ricottura, ove, inizialmente e grazie all’ausilio di appositi bruciatori, la temperatura del vetro viene elevata da 4500°C a 5600°C circa, distribuendo il calore in modo omogeneo nel forno per mezzo di ventilatori e poi raffreddando lentamente, onde portare l'articolo a temperatura ambiente, allo scopo di eliminare le tensioni superficiali introdotte durante la fase di formatura. La durata del processo di ricottura è di circa un'ora.

Trattamento a freddo

A valle dei ventilatori di raffreddamento le superfici esterne delle bottiglie vengono spruzzate con una dispersione acquosa di un composto organico (in genere polietilene), detto trattamento a freddo, che si aggrappa ai clusters di SnO depositati dal trattamento a caldo e forma un film anti-frizione; quest'ultimo ha la funzione di ridurre l'attrito di sfregamento tra bottiglie nelle successive fasi della vita del contenitore, con lo scopo ultimo di preservarne al massimo le superfici da graffi e cricche, che ne pregiudicherebbero la resistenza meccanica. L'applicazione del trattamento è realizzata in modo automatico da un sistema di ugelli spruzzatori alimentati ad aria compressa e movimentato elettricamente.

Controllo qualità e imballaggio

Dopo il trattamento a freddo il prodotto viene controllato sia con ispezioni visive sia, e soprattutto, tramite l'aiuto di macchine automatiche per verificare la qualità dell'articolo e la corretta esecuzione del processo di fabbricazione.

Generalmente i controlli automatici riguardano l'ispezione della imboccatura e del fondo, la verifica dell'aspetto delle pareti ed i controlli dimensionali. Questi controlli variano da stabilimento a stabilimento, da articolo ad articolo e da colore a colore. I contenitori non considerati idonei vengono eliminati dalla linea di scelta e conseguentemente riciclati nel medesimo processo produttivo per essere rifusi. È anche questa una fase del ciclo produttivo nella quale la stabilità del contenitore sulla linea è importante poiché essi vengono trasportati-trascinati dai nastri trasportatori a grande velocità e durante questo scorrimento vengono eseguite le operazioni di controllo.

Solitamente la prima stazione di verifica delle linee produttive è il simulatore d'urto. I contenitori vengono introdotti nella macchina ad una certa distanza l'uno dall'altro. All'interno della stazione il contenitore viene fatto passare attraverso una ganascia contrapposta a delle ruote guida. Le ruote guida, tramite un attuatore ad aria compressa, vengono spinte sui contenitori ad una pressione di test predeterminata. In caso di difetto strutturale il contenitore si frantuma e viene rimosso dalla linea produttiva.

A valle del test di resistenza meccanica il prodotto viene trasferito ad una stazione di verifica che ne controlla i fattori di forma, lo spessore del fondo e del corpo, della bocca e del collo e i possibili difetti quali smerigli, infusi, bolle ecc. La macchina è in grado di leggere il numero di stampo riportato al piede delle bottiglie, in modo tale che, se si riscontra ripetutamente un difetto di fabbricazione nelle bottiglie prodotte da un dato stampo, si può attivare lo scarto automatico di tutti i successivi contenitori derivanti dallo stampo in questione, fino alla sua sostituzione.

Le linee di produzione che producono articoli per l'alimentare (vasi, oli, baby food) sono dotate di un ribaltatore automatico, che ruota il prodotto cavo di 180° lasciando l'apertura in basso. Un ventilatore dedicato soffia aria all'interno del prodotto per eliminare eventuali tracce di polvere o frammenti di vetro. Da qui il prodotto viene ruotato nuovamente di 180°, per proseguire poi lungo la linea.

A valle delle stazioni di verifica il prodotto viene trasferito all'ultima postazione di controllo, presidiata da un operatore che, a campione, effettua ulteriori test visivi di conformità. Qualora il prodotto non dovesse risultare conforme, l'operatore scarta il prodotto e blocca la sezione problematica della macchina formatrice.

Terminato il controllo, i contenitori vengono avviati su piani di accumulo in più file e un braccio automatizzato ne aspira un intero piano alla volta e li appoggia su un bancale in legno precedentemente preparato. Obiettivo della vetreria è produrre nelle condizioni più igieniche possibili e limitando al massimo possibili rotture per cui, partendo da un piano in legno, vengono sovrapposti divisori e bottiglie in strati sovrapposti. La stazione di lavoro impiega energia elettrica, aria compressa e vuoto.

Una volta composto, il bancale è spostato alla stazione di prelievo mediante rulli o catenarie ad azionamento elettrico. Una navetta automatizzata preleva i bancali dalla stazione di prelievo e li trasferisce su un'altra catenaria per la termo-retrazione.

Una volta giunto nella stazione di termo-retrazione, il tutto viene coperto e avvolto con un film in materiale plastico termoretraibile (un film che quando è sottoposto ad una fonte di calore si ritira fino a circa il 50% della dimensione iniziale, aderendo all'oggetto attorno al quale è stato avvolto) che, una volta scaldato tramite appositi bruciatori, trasforma la massa dei contenitori in un corpo unico, stabile, compatto e idoneo al trasporto.

Partendo da questo tipo di imballo, nel tempo, sono stati sviluppati materiali per aumentare le performance di scivolamento in linea dei contenitori ovvero i vassoi in cartone sono stati sostituiti da interfalde in plastica.

Nei casi di bottiglie particolarmente difficili o decorate, si sono realizzati imballi che impediscono lo sfregamento tra un contenitore e l'altro ovvero delle scacchiere grandi quanto i pallet di appoggio, denominati alveari, dove le bottiglie vengono alloggiare manualmente permettendone un trasporto più sicuro.

Ultima fase l'etichettatura del bancale con tutti gli elementi identificativi dell'articolo e del lotto. Il prodotto finito, una volta imballato, avvolto con cappucci di politene (che vengono retratti all'interno di un forno di termo retrazione) ed etichettato viene inviato ai magazzini previo benestare del Controllo Qualità.

2.2 Mappatura ed Analisi Energetica

A seguito dell'analisi del processo di fabbricazione del vetro cavo, si pone ora enfasi su quelli che sono i consumi energetici di tale processo.

La produzione di vetro è un'attività molto energivora in quanto, per essere fuso e plasmato nelle diverse forme desiderate, il vetro deve raggiungere alte temperature. Diversamente da altri settori, inoltre, i consumi sono continui e costanti tutto l'anno, con rare fermate dei forni, se non per manutenzioni straordinarie o fine vita degli stessi.

Il costo della voce energetica, in particolare di energia elettrica e gas, incide in modo importante nella produzione del vetro, arrivando anche a superare il 20% dei costi totali, con conseguenze rilevanti sulla competitività delle aziende italiane rispetto alle omologhe europee. Diventa dunque necessario un'analisi per capire la natura di tale domanda energetica ed individuare eventuali indicatori che permettano di capire, dal punto di vista energetico, l'efficienza di un determinato processo. È fondamentale quindi realizzare una prima mappatura del processo produttivo per comprendere al meglio l'uso delle risorse, e una stima delle medie dei consumi % dei vettori utilizzati. Da una prima analisi dei dati forniti dalle diagnosi messe a disposizione si è evinto quanto segue:

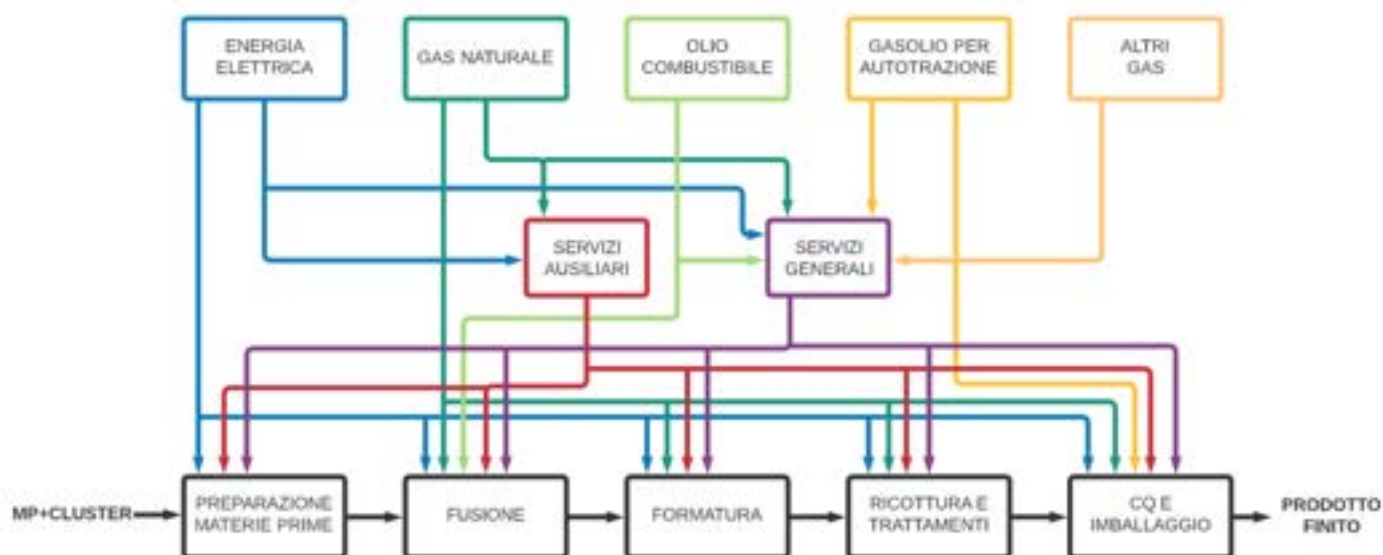


Figure 10- Analisi del processo produttivo del vetro cavo

Oltre al gas naturale e all'energia elettrica, che rappresentano i vettori energetici maggiormente utilizzati, è possibile trovare nei vari stadi di processo, a seconda della politica energetica dell'azienda, altri vettori aventi impatto inferiore quali:

- Olio combustibile
- Gasolio per autotrazione
- Altri gas (vapore, acqua calda o fredda).

Da questo prospetto salta subito all'occhio quanto l'energia elettrica ed il gas naturale siano importanti, poiché intervengono, praticamente, in quasi tutti gli step. La presenza dell'olio combustibile, invece, dipende strettamente dalle politiche energetiche dell'azienda. Gasolio per autotrazione e altri gas (tra cui gas tecnici) hanno un impatto minore.

Nella figura 11 sono mostrati solo i vettori energetici più usati per semplificare la visualizzazione, senza specificarne le percentuali di utilizzo. Un grafico più completo verrà mostrato in seguito.

Tra i principali servizi ausiliari non specificati in slide troviamo:

- Impianto per aria compressa;
- Ventilatori;
- Impianto per le acque di raffreddamento;
- Impianto per il trattamento dei fumi;
- Pompe da vuoto;
- Officina per la manutenzione degli stampi;

I principali servizi generali, invece, comprendono:

- Impianto per illuminazione interna ed esterna;
- Impianto per riscaldamento/raffrescamento degli ambienti;
- Officine di manutenzione generale;
- Veicoli per trasporto interno.

Si passa, quindi, ad un'analisi più approfondita dei fabbisogni di ogni singola fase del processo. Per prima cosa, tramite il diagramma a blocchi a seguito, è possibile individuare come ogni vettore energetico e come i diversi servizi intervengono nel processo in termini di percentuali di tonnellate di petrolio equivalenti di energia messa a disposizione dai vettori.

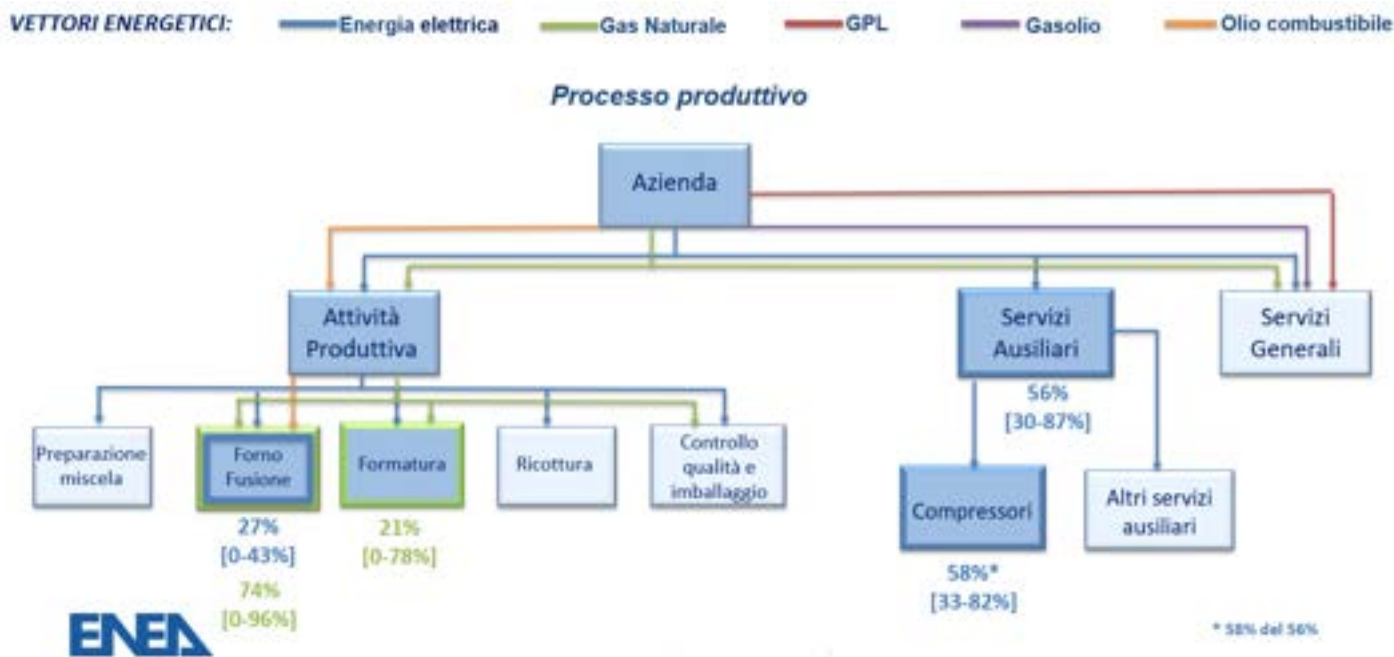


Figure 11- Analisi dei consumi Vetro Cavo

In particolare, si può osservare che la fase maggiormente energivora è quella di fusione. Per tale motivo, proprio su questa fase si cerca di intervenire maggiormente per ottimizzare i consumi. La fusione è l'operazione che richiede di gran lunga il maggior apporto di gas combustibile congiuntamente con la fase di formatura.

Il consumo elettrico, invece, è maggiormente capillare ma abbiamo una concentrazione nella fase di fusione mentre è trascurabile nella fase di formatura. Questa inattesa carenza di energia elettrica nella fase di formatura è dovuta al fatto che l'aria compressa utilizzata viene contabilizzata in quelli che sono definiti servizi ausiliari, che verosimilmente mostrano un consumo di energia elettrica molto elevato. L'aria compressa è maggiormente utilizzata nella fase di formatura quindi possiamo dedurre che l'alta percentuale di utilizzo di energia elettrica per i servizi ausiliari sia dovuto a questo tipo di contabilità.

Una volta avuto il quadro complessivo, si passa ora all'analisi fase per fase e, infine, la nostra attenzione si sposterà sull'analisi dei fabbisogni dei servizi ausiliari e generali completando così l'analisi.

Preparazione delle materie prime



Figure 12- Preparazione MP (IDEF-0)

INPUT:

L'input di tale fase del processo è rappresentato dalla miscela, nelle opportune quantità, delle materie prime e dal rottame di vetro (o "cluster").

OUTPUT:

Output della fase è la miscela finale destinata al forno fusorio, composta dagli input prima citati.

ATTREZZATURE PRINCIPALI:

- trasportatori a nastri o a coclea;
- mescolatrice;
- tramoggia di infornaggio e infornatrici;
- vasche di raffreddamento per la raccolta degli scarti derivanti da gocce roventi.

CONSUMI ENERGETICI:

Tale fase richiede sicuramente un certo quantitativo di energia elettrica, al fine di alimentare alcune delle attrezzature prima citate.

I servizi ausiliari coadiuvano tale fase tramite l'impianto per le acque di raffreddamento, necessario a raffreddare gli scarti derivanti da gocce non idonee alla fase di formatura.

È presente in questa fase e, ovviamente visto come vengono essi stesso definiti, nelle altre, anche l'apporto dei servizi generali, attraverso i vari impianti di illuminazione, condizionamento degli ambienti ed il supporto delle officine di manutenzione generale.

Fusione

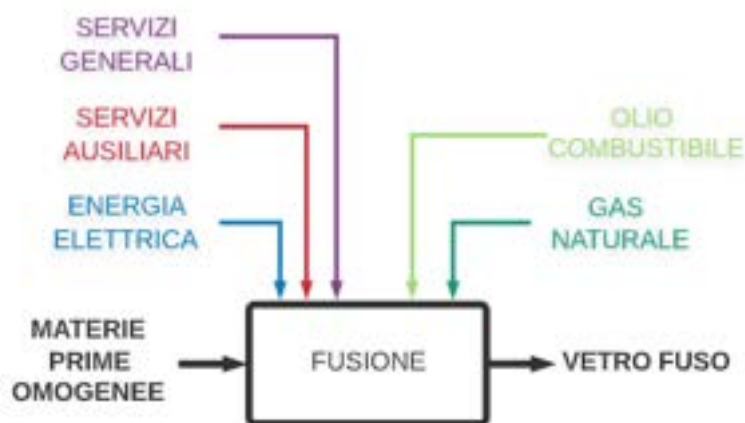


Figure 13- Fusione (IDEF-0)

INPUT:

All'ingresso del forno fusorio abbiamo la miscela di materie prime e frammenti di vetro da riciclare ("cluster").

OUTPUT:

Output della fornace è vetro fuso alla temperatura di circa 1550°C.

ATTREZZATURE PRINCIPALI:

- forno fusorio, a due vasche, dotato di bruciatori e, eventualmente, booster elettrici raffreddati ad acqua;
- sistema di immissione dell'aria comburente e l'estrazione dei fumi combusti;
- varie apparecchiature di controllo.

CONSUMI ENERGETICI

La voce preponderante di consumo per la fase di fusione è quella di gas naturale, necessario ad alimentare i bruciatori per far avvenire la combustione. Questi ultimi, a seconda della politica energetica dell'azienda, possono anche essere

del tipo alimentati ad olio combustibile. Altro consumo rilevante è quello di energia elettrica, utilizzata per alimentare, se presenti, i booster elettrici, oltre che tutte le attrezzature di controllo.

I servizi ausiliari assistono la fase di fusione tramite il sistema di trattamento dei fumi, che filtra tutti i fumi combustivi provenienti dall'intero impianto, la maggior parte dei quali provengono proprio dalla fornace. Inoltre è fondamentale l'intervento dei ventilatori, che giocano un ruolo fondamentale nel sistema di immissione dell'aria comburente e l'estrazione dei fumi combustivi, e dell'impianto per le acque di raffreddamento, utilizzato per tenere sotto controllo la temperatura dei booster elettrici.

I servizi generali sostengono questa fase tramite i vari impianti di illuminazione, condizionamento degli ambienti ed il supporto delle officine di manutenzione generale.

Formatura

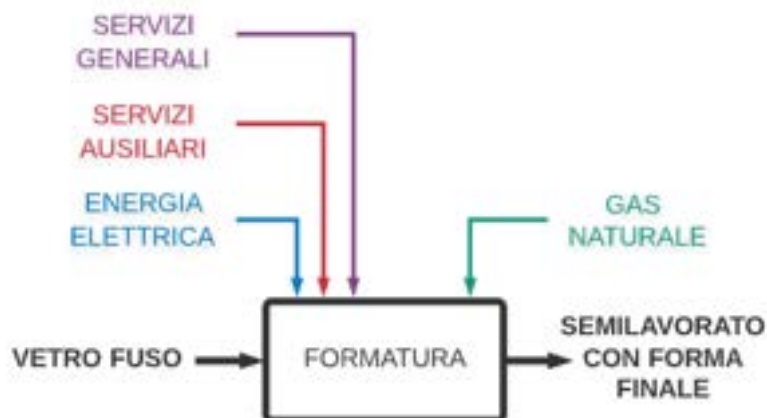


Figure 14- Formatura (IDEF-0)

INPUT:

Input di questa fase è il vetro fuso uscente dalla fornace, ad una temperatura di circa 1500°C, che dovrà subire un raffreddamento controllato in modo da raggiungere la temperatura alla quale corrisponde la viscosità adatta per assumere quella che sarà la forma finale.

OUTPUT:

Tramite la formatura ottengo un semilavorato avente già la forma finale, ma che deve subire ulteriori trattamenti prima di poter essere immagazzinato.

ATTREZZATURE PRINCIPALI:

- canale di condizionamento (feeder), munito di dispositivi per immettere aria fredda (ventilatori) e bruciatori a gas;
- sistema di regolazione dell'aria di raffreddamento e dell'aria comburente;
- eventuali agitatori per l'inserimento di vetri bassofondenti coloranti;
- vaschetta alimentatrice con pistone e cilindri in refrattario, messi in movimento da motore elettrico, e forbici per il taglio della goccia, raffreddate con una miscela di acqua e olio in emulsione;
- stampo preparatore e stampo finitore
- altre varie attrezzature che coadiuvano la fase di preparazione e finitura (imbuto di guida, tampone, collarino, "invert", "take-out mechanism", eventuale maschio preparatore per processo presso-soffio).

CONSUMI ENERGETICI:

La fase di formatura richiede l'apporto di energia elettrica, per il funzionamento delle varie attrezzature elencate precedentemente, oltre che l'apporto di gas naturale al fine di alimentare i numerosi bruciatori presenti nel canale di condizionamento.

I servizi ausiliari coadiuvano questa fase grazie all'uso dei ventilatori, utilizzati per la regolazione dell'aria comburente o raffreddante all'interno del canale di condizionamento e per il raffreddamento degli stampi, dell'impianto per aria compressa, necessaria per l'operazione di soffiatura del vetro nello stampo o per la movimentazione del maschio preparatore nel processo presso-soffio, tramite l'ausilio di pompe da vuoto, necessarie nella fase di finitura a far aderire la "parison" allo stampo finitore, e tramite l'impianto per le acque di raffreddamento, che interviene per tenere sotto controllo la temperatura delle forbici taglia-goccia. Ultimo apporto fornito dai servizi ausiliari è quello dato dall'officina di manutenzione degli stampi

I servizi generali intervengono tramite i vari impianti di illuminazione, condizionamento degli ambienti ed il supporto delle officine di manutenzione generale.

Ricottura e trattamenti superficiali



Figure 15- Ricottura e trattamenti superficiali (IDEF-0)

INPUT:

A monte del trattamento a caldo che precede la fase di ricottura ho un semilavorato avente già la forma finale ed una temperatura di circa 550°C.

OUTPUT:

A valle del trattamento a freddo ho il prodotto trattato, pronto per il controllo qualità.

ATTREZZATURE PRINCIPALI:

- cappa di trattamento a caldo con nebulizzatori alimentati ad aria compressa;
- forno di ricottura con appositi bruciatori;
- ventilatori per la distribuzione del calore e per il raffreddamento del prodotto;
- sistema di ugelli spruzzatori per il trattamento a freddo, alimentati ad aria compressa e movimentato elettricamente;
- vari sistemi per trasporto del prodotto (trasportatori a nastro, trasversali ecc.)

CONSUMI ENERGETICI:

Questa fase del processo, necessaria a far acquisire al prodotto finale le caratteristiche necessarie a immetterlo sul mercato, richiede il consumo di energia elettrica, da fornire alle attrezzature precedentemente elencate, e di gas naturale, per alimentare il forno di ricottura. I servizi ausiliari intervengono attraverso il rifornimento di aria compressa, che alimenta i nebulizzatori per il trattamento a caldo e a freddo, ed i ventilatori presenti all'interno del forno di ricottura per il trattamento termico. I servizi generali intervengono, come sempre, tramite i vari impianti di illuminazione, condizionamento degli ambienti ed il supporto delle officine di manutenzione generale.

Controllo qualità e imballaggio

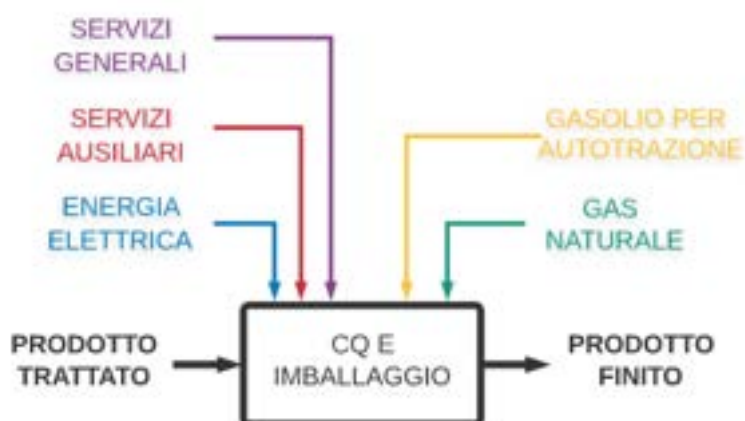


Figure 16- CQ e imballaggio (IDEF-0)

INPUT:

Input di questa fase sono i prodotti che hanno ricevuto già tutti i trattamenti e le lavorazioni necessarie ad essere immessi sul mercato e necessitano solo del controllo necessario a verificare la buona riuscita di tali lavorazioni.

OUTPUT:

Pallet etichettato ed imballato, pronto ad essere spedito.

ATTREZZATURE PRINCIPALI:

- trasportatori a nastro, a rulli o catenarie ed altri sistemi di trasporto;
- stazione per test di resistenza;
- macchina per test visivo automatizzato;
- eventuale capovolgitore automatico per articoli per alimentare;
- stazioni di pallettizzazione e di termo-retrazione

CONSUMI ENERGETICI:

Le fasi di controllo qualità e imballaggio richiedono l'apporto di energia elettrica, per l'azionamento delle varie attrezzature presenti, di gas naturale, come combustibile dei bruciatori della stazione di termo-retrazione, e di gasolio per autotrazione, per alimentare eventuali veicoli assegnati specificamente a questa fase per il trasporto dei pallet.

I sistemi ausiliari supportano queste fasi tramite gli impianti di aria compressa e le pompe a vuoto, necessari al corretto imballaggio del prodotto finito, ed i ventilatori utilizzati per eliminare eventuali frammenti di vetro o tracce di polvere nei contenitori destinati ad uso alimentare.

I servizi generali intervengono tramite i vari impianti di illuminazione, condizionamento degli ambienti ed il supporto delle officine di manutenzione generale.

I servizi ausiliari



Figure 17- Servizi Ausiliari (IDEF-0)

Indichiamo con il termine “servizi ausiliari” tutti quei servizi che sono di diretto supporto all’attività di processo ed assolgono funzioni necessarie alla buona riuscita dello stesso.

Si è già mostrato come tali servizi vadano ad interagire con le varie fasi. Per capire, però, l’impatto energetico complessivo del processo è necessario definire quali sono i fabbisogni di tali servizi:

- **Impianto per aria compressa:**

Negli stabilimenti che realizzano la produzione di vetro cavo è presente una sala compressori all’interno della quale sono alloggiati vari gruppi distinti di generazione di aria compressa. Non tutti i compressori presenti lavorano simultaneamente ma ho gruppi operativi e gruppi di riserva.

Solitamente si utilizzano compressori a vite, più silenziosi e maggiormente adatti a lavorare in modo prolungato rispetto a quelli a pistone, raffreddati ad acqua, se di grandi dimensioni, o ad aria, se di piccole dimensioni.

Il funzionamento di tale impianto richiede l’apporto di energia elettrica e di acqua o aria per il raffreddamento.

- **Ventilatori**

I ventilatori rappresentano in genere la seconda voce di consumo di elettricità tra i servizi ausiliari, in quanto la ventilazione forzata che generano assolve a compiti di primaria importanza per il corretto e sicuro svolgimento delle attività produttive, come il raffreddamento degli stampi, l’alimentazione dell’aria di combustione al forno e ai canali, il condizionamento del vetro durante la ricottura, il tiraggio forzato dei fumi di combustione e tutte le altre funzioni indicate nell’analisi energetica di ogni singola fase.

- **Impianto per le acque di raffreddamento**

Il circuito di prelievo (preferibilmente da pozzi artesiani), trattamento, circolazione, raffreddamento, riciclo delle acque di processo e di raffreddamento risulta anch’esso di grande importanza per la produzione vetraria, in quanto garantisce la sopravvivenza delle infornatrici della miscela vetrificabile, il raffreddamento dei compressori, la lubro-refrigerazione di cesoie e distributore, e tutte le altre funzioni elencate in precedenza. L’acqua potabile di acquedotto viene impiegata esclusivamente per usi sanitari, colonnine d’acqua e mensa. Le pompe di circolazione sono alimentate ad energia elettrica.

- **Impianto per il trattamento dei fumi**

Il trattamento dei fumi di combustione per l’eliminazione delle sostanze inquinanti prima della loro immissione in atmosfera è di fondamentale importanza per il contenimento dell’impatto ambientale della produzione di vetro per contenitori.

I principali sistemi di trattamento dei fumi utilizzati sono tre:

- Il filtro a maniche, in cui i fumi vengono fatti passare attraverso delle maniche in tessuto speciale, che trattengono il particolato;
- l’elettrofiltro a due o tre campi, in cui il particolato sospeso nei fumi viene intrappolato e rimosso per mezzo di un intenso campo elettrostatico;
- lo scrubber a secco per la neutralizzazione dei gas acidi presenti nei fumi.

Questi, il più delle volte, non vengono utilizzati singolarmente, ma combinati tra di loro per ottenere un miglior filtraggio. I fumi da trattare provengono dal forno fusorio, dal canale di condizionamento, dal forno di ricottura e dalla

stazione di termo-retrazione dei pallet. Il particolare che contengono, e che deve essere filtrato, è costituito principalmente da solfato di sodio, solfati di calcio, sorbente non reagito, e spolverio di composizione.

L'elettrofiltro e lo scrubber sono alimentati ad energia elettrica.

- **Pompe da vuoto**

Le pompe da vuoto hanno un impiego di nicchia nella produzione vetraria, in quanto servono quasi esclusivamente due tipologie di utenza: i pallettizzatori automatici, in cui alimentano le ventose per la manipolazione delle interfalderie e dei cartoni di copertura superiore; e la formatura di alcuni prodotti particolari, in cui il vuoto viene applicato alla cavità dello stampo per coadiuvarne il perfetto riempimento. Ovviamente le pompe da vuoto richiedono l'apporto di energia elettrica

- **Officina per la manutenzione degli stampi**

Nell'officina manutenzione stampi vengono effettuate tutte le operazioni volte a ripristinare la funzionalità e la finitura superficiale degli stampi impiegati in formatura, e pertanto rappresenta un'unità asservita alla produzione di fondamentale importanza per il mantenimento dei necessari standard di qualità prodotto.

Al suo interno vengono effettuate fresature, sabbiature, saldature, ricoperture con materiale d'apporto e altre operazioni, tutte operate manualmente da tecnici esperti in diverse postazioni singole, ciascuna dotata di un opportuno sistema di aspirazione a cappa orientabile, per l'evacuazione dei fumi di saldatura e sfridi di processo.

L'unità ha quindi consumi di gas naturale, per tutte le operazioni che necessitano di fiamma, gas tecnici (per i cannelli di saldatura), e consumi elettrici correlati ai sistemi di aspirazione e filtrazione necessari a garantire la salubrità dell'ambiente di lavoro.

I servizi generali

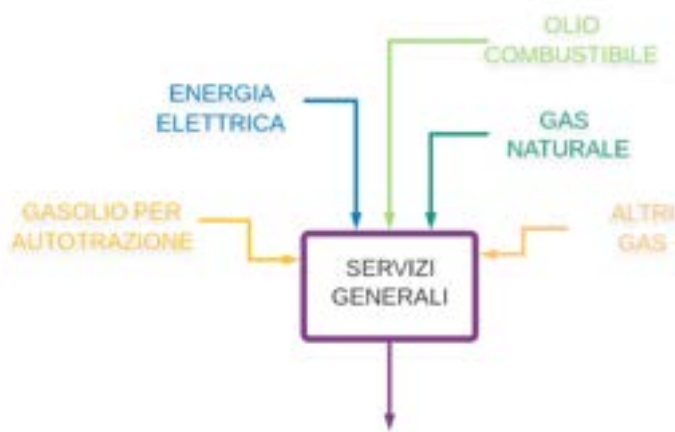


Figure 18- Servizi Generali (IDEF-0)

Rientrano in quest'ambito tutte le utenze i cui consumi e la cui regolazione sono sostanzialmente indipendenti dal processo produttivo di stabilimento, ma sono più correlate a fattori ambientali e climatici; si tratta per esempio di:

- Illuminazione interna ed esterna: nello stabilimento, nei magazzini e nei piazzali sono presenti centinaia di corpi illuminanti, che richiedono un consumo di energia elettrica.
- Riscaldamento degli ambienti: si tratta delle caldaie e dei generatori di calore per il riscaldamento invernale, nonché per la produzione di acqua calda sanitaria. Richiedono l'apporto di energia elettrica e gas combustibile (olio combustibile in alternativa);

- Raffrescamento degli ambienti: si tratta delle unità per il raffrescamento estivo, nonché per la climatizzazione continua di alcuni locali tecnici, che operano grazie all'uso di energia elettrica.
- Officine di manutenzione generale: si tratta dell'officina meccanica ed elettrica dello stabilimento. Per il funzionamento di tale unità è necessario l'apporto di energia elettrica ed eventuali gas tecnici (per i cannelli di saldatura).
- Veicoli per il trasporto interno delle merci, ai quali è necessario gasolio per autotrazione.

Dall'analisi effettuata si è evinto che le fasi maggiormente critiche per quanto riguarda la produzione del vetro cavo sono: fusione e formatura. Verrà mostrato alla fine del capitolo la metodologia di raccolta dati utilizzata ed il cruscotto di monitoraggio creato in seguito al lavoro effettuato da UniTuscia.

Prima di descrivere questi passaggi finali viene studiato il processo di produzione del vetro piano.

2.3 Produzione del vetro piano

Il vetro piano viene creato seguendo il processo base di produzione del vetro cavo, fatta eccezione per la fase di formatura.

In questa fase possiamo avere diversi tipi di lavorazione:

- Formatura per stiro;
- Laminazione;
- Filatura.

Oltre queste lavorazioni, il vetro piano viene creato mediante il processo float.

Formatura per stiro

Consiste nel sollevare, da una massa fusa di vetro, un velo di sufficiente plasticità da poter essere innalzato evitando il restringimento laterale. Il vetro, ridotto a forma di nastro continuo, viene spinto a sollevarsi attraverso una fessura orizzontale, ricavata in un blocco refrattario sommerso nel vetro fuso e, quindi, viene fatto passare attraverso due serie di rulli. Si producono fogli continui con spessore di 0,1-1mm e larghezza di 2,5 m. Queste lastre però possono presentare delle imperfezioni e difetti di planarità. La formatura per stiro può essere ottenuta mediante [8] :

- Procedimento Fourcalt, il vetro fatto passare attraverso coppie di rulli dove si raffredda gradualmente, dopo essere stato tirato verticalmente fino ad un'altezza di circa 12 metri;
- Procedimento Libbey-Owens, il vetro viene fatto salire per circa 1 m, tirato direttamente dal forno di fusione, e fatto piegare, poi, su un cilindro da dove prosegue orizzontalmente per essere raffreddato e laminato;
- Procedimento Pittsburg, il vetro viene tirato dal forno, come nel caso precedente, ma poi avanza verticalmente come nel Fourcalt.

Laminazione

Il vetro fuso scorre attraverso rulli di acciaio internamente raffreddati, dando luogo ad un nastro continuo di larghezza massima 4 m e spessore minimo 1 m. Le superfici ottenute non hanno facce otticamente parallele, ecco perché vi è bisogno della finitura. La finitura è realizzata in superficie, dopo il raffreddamento della massa, tramite mole abrasive che levigano ambedue le facce. Questa procedura è molto costosa, infatti la laminazione viene utilizzata per realizzare vetri particolari o decorativi:

Vetro stampato, su una superficie del vetro viene stampato un disegno in rilievo. Lo "stampato C" è quello più famoso, utilizzato su porte e frigoriferi e non è di conseguenza lucido trasparente. Può essere anche ricavato da lastra atermica colorata nelle tonalità verde-marrone-grigio;

1. Vetro retinato, viene prodotto incorporando una rete metallica al suo interno e viene impiegato per sicurezza nelle zone sotto luce di parapetto delle vetrate. Può essere anche di aspetto colorato. Per il vetro retinato non è applicabile il processo di tempra, a causa della presenza della rete metallica;
2. Vetro ornamentale.

Filatura

Viene utilizzata per la produzione di fibre di vetro di diametro compreso tra 1 e 8 micrometri, con resistenza alla trazione da 8500 a 20000 kgp/cm². Tali fibre si ottengono attraverso tiraggio meccanico e soffiatura. Questa può essere eseguita mediante:

- Tiraggio meccanico ad elevata velocità, secondo questo metodo il fuso viene fatto passare in una filiera di platino, in modo da ottenere il raggruppamento in un pluri-filamento. I filamenti ottenuti sono trattati successivamente con un appretto (amido o acetato di polivinile) e quindi sono avvolti su un tamburo rotante a 5000-7000 giri/min che ne determina il diametro. Essi sono impiegati come rinforzanti di poliesteri (scafi delle barche).
- Soffiatura con aria e vapore, consiste nell'utilizzo di getti di vapore o di aria compressa sui filamenti uscenti dalla filiera, in modo da determinarne la trasformazione in fibre discontinue sottili. Queste sono usate come materiale isolante termico o acustico.

Vetro float

Il vetro float è una lastra di vetro composta da vetro fuso galleggiante su un letto di stagno fuso. Questo metodo conferisce al vetro uno spessore uniforme e una superficie molto piatta. Il vetro fuso si diffonde sulla superficie del metallo e produce una lastra di vetro di alta qualità, che viene successivamente lucidata a caldo. Il vetro float non ha onde o distorsioni ed è ora il metodo standard per la produzione di vetro piano; oltre il 90% della produzione mondiale di vetro piano è vetro float. Il principale costituente del vetro piano è il SiO₂ (sabbia silicea). Ha un'alta temperatura di fusione che si trova nella regione di 1700 °C. Il blocco di base della silice ha una forma piramidale tetraedrica, con il silicio al centro collegato simmetricamente a quattro atomi di ossigeno che si trovano ai suoi angoli: ha la formula chimica SiO₄ ed è caricato negativamente. Raffreddando rapidamente la silice fusa, si forma una rete organizzata a caso di questi tetraedri, collegati ai loro angoli, per dare un materiale amorfo noto come silice vitrea. Per ragioni pratiche ed economiche, l'alto punto di fusione e la viscosità della silice vengono ridotti aggiungendo ossido di sodio sotto forma di carbonato e gli atomi di sodio-ossigeno entrano nella rete silicio-ossigeno, secondo i loro stati di valenza. Questi atomi sono conosciuti come Network Formers. Altri componenti principali del vetro piano: Calcio e Magnesio entrano nella struttura della rete come modificatori di rete e l'azione di questi modificatori è quella di rendere le strutture più complesse, in modo che quando i componenti sono fusi insieme, nel processo di raffreddamento, è più difficile per gli atomi disporsi in configurazioni adeguate alla cristallizzazione. Nel processo di fabbricazione del vetro, la velocità di raffreddamento è disposta in modo tale che la viscosità aumenta e la mobilità degli atomi è ostacolata impedendo così che si verifichi la disposizione e la cristallizzazione. Così il vetro viene spesso definito come un liquido super raffreddato in quanto non ha un punto di cristallizzazione o di fusione e non presenta il fenomeno del calore latente della cristallizzazione o della fusione.

The structure of soda-lime-silica float glass

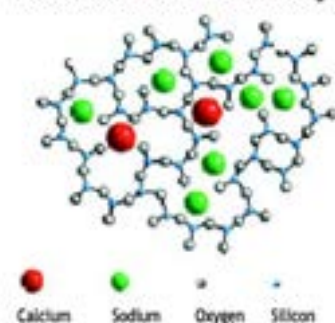


Figure 19-Struttura chimica vetro float

Analisi del processo produttivo

Nel processo del vetro float, il vetro fuso viene immerso in un bagno galleggiante di stagno fuso. Questo bagno di stagno è largo 4-8 metri e lungo fino a 60 metri. Per evitare che la superficie dello stagno si ossidi con l'ossigeno atmosferico, il bagno di stagno viene posto in atmosfera di gas protettivo. Questa atmosfera deve essere attentamente controllata poiché la sua composizione è strumentale alle proprietà della superficie di contatto tra il vetro e lo stagno che, a loro volta, influenzano lo spessore della lastra di vetro.

Il vetro galleggia come un nastro infinito sulla scatola. All'ingresso dove il vetro entra per la prima volta a contatto con la superficie dello stagno, la temperatura del metallo liquido è di circa 600 ° C. Lo stagno è l'unico metallo che rimane allo stato liquido a 600 ° C.

Immediatamente dopo l'uscita dalla camera del galleggiante, rulli speciali raccolgono il vetro e lo alimentano nel lehr di ricottura da cui esce a circa 200 ° C. Dopo il raffreddamento a temperatura ambiente su una pista a rulli aperta, viene tagliato, imballato e immagazzinato per la spedizione o per l'ulteriore elaborazione.

Il vetro float può essere realizzato con uno spessore compreso tra 3 e 19 mm. Esistono due tecniche per raggiungere questo obiettivo. Per produrre vetro float sottile, i rulli controllano la larghezza e la velocità del nastro di vetro. Per vetro float spesso, il vetro galleggia contro le barriere di grafite, in modo che il nastro fuoriesca più spesso. In questo modo è possibile ottenere le larghezze e gli spessori desiderati.

Mentre ogni pianta di vetro è diversa dall'altra, il processo di produzione del vetro float può essere suddiviso in cinque fasi universali:

1. Preparazione delle materie prime;
2. Fusione e raffinazione;
3. Bagno di stagno;
4. Ricottura;
5. Controllo qualità e taglio.

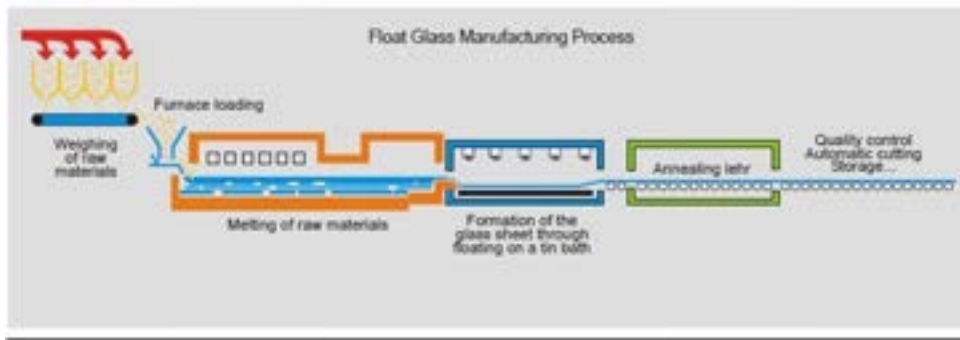


Figure 20-Processo float

Preparazione delle materie prime

Come per il processo base, anche in quello float i componenti principali vengono pesati e miscelati, attraverso l’impianto di dosaggio, in un lotto in cui viene riutilizzato anche il rottame di vetro. Esso riduce il consumo di gas naturale. I materiali vengono testati e conservati per essere successivamente miscelati sotto controllo computerizzato. I principali componenti che servono per realizzare il vetro float di base sono i seguenti:

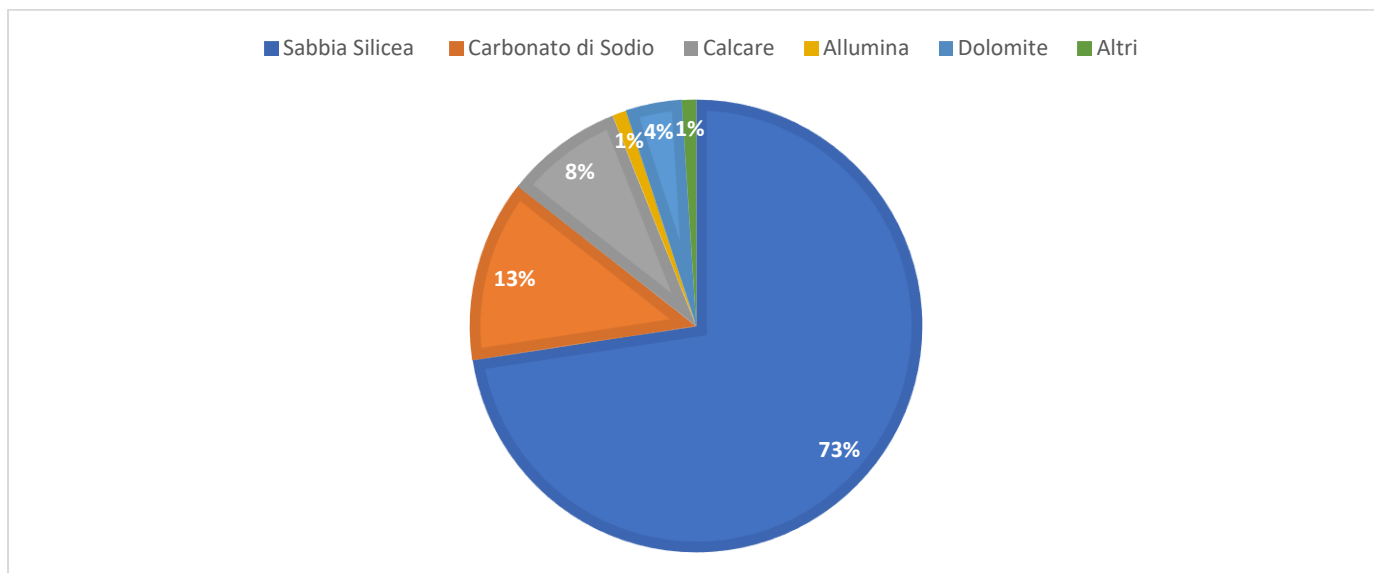


Figure 21- Percentuale Materie prime Vetro Float

Fusione e raffinazione

Gli ingredienti a grana fine, strettamente controllati per la qualità, vengono miscelati per formare un lotto, che scorre come una coperta sul vetro fuso a 1.500 ° C nell’unità di fusione.

Numerosi processi - fusione, raffinazione, omogeneizzazione - avvengono simultaneamente nelle migliaia tonnellate di vetro fuso nel forno (Figura 22). Si verificano in zone separate attraverso un flusso di vetro complesso guidato da alte temperature. Si raggiunge un processo di fusione continua, che dura fino a 50 ore, che fornisce vetro a 1.100 ° C, privo di inclusioni e bolle, in modo uniforme, il quale prosegue poi nel bagno galleggiante. Il processo di fusione è la chiave per la qualità del vetro e le composizioni possono essere modificate per cambiare le proprietà del prodotto finito.

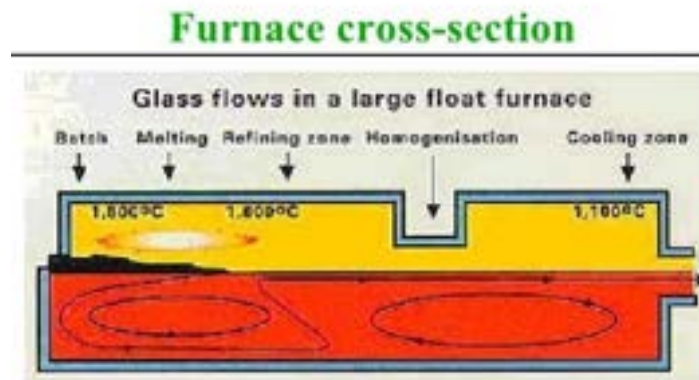


Figure 22- Processo di fusione

Bagno di stagno

Il vetro dall'unità di fusione scorre delicatamente su un beccuccio refrattario e passa sulla superficie a specchio di stagno fuso dove viene "fatto galleggiare" iniziando a 1.100 ° C e lasciando il bagno galleggiante come un nastro solido a 600 ° C. Forma un nastro con una larghezza di lavoro variabile sulla base della grandezza della lastra desiderata e normalmente ha uno spessore compreso tra 3 e 19 mm. Il vetro altamente viscoso e lo stagno molto fluido non si mescolano e la superficie di contatto tra questi due materiali è perfettamente piatta.

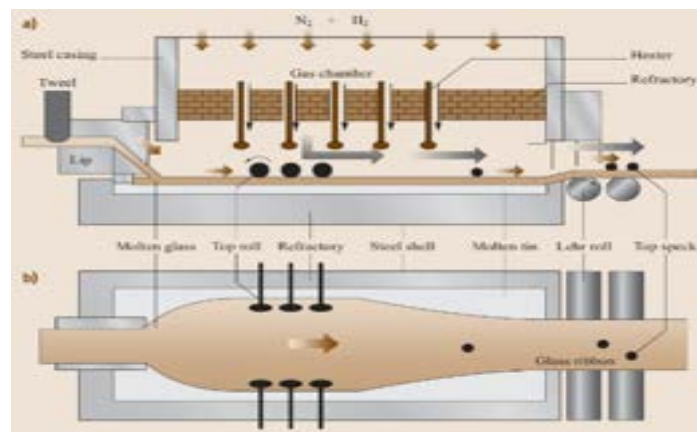


Figure 23- Processo di formatura Float

Ricottura

Durante il raffreddamento si sviluppano notevoli tensioni nel nastro. Lasciando il bagno di stagno fuso, il vetro, ora a una temperatura di 600 ° C, si è sufficientemente raffreddato per passare a una lunga fornace di ricottura chiamata "lehr", attraverso la quale sarà sottoposto a un trattamento termico. Le temperature sono strettamente controllate, sia lungo che attraverso il nastro. Il vetro è ora abbastanza duro da passare sui rulli ed è ricotto, in modo tale da modificare le sollecitazioni interne, che gli consentono di essere tagliato e lavorato in modo prevedibile e garantendo la planarità. Poiché entrambe le superfici sono finite al fuoco, non necessitano di levigatura o lucidatura.

Controllo qualità e taglio

Il processo float è noto per la realizzazione di vetri perfettamente piatti e privi di difetti. Ma per garantire la massima qualità, l'ispezione avviene in ogni fase.

Di tanto in tanto una bolla non viene rimossa durante la raffinazione, un granello di sabbia si rifiuta di sciogliersi, un tremore nella scatola crea increspature nel nastro di vetro. L'ispezione online automatizzata fa due cose: rivela i guasti di processo a monte che possono essere corretti e consente ai computer a valle di guidare i cutter attorno ai difetti. I difetti implicano uno spreco e, inoltre, i clienti premono costantemente per una maggiore perfezione. La tecnologia di ispezione consente di eseguire oltre cento milioni di misurazioni al secondo sul nastro, individuando i difetti che l'occhio senza ausilio non sarebbe in grado di vedere. I dati guidano frese "intelligenti", migliorando ulteriormente la qualità del prodotto per il cliente.

Viene infine tagliato mediante ruote diamantate che eliminano i bordi "stressati" in modo da ottenere lastre della misura desiderata che vengono a loro volta impilate, conservate e pronte per il trasporto. Il vetro float viene venduto al metro quadro. I computer traducono le esigenze dei clienti in schemi di tagli progettati per ridurre al minimo gli sprechi. Sempre più sistemi elettronici integrano il funzionamento degli impianti di produzione con il portafoglio ordini.

Differenze tra il processo di produzione tradizionale e il processo float

Entrambi i processi di produzione permettono di produrre vetro piano ma le differenze tra i due sono molteplici:

1. **Composizione del vetro:** il vetro piano ordinario è realizzato in polvere di arenaria al quarzo, sabbia silicea, fossili di potassio, soda, mirabilite e altre materie prime in una certa proporzione, mentre il vetro float è costituito da sabbia silicea, carbonato di sodio, calcare, dolomite, allumina e altre materie prime, in una certa proporzione;
2. **Forno:** a differenza del processo tradizionale, nel processo float il forno ha cinque camere di combustione;
3. **Formatura:** la fase di formatura nel processo tradizionale può essere eseguita mediante la laminazione, stiratura verticale oppure filatura, mentre nel processo float la formatura avviene prima chimicamente nel bagno di stagno e poi meccanicamente attraverso il taglio;
4. **Finitura:** nel processo tradizionale la fase di finitura può essere presente sia prima che dopo la ricottura mentre nel processo float questa fase è assente;
5. **Qualità e spessore del vetro:** il vetro piano ordinario può essere diviso in tre categorie, in base alla sua qualità esteriore. Esse sono la selezione speciale, prodotti di prima classe e prodotti di seconda classe. A seconda dello spessore, può essere diviso in cinque tipi: 2, 3, 4, 5 e 6 mm. La superficie del vetro float è molto liscia, lo spessore è molto uniforme e la distorsione ottica è molto piccola. Il vetro float può essere suddiviso in tre categorie, ovvero, in base alla sua qualità esteriore, prodotto di prima classe, prodotto qualificato. A seconda dello spessore, può essere diviso in 9 tipi: 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15 e 19 mm. Il grado di qualità esteriore del normale vetro piano è determinato dal numero di difetti come costole, bolle, graffi, granelli di sabbia, cheloidi, linee e così via. Il grado di qualità esteriore del vetro float è determinato dal numero di difetti come deformazione ottica, bolle, inclusioni, graffi, linee e punti di nebbia;
6. **Resistenza del vetro:** il vetro piano ordinario è più fragile, ha una bassa trasparenza e bassa resistenza agli agenti atmosferici a differenza di quello float che ha una superficie dura, liscia e uniforme e riesce a resistere maggiormente agli agenti atmosferici.

2.4 Mappatura ed Analisi Energetica

Avendo individuato il processo float come energivoro, analizziamo quali sono i fabbisogni attraverso un'esaustiva schematizzazione.

Il processo di produzione del vetro piano può essere diviso in:

1. Fasi principali
2. Processi secondari

Le fasi principali individuate nel processo float di base, come già visto, sono:

1. Preparazione delle materie prime;
2. Fusione e raffinazione;
3. Bagno di stagno;
4. Ricottura;
5. Controllo qualità e taglio.

Sulla base dei dati a disposizione il consumo energetico medio registrato per un tipico impianto float (figura 24) viene rappresentata dalle seguenti fasi:

- a. Fusione, 83%;
- b. Formatura e ricottura, 5%;
- c. Taglio, 2%;
- d. Processi secondari, 10%

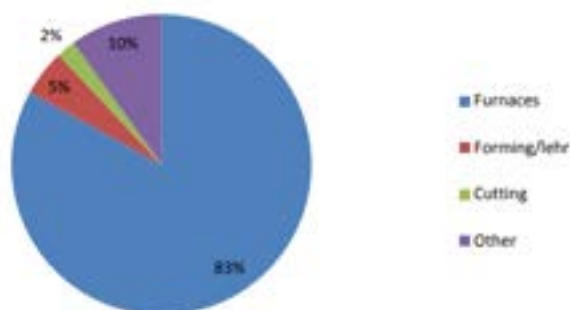


Figure 24- Distribuzione consumo energetico medio

Naturalmente questa distribuzione può variare in base ad alcuni fattori:

1. Le dimensioni del forno, poiché forni in grado di produrre 800 t/giorno risparmia circa 10-12% dell'energia rispetto una fornace di piccole dimensioni;
2. L'invecchiamento dell'impianto, in quanto più è vecchio l'impianto di produzione maggiore sarà il tasso di energia necessaria.

La tipologia di vettori energetici dipende dal tipo di azienda e dalle scelte di politica energetica di ogni singola azienda. Essi dipendono sia dal processo base sia dai processi secondari.

I principali vettori energetici che ritroviamo nel processo sono:

- I. Energia elettrica;
- II. Gas naturale;

- III. Olio combustibile;
- IV. Gasolio per autotrazioni;
- V. Altri gas (tecnici, vapore, acqua calda e acqua fredda).

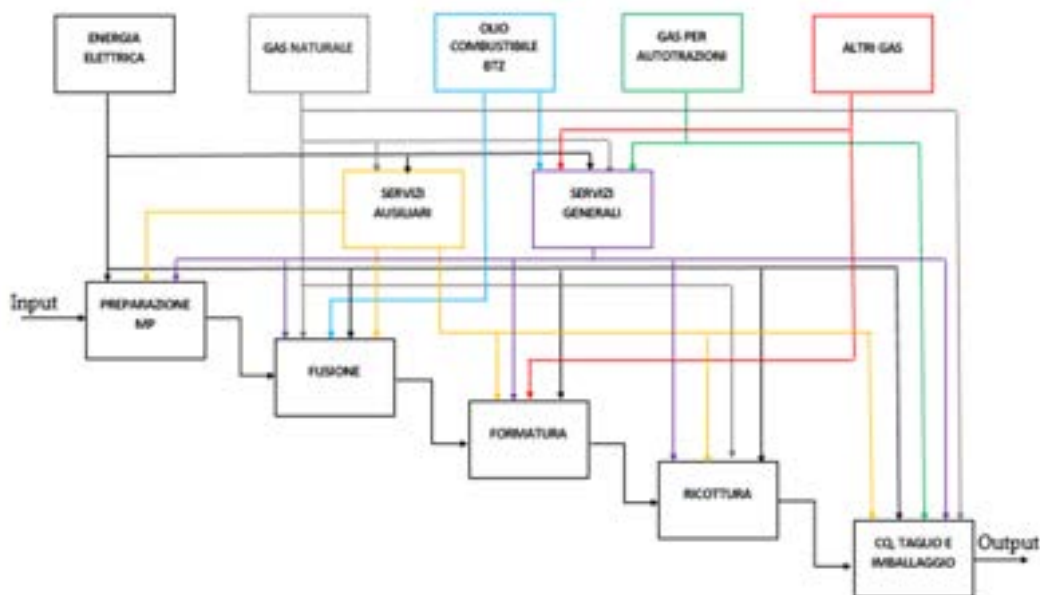


Figure 25- Schematizzazione energetica processo produttivo

Ogni fase viene rappresentata da un blocco in cui avremo input e output del materiale che subisce le trasformazioni. A questi si aggiungono i vettori energetici, rappresentati dalle frecce superiori in diversi colori, e le attrezzature principali a cui questi vettori sono legati, insieme alle possibili perdite energetiche, rappresentati dalle frecce inferiori del blocco, che ogni fase può subire. Per ogni fase è stato, inoltre, individuato un consumo energetico teorico.

I principali servizi ausiliari comprendono:

- Impianto di aria compressa;
- Ventilatori di raffreddamento nei forni fusori;
- Chiller acqua e cooling forno;
- Ventilatore di combustione;
- Impianto filtrazione fumi.

I principali servizi generali comprendono:

- Centrali termiche;
- Climatizzazione;
- Illuminazione;
- Gruppi elettrogeni.

Si passa, quindi, ad un'analisi più approfondita dei fabbisogni di ogni singola fase del processo. Per prima cosa, tramite il diagramma a blocchi a seguito, è possibile individuare come ogni vettore energetico e come i diversi servizi intervengono nel processo in termini di percentuali di tonnellate di petrolio equivalenti di energia messa a disposizione dai vettori.

VETTORI ENERGETICI:

— Energia elettrica — Gas Naturale — GPL

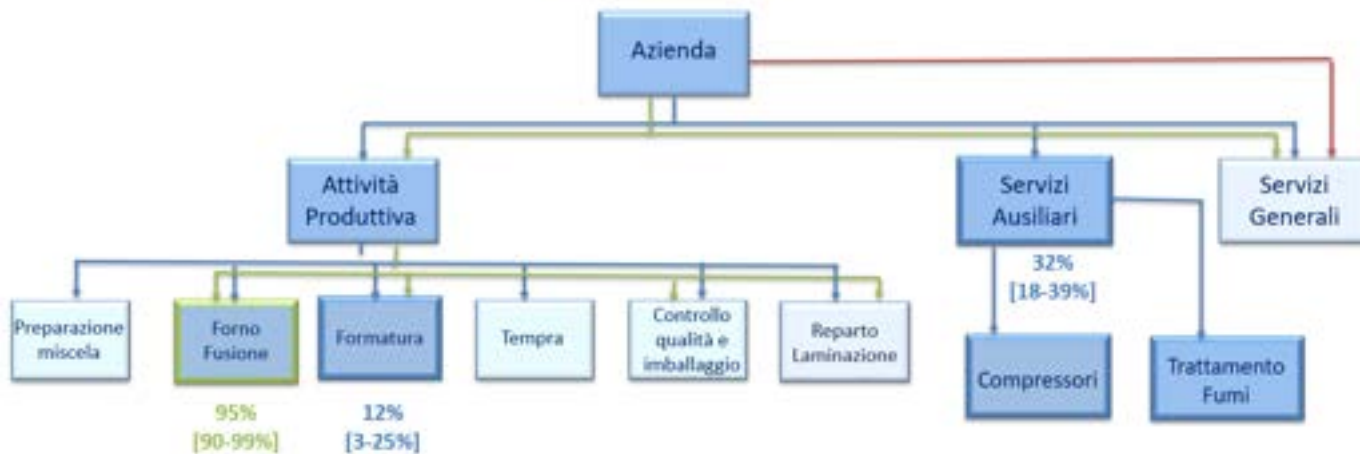
Processo produttivo


Figure 26- Analisi dei consumi Vetro piano

Dallo studio dei dati messi a disposizione dalle aziende si è evinto che, mediamente, quasi tutto il gas naturale messo a disposizione viene utilizzato nella fase di fusione, mentre l'energia elettrica è distribuita in modo capillare e le fasi più critiche sono la formatura ed i servizi ausiliari. Per cui possiamo dire che le fasi più critiche sono state evidenziate, si passa quindi all'analisi fase per fase del processo, con rappresentazione IDEF-0.

Preparazione delle materie prime



Figure 27- Preparazione materie prime (IDEF-0)

INPUT:

1. Materie prime grezze, in cui troviamo la sabbia silicea (72,6%), carbonato di sodio (13%), calcare (8,4%), dolomite (4%), allumina (1%) e altri componenti di minor rilievo (1%);
2. Cullet, ovvero il rottame di vetro scartato o riciclato.

Particolare importanza in questa fase ha il “cullet” in quanto, miscelato con le materie prime, limita le emissioni di CO₂, riducendo l’energia nella fase di fusione di circa 2-3%. La percentuale di rottame utilizzato può variare dal 10% al 40%.

OUTPUT: miscela omogenea di materie prime.

ATTREZZATURE PRINCIPALI: sollevatori, nastri, bilance, frantoio rottame alimentati sia da energia elettrica sia da aria compressa proveniente dai servizi ausiliari.

CONSUMO: minore del 5% tep, per singolo vettore energetico, e il consumo generale di energia elettrica per la preparazione delle materie prime è di circa 80 kWh/ton. In generale circa il 4% dell’energia di un impianto viene utilizzata per la preparazione delle materie prime.

Fusione

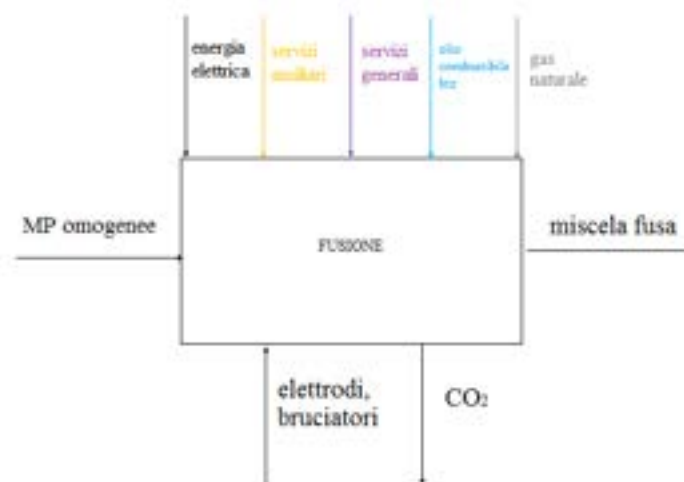


Figure 28- Fusione (IDEF-0)

INPUT: Le materie prime rese omogenee entrano nel forno, a temperatura di 1500 °C

OUTPUT: miscela fusa, dopo essere state raffreddate a 1100 °C. Altro output di questa fase vi è l’emissione di CO₂. Circa il 75% di questa emissione proviene dal combustibile fossile, mentre il 25% proviene dalle emissioni di processo. Le emissioni di processo comprendono sia emissioni provenienti dal processo sia emissioni indirette provenienti dall’uso di energia elettrica. Le emissioni indirette rappresentano il 16% delle emissioni complessive di CO₂.

ATTREZZATURE PRINCIPALI: Tra i forni più utilizzati nel processo float ritroviamo:

1. Forni a rigenerazione;
2. Forni a ossi-combustione;

3. Forni elettrici.

I forni a rigenerazione hanno un'efficienza pari a $2\text{ton}/\text{m}^2$ e un consumo pari a $10.000\text{KJ}/\text{Kg}$, con produzioni giornaliere fino $700\text{t}/\text{giorno}$ e temperatura di fusione di 1400°C . Questi forni sono in grado di recuperare in circolo il calore prodotto.

I forni elettrici possono fornire il 20% dell'energia totale in entrata nella fase, ma il loro utilizzo è limitato (meno del 5% dell'energia totale) a causa dell'elevato costo dell'elettricità. Hanno un consumo pari a $3.000\text{KJ}/\text{Kg}$, produzioni tipiche $4\text{t}/\text{giorno}$, massime $120\text{t}/\text{giorno}$. Se invece vengono utilizzati forni a ossi-combustione, oltre al gas naturale e all'olio combustibile vi è, in ingresso, l'ossigeno (purezza maggiore del 90%). Con questo tipo di forno si può ridurre il consumo di energia in quanto viene ridotta l'aria preriscaldata. Un forno completo a ossi-combustione è circa il 35% più economico rispetto a un forno rigenerativo a riscaldamento incrociato. I forni a ossi-combustione vengono normalmente utilizzati per la fusione del vetro tra 50 e 400 ton / giorno, in alcuni casi speciali anche fino a 500 ton / giorno

CONSUMO: Il consumo energetico è maggiore di 20% tep, per singolo vettore energetico. Oltre tre quarti dell'energia dell'intero processo viene utilizzata nella fase di fusione, circa l'83%. Ad oggi non esiste alcuna tecnologia, nel processo float, che utilizzi solo l'alimentazione elettrica. Gli impianti più performanti sono quelli che utilizzano un mix di energia elettrica e combustibili, tra cui ritroviamo l'olio combustibile btz e il gas naturale. Negli ultimi anni si è ridotto l'utilizzo dell'olio combustibile a favore del gas naturale, che è diventato fonte di alimentazione principale.

Oltre all'aria compressa, che ritroviamo nella prima fase, nella fase di fusione, tra i servizi ausiliari, vi sono sistemi di ventilazione, per combustione e raffreddamento, e sistemi di filtrazione dei fumi.

Formatura

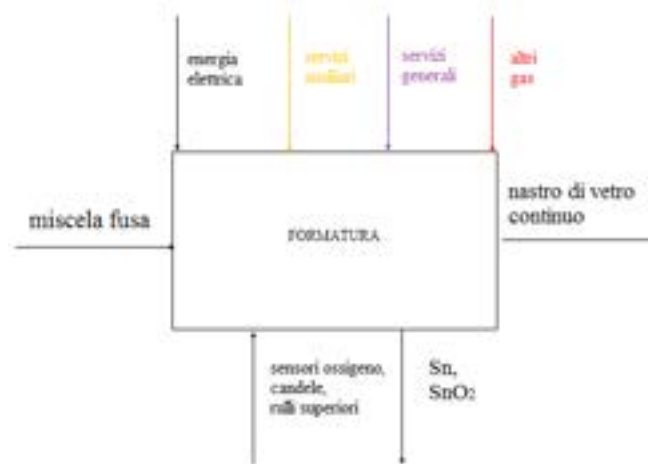


Figure 29- Formatura (IDEF-0)

INPUT: L'input di questa fase è la miscela fusa, che entra nel bagno di stagno a 1100°C

OUTPUT: nastro di vetro solido continuo a 600°C .

ATTREZZATURE PRINCIPALI: nelle attrezzature necessarie, oltre le candele, che servono a mantenere una temperatura di 600° , e oltre i rulli, responsabili principali della formatura, troviamo sensori di ossigeno. Le attrezzature vengono alimentate grazie all'energia elettrica e i servizi ausiliari di aria compressa.

CONSUMO: Il vettore energetico più importate in questa fase è il vettore dei gas. Essi sono l'idrogeno (H_2) e l'azoto (N_2), i quali generano un'atmosfera protettiva formata dall'1-10% di idrogeno e dal 90-99% di azoto. Tuttavia, possono

esservi tracce di ossigeno. Esso può entrare nel forno per perdite d'aria nel perimetro del bagno, per diffusione dalla lastra di vetro o come impurità nel gas di formazione. Livelli di ossigeno nello stagno superiori a pochi ppm possono portare a vari difetti superficiali superiori e inferiori, con ripercussioni negative sull'efficienza produttiva e/o sul valore del prodotto di vetro finale. La solubilità dell'ossigeno nel bagno di stagno dipende fortemente dalla temperatura. Quando il livello di saturazione dell'ossigeno ad una certa temperatura viene superato, il biossido di stagno (SnO_2) si forma sulla superficie dello stagno fuso, principalmente nella parte finale fredda, poiché la solubilità dell'ossigeno è bassa. Inoltre, a temperature elevate nella sezione finale calda, il monossido di stagno volatile (SnO) può facilmente evaporare dal bagno formando depositi di Sn e SnO_2 sulle aree delle apparecchiature e sulle sezioni del tetto più fredde.

Il consumo energetico in questa fase è relativamente basso, minore del 5% rispetto al consumo energetico totale. Ogni vettore energetico ha un consumo maggiore di 5% tep.

Ricottura



Figure 30- Ricottura (IDEF-0)

INPUT: Il nastro di vetro continuo entra nel forno di ricottura lehr alla temperatura di 600 °C e man mano viene raffreddato.

OUTPUT: Come vediamo input e output sono uguali poiché questa fase ha lo scopo di aumentare la resistenza meccanica del vetro e ridurre le tensioni.

CONSUMO: Anche in questa fase il consumo energetico è molto basso, meno del 5% del consumo energetico totale. Ogni vettore energetico ha un consumo minore di 5% tep. Tra i principali vettori energetici ritroviamo l'energia elettrica e il gas naturale che alimentano il forno e i servizi ausiliari e generali. I servizi ausiliari in questa fase sono l'aria compressa, ad una pressione di 3,5 bar, la quale alimenta anch'essa il forno, e i ventilatori di raffreddamento, i quali hanno il compito di raffreddare gradualmente il nastro, in modo tale da evitare lo shock termico.

Controllo qualità, taglio e imballaggio



Figure 31-Controllo qualità, taglio e imballaggio

INPUT: Uscito dalla fase di ricottura, il nastro viene sottoposto a controlli molto rigorosi.

OUTPUT: A seguito di questi controlli, se il vetro non è idoneo sarà scartato.

ATTREZZATURE PRINCIPALI: Le principali attrezzature utilizzate sono, nastri trasportatori, altri mezzi di trasporto e sistemi di termorestrizione per l'imballaggio

CONSUMO: I principali vettori energetici, oltre l'energia elettrica, sono il gas naturale, che alimenta l'impianto di termo-retrazione per l'imballaggio; il gas per autotrazione, per la movimentazione delle unità; i servizi ausiliari e generali. Il consumo di energia è molto basso in questa fase, riguarda il 2% dell'energia totale impiegata e ogni vettore energetico consuma meno di 5% tep.

Stabilite le fasi più energivore per entrambi i codici ATECO, si mostra la realizzazione del cruscotto di monitoraggio che risulta essere simile per i due processi in quanto la fase di fusione è stata analizzata come fase comune, per il cavo viene analizzata aggiuntivamente la fase di formatura per soffiatura, per il piano la fase di formatura del tipo float.

2.5 Realizzazione del cruscotto di monitoraggio

Una volta studiati i processi produttivi, sono state definite le formule per gli indicatori teorici e contattate le aziende per reperire le informazioni necessarie al calcolo. Data la mole di dati, è stato fondamentale trattarli e suddividerli per semplificare il lavoro, per cui quest'ultima fase è stata organizzata seguendo i tre step mostrati in figura 32.



Figure 32- Passi necessari allo sviluppo del cruscotto

È stata necessaria anzitutto un'analisi dei dati per suddividerli in base alla loro variabilità e frequenza di acquisizione; in seguito, è stato possibile predisporre un foglio elettronico per agevolare e strutturare la raccolta dati e per rendere più immediata e semplice la lettura delle informazioni di riepilogo, presente in allegato con il nome di "Database Vetro Piano" e "Database Vetro Cavo".

I valori ottenuti dalle formule teoriche risultano essere di riferimento e rappresentano i valori a cui le aziende dovrebbero tendere per ottimizzare i propri consumi. Questi dati di riferimento non sono presenti in letteratura, e spesso non è facile per le aziende del settore reperirli, per questo motivo è di fondamentale importanza l'analisi svolta. Una volta adeguate le unità di misura, gli indicatori saranno comparati con quelli che sono i consumi reali delle aziende e resi fruibili attraverso la realizzazione un cruscotto di monitoraggio. Questo confronto permetterà a ciascuna realtà operativa di effettuare un'autodiagnosi e approfondire le cause di inefficienza nei periodi in cui gli indicatori e i consumi risulteranno difforni. Dal punto di vista software la realizzazione del cruscotto è stata effettuata mediante l'applicativo di analisi aziendale "Power BI" di Microsoft.

È importante precisare che, per motivi di privacy, non potranno essere mostrati dati appartenenti ad alcuna azienda o ente, quelli mostrati nei paragrafi successivi a scopo esemplificativo saranno dati verosimili ma di pura fantasia

Inserimento dei dati

I dati necessari al calcolo sono stati forniti dall'Università della Tuscia e possono essere classificati come segue:

- **Dati statici:** sono i dati che non cambiano o che cambiano di rado, valori caratteristici dei materiali e/o dell'impianto, temperature non variabili
- **Dati dinamici:** sono i dati che variano di continuo, valori dipendenti dalle temperature o semplicemente variabili nel tempo, come i kg di materiali utilizzati. Questi subiscono una frequenza di variazione genericamente mensile.

Sulla base di quanto detto è stato realizzato un foglio di raccolta dati da consegnare alle aziende, mostrato in figura 33 e presente in allegato con il nome di "Foglio raccolta dati Vetro piano" e "Foglio raccolta dati vetro cavo". Le aziende potranno inserire i dati necessari al calcolo degli indicatori, specificando se questi siano statici o dinamici.

Informazioni necessarie	Unità di misura	Dati Processo 1		Dati Processo 2		Dati Processo 3		Dati Processo 4	
		Statico/Dinamico	Valore	Stat/Din	Valore	Stat/Din	Valore	Stat/Din	Valore
Composizione % vetro:									
SiO ₂	% ,/kg vetro								
Al ₂ O ₃	% ,/kg vetro								
CaCO ₃	% ,/kg vetro								
Ca MgCO ₃	% ,/kg vetro								
Na ₂ O	% ,/kg vetro								
K ₂ O	% ,/kg vetro								
CaO	% ,/kg vetro								
BaO	% ,/kg vetro								
..	% ,/kg vetro								
..	% ,/kg vetro								
..	% ,/kg vetro								
..	% ,/kg vetro								
..	% ,/kg vetro								
Entalpie elementi									
SiO ₂	kJ/vetro								
Al ₂ O ₃	kJ/vetro								
CaCO ₃	kJ/vetro								
Ca MgCO ₃	kJ/vetro								
Na ₂ O	kJ/vetro								
K ₂ O	kJ/vetro								
CaO	kJ/vetro								
BaO	kJ/vetro								
..	kJ/vetro								
..	kJ/vetro								
..	kJ/vetro								
..	kJ/vetro								
..	kJ/vetro								
..	kJ/vetro								
T minima di uscita bacino di fusione	°C								
N rottame	%								
T ambiente	°C								
H° vetro standard	kJ/vetro								

Figure 33- Foglio di raccolta dati Vetro

Il dato più importante è quello sulla composizione del vetro, in quanto esso cambia da azienda ad azienda. Per questo motivo sono stati elencati tutti i principali componenti trovati in letteratura, in più sono state lasciate delle righe vuote nel caso siano presenti dei componenti non elencati in precedenza. In seguito, dovranno essere specificate le entalpie dei suddetti elementi, in questo modo il foglio calcolerà in automatico le entalpie della carica, come media pesata di quelle delle materie prime. Tutti gli altri dati necessari sono elencati in seguito. Ciascuna azienda potrebbe avere più linee di processo, per cui sono presenti più colonne, e per ciascun processo oltre al valore va inserito anche "statico" o "dinamico" a seconda della variabilità del dato.

I dati ottenuti vengono caricati su di un ulteriore foglio Excel presenti in allegato con il nome di "database Vetro piano" e "database vetro cavo" e successivamente trasferiti ad un software necessario per la rappresentazione degli indicatori; se si volessero aggiornare dati già esistenti o aggiungerne di nuovi, sarebbe possibile farlo inserendo manualmente i dati, ciascun utilizzatore dello strumento lo potrà personalizzare in base alle proprie esigenze e caratteristiche di produzione.

Il database per la fase di produzione è mostrato in figura 34 ed è evidenziata una suddivisione fra i dati relativi all'entalpia e quelli relativi al processo.

Month	Entalpie [kJ/kg]				Dati di processo												Cons spec [MJ/t vt]
	H CARICA	H v	H ^o gas	Hfuso,1400	%rottame	T_out_Vetro [C]	cp vetro fuso[kJ/s]	TD [C]	cp fumi [MJ/t]	DMV[MJ/t]	T fumi, est [C]	alfa-tech	mgas %	Hutile [MJ/t]	Hfumi,a [MJ/t]		
gen-19	2656,92	5710,90	620	4988,00	41%	1523,0	637,60	301,00	0,90	38492,80	1673,00	0,1050	14%	786,30	208,12	1726	
feb-19	2656,92	5710,90	620	4988,00	60%	1523,0	637,60	297,00	0,90	38492,80	1673,00	0,1050	15%	788,16	221,66	1377	
mar-19	2656,92	5710,90	620	4988,00	46%	1523,0	637,60	297,00	0,90	38492,80	1673,00	0,1050	16%	788,67	234,52	1874	
apr-19	2656,92	5710,90	620	4988,00	42%	1523,0	637,60	299,00	1,00	38492,80	1673,00	0,1050	16%	787,54	261,21	1412	
mag-19	2656,92	5710,90	620	4988,00	54%	1523,0	637,60	300,00	1,00	38492,80	1673,00	0,1050	12%	786,46	203,79	1470	
giu-19	2656,92	5710,90	620	4988,00	57%	1523,0	637,60	298,00	1,00	38492,80	1673,00	0,1050	18%	787,63	290,04	1268	
lug-19	2656,92	5710,90	620	4988,00	53%	1523,0	637,60	301,00	0,90	38492,80	1673,00	0,1050	17%	785,86	246,51	1888	
ago-19	2656,92	5710,90	620	4988,00	46%	1523,0	637,60	299,00	0,90	38492,80	1673,00	0,1050	19%	787,39	272,58	1706	
set-19	2656,92	5710,90	620	4988,00	40%	1523,0	637,60	296,00	0,90	38492,80	1673,00	0,1050	14%	789,53	209,03	1329	
ott-19	2656,92	5710,90	620	4988,00	53%	1523,0	637,60	301,00	0,90	38492,80	1673,00	0,1050	11%	785,86	169,70	1579	
nov-19	2656,92	5710,90	620	4988,00	53%	1523,0	637,60	301,00	1,00	38492,80	1673,00	0,1050	12%	785,86	203,61	1649	
dic-19	2656,92	5710,90	620	4988,00	40%	1523,0	637,60	300,00	1,00	38492,80	1673,00	0,1050	13%	786,98	218,11	1733	

Figure 34- Database Fusione

Oltre ai dati mostrati è possibile aggiungere ulteriori colonne in cui specificare il consumo reale e/o un valore di benchmark. Quando il valore di benchmark inserito è diverso da zero, viene utilizzato in sostituzione all'indicatore calcolato. Nel in cui il benchmark sia posto pari a zero, lo strumento interpreterà l'assenza di dati dall'esterno e procederà al calcolo in automatico del valore di benchmark come media dei valori dell'indicatore sperimentati in un determinato orizzonte temporale.

Il foglio di calcolo

La realizzazione del foglio di calcolo ha lo scopo di strutturare e sistematizzare il patrimonio informativo aziendale, semplificando la fase di raccolta dei dati e consentendo una migliore comprensibilità e consultabilità delle informazioni al fine di rendere più efficaci e veloci le successive attività previste dal progetto. Esso è stato strutturato sulla base dei dati raccolti grazie al foglio Excel citato in precedenza, a causa dell'assenza dei sopralluoghi previsti. Il foglio è presente in allegato al documento con il nome di "Database Vetro Piano" e "Database Vetro Cavo".

Ovviamente per il processo di produzione del vetro piano e cavo sono stati realizzati fogli di calcolo e cruscotti differenti, ma sostanzialmente il cruscotto è simile in quanto la fase di fusione risulta essere strutturata identicamente nei due casi.

Per il vetro cavo sono state rappresentate le fasi di fusione e soffiatura, per il piano abbiamo fusione e processo float.

Suddivisi i dati, adeguate le unità di misura, per garantire una visualizzazione chiara e di semplice comprensione è stato utilizzato il software Power-BI, che come già accennato fa parte di una famiglia di strumenti di business intelligence di Microsoft che permette, a partire dai dati aziendali, di generare report e quindi informazioni a supporto delle decisioni. È possibile ricevere in input dati da differenti fonti, tra le quali Excel, come si vede in figura 35 evidenziato in blu.

In figura 35 è possibile osservare come si presenta una parte del database del software la cui visualizzazione è simile ad Excel. Questo database è accessibile selezionando la seconda icona che troviamo in alto a sinistra nello strumento, cerchiato in rosso.

Month	NSIO1	NSIO2	NSIO3	NSIO1 (kWh/m2)	NSIO2 (kWh/m2)	NSIO3 (kWh/m2)	NSIO1 (kWh/m2)	NSIO2 (kWh/m2)	NSIO3 (kWh/m2)	NSIO4	NSIO5	
gennaio 2019	0.144951232796882	0.137048244440214	0.120998807032970	308.0	438	1270	308.0	438	1270	205.00	205.024498804084	370
febbraio 2019	0.144951232796882	0.137048244440214	0.120998807032970	308.0	438	1270	308.0	438	1270	205.00	205.024498804084	370
marzo 2019	0.144951232796882	0.137048244440214	0.120998807032970	308.0	438	1270	308.0	438	1270	205.00	205.024498804084	370
aprile 2019	0.144951232796882	0.137048244440214	0.120998807032970	308.0	438	1270	308.0	438	1270	205.00	205.024498804084	370
maggio 2019	0.144951232796882	0.137048244440214	0.120998807032970	308.0	438	1270	308.0	438	1270	205.00	205.024498804084	370
giugno 2019	0.144951232796882	0.137048244440214	0.120998807032970	308.0	438	1270	308.0	438	1270	205.00	205.024498804084	370
luglio 2019	0.144951232796882	0.137048244440214	0.120998807032970	308.0	438	1270	308.0	438	1270	205.00	205.024498804084	370
agosto 2019	0.144951232796882	0.137048244440214	0.120998807032970	308.0	438	1270	308.0	438	1270	205.00	205.024498804084	370
settembre 2019	0.144951232796882	0.137048244440214	0.120998807032970	308.0	438	1270	308.0	438	1270	205.00	205.024498804084	370
ottobre 2019	0.144951232796882	0.137048244440214	0.120998807032970	308.0	438	1270	308.0	438	1270	205.00	205.024498804084	370
novembre 2019	0.144951232796882	0.137048244440214	0.120998807032970	308.0	438	1270	308.0	438	1270	205.00	205.024498804084	370
dicembre 2019	0.144951232796882	0.137048244440214	0.120998807032970	308.0	438	1270	308.0	438	1270	205.00	205.024498804084	370

Figure 35- Database Power BI

È fondamentale nella prima colonna indicare il mese e l'anno di riferimento, seguono i dati di entalpia ed infine quelli di processo. La colonna dell'indicatore è semplicemente realizzata implementando la formula nella barra superiore, evidenziata in verde.

Per le due fasi fondamentali, quindi fusione e soffiatura i fogli di calcolo sono indipendenti e vengono caricati separatamente sullo strumento. Essi sono accomunati solo dalla prima colonna, ovvero quella che indica la data. Una delle sezioni del foglio di calcolo, che viene mostrata in figura 36, permette di definire le relazioni tra gruppi di dati, in questo caso esistono due collegamenti bilaterali. Questi collegamenti fanno sì che ogni qualvolta ci si riferisca ad uno specifico mese, tutti e tre gli indicatori si sincronizzino su quella data, garantendo un orizzonte temporale comune.

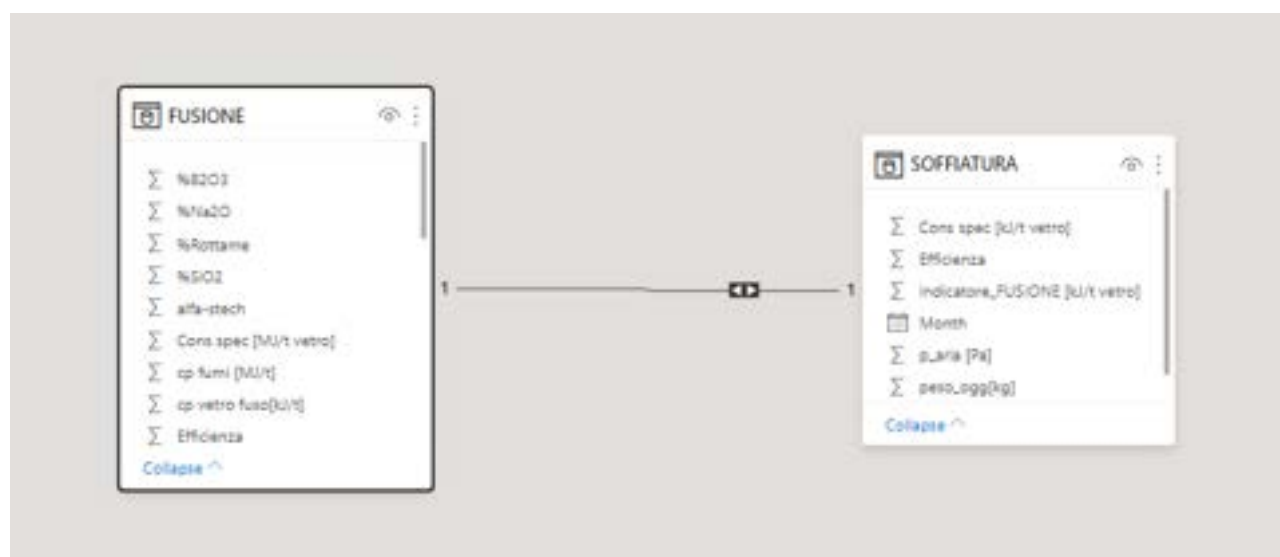


Figure 36- Collegamento tra Fasi

Il cruscotto di monitoraggio

Una volta completato il database e definite le relazioni presenti tra i gruppi di dati, è stato finalmente possibile modellare il cruscotto di monitoraggio che rappresenta il punto focale per le aziende del settore: grazie ad esso è possibile inquadrare al meglio i consumi aziendali, confrontarli con i valori ideali, fare valutazioni, proporre soluzioni

di miglioramento in maniera rapida ma accurata. La scelta dell'applicativo è stata fatta dopo attenta valutazione delle caratteristiche dei principali software con foglio di calcolo per sfruttare la sua estrema versatilità, scalabilità e adattabilità a casi differenti, unita alla efficacia della rappresentazione di sintesi, sia grafica che numerica dei risultati di performance.

Esso è composto di tre sezioni interdipendenti: Cruscotto, Composizione Indicatori, Storico Indicatori.

Nelle figure 37 e 38 mostrato il cruscotto principale: in alto vi è la possibilità di scegliere l'orizzonte temporale di cui si vogliono visualizzare i dati, può essere selezionato un singolo mese, più mesi o tutti quelli a disposizione tramite il tasto "Select All". Nell'esempio sottostante è stato preso in considerazione il periodo da Gennaio ad Aprile 2019.

Scelto il periodo di interesse, sono in automatico mostrati i consumi delle tre fasi analizzate, espressi secondo le unità di misura prestabilite, questo è possibile grazie alla relazione creata tra i gruppi di dati nel paragrafo precedente. La visualizzazione è simile ad un indicatore Gauge, troviamo il valore minimo in assoluto tra tutti i valori in database in basso a sinistra, in basso a destra viene mostrato il valore massimo che assume il consumo, mentre al centro troviamo il valore attuale. In una colorazione più scura, troviamo il valore target o benchmark (ovvero l'indicatore definito in precedenza secondo gli studi effettuati da UniTuscia) inserito direttamente sulla barra di visualizzazione, come una lancetta. Essi sono stati mostrati con colori differenti: rosso se relativi al consumo nella fase di fusione, azzurri per i consumi di soffiatura. Le unità di misura sono in MJ/tonnellata di vetro per gli indicatori relativi alla fase di fusione per semplificarne il confronto con i consumi che le aziende ottengono dal consumo di combustibile, per la fase di soffiatura invece è stato utilizzato il kJ/tonnellata di vetro.

In alto a destra, per ogni grafico, troviamo un valore percentuale, che indica l'efficienza della fase produttiva in quel mese o in più mesi. Essa è il rapporto tra il consumo teorico e quello effettivo. La percentuale si colora di rosso se il valore è <60%, di giallo se compresa tra 60 e 85%, di verde se superiore al 85%

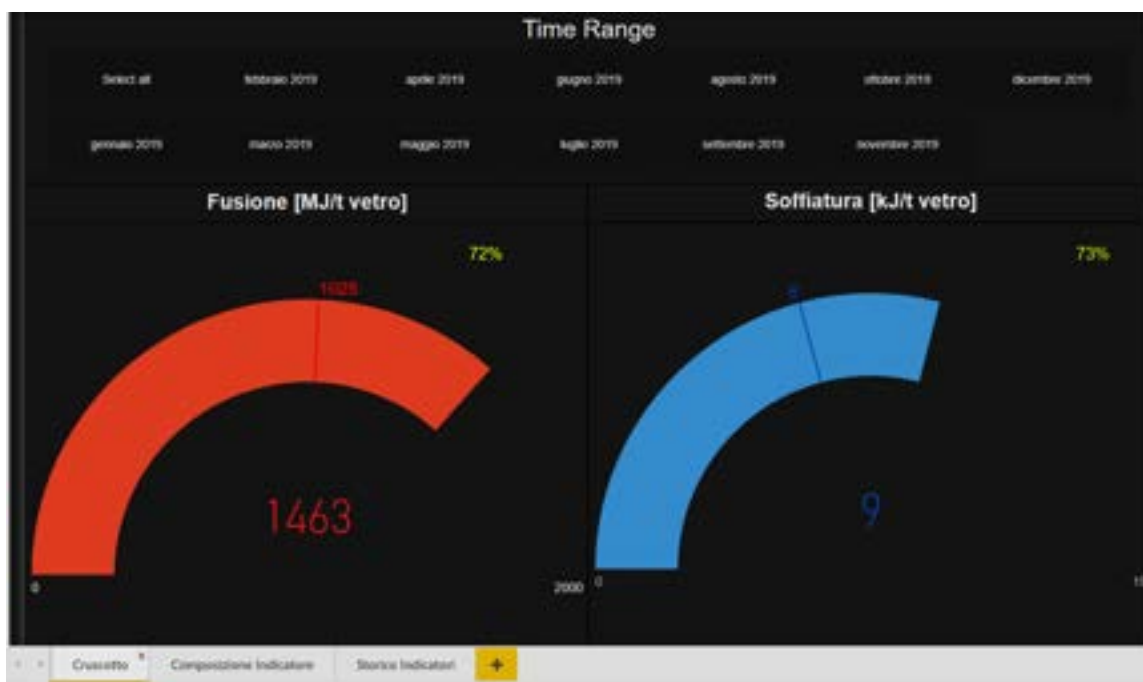


Figure 37- Cruscotto per vetro cavo

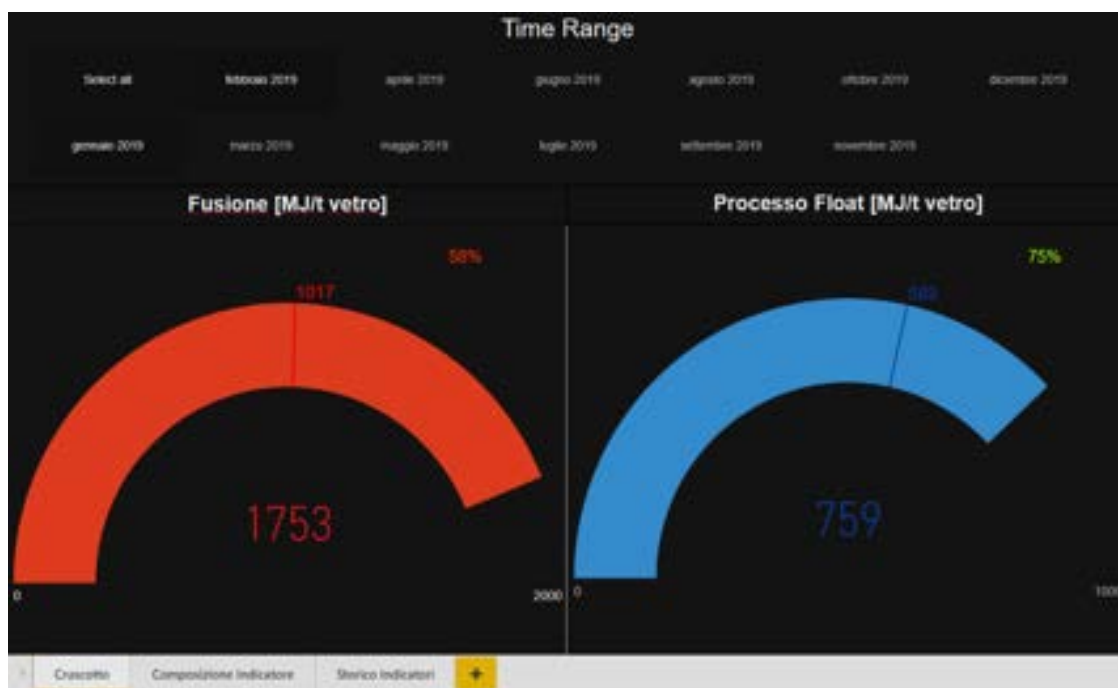


Figure 38- Cruscotto per vetro piano

In basso è possibile selezionare la sezione che si preferisce visualizzare tra le tre precedentemente elencate.

In figura 39 viene mostrata la seconda sezione del progetto che ha la finalità di mostrare all'utente dello strumento il peso dei vari componenti dell'indicatore; in particolare per la fase di Fusione abbiamo visto che ciascun termine dell'equazione equivale ad una entalpia precisa, ed è quindi importante evidenziarle per poter capire se sono presenti stranezze. Paradossalmente, infatti, l'indicatore potrebbe essere in regola, ma i termini che lo compongono potrebbero non essere adeguati. Vediamo quindi, nella colonna a sinistra, la sezione del time range: essa è sincronizzata con quella della pagina precedente e successiva in modo da permettere all'utente dello strumento, di selezionare una volta sola i mesi di interesse e di non ripetere l'operazione nelle sezioni successive.

Nella zona centrale, abbiamo due grafici "a ciambella", nel quale sono specificate le percentuali di ciascun termine, corredato da una legenda a destra. In basso, il secondo grafico mostra la % di entalpia fornita dalla carica, dai gas e dal vetro che compongono l'entalpia utile.

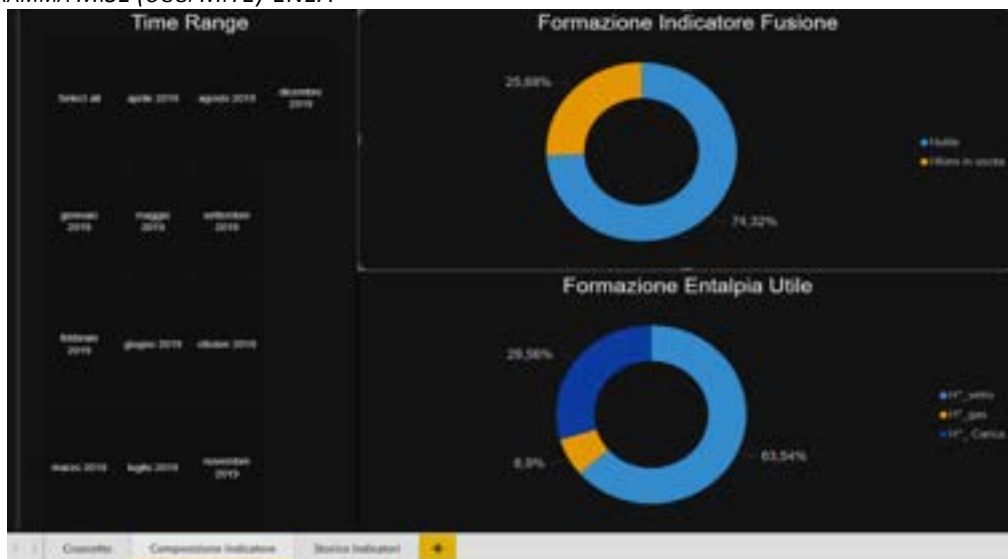


Figure 39- Composizione Indicatore (Comune)

L'ultima sezione dello strumento è strutturata come mostrato nelle figure 40 e 41

In basso a sinistra troviamo nuovamente il time range sia per poter tenere a mente il periodo di riferimento, sia perché esso può essere sempre modificato e tale modifica verrà apportata a tutte e tre le pagine in cui esso è presente.

In alto troviamo una tabella in cui vengono specificati i valori dei consumi suddivisi per fase e per mese, quindi non un valore medio come si vede nel Cruscotto iniziale, ma un vero e proprio report in cui sono elencati tutti i consumi mese per mese. Questa tabella permette di ordinare in senso crescente o decrescente ciascuna colonna, se si volesse sapere quindi qual è il mese in cui il consumo del crudo è maggiore basterebbe selezionare quella colonna per ordinare i dati in senso crescente o decrescente: il triangolo rivolto verso l'alto indica l'ordine crescente, verso il basso decrescente (cerchiato in rosso).

A destra troviamo invece due grafici a barre verticali: in base ai mesi selezionati viene mostrato l'andamento dei consumi reali e degli indicatori nel tempo. La linea indica sempre il valore di benchmark, mentre le barre indicano i consumi effettivi. Tramite uno slide presente nella parte inferiore del grafico è possibile allargare o restringere la visuale in maniera individuale per ciascun grafico, senza cambiare l'orizzonte temporale, come nell'ultimo grafico in basso a destra. Anche qui ritroviamo il colore azzurro per i consumi relativi alla fase di soffiatura e rosso per quelli relativi alla fusione.

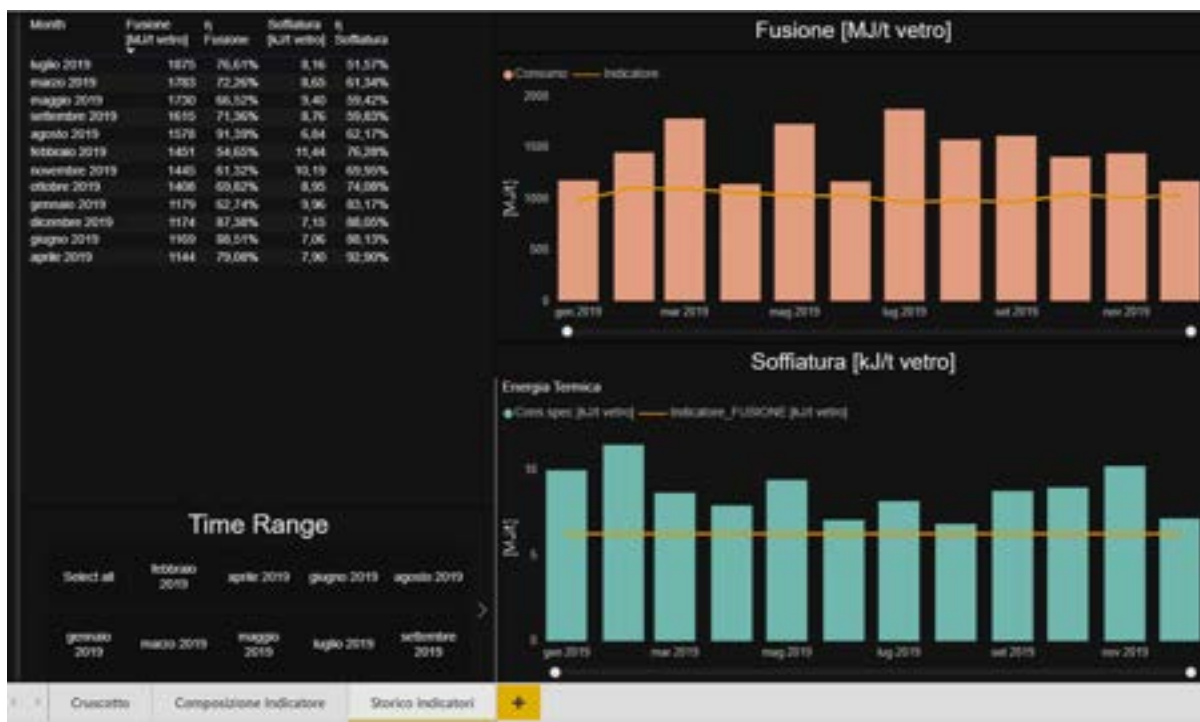


Figure 40- Storico Indicatori vetro cavo



Figure 41- Storico indicatori vetro piano

Per rapidità, è possibile selezionare come time range tutto l'orizzonte temporale presente nel database, tramite la presenza del tasto "Select All". In questo modo è possibile, con una sola occhiata, comprendere quali fasi e in quali mesi è stato raggiunto il risultato desiderato e quali sono stati invece i mesi e le fasi meno efficienti.

In linea teorica i consumi risultano sempre maggiorati rispetto ai dati teorici rappresentati nel grafico a barre, in quanto nel calcolo degli indicatori teorici non sono tenute in considerazione tutte le perdite dovute a fermate, guasti, condizioni di lavoro non ideali.

3. Caso Studio: Il settore Cemento

L'Italia è tra i maggiori produttori di cemento in ambito europeo, con un volume di produzione pari a 26,2 milioni di tonnellate di cemento prodotto nel 2012, nonostante la contrazione degli ultimi anni (-20,8% sul 2011) [3]. Per quanto attiene il profilo strutturale, l'industria del cemento è caratterizzata da una capillare distribuzione dei diversi stabilimenti produttivi sul territorio nazionale; attualmente operano 28 aziende con 80 unità produttive, delle quali 56 sono cementifici a ciclo completo e 24 sono officine di macinazione. [1] Le nuove tecnologie di riferimento riflettono le rilevanti trasformazioni, tendenti al contenimento dei consumi energetici e dell'impatto ambientale, avviate nei paesi occidentali verso la fine degli anni '70. In particolare, negli ultimi decenni sono stati apportati dei cambiamenti rilevanti all'intero processo produttivo specialmente grazie all'utilizzo di macchinari più performanti; ne è risultata una drastica riduzione dei consumi energetici (termici ed elettrici) per unità di massa di cemento ottenuto, nonché un aumento della produttività e delle proprietà/prestazioni del clinker. Ciò nonostante, la produzione del cemento e del suo componente di base, il clinker, è un'attività che richiede un elevato quantitativo di energia per unità di prodotto, e pertanto definita energivora. Questo capitolo sarà quindi fondamentale per comprendere al meglio il processo produttivo del cemento, partendo dall'analisi generale verranno analizzate le singole fasi e mappate secondo quanto definito nei precedenti capitoli, con l'intento di individuare quelle di maggior interesse per la definizione degli indicatori.

Il cemento, utilizzato in edilizia ma non solo, è un prodotto proveniente dalla macinazione e cottura di pietre di vario tipo che, mescolato con acqua, ritorna per reazione chimica e fisica, nel suo originario stato solido. Viene impiegato come legante in miscela con materiali inerti (sabbia, ghiaia) per formare la malta e per preparare il calcestruzzo. È utilizzato, in questo caso, per la costruzione di edifici e strutture in cemento armato

3.1 Analisi del processo produttivo

Il cemento nasce da materie prime di origine naturale: il calcare e l'argilla. Sono scavate in giacimenti situati generalmente in prossimità delle cementerie e sottoposte a preventivo trattamento di frantumazione per ridurne la pezzatura e agevolarne il trasporto nei centri produttivi.

Per la fabbricazione del cemento si possono impiegare sia minerali d'origine naturale, sia prodotti o scarti minerali e/o industriali, che possono essere virtuosamente impiegati nel ciclo produttivo, in sostituzione delle materie prime naturali. Sono utilizzate a questo scopo le sostanze minerali che contengono i componenti principali del cemento ossia il calcio, la silice, l'allumina e l'ossido di ferro. Questi componenti sono raramente riuniti nella necessaria proporzione in una sola materia prima, pertanto è necessario produrre una miscela apposita, costituita da un componente ad alto tenore di calcio (componente calcareo) e da uno a basso tenore di calcio che contenga però una percentuale maggiore di silice, allumina e ossido di ferro (componente argilloso).

I due componenti principali sono normalmente il calcare e l'argilla, oppure il calcare e la marna.

Il calcare

Il carbonato di calcio (CaCO_3) è molto diffuso in natura. Per la fabbricazione del cemento è idoneo in tutte le formazioni geologiche. Le forme più pure di calcare sono lo spato calcareo (calcite), l'aragonite e il marmo. Il calcare possiede una

struttura cristallina finemente granulare. La durezza del calcare dipende dalla sua era geologica: quanto più antica è la formazione geologica, tanto più duro risulta in generale il calcare.

Normalmente tale materiale contiene miscele di sostanze argillose e combinazioni ferrose che ne influenzano il colore.

La marna

I calcari con inclusioni di silice e di sostanza argillosa, come anche d'ossido di ferro, sono chiamati marne. Le marne formano lo stadio di transizione alle argille.

A causa della loro larga diffusione, esse sono spesso impiegate per la fabbricazione del cemento. Geologicamente, le marne sono rocce sedimentarie, formatesi dalla contemporanea sedimentazione del carbonato di calcio della sostanza argillosa.

La durezza delle marne è inferiore a quella dei calcari: quanto più in loro è elevato il tenore d'argilla, tanto minore è la loro resistenza. Il colore delle marne dipende dalla sostanza argillosa e passa dal giallo al grigio-nero.

I componenti correttivi

I correttivi vengono aggiunti alla miscela in quei casi in cui sia necessario bilanciare chimicamente la miscela di calcare e marna/argilla. Per esempio, per aumentare il tenore in silice s'impiega come correttivo *sabbia*, argilla ad alto tenore di silice, *diatomea* o altri materiali. Per compensare la scarsità d'ossido di ferro si può ricorrere al minerale di ferro naturale o, ad esempio, alle scaglie di laminazione che provengono dalla lavorazione industriale dell'acciaio.

La classificazione dei cementi

Esistono diversi tipi di cemento, differenti per la composizione, per le proprietà di resistenza e durezza e quindi per la destinazione d'uso.

Dal punto di vista chimico si tratta in tutti i casi di una miscela di silicati e alluminati di calcio, ottenuti dalla cottura di calcare, argilla e sabbia (clinker). Il materiale ottenuto, finemente macinato, una volta miscelato con acqua si idrata e solidifica progressivamente nel tempo.

La composizione chimica dei cementi è complessa e vengono usate terminologie specifiche per definirli. [4],[1]

- **CEM I** Cemento Portland: sono costituiti almeno per il 95% da clinker e in misura variabile da 0 a 5% da costituenti minori. Sono generalmente utilizzati nella prefabbricazione di calcestruzzi armati semplici e precompressi.
- **CEM II** Cemento Portland composito: hanno come costituenti principali oltre al clinker, presente in percentuale variabile dal 65 al 94%, le loppe granulate d'altoforno, la silice fume, le pozzolane, le ceneri volanti, scisti calcinati e calcare. Hanno proprietà molto simili a quelle dei CEM I che li rendono idonei ai più comuni impieghi nella realizzazione di calcestruzzi armati normali e precompressi, di elementi prefabbricati.
- **CEM III** Cemento d'altoforno: sono costituiti da clinker fino al 64%, e loppa granulata basica d'alto forno. Questo tipo è articolato in tre sottotipi con contenuti di loppa variabile dal 36% al 95%. Rispetto al cemento Portland, i CEM III sono principalmente indicati nelle situazioni in cui il calcestruzzo è soggetto ad ambienti chimicamente aggressivi e per la realizzazione di opere di grosse dimensioni.
- **CEM IV** Cemento pozzolanico: sono costituiti da clinker tra il 45 e 89%, e materiale pozzolanico naturale o artificiale. In base alla percentuale di materiale pozzolanico, variabile dal 11% al 55%, sono articolati in due

sottotipi. Il termine "pozzolana" deriva dal nome da Pozzuoli, località della Campania dove si estraeva il materiale, destinato, fin dall'antichità, alla produzione malte idrauliche. Presentano una elevata resistenza all'attacco chimico.

- **CEM V** Cemento composito: sono costituiti da una miscela di clinker, loppa d'altoforno e pozzolana e sono adatti a realizzare calcestruzzi esposti ad ambienti mediamente aggressivi quali acqua di mare, acque acide, terreni solfatici, etc.

Il cemento Portland

Il cemento Portland, probabilmente il tipo più utilizzato, fu scoperto nel 1824 in Inghilterra dal muratore Joseph Aspdin e deve il nome alla somiglianza nell'aspetto e nel colore con la roccia di Portland, un'isola nella contea di Dorset in Inghilterra. [4]

La fabbricazione del cemento Portland avviene sommariamente nelle seguenti tre fasi:

- preparazione della miscela grezza dalle materie prime
- produzione del clinker
- preparazione del cemento.

Le materie prime per la produzione del Portland sono minerali contenenti:

- ossido di calcio (44%),
- ossido di silicio (14,5%),
- ossido di alluminio (3,5%),
- ossido di ferro (3%),
- ossido di magnesio (1,6%).

L'estrazione avviene in apposite cave poste in prossimità della fabbrica (anche se generalmente questa viene costruita dove è possibile fornirsi del materiale con poca spesa per il trasporto), che in genere hanno già la composizione desiderata, mentre in alcuni casi è necessario aggiungere argilla o calcare, oppure minerale di ferro, bauxite o altri materiali residui di fonderia.

La miscela viene riscaldata in un forno speciale costituito da un cilindro (chiamato Kiln) di lunghezza compresa tra i 3 e i 6 metri, disposto orizzontalmente con leggera inclinazione (3-5%) e ruotante lentamente (1-2 giri/min) [1]. La temperatura viene fatta crescere lungo il cilindro fino a circa 1450° centigradi in modo che i minerali si aggregino, ma non fondano e vetrificano.

Nella sezione a temperatura minore il carbonato di calcio (il calcare, le pietre) si miscela con i silicati e forma silicati di calcio (Ca_2Si e Ca_3Si). Si forma anche una piccola quantità di Alluminato di calcio che si scinde in ossido di calcio e biossido di carbonio (CO_2). Nella zona ad alta temperatura l'ossido di calcio reagisce di tricalcio (Ca_3Al) e Alluminoferrite di tricalcio (Ca_3AlFe).

Il materiale risultante dalla cottura è complessivamente denominato clinker. Il clinker può essere conservato per anni prima di produrre il cemento, a condizione di evitare il contatto con l'acqua.

L'energia teorica necessaria per produrre **il clinker è di circa 1700 Joule per grammo**, ma a causa delle dispersioni il valore è molto più alto. Questo comporta una grande richiesta di energia per la produzione del cemento, e quindi un notevole rilascio di biossido di carbonio in atmosfera, gas ad effetto serra. Per migliorare le caratteristiche del prodotto finito al clinker viene aggiunto circa il 2% di gesso e la miscela viene finemente macinata. La polvere ottenuta è il cemento pronto per l'uso. Il cemento ottenuto ha una composizione del tipo:

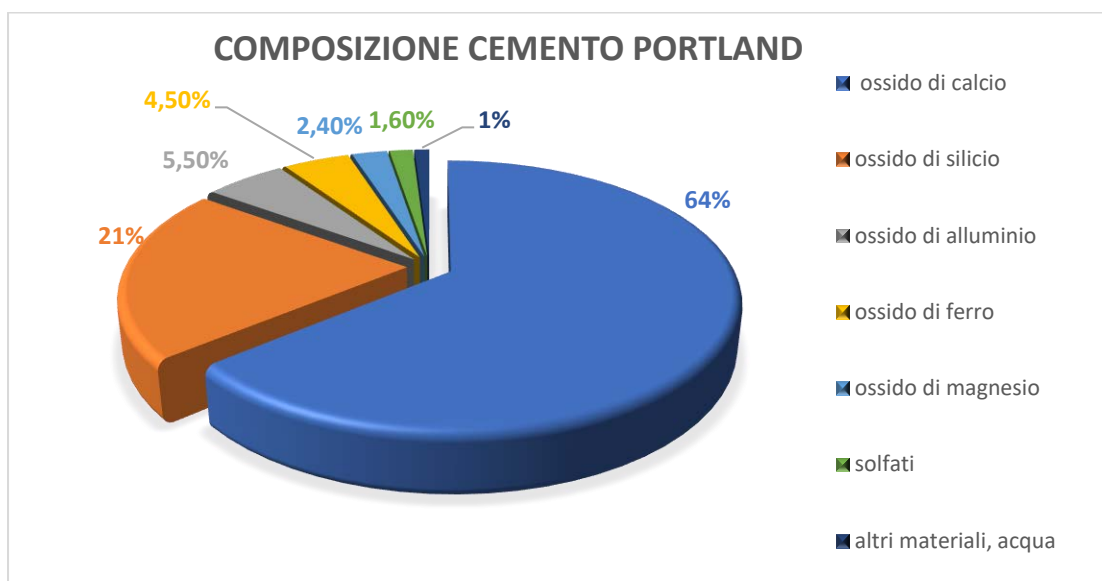


Figure 42- Composizione del cemento Portland

Quando il cemento Portland viene miscelato con l'acqua, il prodotto solidifica in alcune ore e indurisce progressivamente nell'arco di diverse settimane; anche se la presa continua nel tempo si considera ottenuta completamente a 28 giorni quando raggiunge il 90% del suo sviluppo. L'indurimento iniziale è provocato dalla reazione tra acqua, gesso e l'alluminato di tricalcio, a formare una struttura cristallina di calcio-alluminio-idrato (CAH), ettringite (Aft) e monosolfato (Afm). Il successivo indurimento e lo sviluppo di forze interne di tensione derivano dalla più lenta reazione dell'acqua con il silicato di tricalcio a formare una struttura amorfa chiamata calcio-silicato-idrato (CSH gel). Un'ultima reazione produce il gel di silice (SiO₂). Tutte le tre reazioni sviluppano calore. [5]

Con l'aggiunta di particolari materiali al cemento (calcare e calce) si ottiene il cemento plastico, di più rapida presa e maggiore lavorabilità. La malta preparata usando una miscela di cemento Portland e calce è nota come malta bastarda. Il clinker in forma di particelle sferiche di diametro 3-25 mm viene macinato in mulini a sfere insieme al gesso (3-4 % come SO₃) fino ad ottenere una polvere di dimensioni inferiori a 100 micrometri detto quindi Cemento Portland.[1]

Questo materiale è usato in particolare per rivestire le superfici esterne ed interne degli edifici, il comune intonaco. Vediamo ora nello specifico la descrizione, fase per fase, della produzione del cemento

Descrizione del processo produttivo del cemento

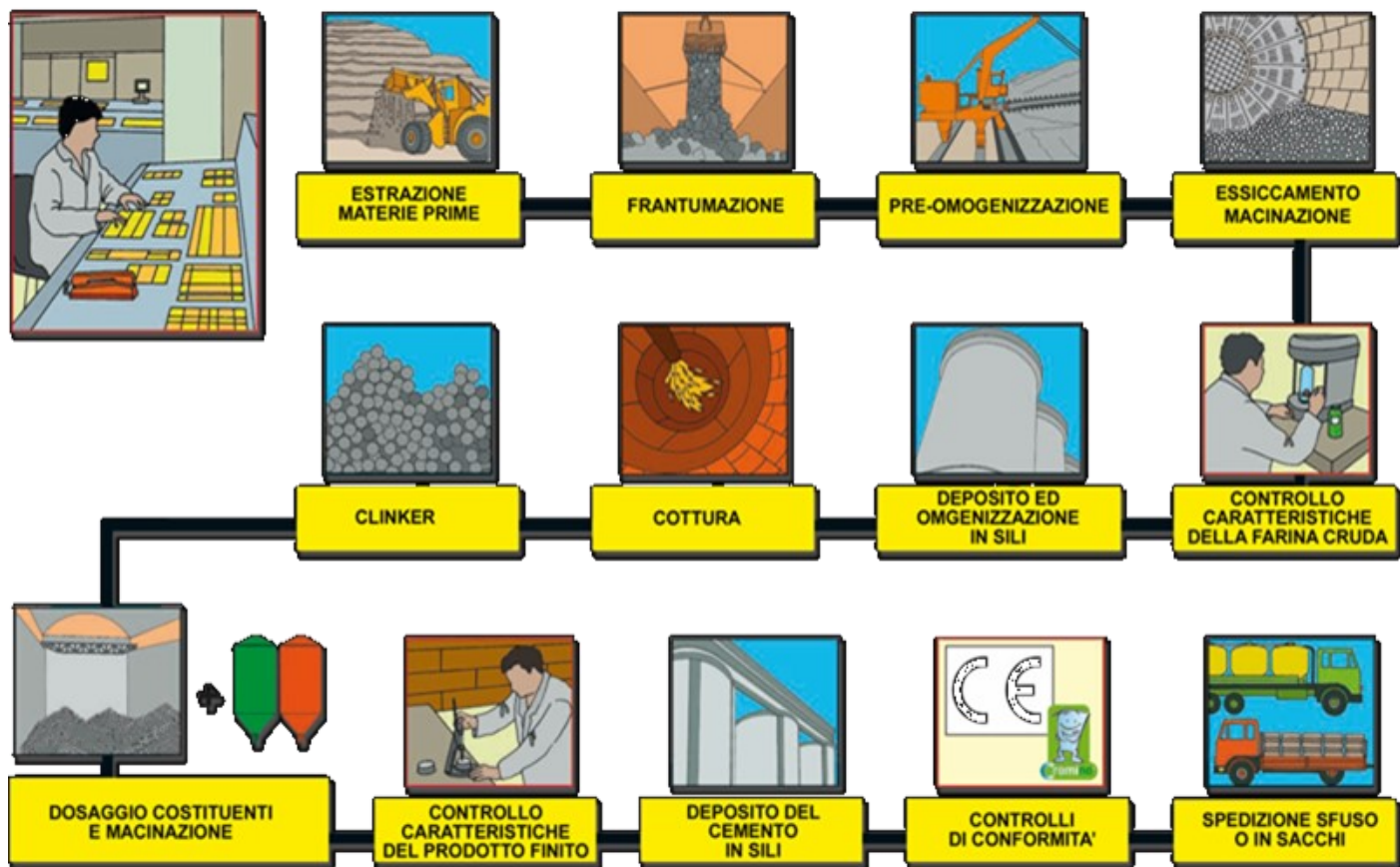


Figure 43- Processo produttivo Cemento

Approvvigionamento MP

Le materie prime principali, calcare e argilla, vengono estratte dalle cave mediante l'uso di esplosivo e trasportati ai frantoi con gli automezzi. Quando la cava è vicina allo stabilimento, il calcare proveniente dalla cava, viene frantumato nel frantoio ubicato nella stessa area di cava, ed inviato, mediante nastri trasportatori, direttamente al silo di deposito interno allo stabilimento.

La frantumazione

Per facilitare e ottimizzare la movimentazione e lo stoccaggio delle materie prime estratte dalle cave, queste vanno ridotte di dimensioni, utilizzando un frantoio, fino a una pezzatura compresa tra i 5 ed i 10 centimetri. La tipologia di frantoio è scelta in funzione della granulometria finale desiderata e dell'umidità del materiale in ingresso. La frantumazione consiste nel sottoporre i blocchi di materia prima a delle sollecitazioni d'impatto, d'attrito, di taglio o di compressione.

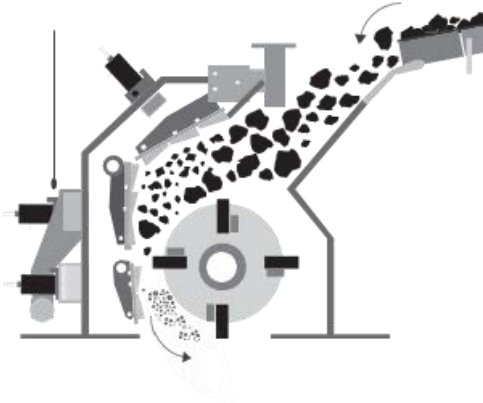


Figure 44- Frantoio

Pre-omogeneizzazione (opzionale)

La pre-omogeneizzazione è un'operazione che mira ad assicurare una composizione chimica costante alla miscela delle materie prime. Quest'ultima è analizzata tramite apparecchi a raggi gamma. I risultati di queste analisi permettono di definire le correzioni necessarie per ottenere un'alimentazione ottimale del mulino delle materie prime (o mulino del crudo).

La pre-omogeneizzazione viene effettuata in appositi impianti per garantire una perfetta miscelazione preliminare del materiale, ove proveniente da fonti diverse. È indispensabile laddove i prodotti di cava siano poco omogenei. Si depositano degli strati orizzontali dei diversi materiali, poi li si riprende in senso verticale. Vengono poi diretti, tramite nastro trasportatore, verso l'impianto di macinazione della miscela cruda.

La Macinazione a crudo

Il Molino del Crudo è l'impianto predisposto per macinare finemente le materie prime fino a farle diventare una polvere di consistenza simile alla farina. In cementeria si associa proprio il nome "farina" alla miscela di materie prime finemente macinata ed essiccata e si indica il molino che la lavora come "molino del crudo" perché tratta un materiale che ancora deve essere cotto nel forno rotante. Le materie prime opportunamente dosate durante la fase di pre-omogeneizzazione ed eventualmente addizionate con correttivi vengono trasformate in polvere finissima e avviate a deposito sotto forma di farina.

L'impianto di macinazione del crudo riduce le materie prime in farina molto fine, con dimensioni dei granelli inferiori ai 160 μm . L'impianto effettua contemporaneamente anche l'essiccazione (le materie prime possiedono un contenuto in acqua che può arrivare al 7%)

I molini del crudo sono di due tipi:

1. **Molini a sfere:** attualmente più in uso, è costituito da un corpo cilindrico corazzato entro il quale sono contenuti i corpi macinanti costituiti da sfere aventi diversi diametri.
2. **Molini a piste e rulli:** è costituito da rulli che premono su una pista anulare, la quale gira a bassa velocità.

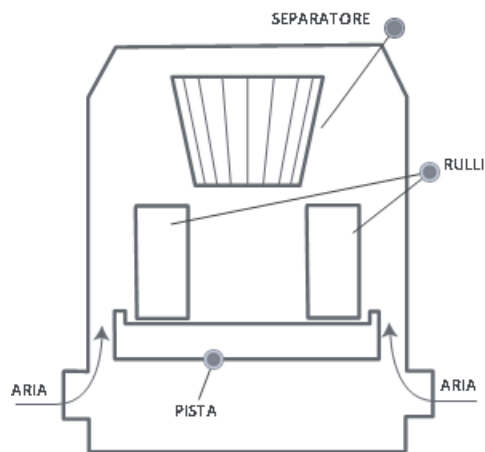


Figure 45- Molino a rulli

Le principali variabili fisiche da considerare in questa fase del processo sono:

- Attrito reciproco tra le varie particelle
- Attrito reciproco tra le particelle ed i corpi macinanti
- Calore
- Vibrazioni
- Grado d'efficienza dei vari organi di rotazione (corona, pignone, riduttore, motore, ecc.)

Omogeneizzazione

Tra il reparto di macinazione del crudo e quello di cottura della farina è necessario un deposito intermedio che permetta al forno, macchina termica ad esercizio continuo, di non risentire delle periodiche fermate (anche solo di controllo) degli impianti meccanici che la precedono; a mezzo trasporto pneumatico la farina è inviata in un silo a tenuta stagna.

Le materie prime da cemento contengono molta umidità, si rende quindi necessaria una loro essiccazione durante la fase di pre-omogeneizzazione. Ciò avviene in idonee apparecchiature, in cui le materie prime vengono opportunamente dosate e controllate chimicamente. In questa fase i materiali vengono dunque essiccati tramite aria calda prelevata dal forno.

L'omogeneizzazione viene effettuata in sili cilindrici ove subisce un'agitazione pneumatica tramite insufflaggio di aria che, rimescolando grandi quantitativi di farina proveniente dall'impianto di macinazione a crudo, ne assicura l'omogeneità. Così si ottiene una farina con una composizione compatibile con quella prefissata e pronta per essere avviata agli impianti di cottura. Prima della cottura vengono effettuati i controlli delle caratteristiche della farina cruda.

Con questa operazione si eliminano i valori massimi di oscillazione della composizione chimica della farina (titolo CaCO_3) fino al limite della sensibilità degli apparecchi, generalmente impiegati per il controllo in loco, e si crea una indispensabile premessa per l'ottenimento della costanza del prodotto ed una marcia regolare e continua dell'impianto di cottura.

L'impianto di cottura

La cottura della farina avviene secondo quattro metodologie, via **umida**, **semisecca**, **semiumida** e **secca**.

Nella via **umida** la farina presenta un tenore di umidità iniziale del 18 - 45% la consistenza è simile ad una melma e viene alimentata nel forno con delle pompe.

Nella via **semisecca** la farina presenta un tenore di umidità del 10 -20% e viene alimentata nel forno sotto forma di granuli.

Nella via **semiumida** la materia cruda viene alimentata in forma di biscotti, ottenuti estrudendo pani disidratati mediante filtro-presse, immessi in un preriscaldatore a griglia o direttamente nell'essiccatore.

Nella via **secca** la farina presenta un tenore di umidità inferiore al 1% e viene alimentata nel forno sotto forma di polvere.

La scelta del processo dipende fortemente dal contenuto di acqua delle materie prime allo stato naturale; i processi per via umida e semiumida, nei quali la miscela cruda viene macinata in acqua per formare una melma pompabile, consumano più energia e, quindi, sono più costosi. Gran parte della produzione mondiale di clinker si fonda ancora su processi a via umida. In Europa, invece, la disponibilità di materie prime a basso contenuto di umidità fa sì che più del 75% della produzione si basi sui più avanzati processi a via secca e semisecca.

Nella seguente figura (46) vengono mostrate le richieste energetiche relative ai diversi processi di essiccazione, come ci si attende per il processo secco la richiesta energetica specifica è minima, mentre è massima per processi a via umida:

Specific thermal energy demand (MJ/tonne clinker)	Process
3 000 – <4 000	For the dry process, multistage (three to six stages) cyclone preheaters and precalcining kilns
3 100 – 4 200	For the dry process rotary kilns equipped with cyclone preheaters
3 300 – 5 400	For the semi-dry/semi-wet processes (Lepol kiln)
up to 5 000	For the dry process long kilns
5 000 – 6 400	For the wet process long kilns
3 100 – 6 500 and higher	For shaft kilns and for the production of special cements

Figure 46-Richieste di energia termica specifica per processo

Cottura a via Secca

Analizziamo quindi, inizialmente, il processo di cottura che viene utilizzato per la maggiore in Europa, ovvero il processo a via secca. In tal caso, la farina viene alimentata ai forni attraverso la torre a cicloni, dove raggiunge una temperatura di 1450 C ottenendo il clinker i cui componenti conferiscono al cemento l'attività idraulica. Il clinker all'uscita dal forno viene poi sottoposto ad un processo di raffreddamento.

Il processo può essere così schematizzato:

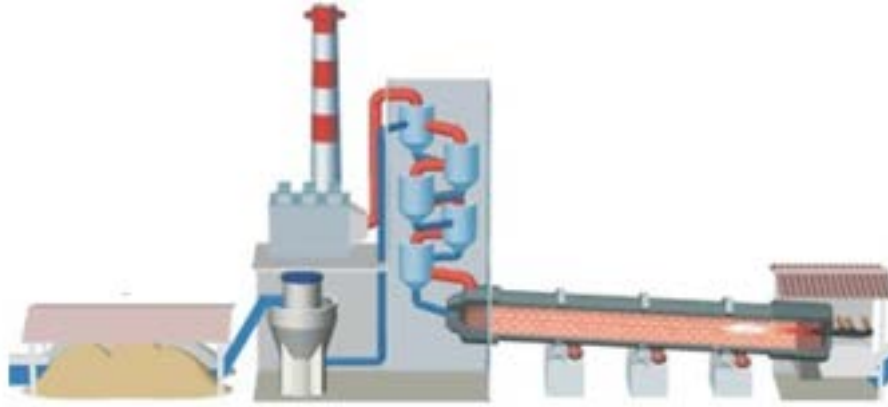


Figure 47- Impianto di cottura

L'impianto di cottura si compone di 3 parti che lavorano in sequenza:

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

Il clinker è il semilavorato che esce dal forno è costituito da quattro minerali principali, che saranno fondamentali nella definizione degli indicatori:

Alite (C3S - silicato tricalcico)

Belite (C2S - silicato bicalcico)

Celite (C3A - alluminato tricalcico)

Brownmillerite (C4AF - alluminato ferrito tetracalcico)

[Notazione abbreviata: C = CaO; S = SiO₂; A = AlO₃; F = Fe₂O₃]

La torre a cicloni

Questa fase è esclusiva per il processo di cottura del tipo a via secca, è composta da alcuni stadi (tipicamente da 4 a 6) sovrapposti e numerati generalmente dall'alto verso il basso. Lo stadio più alto, per realizzare una migliore separazione della farina in arrivo dal suo silo di stoccaggio, è in realtà un doppio ciclone. Ogni singolo ciclone (stadio) è collegato alla condotta ascendente dei gas caldi che arrivano dal forno rotante. Attraverso questo ciclone la farina è riscaldata e per mezzo del tubo di caduta dello stadio inferiore entra nel forno. Già nella torre di preriscaldamento (torre a cicloni), si realizza la cosiddetta "decarbonatazione" della farina, necessaria a separare la CO₂ (anidride carbonica), contenuta nelle materie prime sotto forma di carbonati, dagli ossidi necessari per la produzione del clinker. Nel corso del suo passaggio nella torre, la temperatura del crudo passa, progressivamente, da 100 °C a 900 °C circa. Circa il 60% del combustibile può essere consumato in questo stadio, in quanto la decarbonatazione è un processo estremamente endotermico.

È possibile schematizzare questi passaggi come segue:

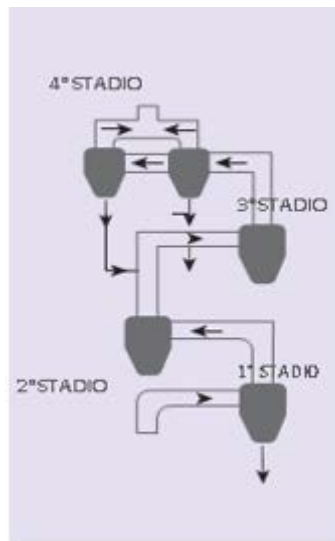


Figure 49-Processo a 4 stadi

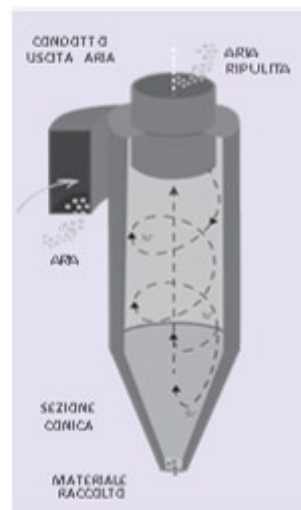


Figure 48- Struttura di un ciclone

La scelta del numero di cicloni viene effettuata secondo la seguente tabella:

Characteristics	Unit	Raw material moisture (% w/w)			
		3	6	9	12
Number of cyclone stages	-	6	5	4	3
Enthalpy required for drying	MJ/t clinker	150	290	440	599

Figure 50-Tabella entalpica Cicloni

Come si può notare l'entalpia per tonnellata di clinker aumenta all'aumentare dell'umidità del materiale del crudo, come atteso. Al contrario, il numero di stadi necessario diminuisce all'aumentare dell'umidità del materiale, in modo da avere una quantità di calore nei gas all'uscita torre adeguata ad una migliore essiccazione delle materie prime;

infatti, più sono gli stadi, minore sarà la temperatura dei gas al termine di questi necessaria a realizzare l'essiccazione. La suddetta tabella è valida nel caso in cui vengano utilizzati i soli gas di uscita torre per l'essiccazione al crudo. Se oltre ai gas uscita torre vengono utilizzati anche i gas di esubero griglia allora con una torre a 5 stadi si possono essiccare materie prime con umidità fino al 10-11%.

Il forno rotante

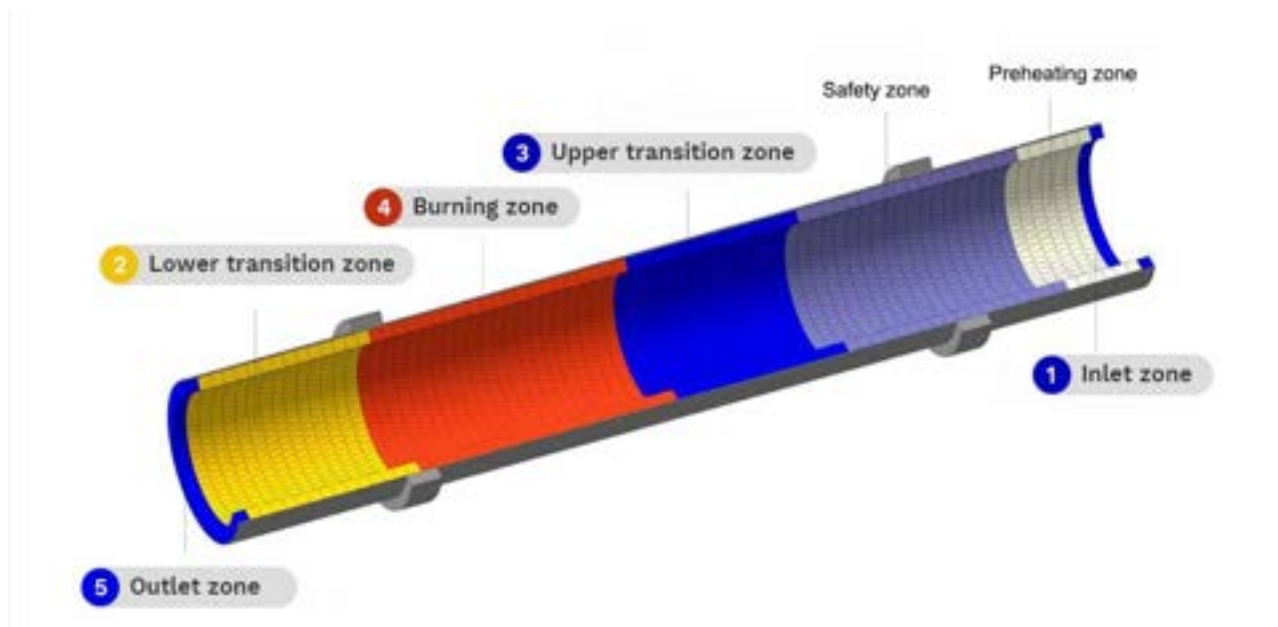


Figure 51- Forno rotante

Il forno rotante produce il clinker attraverso la cottura della miscela di materie prime (farina), come mostrato dalla figura 51. Per raggiungere tale risultato occorre innalzare la temperatura all'interno del forno rotante fino a circa 1.450 °C (con una temperatura di fiamma prossima a 2.000 °C) rendendo indispensabile l'utilizzo di determinate quantità di combustibile. La "farina" viene introdotta all'estremità superiore di un forno rotante costituito da un cilindro (diametro 3-6 m, lunghezza 100-200 m) leggermente inclinato e avanza in controcorrente rispetto al flusso di calore. Durante la cottura, il forno ruota sul suo asse e, la collocazione in leggera pendenza, permette l'avanzamento del materiale in cottura che entra nella parte alta e scivola rotolando sulle pareti interne composte da materiale refrattario, mentre, allo scarico, si trovano il bruciatore e la relativa fiamma (a carbone, ad olio denso, con eventuale apporto di combustibili alternativi). Durante la combustione vengono riscaldati e generati gas esausti che fuoriescono ad una temperatura che si aggira intorno ai 300-400 °C, questa temperatura elevata permetterà il successivo riutilizzo dei gas nella fase di riscaldamento della farina nei cicloni.

Nel forno rotante, si verificano le seguenti fasi:

- 1 Espulsione dell'acqua libera ancora presente nella farina (100°C- zona bianca)
- 2 Perdita dell'acqua legata (nella zona di preriscaldamento del forno nell'intervallo di temperatura compreso tra 100 e 750°C circa- zona grigia) contenuta nei materiali argillosi
- 3 Dissociazione del carbonato di magnesio e calcio (750 – 1000°C- zona blu)
- 4 Combinazione della calce con i minerali argillosi: formazione dei quattro minerali principali del **clinker** (questa fase è detta clinkerizzazione 1450°C- zona rossa)
- 5 Nella fase finale del processo, quando la miscela inizia a raffreddarsi alla temperatura di circa 1350°C, si ha una parziale cristallizzazione della massa fusa con la formazione di alluminati di calcio (zona gialla)

I parametri che influenzano il funzionamento di un forno rotante sono tanti:

- 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 completare la trattazione inerente alla cottura, non si può prescindere dal menzionare il trattamento dei combustibili utilizzati per azionare il forno. In particolare, la macinazione del combustibile è un'ulteriore fonte di consumo energetico a carico dell'azienda non trascurabile. All'interno del forno rotante è necessario utilizzare combustibili per la cottura del clinker ed essi possono essere suddivisi in due grandi categorie: combustibili fossili e alternativi.

- **Fossili:** ossia quelli che derivano da fonti fossili non rinnovabili. Appartengono a questa categoria il carbone, il pet-coke e l'olio combustibile.
- **Alternativi:** ossia quelli che derivano da altre lavorazioni industriali e alcuni dei quali annoverabili tra quelli rinnovabili. Appartengono a questa categoria le emulsioni oleose, le farine animali ed i combustibili derivati dai rifiuti.

Il raffreddamento del clinker

Il clinker che esce dal forno deve essere raffreddato rapidamente per stabilizzare la propria struttura molecolare e composizione chimica. Il raffreddatore a griglia, per veicolare il passaggio di aria fredda, è costituito da una serie di piastre forate sovrapposte che si muovono alternativamente per trasportare il clinker in uscita dal forno. Il raffreddatore a griglia permette una tempra più efficace del clinker rispetto a quello a satelliti. L'aria calda in uscita dal raffreddatore viene in gran parte recuperata come aria **secondaria** e **terziaria** (rispettivamente per il bruciatore principale e per la camera di calcinazione).

La parte restante dell'aria di raffreddamento del clinker viene inviata invece al filtro ad alta temperatura per la depolverazione e quindi scaricata in atmosfera ed è detta **aria esausta**

Nella figura 52 vediamo rappresentato il flusso d'aria che lo caratterizza:

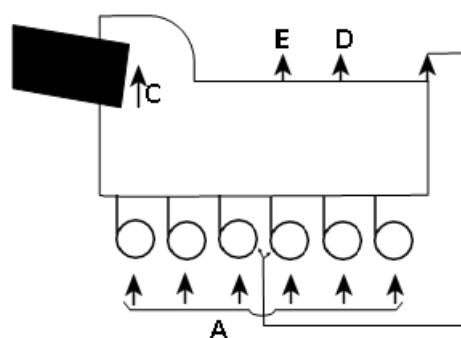


Figure 52 -Raffreddatore a griglia

- A- *Aria di raffreddamento (Aria esterna fredda)*
- B- *Aria circolante*
- C- *Aria secondaria (aria calda dal raffreddamento forno)*
- D- *Aria di scarico (al Camino)*
- E- *Aria di scarico centrale (per l'essiccazione)*

Durante il suo passaggio sulle suddette piastre forate, lo strato di clinker viene attraversato dall'aria di raffreddamento in arrivo da una serie di ventilatori disposti sotto la griglia stessa.

Il rapido raffreddamento del clinker ha influenza su:

- Struttura cristallina
- Composizione chimica
- Macinabilità
- Caratteristiche del cemento

Cottura Semi-Secca

Il processo di cottura a via semisecca seguirà gli stessi step del processo secco facendo eccezione del sistema di preriscaldamento.

La farina viene addizionata con acqua in appositi piatti rotanti, detti piatti granulatori, nei quali si formano granuli con umidità del 10-12% approssimativamente sferici con diametro di 1-2 cm.

Provvede alla produzione di clinker un forno rotante a via "semi-secca" con griglia di preriscaldamento Lepol (figura 53). I granuli vengono riversati da tre piatti granulatori in una tramoggia, che carica la griglia di preriscaldamento, incontrano in contro-corrente i gas meno caldi, dapprima si essiccano e poi si riscaldano fino a raggiungere i 900°C (temperatura di decarbonatazione del calcare).

La griglia è racchiusa in un involucro metallico internamente rivestito di materiale refrattario.

Un bruciatore ausiliario è posizionato nella camera di calcinazione della griglia di preriscaldamento con il compito di preparare il materiale prima che lo stesso entri nel forno. I granuli, parzialmente decarbonatati, vengono riversati dalla griglia nella parte rotante, dove si completa la fase di decarbonatazione.

Nella parte rotante, inclinata leggermente verso lo scarico e costituita da un tubo metallico rivestito in materiale refrattario, esattamente come nel caso a via secca, i granuli avanzano e si riscaldano fino a trovarsi direttamente esposti all'irraggiamento della fiamma del bruciatore principale. Si raggiunge in questa zona del forno, detta "zona di cottura", la temperatura di circa 1.450 °C necessaria affinché avvengano le reazioni di sinterizzazione fra i quattro ossidi principali: si ottengono così i composti caratteristici del clinker da cemento (il silicato bicalcico e tricalcico, l'alluminato tricalcico e l'allumino-ferrito tetracalcico).

Per effetto dell'irraggiamento della zona di cottura e per il forte preriscaldamento dell'aria secondaria proveniente dal raffreddatore, nonché per il costante eccesso d'aria di combustione, si ha sempre una combustione completa. I gas caldi, provocati dalla combustione, vengono aspirati dal ventilatore di coda ed inviati al filtro elettrostatico e di qui alla ciminiera.

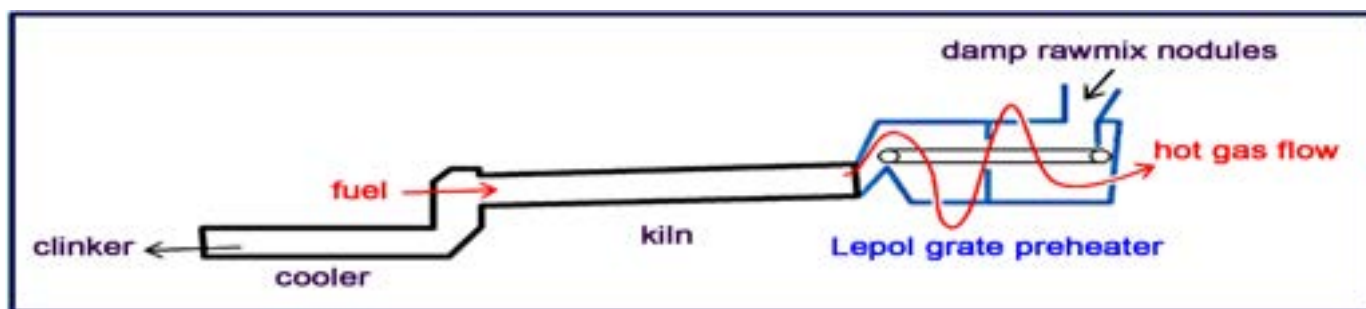


Figure 53-Preriscaldamento Lepol

Macinazione del cotto

In questo reparto si produce il cemento utilizzando il clinker che è stato prodotto dal forno. Per tale ragione, in cementeria, si chiamano “molini del cotto”. Questa fase è ovviamente fondamentale nel processo di fabbricazione del cemento perché concorre a determinare la qualità del prodotto finale. Il cemento si produce macinando finemente una miscela opportunamente dosata di clinker, gesso e altri costituenti, tra cui alcuni sottoprodotti minerali e/o industriali in sostituzione di materie prime naturali.

Un composto importante che deve essere aggiunto durante la macinazione del clinker è il gesso che funziona da “regolatore di presa”, ossia permette al cemento di essere lavorabile quando è impastato con l’acqua. Gli additivi di macinazione rivestono altresì un ruolo importante nella macinazione del cemento poiché favoriscono il processo di macinazione ed evitano la formazione di masse di particelle agglomerate.

Nei tradizionali molini a sfere, il clinker e le aggiunte minerali (gesso, loppa d’altoforno, ceneri volanti, fillers) passano attraverso due (o tre) camere contenenti corpi macinanti di diverso diametro, separate da griglie.

1. Nella prima camera, la miscela viene sgrossata
2. Nella seconda camera, viene macinata alla finezza desiderata

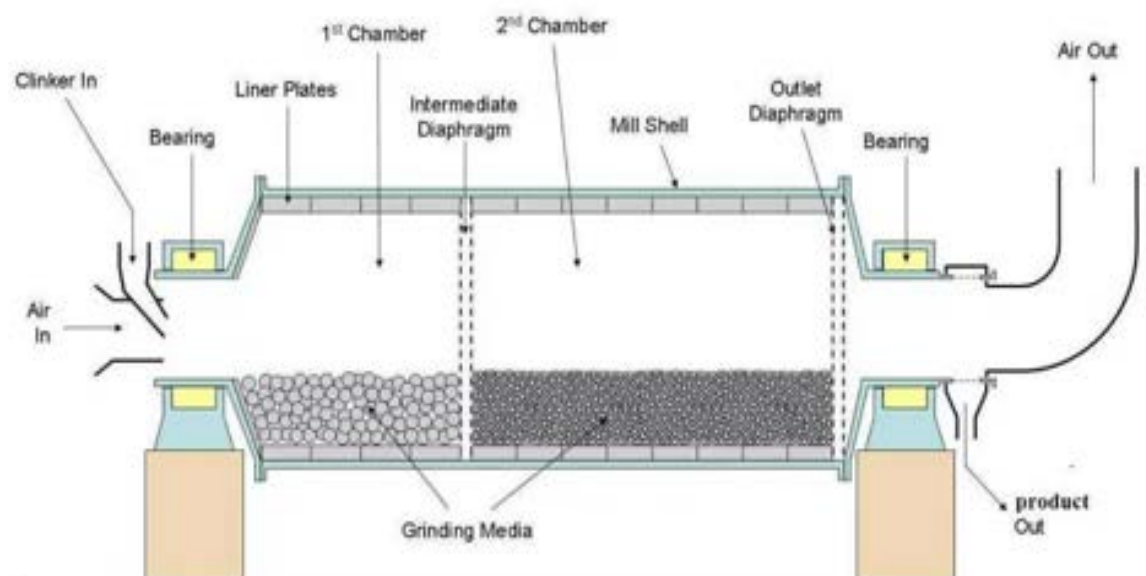


Figure 54 - Macinazione del cotto

È importante ottenere una determinata granulometria, a seconda delle caratteristiche che si richiedono:

- *Fino a 3 micron (μm):* se si desidera un maggiore contributo sulle resistenze iniziali (flessione e compressione).
- *Tra 3 e 30 micron:* per avere un maggiore contributo sulle resistenze finali di un cemento.
- *Oltre 60 micron:* Questa frazione granulometrica s'idrata più lentamente e consente al cemento di proseguire nel tempo nel suo processo d'indurimento (favorisce la durabilità del calcestruzzo).

Separatore

Il prodotto in uscita dal molino viene raccolto da un elevatore a tazze ed inviato ad un separatore dinamico. In esso, il prodotto viene portato in sospensione in una corrente d'aria, la cui velocità è dimensionata in modo tale da portare in sospensione solo le particelle della grandezza desiderata. Le particelle di dimensioni maggiori vengono automaticamente riciclate verso il molino

Stoccaggio

A partire dallo stesso clinker vengono prodotte diverse qualità di cemento. Una cementeria possiede dunque diversi silos di stoccaggio per garantire una corretta separazione delle diverse tipologie di prodotto.

I prodotti finali

Una volta prodotto, il cemento è stoccato in silos e può essere venduto sfuso o in sacchi da 25 kg, raggiunge il cliente ed è pronto per ogni tipo di impiego. Tutti i cementi sono muniti di Certificato di Conformità Europea - CE; nonché costantemente sorvegliati da I.T.C. per verificare la conformità dei requisiti alle specifiche di Qualità della norma europea in linea con la politica aziendale del controllo, del mantenimento e del continuo miglioramento della qualità dei prodotti e dei servizi offerti.

La sala di controllo

Tutto il ciclo produttivo viene controllato e comandato da salette di reparto o da un'unica sala centralizzata. Sui monitor appaiono 24 ore su 24 tutti i dati relativi alla produzione, alla qualità e ai controlli ambientali. Tecnici specializzati sono in grado evidenziare eventuali anomalie o situazioni di pericolo, mettendo in atto le azioni preventive o correttive necessarie a riportare sotto controllo il sistema. Dei tecnici sorvegliano in permanenza il buon funzionamento delle macchine ed intervengono immediatamente in caso di anomalia. In questo lavoro vengono loro in aiuto sistemi esperti e sistemi di pilotaggio automatico degli impianti. È così possibile sorvegliare l'intero impianto produttivo, suddiviso in alcune zone principali:

1. macinazione del crudo
2. cottura clinker
3. preparazione combustibili
4. macinazione cementi

Ogni zona viene controllata da uno o più impianti automatizzati e da una o più unità locali, situate nelle cabine elettriche dell'impianto. Gli impianti automatizzati gestiscono le partenze e gli arresti delle macchine, le sicurezze, gli asservimenti, i messaggi che informano sullo stato dell'impianto, sui problemi che si presentano, sui superamenti dei valori di soglia.

3.2 Mappatura ed Analisi energetica

Una volta studiato il processo produttivo a livello teorico, è stato necessario definire con certezza quelle che sono le fasi energeticamente più gravose e quali i vettori energetici maggiormente utilizzati. Per fare ciò si è preso inizialmente contatto con le associazioni di categoria, le quali si sono rese disponibili a fornire alcuni dati non sensibili, per il completamento del lavoro. Il campione di aziende che ha contribuito al progetto è composto da 48 aziende.

Delle 48 analizzate, solamente 34 di esse possiedono un processo produttivo completo, mentre le restanti 14 utilizzano come materia prima del clinker già cotto da terzi. Per una questione di completezza, e anche perché considerate maggiormente energivore, sono state prese in considerazione solo le 34 aziende con processo completo.

In figura 55 viene mostrata una tabella riassuntiva riguardo l'utilizzo dei vettori energetici in termini percentuali.

Vettore	# di aziende	% utilizzo	% totale*
<u>Energia elettrica</u>	34/34	24,70%	24,70%
Gas Naturale	26/34	1,01%	0,77%
<u>Coke di petrolio</u>	32/34	57,46%	54,08%
Biomassa	2/34	17,9%	1,06%
Olio combustibile	17/34	9,05%	4,52%
Gasolio	31/34	0,26%	0,24%
<u>Combustibile da Rifiuto</u>	14/34	25,53%	10,51%
Pneumatici fuori uso	4/34	19,72%	2,32%
Bitume di petrolio	2/34	18,33%	1,08%
Carbon fossile	2/34	7,05%	0,41%
GPL	4/34	0,11%	0,01%

Figure 55-Analisi statistica sul consumo di vettori energetici

Nello specifico: la prima colonna indica il vettore a cui ci si riferisce, la seconda il numero di aziende che utilizza quello specifico vettore; la terza mostra la percentuale di utilizzo calcolata sul numero di aziende che usa quel vettore quindi, ad esempio per il CDR la media è calcolata su 14 aziende; la quarta colonna invece, mostra la percentuale calcolata sul totale delle aziende, quindi 34. Si noti che, per vettori combustibili poco utilizzati come il bitume, se si considerano le sole aziende (14) in cui lo si utilizza, la percentuale è molto alta (18%) ciò indica che in quelle realtà il bitume è molto importante; se si fa un discorso generale invece, essendo il bitume scelto in poche aziende, la percentuale si abbassa rendendolo globalmente un vettore poco importante.

Sulla base di questa tabella è stato realizzato un grafico a torta in cui sono stati accorpati sotto la voce "combustibili" tutti quei vettori energetici usati unicamente nel reparto forno per la cottura del clinker.

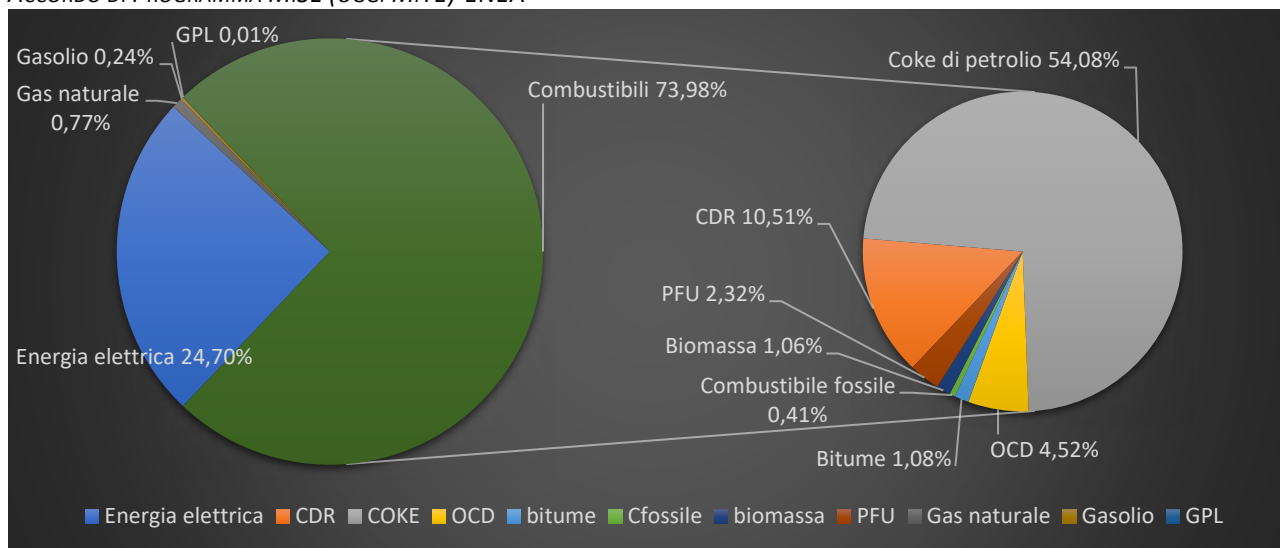


Figure 56-Grafico a torta dei vettori energetici

Dalla figura 56 è evidente che i vettori su cui porre attenzione sono: Energia elettrica e combustibili, in particolare: coke di petrolio e combustibili da rifiuto. Il passo successivo è quello di svolgere l'analisi energetica del processo, per comprendere al meglio le fasi più energivore e i loro flussi energetici. Come è stato già specificato, per eseguire una analisi energetica completa è importante una corretta mappatura del processo che ritroviamo in figura 57.

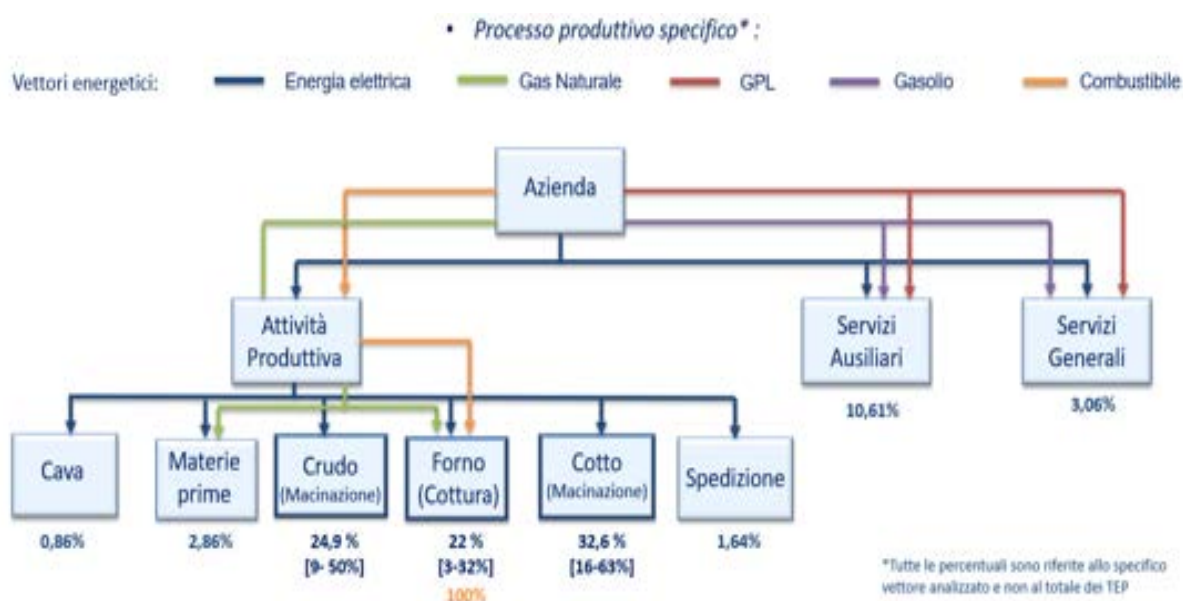


Figure 57- Mappatura processo produttivo Cemento

In figura 57 è mostrato lo schema di processo secondo le modalità definite nel Report dell'anno precedente. Avendo selezionato come vettori energetici fondamentali l'energia elettrica e i combustibili, sono state evidenziate le percentuali relative a ciascuna fase. Anche questi valori, sono una media aritmetica dei dati relativi alle aziende analizzate e riportano in basso il loro range di variazione [min-max].

Si evidenzia che in termini di energia elettrica le fasi di maggiore rilievo sono: Macinazione del cotto (32,6%), Cottura clinker (22,0 %) e Macinazione del crudo (24,9%); invece in termini di combustibile l'unica fase evidenziata è quella della cottura, in cui viene utilizzato il 100% del combustibile messo a disposizione.

Il passo successivo è stato quello di effettuare un'analisi energetica dell'intero processo, scindendolo in fasi ed analizzandone input e output per ciascuna. È stato necessario anzitutto realizzare una mappa che evidenziasse la sequenzialità e il collegamento tra le diverse fasi, prima di analizzarle singolarmente.

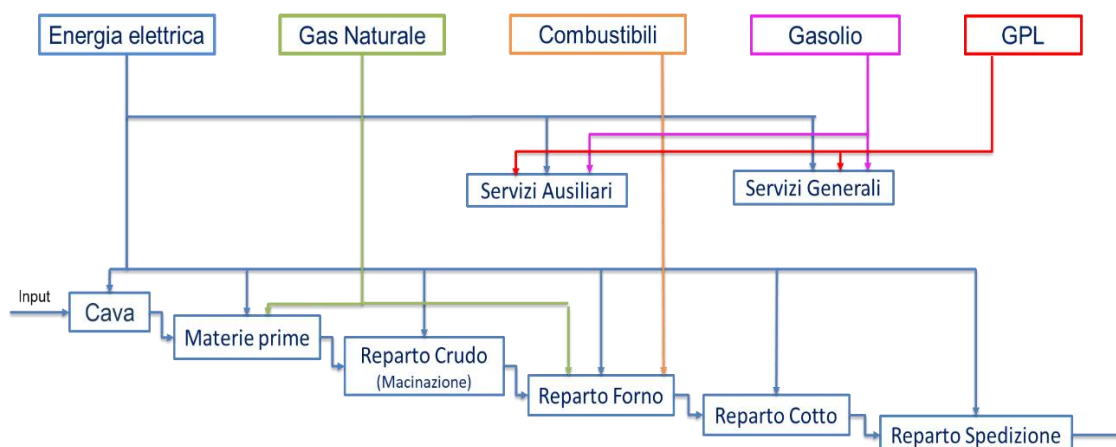


Figure 58- Schema Energetico Cemento

Dallo schema processuale è evidente la maggiore differenziazione nell'utilizzo di energia elettrica sfruttato in tutte le fasi citate. La scelta della tipologia di combustibile, tra quelli indicati in precedenza, dipende dalle politiche energetiche aziendali. Gpl e gasolio vengono sfruttati in fasi meno rilevanti.

Analizziamo, quindi, fase per fase il processo utilizzando dei diagrammi di flusso del tipo IDEF-0 la cui struttura è stata ampiamente esplicitata nel precedente Report.

▪ Cava

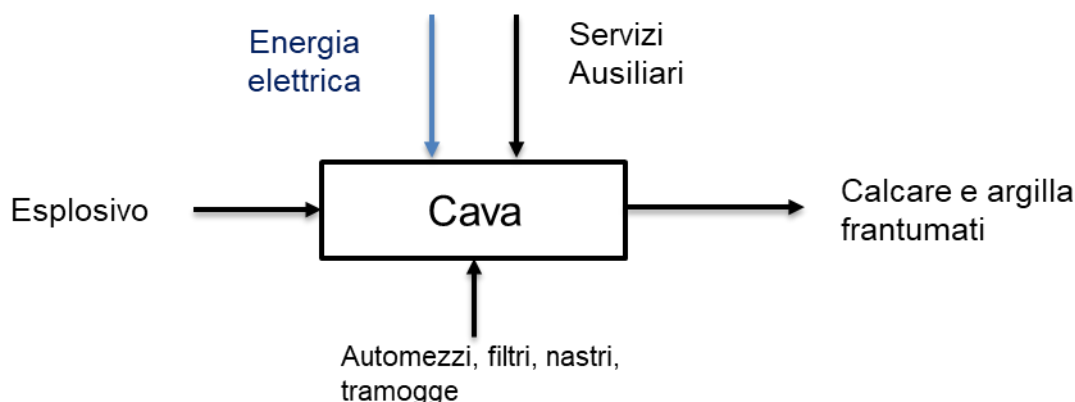


Figure 59- Cava (IDEF-0)

• INPUT:

L'input di tale fase del processo è rappresentato dall'esplosivo utile alla messa in funzione della

- **OUTPUT:**

Output della fase sono il calcare e l'argilla frantumati, considerati come materie prime grezze

- **ATTREZZATURE PRINCIPALI:**

trasportatori a nastri;

automezzi trasportano il calcare;

I nastri e il frantoio sono depolverati da filtri a maniche;

Tramogge per il trasporto

- **CONSUMI ENERGETICI:**

Tale fase richiede sicuramente un certo quantitativo di energia elettrica, al fine di trasportare le materie prime. I servizi ausiliari coadiuvano tale fase tramite l'impianto per la presenza di aria compressa, necessaria al funzionamento dei filtri a maniche e degli attuatori pneumatici.

- **Materie prime**

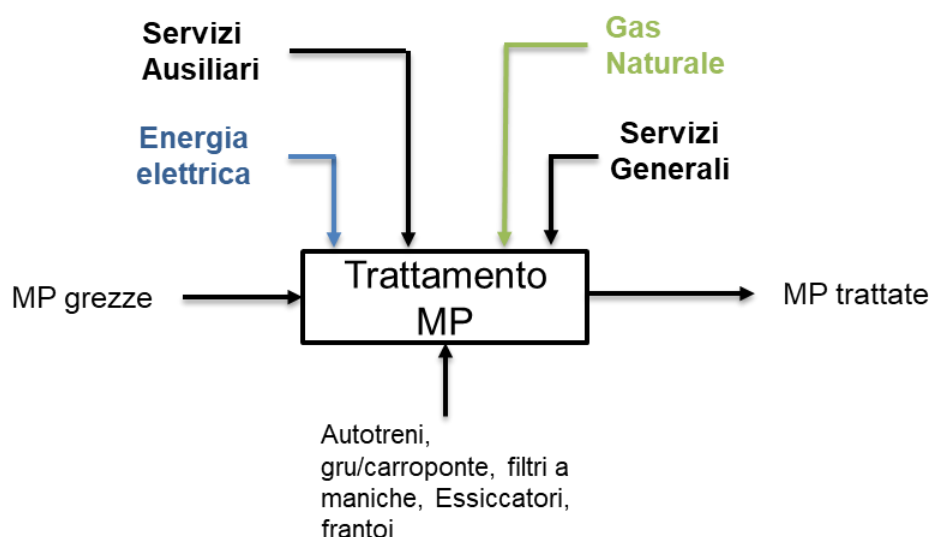


Figure 60- Trattamento MP Cemento

- **INPUT:**

L'input alla fase n°2 viene rappresentato dalle materie prime grezze

- **OUTPUT:**

Output della fase sono le materie prime trattate, omogeneizzate e parzialmente essiccate

- **ATTREZZATURE PRINCIPALI:**

Autotreni necessari al trasporto;

Carriponte per lo stoccaggio in azienda;

L'aria compressa è utilizzata per la pulizia dei filtri a maniche;

Frantoi necessari ad una frantumazione primaria approssimativa

Essiccatori per eliminare l'umidità residua delle materie prime

- **CONSUMI ENERGETICI:**

Questa fase richiede un grosso quantitativo di energia elettrica, al fine di trasportare le materie prime e per garantire il funzionamento del frantoio. I servizi ausiliari sono caratterizzati dall'uso dell'aria compressa, necessaria al funzionamento dei filtri a maniche e degli attuatori pneumatici che permettono una corretta preomogenizzazione, mentre il gas naturale viene esclusivamente utilizzato per il riscaldamento degli ambienti, l'azionamento dei ventilatori ha un'importanza fondamentale nell'incanalare i gas combusti utilizzati per l'essiccazione delle MP. Servizi generali sono illuminazione e riscaldamento ambienti, oltre a servizi di trasporto generali.

- **Reparto crudo (Macinazione)**

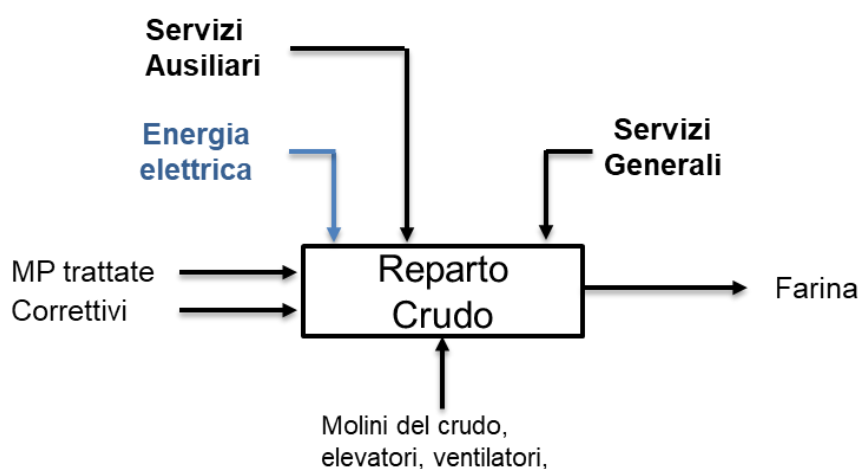


Figure 61- Macinazione crudo (IDEF-0)

- **INPUT:**

Gli input, in questa fase, sono due: le materie prime precedentemente trattate a cui vengono aggiunti dei correttivi come la sabbia per bilanciare la miscela e garantire la composizione desiderata, e dei coadiuvanti per migliorare la macinazione

- **OUTPUT:**

A seguito alla macinazione, l'output è chiamato Farina, una polvere molto sottile

- **ATTREZZATURE PRINCIPALI:**

Molini del crudo necessari alla frantumazione;

Elevatori e nastri per il trasporto al forno

Ventilatori che muovono l'aria proveniente dal forno per l'essiccazione

- **CONSUMI ENERGETICI:**

Questa fase è basata sull'utilizzo di energia elettrica, al fine di macinare le materie prime e per garantire il funzionamento dei ventilatori oltre agli elevatori. I servizi ausiliari sono caratterizzati dall'uso dell'aria compressa, necessaria al funzionamento dei filtri a maniche e degli attuatori pneumatici. Servizi generali sono illuminazione e riscaldamento ambienti, oltre a servizi di trasporto generali.

- **Reparto forno**

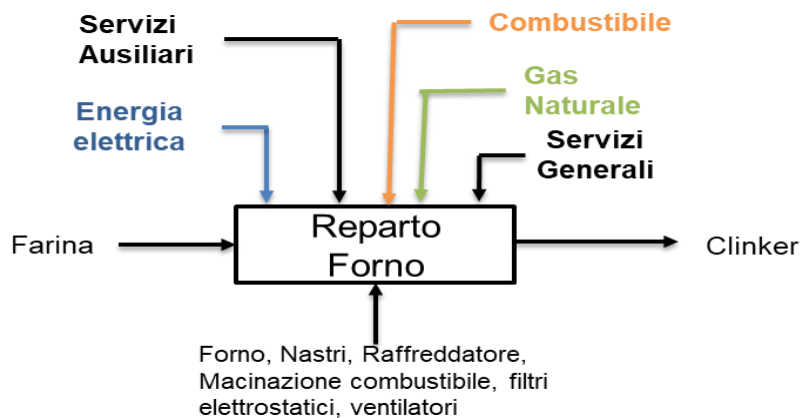


Figure 62- Forno cottura cemento (IDEF-0)

- **INPUT:**

All'ingresso del reparto forno abbiamo la miscela di farina sottile cruda

- **OUTPUT:**

Output del forno è un composto definito clinker, ottenuti dalla cottura di calcare, argilla e sabbia.

- **ATTREZZATURE PRINCIPALI:**

- Forno di cottura che raggiunge temperature di 1450 °C;
- Sistema di immissione dell'aria comburente e filtrazione dei fumi combusti;
- Nastri trasportatori per combustibile e farina
 - Sistema di macinazione del combustibile
 - Attrezzatura e griglie necessarie al raffreddamento del clinker in uscita dal forno

- **CONSUMI ENERGETICI**

La voce preponderante di consumo per la fase di cottura è quella del combustibile, necessario ad alimentare i bruciatori per far avvenire la combustione. Questi ultimi, a seconda della politica energetica dell'azienda, possono anche essere del tipo alimentati ad olio combustibile, combustibili da rifiuto e tanti altri combustibili. Altro consumo rilevante è quello di energia elettrica, utilizzata per tutte le attrezzature di controllo, per i nastri trasportatori e per la rotazione del forno.

I servizi ausiliari assistono la fase di cottura tramite il sistema di trattamento dei fumi, che filtra tutti i fumi combusti provenienti dall'intero impianto, la maggior parte dei quali provengono proprio dalla fornace. Inoltre, è fondamentale l'intervento dei ventilatori, che intervengono nel sistema di immissione dell'aria comburente e l'estrazione dei fumi combusti, e dell'impianto per il sistema di raffreddamento, caratterizzato da un blocco adiacente al forno, composto da griglie e ventilatori. L'aria compressa viene utilizzata per l'iniezione di combustibile attraverso iniettori pneumatici.

I servizi generali sostengono questa fase tramite i vari impianti di illuminazione, condizionamento degli ambienti ed il supporto delle officine di manutenzione generale.

Il gas naturale viene principalmente utilizzato per trasporti e riscaldamento.

- **Reparto Cotto**

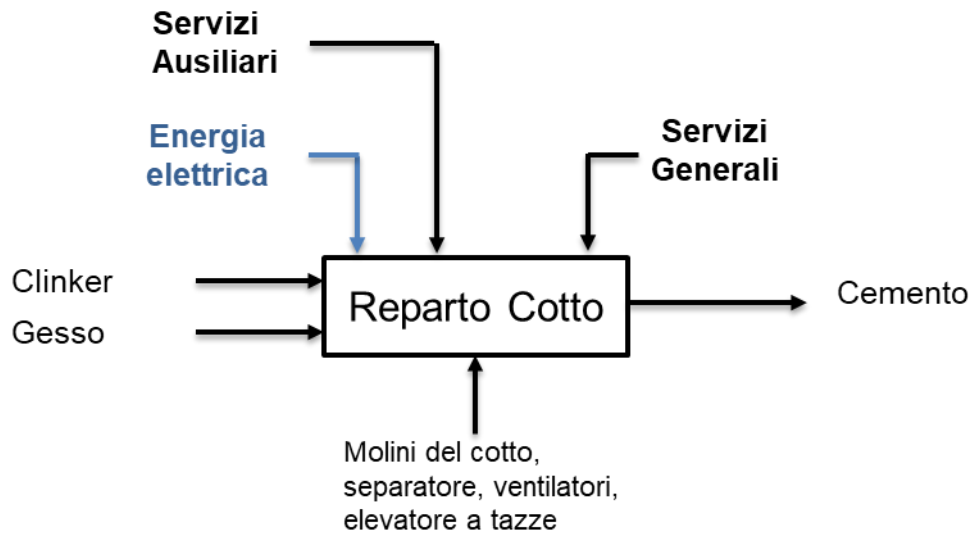


Figure 63- Macinazione clinker cotto (IDEF-0)

- **INPUT:**

Input di questa fase è il clinker uscente dal forno e in seguito dal raffreddatore ad una temperatura di circa 150°C al quale è necessaria l'aggiunta di gesso che funziona da "regolatore di presa", ossia permette al cemento di essere lavorabile quando è impastato con l'acqua

- **OUTPUT:**

Tramite la macinazione del cotto si ottiene il cemento, che viene classificato in base alla dimensione dei suoi grani finali.

- **ATTREZZATURE PRINCIPALI:**

Molini del cotto, atti alla frantumazione del clinker;

Sistema di separazione suddivide il prodotto fra meno e più fine: quello più fine e leggero va verso i lati scendendo verso i silos, quello più pesante cade al centro e ritorna al mulino

Ventilatori a supporto del sistema di separazione

Elevatore a tazze per il trasporto dal mulino al separatore

- **CONSUMI ENERGETICI:**

La fase di macinazione del cotto richiede l'apporto di energia elettrica, per il funzionamento delle varie attrezzature elencate precedentemente.

I servizi ausiliari coadiuvano questa fase grazie all'uso dei ventilatori, utilizzati a supporto del sistema di separazione. L'aria compressa, invece, è utilizzata per i sistemi di attuazione pneumatica.

I servizi generali intervengono tramite i vari impianti di illuminazione, condizionamento degli ambienti ed il supporto delle officine di manutenzione generale.

- **Reparto Spedizione**

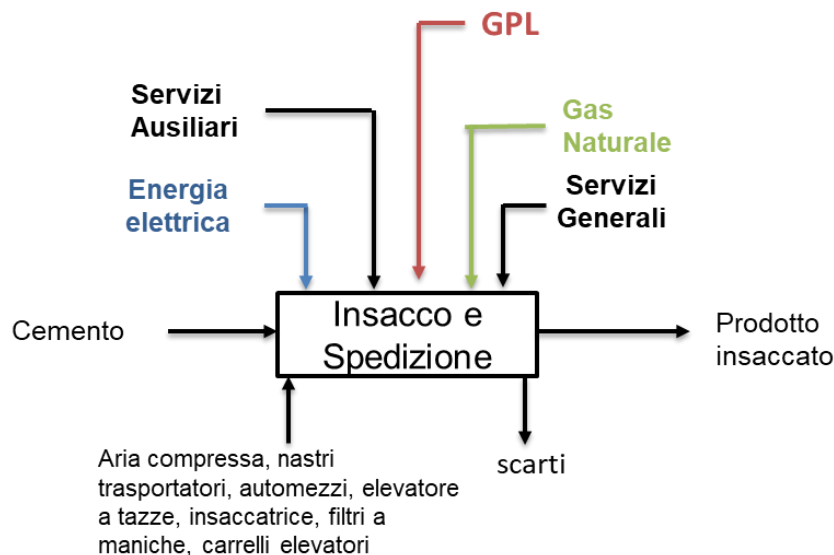


Figure 64- Insacco e Spedizione (IDEF-0)

- **INPUT:**

Input di questa fase sono i prodotti che hanno ricevuto già tutti i trattamenti e le lavorazioni necessarie ad essere immessi sul mercato e necessitano solo del controllo necessario a verificare la qualità e la misura dei grani.

- **OUTPUT:**

Sacchi di cemento sfuso insaccato, pronto ad essere spedito.

- **ATTREZZATURE PRINCIPALI:**

trasportatori a nastro, a rulli o catenarie ed altri sistemi di trasporto;

tramogge di carico delle corsie dello sfuso, separate per i vari prodotti, attrezzate con punti di carico mobili e dotate di pese a ponte che assicurano il carico completo

insacchitrice

filtri a maniche per la selezione dei prodotti da scartare

stazioni di pallettizzazione e di termo-retrazione

- **CONSUMI ENERGETICI:**

Le fasi di controllo qualità e imballaggio richiedono l'apporto di energia elettrica, per l'azionamento delle varie attrezzature presenti, di gas naturale, come combustibile dei bruciatori della stazione di termo-retrazione, e di gasolio per autotrazione, per alimentare eventuali veicoli assegnati specificamente a questa fase per il trasporto dei pallet.

I sistemi ausiliari supportano queste fasi tramite gli impianti di aria compressa e le pompe a vuoto, necessari al corretto imballaggio del prodotto finito, ed i ventilatori utilizzati per la pulizia dei nastri e filtri.

I servizi generali intervengono tramite i vari impianti di illuminazione, condizionamento degli ambienti ed il supporto delle officine di manutenzione generale.

- **I servizi ausiliari**

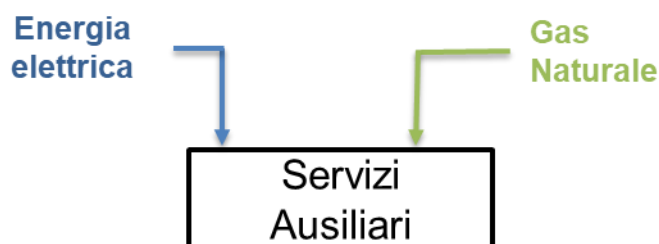


Figure 65- Servizi Ausiliari

Indichiamo con il termine “servizi ausiliari” tutti quei servizi che sono di diretto supporto all’attività di processo ed assolvono funzioni necessarie alla buona riuscita dello stesso.

Si è già mostrato come tali servizi vadano ad interagire con le varie fasi. Per capire, però, l’impatto energetico complessivo del processo è necessario definire quali sono i fabbisogni di tali servizi:

- *Impianto per aria compressa:*

Per la produzione del cemento, l’aria compressa viene utilizzata principalmente per sistemi di trasporto pneumatici e per l’insaccamento. Il funzionamento di tale impianto richiede l’apporto di energia elettrica e di acqua o aria per il raffreddamento.

- *Ventilatori*

I ventilatori assolvono a compiti di primaria importanza come il raffreddamento del clinker, l’essiccazione, l’alimentazione dell’aria di combustione al forno, il tiraggio forzato dei fumi di combustione e tutte le altre funzioni indicate nell’analisi energetica di ogni singola fase.

- *Impianto per le acque di raffreddamento*

Il circuito di prelievo (preferibilmente da pozzi artesiani), trattamento, circolazione, raffreddamento, riciclo delle acque di processo e di raffreddamento risulta anch’esso di grande importanza per la produzione. L’acqua è usata prevalentemente per l’impianto di macinazione, le torri di condizionamento e la griglia di raffreddamento del clinker ed è a perdere. La quota parte usata per raffreddare i mulini e il raffreddamento delle macchine è invece a recupero.

L’acqua potabile di acquedotto viene impiegata esclusivamente per usi sanitari, colonnine d’acqua e mensa.

Le pompe di circolazione sono alimentate ad energia elettrica.

- *Impianto per il trattamento dei fumi*

Il trattamento dei fumi di combustione per l’eliminazione delle sostanze inquinanti prima della loro immissione in atmosfera è di fondamentale importanza per il contenimento dell’impatto ambientale. All’uscita del forno, i fumi vengono fatti passare prima attraverso un filtro DeNOx e poi attraverso un filtro DeSOx, prima dell’espulsione in camino

I principali sistemi di trattamento dei fumi utilizzati sono tre:

- Il filtro a maniche, in cui i fumi vengono fatti passare attraverso delle maniche in tessuto speciale, che trattengono il particolato;

- l'elettrofiltro a due o tre campi, in cui il particolato sospeso nei fumi viene intrappolato e rimosso per mezzo di un intenso campo elettrostatico;
- lo scrubber a secco per la neutralizzazione dei gas acidi presenti nei fumi.

Questi, il più delle volte, non vengono utilizzati singolarmente, ma combinati tra di loro per ottenere un miglior filtraggio. I fumi da trattare provengono dal forno fusorio, dal sistema di raffreddamento clinker, dall'essiccazione e dalla stazione di termo-retrazione dei pallet. L'elettrofiltro e lo scrubber sono alimentati ad energia elettrica.

- *Macinazione coke*

Il combustibile solido (coke di petrolio) è ripreso dal silo di alimentazione e dosato ad uno specifico molino per la essicca-macinazione fino alla finezza necessaria ad una combustione ottimale. L'aria calda necessaria all'essiccazione del combustibile in fase di macinazione proviene dal raffreddatore del clinker. Il polverino di carbone ottenuto è inviato all'apposito silo di stoccaggio da cui è estratto, dosato ed inviato pneumaticamente al forno di cottura.

- *Riscaldamento olio combustibile denso*

L'olio combustibile denso deve essere mantenuto caldo per evitare che solidifichi all'interno dei serbatoi e delle tubazioni provocando intasamenti e problemi di estrazione ed alimentazione degli impianti.

▪ I servizi generali



Figure 66- Servizi Generali (IDEF-0)

Rientrano in quest'ambito tutte le utenze i cui consumi e la cui regolazione sono sostanzialmente indipendenti dal processo produttivo di stabilimento, ma sono più correlate a fattori ambientali e climatici; si tratta per esempio di:

- Illuminazione interna ed esterna: nello stabilimento, nei magazzini e nei piazzali sono presenti centinaia di corpi illuminanti, che richiedono un consumo di energia elettrica.
- Riscaldamento degli ambienti: si tratta delle caldaie e dei generatori di calore per il riscaldamento invernale, nonché per la produzione di acqua calda sanitaria. Richiedono l'apporto di energia elettrica e gas combustibile (olio combustibile in alternativa);
- Raffrescamento degli ambienti: si tratta delle unità per il raffrescamento estivo, nonché per la climatizzazione continua di alcuni locali tecnici, che operano grazie all'uso di energia elettrica.
- Officine di manutenzione generale: si tratta dell'officina meccanica ed elettrica dello stabilimento. Per il funzionamento di tale unità è necessario l'apporto di energia elettrica ed eventuali gas tecnici (per i cannelli di saldatura);
- Veicoli per il trasporto interno delle merci, ai quali è necessario gasolio per autotrazione

3.3 Realizzazione del cruscotto di monitoraggio

Una volta definite le formule per gli indicatori teorici, sono state contattate le aziende per reperire le informazioni necessarie al calcolo. Data la mole di dati, è stato fondamentale trattarli e suddividerli per semplificare il lavoro, per cui quest'ultima fase è stata organizzata seguendo i tre step mostrati in figura 67.

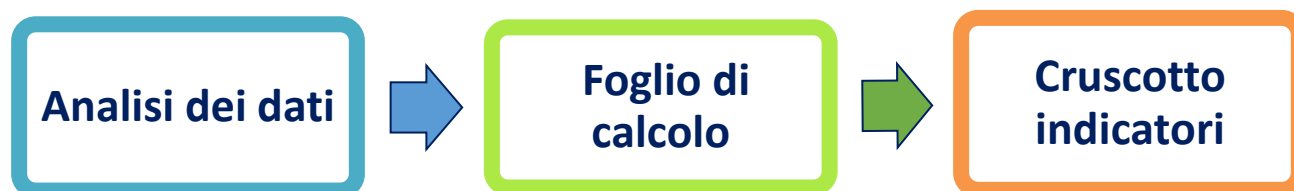


Figure 67 - Passi necessari allo sviluppo del cruscotto

È stata necessaria anzitutto un'analisi dei dati per suddividerli in base alla loro variabilità e frequenza di acquisizione; in seguito, è stato possibile predisporre un foglio elettronico per agevolare e strutturare la raccolta dati e per rendere più immediata e semplice la lettura delle informazioni di riepilogo, presente in allegato con il nome di "Database Cemento".

I valori ottenuti dalle formule teoriche risultano essere di riferimento e rappresentano i valori a cui le aziende dovrebbero tendere per ottimizzare i propri consumi. Questi dati di riferimento non sono presenti in letteratura, e spesso non è facile per le aziende del settore reperirli, per questo motivo è di fondamentale importanza l'analisi svolta. Una volta adeguate le unità di misura, gli indicatori saranno comparati con quelli che sono i consumi reali delle aziende e resi fruibili attraverso la realizzazione un cruscotto di monitoraggio. Questo confronto permetterà a ciascuna realtà operativa di effettuare un'autodiagnosi e approfondire le cause di inefficienza nei periodi in cui gli indicatori e i consumi risulteranno difformi. Dal punto di vista software la realizzazione del cruscotto è stata effettuata mediante l'applicativo di analisi aziendale "Power BI" di Microsoft.

È importante precisare che, per motivi di privacy, non potranno essere mostrati dati appartenenti ad alcuna azienda o ente, quelli mostrati nei paragrafi successivi a scopo esemplificativo saranno dati verosimili ma di pura fantasia

Inserimento dei dati

I dati necessari al calcolo sono stati precedentemente elencati e possono essere classificati come segue:

- **Dati statici:** sono i dati che non cambiano o che cambiano di rado, valori caratteristici dei materiali e/o dell'impianto, temperature non variabili
- **Dati dinamici:** sono i dati che variano di continuo, valori dipendenti dalle temperature o semplicemente variabili nel tempo, come i kg di materiali utilizzati. Questi subiscono una frequenza di variazione genericamente mensile.

Sulla base di quanto detto sono state realizzate tre tabelle riassuntive (Tabella) relative ai dati necessari e alla loro classificazione, effettuando una suddivisione per fase.

Fase di cottura

Dati statici	Dati dinamici
Composizione % clinker	$u_{farina} \%$
<i>Kf o Loss of Ignition</i>	$T_{gas,out}$
$T_{aria,in}$	$T_{aria,out}$
$T_{farina,in}$	T_{amb}
$Cp_{ex,gas}$	$m_{ex,gas}$
$Cp_{farina,in}$	m_{cool}
$Cp_{aria,cool}$	$m_{aria,in}$
$Cp_{aria,in}$	

Figure 68- Tabella dati statici e dinamici fase cottura

Fase di Macinazione Crudo

Dati statici	Dati dinamici
Wi_m	$u_{farina} \%$
C	d_{crudo}
z	D_{crudo}

Fase di Macinazione Cotto

Dati statici	Dati dinamici
Wi_m	d_{cotto}
C	D_{cotto}
z	

Figure 69- Tabella dati statici e dinamici fasi di Macinazione

Per la fase della cottura, per semplicità i calori specifici sono stati considerati costanti, in quanto dipendenti dal materiale (fissato) e dalle temperature in gioco, che subendo piccole variazioni, causano minime oscillazioni del valore del calore specifico, considerate influenti. Anche le temperature considerate in ingresso al volume di controllo sono state indicate come costanti, in quanto subiscono piccole variazioni. I dati variabili invece sono: l'umidità percentuale (0-10%), la massa di polveri, aria e gas esausti e le temperature dei gas esausti in uscita e dell'aria in uscita; essi variano entro certi range indicati da ciascuna azienda.

Per le fasi di macinazione si considerano come valori costanti i fattori di conversione e l'indice di Bond per la macinazione del clinker poiché dipende esclusivamente dal materiale, invece sono dati variabili tutti i diametri del materiale in ingresso e uscita.

Parte dei dati statici è stata reperita da manuali, parte invece è stata specificata dalle aziende in quanto caratteristica di ciascun impianto; per i dati dinamici invece è obbligatoria una comunicazione costante con l'azienda in quanto dati sensibili e sempre differenti.

I dati ottenuti vengono caricati sul “Database Cemento” e successivamente trasferiti ad un software necessario per la rappresentazione degli indicatori; se si volessero aggiornare dati già esistenti o aggiungerne di nuovi, sarebbe possibile farlo grazie ad una pagina iniziale dedicata all’inserimento dati mostrata in figura 70 o manualmente nel foglio di calcolo che verrà mostrato nel paragrafo successivo e che troviamo in allegato al documento presente. È possibile inserire manualmente i dati variabili, ciascun utilizzatore dello strumento lo potrà personalizzare in base alle proprie esigenze e caratteristiche di produzione. In figura 70 è stato inserito un valore minimo e massimo delle variabili per simulare una casualità dei dati.

	Variabile	MIN	MAX	Benchmark	U.M.	
REP. CRUDO	D in [μm]	30.000	70.000	12500	Kwh/t farina	Energia Elettrica Energia Termica
	d out [μm]	90	100			
REP. CRUDO				0	MI/t farina	
REP. FORNO	T_out_gas [$^{\circ}\text{C}$]	130	150	0	MI/t clinker	
REP. COTTO	D in [μm]	20.000	30.000	0	Kwh/t clinker	
	d out [μm]	40	80			

Figure 70- Pagina Iniziale di Inserimento Dati

Come si nota, oltre alle variabili utili al calcolo degli indicatori, può essere inserito il valore di benchmark reperendolo dall’esterno (manuali, normative) oppure si potrà utilizzare un benchmark calcolato in base ai dati già noti. Nel caso specifico notiamo che in alcuni reparti esso è pari a zero, in questi casi lo strumento interpreterà l’assenza di dati dall’esterno e procederà al calcolo in automatico del valore di benchmark come media dei valori dell’indicatore sperimentati in un determinato orizzonte temporale.

Il foglio di calcolo

La realizzazione del foglio di calcolo ha lo scopo di strutturare e sistematizzare il patrimonio informativo aziendale, semplificando la fase di analisi dei dati e consentendo una migliore comprensibilità e consultabilità delle informazioni al fine di rendere più efficaci e veloci le successive attività previste dal progetto. **Esso è stato strutturato sulla base dei dati raccolti grazie al foglio Excel mostrato in precedenza, resosi necessario a causa dell’impossibilità ad effettuare i sopralluoghi previsti. Il foglio è presente in allegato al documento con il nome di “Database Cemento”.**

Suddivisi i dati, adeguate le unità di misura, per garantire una visualizzazione chiara e di semplice comprensione è stato utilizzato il software Power-BI, che come già accennato fa parte di una famiglia di strumenti di business intelligence di Microsoft che permette, a partire dai dati aziendali, di generare report e quindi informazioni a supporto delle decisioni. È possibile ricevere in input dati da differenti fonti, tra le quali Excel, come si vede in figura 71 evidenziato in blu.

In figura 71 è possibile, inoltre, osservare come si presenta una parte del database del software la cui visualizzazione è simile ad Excel. Questo database è accessibile selezionando la seconda icona che troviamo in alto a sinistra nello strumento, cerchiato in rosso.

Month	Tipi Macinazione	WI (kWh/ShortTon)	C	F	D ingresso (micro)	D uscita (micro)	Indicatore_Cotto (kWh/t cB)	MIN	MAX	Media	Consumo finale (kWh/t cB)	Fase
gennaio 2019	Secca	14,00	2,3	3969,13	16601	65	22,83	20,41	29,15	24,34	33	Cotto
febbraio 2019	Secca	14,00	2,3	3969,13	16815	43	29,13	20,43	29,15	24,34	45	Cotto
marzo 2019	Secca	14,00	2,3	3969,13	15295	70	21,48	20,41	29,15	24,34	40	Cotto
aprile 2019	Secca	14,00	2,3	3969,13	13898	59	23,90	20,43	29,15	24,34	37	Cotto
maggio 2019	Secca	14,00	2,3	3969,13	18859	56	24,83	20,41	29,15	24,34	44	Cotto
giugno 2019	Secca	14,00	2,3	3969,13	18128	79	20,63	20,41	29,15	24,34	49	Cotto
luglio 2019	Secca	14,00	2,3	3969,13	18941	45	27,83	20,41	29,15	24,34	40	Cotto
agosto 2019	Secca	14,00	2,3	3969,13	17429	66	22,68	20,41	29,15	24,34	44	Cotto
settembre 2019	Secca	14,00	2,3	3969,13	14173	74	21,18	20,43	29,15	24,34	33	Cotto
ottobre 2019	Secca	14,00	2,3	3969,13	28564	43	28,50	20,41	29,15	24,34	34	Cotto
novembre 2019	Secca	14,00	2,3	3969,13	12113	63	22,96	20,41	29,15	24,34	32	Cotto
dicembre 2019	Secca	14,00	2,3	3969,13	13101	41	26,93	20,41	29,15	24,34	35	Cotto
gennaio 2020	Secca	14,00	2,3	3969,13	18422	63	23,69	20,41	29,15	24,34	35	Cotto
febbraio 2020	Secca	14,00	2,3	3969,13	18176	83	23,69	20,41	29,15	24,34	47	Cotto
marzo 2020	Secca	14,00	2,3	3969,13	19842	79	20,41	20,41	29,15	24,34	45	Cotto
aprile 2020	Secca	14,00	2,3	3969,13	17942	70	22,00	20,43	29,15	24,34	41	Cotto
maggio 2020	Secca	14,00	2,3	3969,13	15621	67	22,42	20,41	29,15	24,34	31	Cotto
giugno 2020	Secca	14,00	2,3	3969,13	15975	54	25,17	20,41	29,15	24,34	40	Cotto
luglio 2020	Secca	14,00	2,3	3969,13	13378	64	27,78	20,41	29,15	24,34	37	Cotto
agosto 2020	Secca	14,00	2,3	3969,13	14593	48	27,43	20,41	29,15	24,34	48	Cotto
settembre 2020	Secca	14,00	2,3	3969,13	18978	53	25,55	20,41	29,15	24,34	50	Cotto
ottobre 2020	Secca	14,00	2,3	3969,13	16175	66	22,27	20,41	29,15	24,34	45	Cotto
novembre 2020	Secca	14,00	2,3	3969,13	13961	45	27,61	20,41	29,15	24,34	39	Cotto
dicembre 2020	Secca	14,00	2,3	3969,13	15693	77	20,85	20,41	29,15	24,34	35	Cotto

Figure 71- Database Macinazione Cotto in Power BI

È fondamentale nella prima colonna indicare il mese e l'anno di riferimento, seguono i dati statici ed infine quelli dinamici. La colonna dell'indicatore è semplicemente realizzata implementando la formula nella barra superiore, evidenziata in verde. Il foglio risulta assolutamente simile per le altre due fasi produttive.

In figura 71 è mostrato solo uno dei tre database caricati, i fogli di calcolo sono indipendenti e vengono caricati separatamente sullo strumento. Essi sono accomunati solo dalla prima colonna, ovvero quella che indica la data. Una delle sezioni del foglio di calcolo, che viene mostrata in figura 72, permette di definire le relazioni tra gruppi di dati, in questo caso esistono due collegamenti bilaterali. Questi collegamenti fanno sì che ogni qualvolta ci si riferisca ad uno specifico mese, tutti e tre gli indicatori si sincronizzino su quella data, garantendo un orizzonte temporale comune.

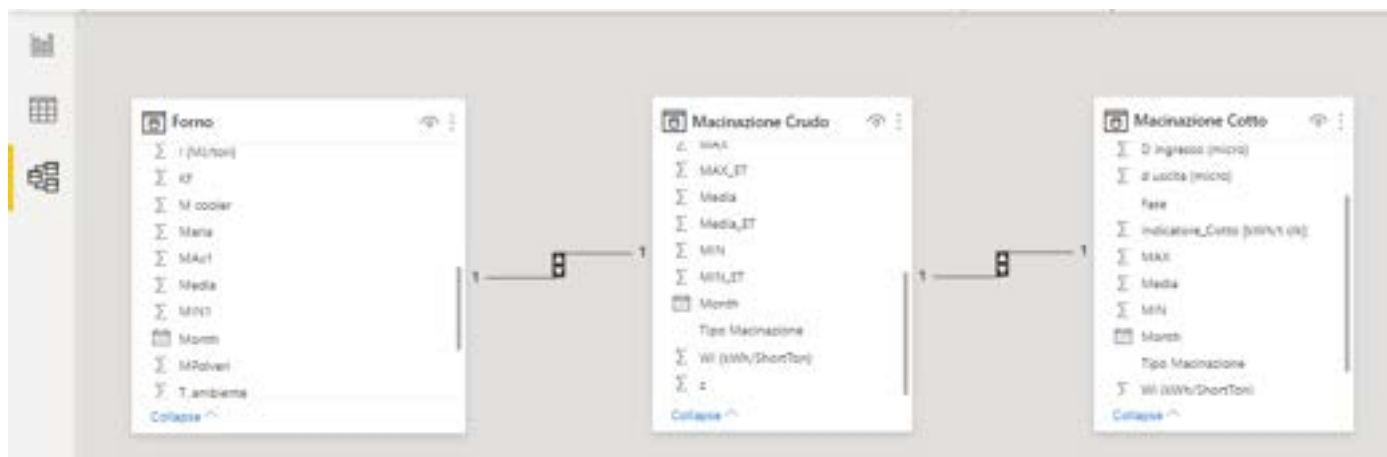


Figure 72- Collegamento tra fasi

Il cruscotto di monitoraggio

Una volta completato il database e definite le relazioni presenti tra i gruppi di dati, è stato finalmente possibile modellare il cruscotto di monitoraggio che rappresenta il punto focale per le aziende del settore: grazie ad esso è possibile inquadrare al meglio i consumi aziendali, confrontarli con i valori ideali, fare valutazioni, proporre soluzioni di miglioramento in maniera rapida ma accurata. La scelta dell'applicativo è stata fatta dopo attenta valutazione delle caratteristiche dei principali software con foglio di calcolo per sfruttare la sua estrema versatilità, scalabilità e adattabilità a casi differenti, unita alla efficacia della rappresentazione di sintesi, sia grafica che numerica dei risultati di performance.

Esso è composto di tre sezioni interdipendenti: Cruscotto, Composizione Indicatori, Storico Indicatori.

In figura 73 viene mostrato il cruscotto principale: in alto vi è la possibilità di scegliere l'orizzonte temporale di cui si vogliono visualizzare i dati, può essere selezionato un singolo mese, più mesi o tutti quelli a disposizione tramite il tasto "Select All". Nell'esempio sottostante è stato preso in considerazione il periodo da Gennaio ad Aprile 2019.

Scelto il periodo di interesse, sono in automatico mostrati i consumi delle tre fasi analizzate, espressi secondo le unità di misura prestabilite, questo è possibile grazie alla relazione creata tra i gruppi di dati nel paragrafo precedente. La visualizzazione è simile ad un indicatore Gauge, troviamo il valore minimo in assoluto tra tutti i valori in database in basso a sinistra, in basso a destra viene mostrato il valore massimo che assume il consumo, mentre al centro troviamo il valore attuale. In una colorazione più scura, troviamo il valore target o benchmark (ovvero l'indicatore definito in precedenza secondo gli studi effettuati da UniTuscia) inserito direttamente sulla barra di visualizzazione, come una lancetta. Essi sono stati mostrati con colori differenti: rosso se relativi al consumo di energia termica, azzurri per quelli di energia elettrica. Le unità di misura sono i kWh/tonnellata di clinker per gli indicatori relativi all'energia elettrica per semplificarne il confronto con i consumi che le aziende leggono da bolletta, per quelli termici invece è stato utilizzato il MJ/tonnellata di clinker per un confronto diretto con il consumo di combustibile.

In alto a destra, per ogni grafico, troviamo un valore percentuale, che indica l'efficienza della fase produttiva in quel mese o in più mesi. Essa è il rapporto tra il consumo teorico e quello effettivo. La percentuale si colora di rosso se il valore è <60%, di arancione se compresa tra 60 e 85%, di verde se superiore al 85%



Figure 73-Cruscotto di monitoraggio

In basso è possibile selezionare la sezione che si preferisce visualizzare tra le tre precedentemente elencate.

In figura 74 viene mostrata la seconda sezione del progetto che ha la finalità di mostrare all’utente dello strumento il peso dei vari componenti dell’indicatore; in particolare per la fase di cottura abbiamo visto che ciascun termine dell’equazione equivale ad un flusso di calore, ed è quindi importante evidenziarli per poter capire se sono presenti degli esuberi o stranezze. Paradossalmente, infatti, l’indicatore potrebbe essere in regola, ma i termini che lo compongono potrebbero non essere adeguati. Vediamo quindi, nella colonna a sinistra, la sezione del time range: essa è sincronizzata con quella della pagina precedente e successiva in modo da permettere all’utente dello strumento, di selezionare una volta sola i mesi di interesse e di non ripetere l’operazione nelle sezioni successive.

Nella zona centrale, abbiamo un grafico “a ciambella”, nel quale sono specificate le percentuali di ciascun termine, corredato da una legenda a destra. In basso, invece, è posizionata una tabella che permetta la visualizzazione dei valori numerici relativi ai singoli calori che compongono l’indicatore qualora le percentuali non fossero sufficientemente esaustive, oltre all’anno e al mese di riferimento.

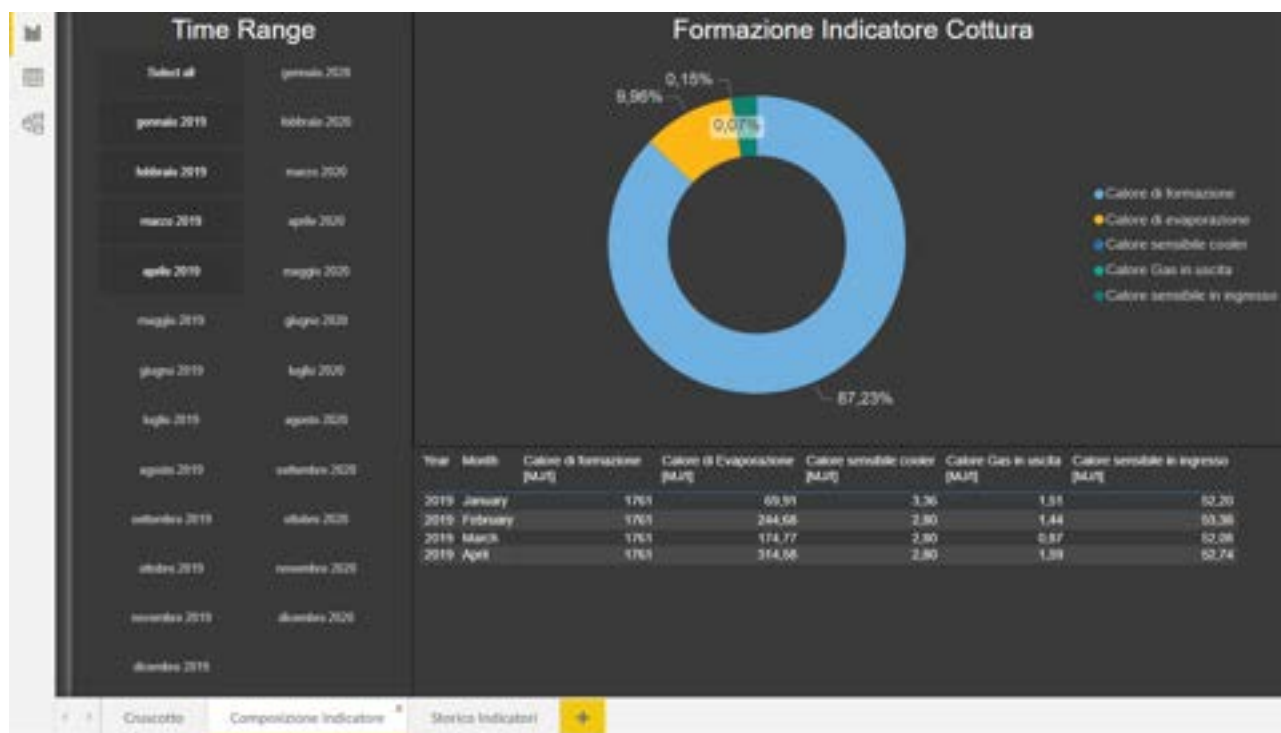


Figure 74- Composizione Indicatori

L'ultima sezione dello strumento è strutturata come mostrato in figura 75.

In basso a sinistra troviamo nuovamente il time range sia per poter tenere a mente il periodo di riferimento, sia perché esso può essere sempre modificato e tale modifica verrà apportata a tutte e tre le pagine in cui esso è presente.

In alto troviamo una tabella in cui vengono specificati i valori dei consumi suddivisi per fase e per mese, quindi non un valore medio come si vede nel Cruscotto iniziale, ma un vero e proprio report in cui sono elencati tutti i consumi mese per mese. Questa tabella permette di ordinare in senso crescente o decrescente ciascuna colonna, se si volesse sapere quindi qual è il mese in cui il consumo del crudo è maggiore basterebbe selezionare quella colonna per ordinare i dati in senso crescente o decrescente: il triangolo rivolto verso l'alto indica l'ordine crescente, verso il basso decrescente (cerchiato in rosso).

A destra troviamo invece quattro grafici a barre verticali: in base ai mesi selezionati viene mostrato l'andamento dei consumi e degli indicatori nel tempo. La linea indica sempre il valore di benchmark, mentre le barre indicano i consumi effettivi. Tramite uno slide presente nella parte inferiore del grafico è possibile allargare o restringere la visuale in maniera individuale per ciascun grafico, senza cambiare l'orizzonte temporale, come nell'ultimo grafico in basso a destra. Anche qui ritroviamo il colore azzurro per i consumi relativi al consumo di energia elettrica e rosso per quelli relativi all'energia termica.



Figure 75- Storico Indicatori

Per rapidità, è possibile selezionare come time range tutto l’orizzonte temporale presente nel database, tramite la presenza del tasto “Select All”. In questo modo è possibile, con una sola occhiata, comprendere quali fasi e in quali mesi è stato raggiunto il risultato desiderato e quali sono stati invece i mesi e le fasi meno efficienti.

In linea teorica i consumi risultano sempre maggiorati rispetto ai dati teorici rappresentati nel grafico a barre, in quanto nel calcolo degli indicatori teorici non sono tenute in considerazione tutte le perdite dovute a fermate, guasti, condizioni di lavoro non ideali.

In Figura 76 lo storico degli indicatori negli anni 2019-2020 presi in considerazione.



Figure 76- Storico Indicatore nell'arco di due anni

4. Conclusioni

Il calcolo delle prestazioni energetiche di un sistema di produzione industriale è molto complesso ed è fortemente influenzato dal tipo di sistema in esame. La presenza di un elevato numero di componenti, sistemi, fonti energetiche e prodotti all'interno di un impianto industriale conferma la possibilità di intervento per l'ottimizzazione delle prestazioni e la diminuzione dei consumi.

In questo lavoro è stata proposta l'analisi di due dei principali settori produttivi italiani: il vetro ed il cemento. Per quanto riguarda il vetro, l'analisi è stata leggermente più complessa a causa della vastità delle tipologie di vetro prodotto, sono stati analizzati i due processi più comuni ed energivori: la produzione del vetro cavo e del vetro piano, mentre il tipo di cemento analizzato è quello Portland. Queste analisi danno la possibilità di indagare le cause di variazione delle performances ed hanno l'obiettivo di supportare gli addetti alla gestione dell'energia nella definizione di una strategia di intervento.

A seguito della mappatura dei processi è stato possibile evidenziare le fasi più energivore, sulla base dei vettori energetici più utilizzati. Sulla base del lavoro svolto, l'Università della Tuscia ha potuto procedere alla definizione degli indicatori di prestazione teorici relativi alle fasi selezionate. Quindi si è arrivati alla parte fondamentale del presente lavoro: il calcolo e monitoraggio degli indicatori. È stato necessario reperire i valori per il calcolo degli indicatori teorici e i valori di consumo effettivi per poter effettuare un confronto continuo tra teorico e reale che aiutasse le aziende nel monitoraggio delle performance. Per semplificare la raccolta dati è stato sviluppato un foglio Excel da compilare, fornito alle aziende delle associazioni di categoria che hanno voluto mettere a disposizione la loro conoscenza e i loro dati al fine di completare il lavoro. Quest'ultimo è stato sviluppato in sostituzione ai sopralluoghi previsti nelle aziende del settore che sono state annullate a causa della situazione pandemica, i documenti Excel sono presenti in allegato al documento. Terminata la raccolta e classificazione dei dati sulla base della variabilità, nell'ultima parte di questo documento, si è realizzato un cruscotto di monitoraggio dei dati, da fornire alle singole aziende presente in allegato. È uno strumento che permetterà alle realtà produttive di poter effettuare un'autodiagnosi: le fasi maggiormente energivore del settore produttivo vengono monitorate costantemente ed in maniera intuitiva, semplificando il lavoro di interpretazione dei dati e soprattutto di confronto con i valori di riferimento. Tale strumento fornisce un supporto fondamentale per gli eventuali interventi da attuare per il miglioramento delle prestazioni.

Allegati

Al presente documento si aggiungono come allegati i seguenti file:

- ✎ Report sulla linea di attività di caratterizzazione energetica per il settore produttivo Cemento (*PDF*)
- ✎ Report sulla linea di attività di caratterizzazione energetica per il settore produttivo Vetro (*PDF*)
- ✎ Foglio di raccolta dati per il settore produttivo Cemento (*Excel*)
- ✎ Foglio di raccolta dati per il settore produttivo Vetro Piano (*Excel*)
- ✎ Foglio di raccolta dati per il settore produttivo Vetro Cavo (*Excel*)
- ✎ Foglio Database per l'analisi dei dati del settore produttivo Cemento (*Excel*)
- ✎ Foglio Database per l'analisi dei dati del settore produttivo Vetro Piano (*Excel*)
- ✎ Foglio Database per l'analisi dei dati del settore produttivo Vetro Cavo (*Excel*)
- ✎ Strumento di monitoraggio dei consumi per il settore produttivo Cemento (*Power-BI*)
- ✎ Strumento di monitoraggio dei consumi per il settore produttivo Vetro Piano (*Power-BI*)
- ✎ Strumento di monitoraggio dei consumi per il settore produttivo Vetro Cavo (*Power-BI*)

Bibliografia

- [1] L. Bartolini- Materiali da costruzione-Vol.I, struttura, proprietà e tecnologie di produzione- 2nd Edition- De agostini Scuola,2010, pp.178
- [2] Relazione Annuale 2012 – AITEC
- [3] Davenport, T. H., & Michael C., B. (1995). "Managing information about processes.". *Journal of Management Information Systems* 12.1, 57-80.
- [4] V. Alunno Rossetti, Il calcestruzzo: materiali e tecnologia, McGraw-Hill, 2003, pp. 181
- [5] La produzione del cemento a 360°-Buzzi Unicem, S.p.A.
- [6] Certificati Bianchi Presentazione dei progetti a Consuntivo (PPPM) Guida Operativa per il settore di produzione del vetro, Enea, 2014, pp. 8
- [7] L. Bartolini- Materiali da costruzione-Vol.I, struttura, proprietà e tecnologie di produzione- 2nd Edition- De agostini Scuola,2010, pp.343
- [8] Saint Gobain, Manuale tecnico del vetro, Fabbrica Pisana, Milano 1993, p. 7
- [9] B.M. Scalet, M. Garcia Munoz, A.Q. Sissa, S. Roudier, L. Delgado Sancho, Best Available Techniques (BAT): Reference Document for the Manufacture of Glass, JRC Reference reports,2012, ISBN 978-92-79-28284-3,pp.181

Indice Figure

Figure 1- Processo produttivo vetro cavo	7
Figure 2- Differenza tra cicli produttivi	8
Figure 3- Forno fusorio.....	9
Figure 4- Forno End Port	10
Figure 5- Forno Side-Port	11
Figure 6- Alimentatore	12
Figure 7- Formazione della goccia	12
Figure 8- Fasi di formatura per processo Soffio-Soffio	13
Figure 9- Fasi di formatura per processo Presso-Soffio	14
Figure 10- Analisi del processo produttivo del vetro cavo	17
Figure 11- Analisi dei consumi Vetro Cavo	18
Figure 12- Preparazione MP (IDEF-0).....	19
Figure 13- Fusione (IDEF-0).....	20
Figure 14- Formatura (IDEF-0)	21
Figure 15- Ricottura e trattamenti superficiali (IDEF-0).....	22
Figure 16- CQ e imballaggio (IDEF-0)	23
Figure 17- Servizi Ausiliari (IDEF-0)	24
Figure 18- Servizi Generali (IDEF-0).....	26
Figure 19-Struttura chimica vetro float	29
Figure 20-Processo float	30
Figure 21- Percentuale Materie prime Vetro Float.....	30
Figure 22- Processo di fusione	31
Figure 23- Processo di formatura Float.....	31
Figure 24- Distribuzione consumo energetico medio.....	33
Figure 25- Schematizzazione energetica processo produttivo	34
Figure 26- Analisi dei consumi Vetro piano	35
Figure 27- Preparazione materie prime (IDEF-0)	35
Figure 28- Fusione (IDEF-0).....	36
Figure 29- Formatura (IDEF-0)	37
Figure 30- Ricottura (IDEF-0).....	38
Figure 31-Controllo qualità, taglio e imballaggio.....	39
Figure 32- Passi necessari allo sviluppo del cruscotto	40
Figure 33- Foglio di raccolta dati Vetro.....	41
Figure 34- Database Fusione.....	42
Figure 35- Database Power BI.....	43
Figure 36- Collegamento tra Fasi	43
Figure 37- Cruscotto per vetro cavo	44

Figure 38- Cruscotto per vetro piano.....	45
Figure 39- Composizione Indicatore (Comune)	46
Figure 40- Storico Indicatori vetro cavo.....	47
Figure 41- Storico indicatori vetro piano	47
Figure 42- Composizione del cemento Portland.....	51
Figure 43- Processo produttivo Cemento	52
Figure 44- Frantoio.....	53
Figure 45- Molino a rulli.....	54
Figure 46-Richieste di energia termica specifica per processo.....	55
Figure 47- Impianto di cottura	56
Figure 49-Processo a 4 stadi	57
Figure 48- Struttura di un ciclone	57
Figure 50-Tabella entalpica Cicloni	57
Figure 51- Forno rotante.....	58
Figure 52 -Raffreddatore a griglia	59
Figure 53-Preriscaldamento Lepol	61
Figure 54 - Macinazione del cotto	61
Figure 55-Analisi statistica sul consumo di vettori energetici	63
Figure 56-Grafico a torta dei vettori energetici	64
Figure 57- Mappatura processo produttivo Cemento.....	64
Figure 58- Schema Energetico Cemento.....	65
Figure 59- Cava (IDEF-0).....	65
Figure 60- Trattamento MP Cemento.....	66
Figure 61- Macinazione crudo (IDEF-0).....	67
Figure 62- Forno cottura cemento (IDEF-0).....	68
Figure 63- Macinazione clinker cotto (IDEF-0).....	69
Figure 64- Insacco e Spedizione (IDEF-0)	70
Figure 65- Servizi Ausiliari	71
Figure 66- Servizi Generali (IDEF-0).....	72
Figure 67 - Passi necessari allo sviluppo del cruscotto	73
Figure 68- Tabella dati statici e dinamici fase cottura	74
Figure 69- Tabella dati statici e dinamici fasi di Macinazione.....	74
Figure 70- Pagina Iniziale di Inserimento Dati	75
Figure 71- Database Macinazione Cotto in Power BI.....	76
Figure 72- Collegamento tra fasi.....	76

Figure 73-Cruscotto di monitoraggio	78
Figure 74- Composizione Indicatori	79
Figure 75- Storico Indicatori.....	80
Figure 76- Storico Indicatore nell'arco di due anni.....	80