



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



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo e applicazione di indicatori di consumo ideali per i settori del Vetro e del Cemento

Santolamazza A., Rubino G., Scungio M., Facci A. L.



Report RdS/PTR2019/093

SVILUPPO E APPLICAZIONE DI INDICATORI DI CONSUMO IDEALI PER I SETTORI DEL VETRO E DEL CEMENTO

Santolamazza A., Rubino G., Scungio M., Facci A. L.
(CINTEST)

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

Linea di attività: LA4.11 - Sviluppo e applicazione di metodologie di benchmark ideali dei consumi energetici per unità di prodotto dei principali settori energivori italiani

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 ideali per unità di prodotto dei principali settori energivori italiani”*

Responsabile scientifico ENEA: Fabrizio Martini

Responsabile scientifico CINTEST: Andrea Luigi Facci

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

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 FORMULAZIONI DI INDICI DI RIFERIMENTO PER IL SETTORE DEL VETRO, CODICE ATECO 23.1	7
2.1 DESCRIZIONE DEL SETTORE ANALIZZATO	7
2.1.1 <i>Processo di fusione del vetro</i>	8
2.1.2 <i>Produzione del vetro cavo</i>	12
2.1.3 <i>Produzione del vetro piano</i>	13
2.2 FORMULAZIONE DEGLI INDICI IDEALI PER LA FUSIONE	15
2.3 FORMULAZIONE DEGLI INDICI IDEALI PER LA FORMATURA VETRO CAVO	20
2.4 FORMULAZIONE DEGLI INDICI IDEALI PER IL PROCESSO FLOAT.....	20
2.5 RIEPILOGO INFORMAZIONI RICHIESTE DAL CALCOLO DEGLI INDICATORI IDEALI DEL VETRO.....	21
2.6 INTERVENTI DI RIDUZIONE DEI CONSUMI SULLA BASE DEGLI INDICI DI CONSUMO IDEALE	22
2.7 CONCLUSIONI DEL CAPITOLO.....	22
3 FORMULAZIONI DI INDICI DI RIFERIMENTO PER IL SETTORE DEL CEMENTO, CODICE ATECO 23.51.....	23
3.1 DESCRIZIONE DEL SETTORE ANALIZZATO	23
3.1.1 <i>Processo di macinazione del crudo</i>	24
3.1.2 <i>Processo di cottura del clinker</i>	24
3.1.3 <i>Processo di macinazione del cotto</i>	26
3.2 FORMULAZIONE DEGLI INDICI IDEALI PER LA MACINAZIONE DEL CRUDO	26
3.3 FORMULAZIONE DEGLI INDICI IDEALI PER LA COTTURA DEL CLINKER	27
3.4 FORMULAZIONE DEGLI INDICI IDEALI PER LA MACINAZIONE DEL COTTO	29
3.5 RIEPILOGO INFORMAZIONI RICHIESTE DAL CALCOLO DEGLI INDICATORI IDEALI DEL CEMENTO	30
3.6 INTERVENTI DI RIDUZIONE DEI CONSUMI SULLA BASE DEGLI INDICI DI CONSUMO IDEALE	31
3.7 CONCLUSIONI DEL CAPITOLO.....	31
4 CRUSCOTTO DI INDICI DI PRESTAZIONE ENERGETICA	33
5 CONCLUSIONI.....	34
6 APPENDICE	35
6.1 RIFERIMENTI AGGIUNTIVI PER LA FORMULAZIONE DEGLI INDICATORI IDEALI RELATIVI ALLA PRODUZIONE DEL VETRO	35
6.1.1 <i>Calcolo delle entalpie standard e dei calori specifici</i>	35
6.1.2 <i>Calcolo di $H_{fumi,u}$</i>	36
6.2 RIFERIMENTI AGGIUNTIVI PER LA FORMULAZIONE DEGLI INDICATORI IDEALI RELATIVI ALLA PRODUZIONE DEL CEMENTO	36
6.2.1 <i>Determinazione della composizione di cemento prodotto in cottura a partire dalla composizione delle materie prime</i>	36
6.2.2 <i>Indice di lavoro di macinazione medio secondo Bond (Wi)</i>	37
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	38
8 BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	39

Sommario

Il lavoro di ricerca della presente linea di attività si inquadra in un più ampio progetto triennale che ha l'obiettivo finale di sviluppare degli indicatori che possano essere assunti come riferimento di eccellenza in termini di prestazione energetica all'interno di specifici settori produttivi di interesse per il panorama nazionale.

Durante la seconda annualità del progetto, si è proceduto ad approfondire, specializzare e applicare la metodologia di definizione degli indici di prestazione ideali definita nel primo anno di lavoro.

A partire dall'analisi bibliografica e dalla metodologia generale per la definizione di indici di prestazione di riferimento sviluppata nel precedente anno sono stati analizzati due settori molto significativi dal punto di vista energetico, identificati in accordo con ENEA: il settore del **vetro** e il settore del **cemento**.

Gli obiettivi del secondo anno per il progetto sono stati quindi i seguenti:

- Applicazione della metodologia per lo sviluppo di indicatori di prestazione di riferimento teorici per i due settori.
- Validazione dei risultati attraverso contatti con le imprese e con le associazioni di categoria.

Il gruppo di ricerca si è inizialmente concentrato sullo studio del processo produttivo dei due settori, il settore della produzione del vetro e il settore della produzione del cemento, analizzando le fasi principali del processo produttivo e le caratteristiche più importanti in termini di parametri di influenza e vettori energetici utilizzati e studiandone le caratteristiche fisiche, termodinamiche e chimiche.

È stata poi avviata un'analisi della letteratura tecnico-scientifica a supporto della definizione di indicatori di prestazione energetica di riferimento ideale per le principali fasi ritenute più significative, selezionate in concordanza con le analisi condotte dall'Università di Salerno.

In particolare, per il settore della produzione del vetro sono stati analizzati i processi relativi alla produzione del vetro cavo e piano. Andando ad approfondire l'analisi sono state quindi identificate delle formulazioni matematiche per gli indicatori di prestazione ideale per i seguenti processi:

- Processo di fusione
- Processo di formatura del vetro cavo
- Processo Float

Allo stesso modo, sono stati analizzati i processi relativi alla produzione del cemento. Andando ad approfondire l'analisi sono state identificate delle formulazioni matematiche per gli indicatori di prestazione ideale per i seguenti processi:

- Processo di macinazione del crudo
- Processo di cottura del clinker
- Processo di macinazione del cotto

Entrambe le analisi e le conseguenti formulazioni definite dal gruppo di lavoro per gli indicatori di prestazione sono state condotte con il supporto e il riscontro fornito dalle associazioni di categoria **Assovetro** e **Federbeton**, interpellate grazie alla collaborazione di ENEA.

1 Introduzione

Il lavoro presentato in questa relazione è relativo ad una specifica linea di attività per il 2020, secondo anno di un progetto di ricerca triennale 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 afferiscono l'Università degli studi della Tuscia e l'Università di Roma "Tor Vergata".

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.

Il lavoro di ricerca della presente linea di attività si inquadra quindi in un più ampio progetto triennale che ha l'obiettivo finale di sviluppare degli indicatori che possano essere assunti come riferimento di eccellenza in termini di prestazione energetica, e che possano essere applicati dalle aziende all'interno di specifici settori produttivi per poter confrontare le proprie prestazioni, valutare margini di miglioramento e definire adeguate strategie di efficientamento energetico.

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.

Gli obiettivi, da conseguire in tre anni, dell'attività di ricerca prevedono:

- Lo studio dello stato dell'arte per quanto riguarda l'utilizzo degli indicatori di prestazione energetica e la determinazione analitica dei consumi energetici industriali;
- Lo sviluppo di un metodo per la definizione indicatori di prestazione di riferimento specifici, utili per stabilire le prestazioni energetiche di ciascun settore industriale;
- Lo sviluppo di indicatori di prestazione energetica di riferimento specifici per i principali settori produttivi, stabiliti in collaborazione con ENEA;

Nel suo sviluppo integrale, l'attività vuole quindi fornire alle aziende, degli indicatori di prestazione con cui poter confrontare le proprie prestazioni ed utili per sviluppare una strategia volta al miglioramento dell'efficienza energetica.

Durante la seconda annualità del progetto, si è proceduto ad approfondire, specializzare e applicare la metodologia di definizione degli indici di prestazione ideali definita nel primo anno di lavoro.

A partire dall'analisi bibliografica e dalla metodologia generale per la definizione di indici di prestazione di riferimento sviluppata nel precedente anno sono stati analizzati due settori molto significativi dal punto di vista energetico, identificati in accordo con ENEA: il settore del **vetro** e il settore del **cemento**.

Gli obiettivi del secondo anno per il progetto sono quindi i seguenti:

- Applicazione della metodologia per lo sviluppo di indicatori di prestazione di riferimento teorici per i due settori.
- Validazione dei risultati attraverso contatti con le imprese e con le associazioni di categoria.

Per raggiungere questi obiettivi, l'attività della seconda annualità ha quindi seguito i seguenti step in maniera parallela per i due settori Vetro e Cemento:

- 1 Studio del settore per identificare le caratteristiche delle fasi e i parametri di influenza relativi al consumo energetico del processo
- 2 Definizione interna dei processi da selezionare in collaborazione con Salerno e scambio con l'associazione di categoria

- 3 Individuazione dei contributi energetici delle fasi esaminate
- 4 Definizione delle potenziali formulazioni degli indici ideali
- 5 Validazione dei risultati attraverso condivisione con le imprese e con le associazioni di categoria

2 Formulazioni di indici di riferimento per il settore del vetro, codice ATECO 23.1

2.1 Descrizione del settore analizzato

L'industria del vetro è rappresentata dal settore Ateco 23.1 "Fabbricazione di vetro e prodotti di vetro", appartenente al comparto manifatturiero C della fabbricazione di altri prodotti della lavorazione di minerali non metalliferi.

Le attività che caratterizzano il settore del vetro si possono distinguere in due categorie: la fabbricazione di quattro tipologie distinte di vetro (piano, cavo, fibre di vetro e altro in cui rientrano le produzioni artistiche) e le relative lavorazioni.



Figura 1. Scomposizione codice Ateco 23.1 "Fabbricazione di vetro e prodotti di vetro"[1]

Il *Rapporto di Sostenibilità 2020* redatto da Assovetro (Associazione Nazionale degli Industriali del Vetro), associazione di categoria di riferimento per le aziende del settore e aderente a Confindustria, offre una panoramica sull'industria del vetro. Tramite la sua consultazione è possibile riscontrare come nel periodo 2014-2018 la produzione del vetro in Italia abbia mostrato un andamento crescente (da 4.845.277 tonnellate nel 2014 a 5.342.046 tonnellate nel 2018) e definire quali tra le diverse tipologie di settori di produzione del vetro siano quelle più diffuse nel panorama italiano.

In particolare, rifacendosi alla suddivisione presentata in **Figura 1**, la produzione di vetro piano e la produzione di vetro cavo rappresentano i settori che registrano una produzione maggiore. In **Tabella 1** è visibile l'andamento delle produzioni totali e di questi due specifici settori in Italia nel quadriennio 2014-2018.

Tabella 1. Produzione di vetro 2014 – 2018 (ton) [2]

Anno	Produzione vetro piano (tonnellate)	Produzione vetro cavo (tonnellate)
2014	989.125	3.856.152
2015	838.017	3.936.885
2016	887.125	4.061.931
2017	873.863	4.173.007
2018	1.054.763	4.287.283

Nella fabbricazione del vetro industriale, la scelta della composizione del prodotto si basa su tre considerazioni principali:

- Requisiti del prodotto
- Requisiti di processo (alcuni elementi possono essere aggiunti alla composizione per facilitare il processo o variare il tasso di produzione)
- Costi

La composizione finale risulterà dal miglior compromesso tra questi tre aspetti per la specifica azienda.

Da qui deriva la variabilità presente nell'industria tra le tante composizioni di vetro. Possono però essere definite alcune principali famiglie di vetri, le cui caratteristiche sono riassunte in **Tabella 2**.

Tabella 2. Principali famiglie di vetri: applicazioni e composizione[3]

Famiglia di vetri	Principali costituenti	Applicazioni
Soda lime silicate	Na ₂ O CaO SiO ₂	Vetro piano, tableware, contenitori, lampadine, lenti
Sodium borosilicate	Na ₂ O B ₂ O ₃ SiO ₂	Tubi, fari, utensili di cucina, vetri speciali da laboratorio
E-glass	CaO Al ₂ O ₃ B ₂ O ₃ SiO ₂ (can also be boron-free)	Rinforzo per plastiche e polimeri Fibre per circuiti stampati
C-glass	Na ₂ O CaO B ₂ O ₃ SiO ₂	Lana di vetro per isolamento o rinforzo
S-glass	MgO Al ₂ O ₃ SiO ₂	Lana di vetro per rinforzo
LCD glass	Al ₂ O ₃ CaO B ₂ O ₃ BaO SiO ₂	Vetro di supporto per display
Lead crystal glass	PbO K ₂ O SiO ₂	Vetro artistico, tableware
Vitreous silica	SiO ₂	Telecomunicazioni, lampade alogene, elementi ottici, vetri speciali da laboratorio

La produzione industriale del vetro è un'attività complessa e ad alta intensità energetica. Infatti, la produzione del vetro è un'attività che richiede alte temperature, con conseguente emissioni di prodotti da combustione e ossidazione ad alta temperatura dell'atmosfera [4].

2.1.1 Processo di fusione del vetro

Le materie prime vengono prelevate automaticamente, pesate, mescolate e inviate, mediante nastri trasportatori, o tubazioni idonee al trasporto pneumatico, alle tramogge di caricamento dei forni fusori. Una quantità variabile di rottame di vetro, opportunamente frantumato, viene aggiunta alle materie prime per diminuire il consumo energetico necessario al processo di fusione e di conseguenza anche la generazione di anidride carbonica.

La miscela tramite nastri trasportatori raggiunge il forno, prevalentemente alimentato a gas metano, dove viene sottoposta al processo di fusione ad alta temperatura, ovvero tra i 1400 °C e 1600 °C.

La fusione del vetro industriale avviene in forni a bacino con ciclo continuo, controllati da sistemi di supervisione per tenere sotto controllo i parametri di funzionamento ed ottenere una corretta vetrificazione delle materie prime.

Allo scopo di aumentare l'efficienza termica del processo di fusione l'aria comburente viene preriscaldata a spese del calore dei fumi di combustione. I sistemi di preriscaldamento possono essere di tipo recuperativo, ovvero con recupero di calore mediante scambiatori metallici o ceramici (forni "unit melter"), o di tipo rigenerativo, dotati di camere in materiale refrattario per il recupero di calore (rigeneratori). In questo secondo caso, l'utilizzo di un sistema di preriscaldamento a rigenerazione implica che il processo di recupero termico sia discontinuo; il forno, infatti, è dotato di due camere che lavorano in maniera alternativa: prima

ricevendo i fumi caldi e scaricandoli a circa 400-450 °C, in seguito ricevendo l'aria di combustione fredda e preriscaldandola fino ad una temperatura di circa 1350 °C.

Esiste anche la possibilità di utilizzare ossigeno puro in sostituzione dell'aria comburente (ossi-combustione).

Inoltre, nel forno possono essere presenti anche dei booster elettrici, allo scopo di fornire una parte dell'energia necessaria per la fusione (in genere tra il 10% ed il 30% del totale).

I fumi in uscita dal forno, ad una temperatura intorno ai 400°C, vengono convogliati verso l'elettrofiltro (alla cui uscita la temperatura è intorno ai 200°C) e l'estrattore di coda.

Prima di essere inviati in atmosfera i fumi vengono trattati in modo da neutralizzare i gas acidi.

Nell'industria del vetro, per il processo di fusione possono quindi essere utilizzati forni di tipologie diverse:

- **Recuperativo** (Unit melter - recupero di calore mediante scambiatori metallici)
- **Rigenerativo**
 - **End-port** (forni con fiamma ad U e camere di rigenerazione posteriori)
 - **Side-port** (forni a fiamma trasversale e camere di rigenerazione laterali)
- **Totalmente elettrico**
- **Oxy-fuel** (usando ossigeno non richiede alcun sistema di recupero dei gas combusti e del calore)

In **Figura 2** sono riportati dei valori di riferimento di mercato per gli indici di consumo energetico dei forni al variare della tipologia di forno, del tasso di produzione e della

Tipologia di forno	Bottiglie [GJ/t]	Flaconeria [GJ/t]	Casalingo [GJ/t]	Piano [GJ/t]
Elettrico				
< 50 t/g		8,6	8,6	
50-100 t/g		7,9	7,8	
End port				
50-100 t/g	5,6	5,8	6,4	
100-250 t/g	5	5,4	4,6	
250-400 t/g	4,4			
>400 t/g	4,2			
Unit melter				
50-100 t/g	5,3			
100-300 t/g	5,1	6		
300-400 t/g	4,9			
Side port				
250-400 t/g	4,9			
400-600 t/g	4,7			6,7
≥600 t/g				6,2

Figura 2. Indici di consumo specifico per tipologie di forni [1]

Forno recuperativo e rigenerativo: principio di funzionamento

Nel caso di **forni recuperativi** i fumi caldi passano attraverso degli scambiatori di calore metallici a fascio tubiero per preriscaldare, in controcorrente, l'aria in entrata che può raggiungere temperature di circa 800°C. In Figura 3

Nel caso di **forni rigenerativi**, il processo di recupero termico è discontinuo. Il forno è dotato di due camere di rigenerazione che lavorano alternativamente, in una prima fase ricevendo i fumi caldi e scaricandoli a circa 400-450°C ed in una seconda fase ricevendo l'aria di combustione fredda e preriscaldandola fino ad una temperatura di circa 1350°C. In Figura 4

L'immissione dell'aria comburente è di tipo forzato, realizzata tramite l'impiego di ventilatori elettrici.

RECUPERATIVO

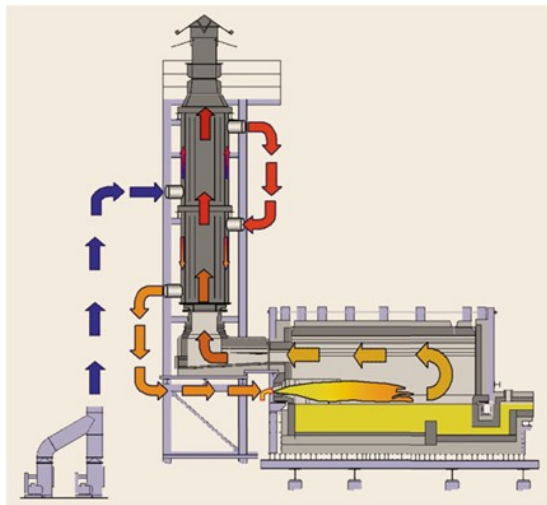


Figura 3. Rappresentazione forno recuperativo [3]

RIGENERATIVO

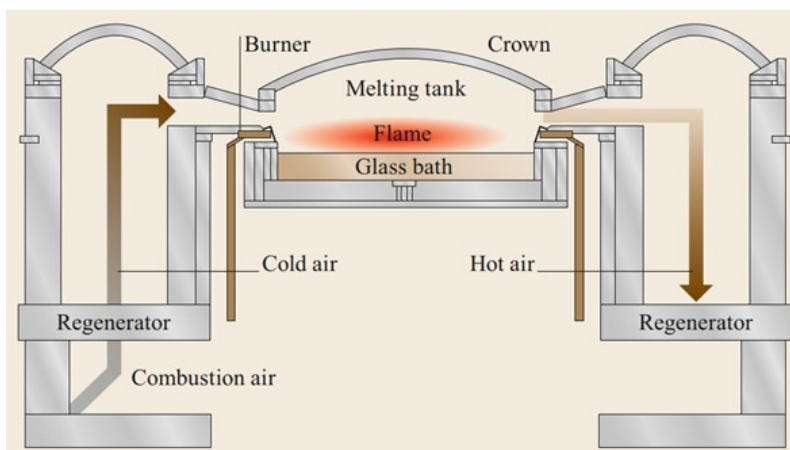


Figura 4. Rappresentazione forno rigenerativo [3]

Dall'analisi delle diagnosi pervenute ad ENEA è stato evidenziato come i forni rigenerativi siano al momento la tipologia più diffusa nel settore produzione **vetro cavo**.

In particolare, la tipologia **End-port** è la più diffusa.

	Unit-melter	Side-port	End-Port	Oxy Fuel	Totalmente elettrico	Altro
% presenza su 39 diagnosi	10%	8%	74%	5%	8%	3%
% presenza su 35 diagnosi*	11%	9%	83%	6%	9%	3%

* Alcune diagnosi non risultano effettivamente appartenere alla produzione, quindi non presentano fase di fusione.

Una esclusa perché presente solo il file excel, non il documento pdf (ISO 50001).

Per la produzione del **vetro piano**, invece, la scelta di forno è già vincolata: si utilizzano i forni di tipologia **Side-port**.

Principali caratteristiche dei forni rigenerativi

I rigeneratori possono essere posizionati **a lato o sul retro del forno**: nel primo caso il forno è definito **Side-port**, mentre se i rigeneratori sono posizionati nella parte posteriore della vasca di fusione i forni sono definiti **End-port**.

Le fiamme prodotte sono generalmente più lunghe nel caso di forni End-port, consentendo minori perdite di calore strutturali. I profili di temperatura possono essere più facili da regolare però nei forni Side-port.

Oltre ai bruciatori a gas nel forno possono essere presenti dei **booster elettrici**, elettrodi posti alla base del forno allo scopo di fornire una parte dell'energia necessaria per la fusione (in genere tra il 10% ed il 30% del totale).

La percentuale di riutilizzo di **rottame** è variabile a seconda del colore e della tipologia di vetro (il vetro cavo permette maggiori quantità, il piano solitamente si attesta a livelli inferiori)

Come già citato, nella **produzione di vetro piano** si utilizzano invece i forni di tipologia **Side-port**.

Di seguito sono rappresentate rispettivamente le due tipologie di forno: End-port (in [Figura 5](#)) e Side-port (in [Figura 6](#)).

END-PORT

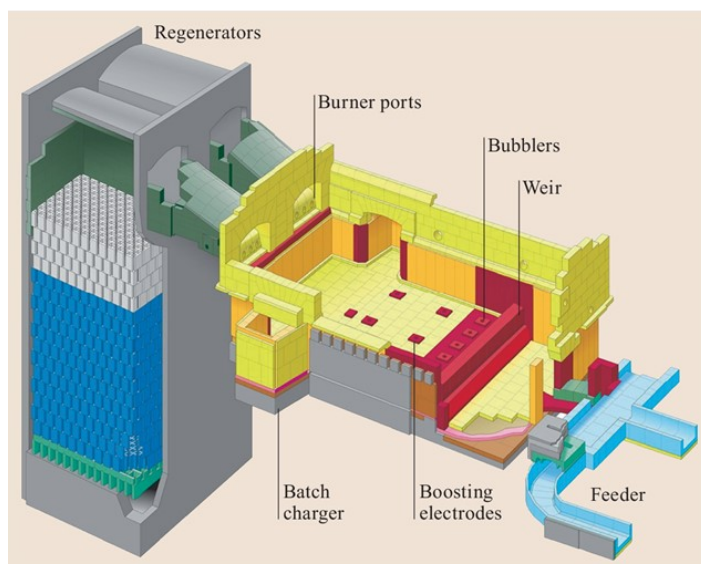


Figura 5. Rappresentazione forno rigenerativo End-port [3]

SIDE-PORT

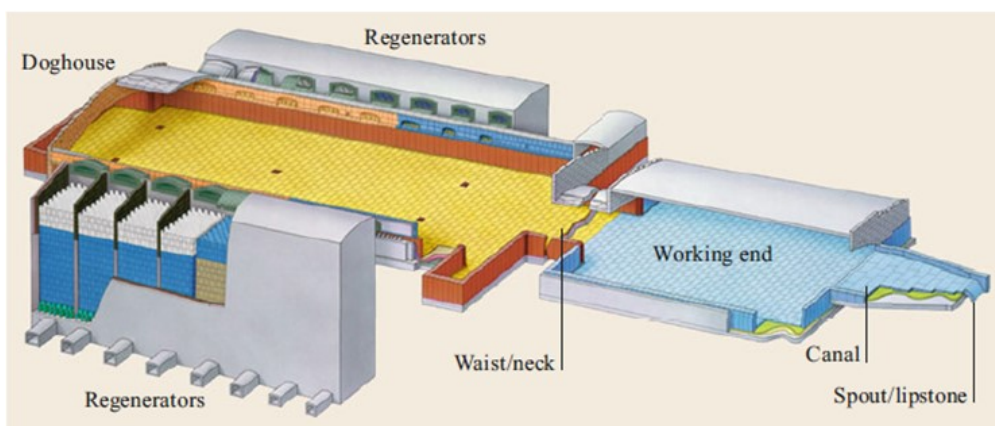


Figura 6. Rappresentazione forno rigenerativo Side-port [3]

2.1.2 Produzione del vetro cavo

Di seguito si riportano le diverse fasi di lavorazione che caratterizzano il processo produttivo del vetro cavo:

- **Fusione delle materie prime**

Le materie prime, opportunamente dosate, vengono miscelate e immesse nella prima vasca del forno fusorio dove la miscela vetrosa viene riscaldata e fusa (1.400-1.600°C). Qui il vetro subisce fusione ed affinazione, liberando le bolle che si formano per il rilascio di anidride carbonica.

Il liquido fuso passa dalla prima vasca del forno attraverso una gola sommersa (al fine di permettere il passaggio solo alla parte più pesante del vetro, priva di bolle) ad una seconda vasca per il raffreddamento. Da qui poi partono i canali di condizionamento termico (feeders) utilizzati per regolare ulteriormente la temperatura. Qui il vetro può anche essere colorato attraverso l'aggiunta di pigmenti.

In **Figura 7** è riportata una schematizzazione del forno per la fusione delle materie prime.

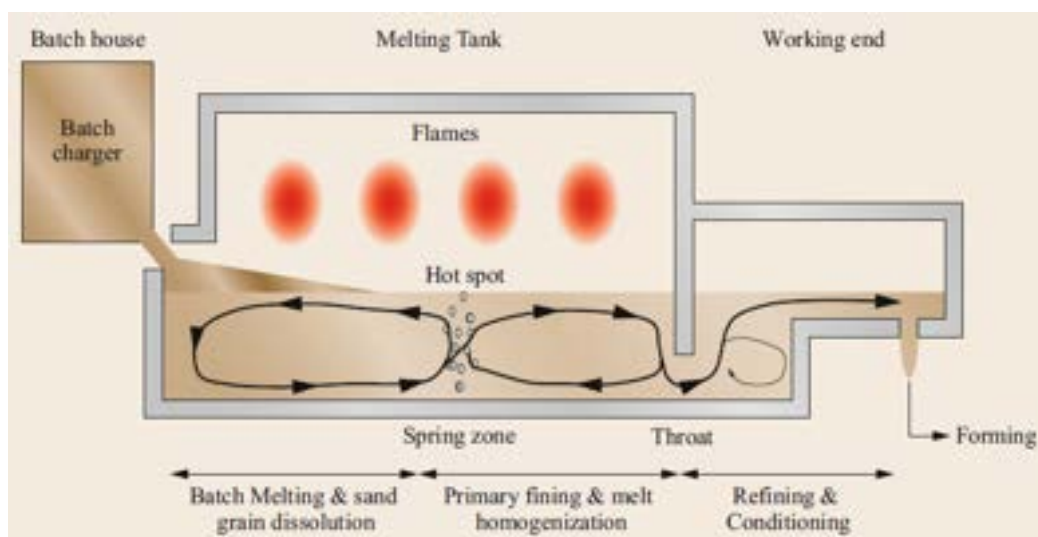


Figura 7. Rappresentazione del forno per la fusione del vetro, differenziando i processi interni che avvengono durante la fase [3]

- **Formatura**

Una volta tagliata la goccia di vetro incandescente dalle cesoie presenti a valle del feeder, il vetro fuso, sotto forma di gocce, viene inviato alle macchine di **formatura**.

Il processo di formatura dei contenitori può essere di tre tipologie: il pressato diretto, il soffio-soffio ed il presso-soffio. Gli stampi, sia inizialmente durante l'abbozzatura che poi durante la finitura, sono raffreddati con aria ventilata attraverso un sistema di canalizzazioni allo scopo di solidificare il contenitore.

Soffio-soffio: utilizza, sia per la fase iniziale che per la finitura dell'articolo in vetro, la soffiatura mediante aria compressa. In **Figura 8** sono evidenziati i passaggi elementari del processo di formatura soffio-soffio.

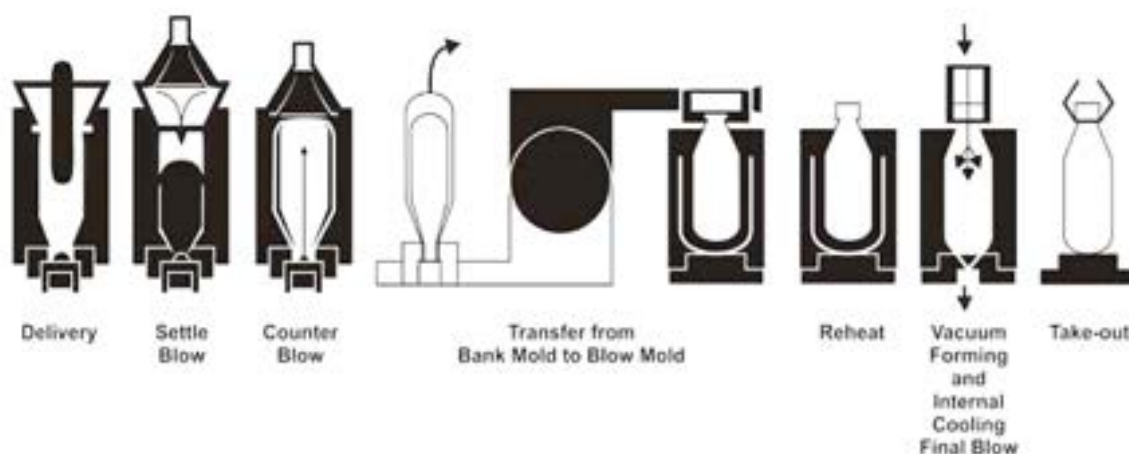


Figura 8. Schematizzazione del processo soffio-soffio [3]

Presso-soffio: consiste in una fase iniziale eseguita mediante pressatura e successivamente la forma desiderata viene completata mediante soffiatura con aria compressa. In **Figura 9** sono evidenziati i passaggi elementari del processo di formatura presso-soffio.

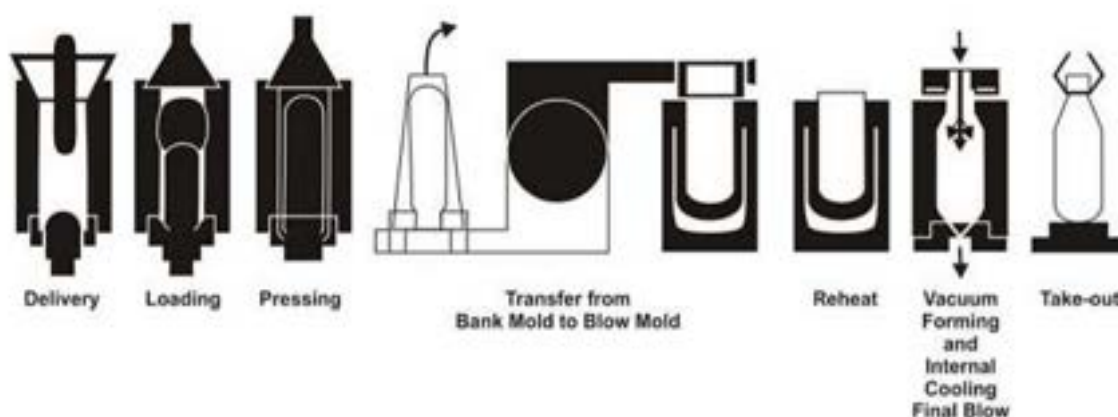


Figura 9. Schematizzazione del processo presso-soffio [3]

- ***Trattamento superficiale a caldo, controllo qualità, imballaggio***

I contenitori usciti dalle macchine formatrici subiscono un trattamento superficiale a caldo, (500-600°C), prima di essere inviati ai conveyor del forno di ricottura. Il processo di ricottura ha lo scopo di aumentare la resistenza meccanica del vetro e prevede che il vetro venga portato alla temperatura di 550 °C e raffreddato lentamente in condizioni controllate allo scopo di eliminarne le tensioni. Si passa poi all'ispezione automatica per il controllo qualità ed infine all'imballaggio.

2.1.3 Produzione del vetro piano

Il vetro piano, comunemente chiamato vetro float, deve il suo nome al procedimento di fabbricazione industriale del vetro sviluppato da Pilkington alla fine degli anni '50.

Il termine “float” deriva dal verbo inglese “to float” che significa “galleggiare”, infatti – ad un certo punto del processo produttivo – la massa vetrosa passa dal bacino di fusione al bagno di stagno. Il vetro, quindi, galleggia sullo stagno e si distribuisce per formare una lastra uniforme.

Di seguito si riportano le diverse fasi di lavorazione che caratterizzano il processo produttivo del vetro float:

▪ **Fusione delle materie prime**

Le materie prime contenute nei silos vengono miscelate e umidificate. La miscela vetrificabile così ottenuta viene convogliata, mediante l'utilizzo di nastri trasportatori, nel forno fusorio in cui la temperatura raggiunge circa 1500 °C.

▪ **Processo Float**

Con il processo Float, il vetro fuso viene alimentato dalla fornace su un bagno contenente stagno fuso a circa 1000-1100°C (la temperatura di fusione dello stagno è di 232°C, mentre quella di ebollizione è di 2602°C). L'equilibrio tra le forze gravitazionali e la tensione superficiale produce una lastra di spessore uniforme.

Il nastro di vetro viene sollevato dal bagno di stagno a una temperatura di circa 600°C, a cui la viscosità è sufficientemente alta per consentirne l'estrazione senza deformazioni.

L'atmosfera sopra il bagno è controllata in quanto si deve garantire che sia neutra o leggermente riducente per evitare l'ossidazione del bagno.

In **Figura 10** è rappresentata una schematizzazione del processo Float con visione sia laterale che dall'alto al fine di mostrare il comportamento del nastro di vetro e i dettagli del processo.

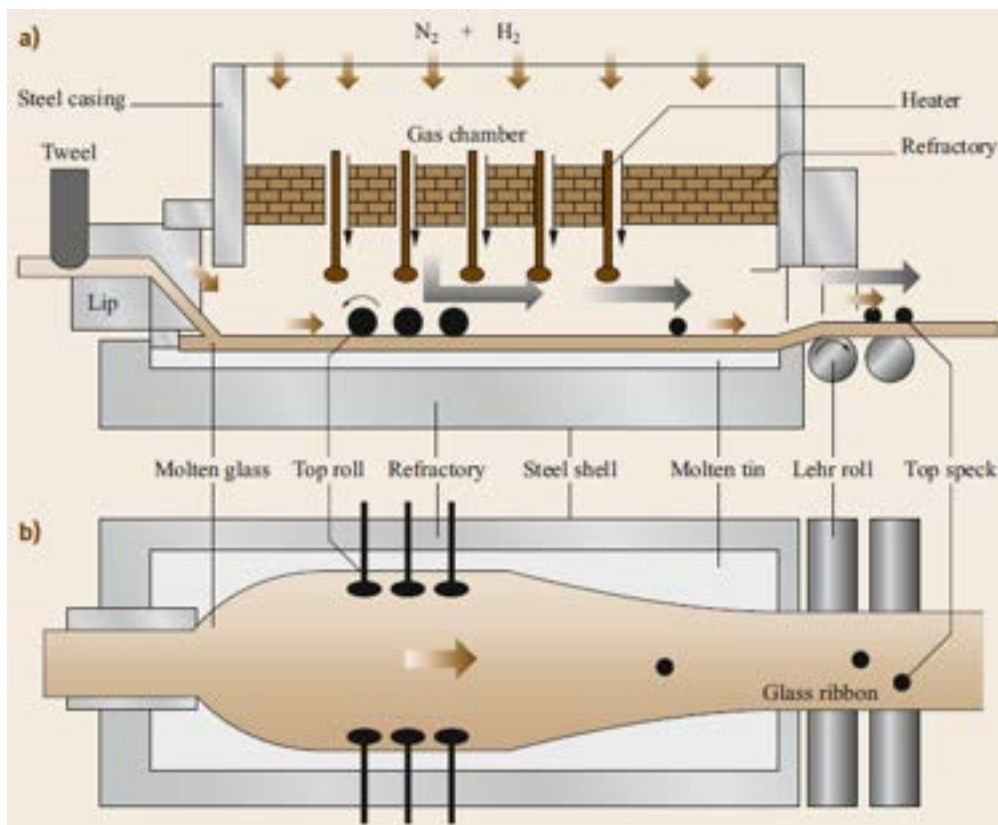


Figura 10. Processo Float – a) Visione laterale; b) Visione dall'alto [3]

▪ **Ricottura**

Il nastro di vetro, deposto a 600 °C sui rulli di un tunnel di raffreddamento lungo circa 100 metri, si raffredda sotto controllo fino alla temperatura ambiente. Intorno ai 500 °C il nastro di vetro acquista le proprietà di un solido perfettamente elastico.

▪ **Squadratura**

Una volta raffreddato, il nastro di vetro viene tagliato in lastre con l'eliminazione dei bordi longitudinali.

2.2 Formulazione degli indici ideali per la fusione

La prima attività necessaria alla definizione di un indice adatto a rappresentare il consumo di energia ideale nel processo di fusione e che potesse essere utile ad un confronto con gli indici reali definiti tramite la raccolta di dati dal campo è stata l'analisi dello stato dell'arte della lettera scientifica sul tema.

Diversi autori in letteratura hanno prestato attenzione alla modellizzazione del consumo energetico delle fornaci industriali per la produzione di vetro.

Per fare ciò sono state utilizzate sia metodologie statistiche basate su risultanze empiriche che formulazioni termodinamiche o simulazioni termo-fluidodinamiche.

Nella totalità dei casi, però, lo scopo della ricerca si è focalizzato sempre sulla definizione di una formulazione che replicasse il fenomeno reale, comprensivo delle perdite, non in grado di rappresentare quindi l'idealità del processo ricercata nella nostra attività al fine di generare un riferimento ideale a cui le aziende possano tendere nel loro percorso di efficientamento.

In **Tabella 3** viene riportata una sintesi delle fonti scientifiche analizzate.

Tabella 3. Riferimenti bibliografici riguardanti il processo di fusione e la sua analisi.

Titolo	Anno	Fonte
Handbook of Glass	2019	[3]
The industrial glass melting process	2008	[5]
Model based energy benchmarking for glass furnace	2007	[6]
Thermodynamic calculation of exploited heat used in glass melting furnace	2011	[7]
Prospects and physical limits of processes and technologies in glass melting	2019	[8]
Monitoring and Targeting in the glass manufacturing industries	1998	[9]
Energy efficiency measurement in industrial processes	2012	[10]
Mathematical model of glass tank furnace with batch melting process	1980	[11]
Modeling of glass making processes for improved efficiency	2003	[12]

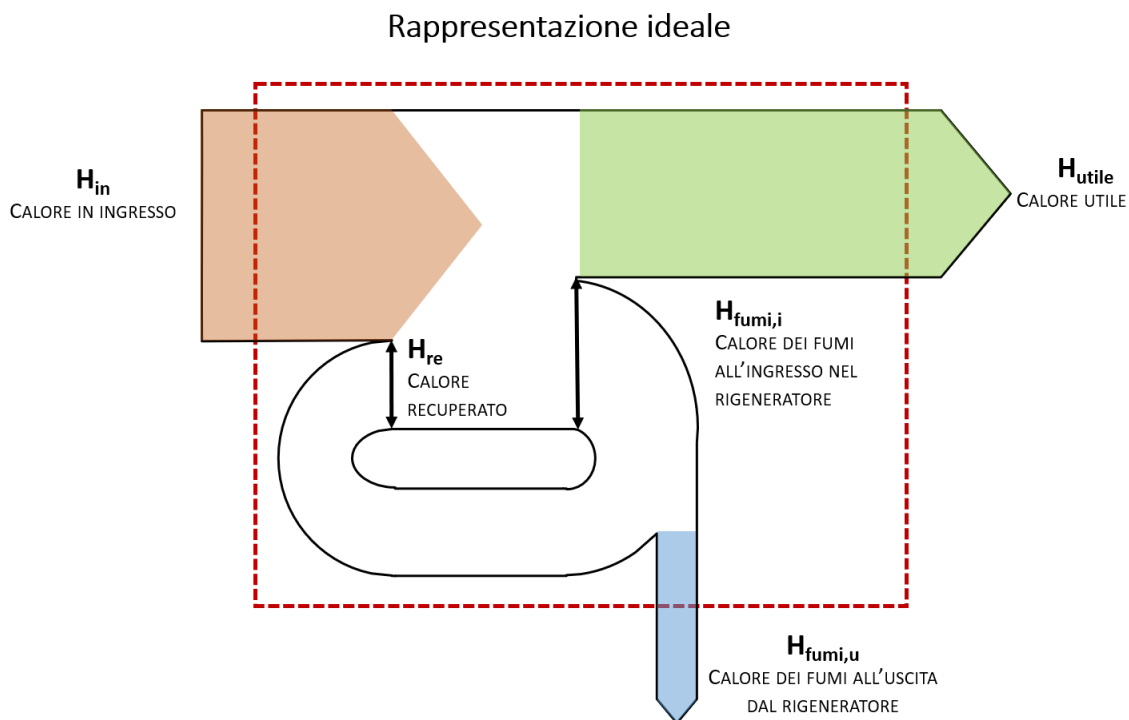


Figura 11. Rappresentazione ideale dei contributi energetici del processo di fusione

In **Figura 11** è fornita una rappresentazione ideale del processo di fusione che avviene all'interno del forno e dei flussi energetici presenti. In rosso è rappresentato il volume di controllo scelto, tale da contenere l'intero processo di fusione, considerando anche la sua relazione con le fasi successive all'interno dell'intero processo. Sono considerati quindi i vincoli tecnici derivanti dalle condizioni che i flussi materiali hanno dovendo confluire in fasi successive.

Osservando la schematizzazione, l'unico flusso energetico entrante nel volume di controllo così definito è H_{in} , il calore generato dalla combustione. I flussi uscenti dal volume di controllo sono, invece, due: il calore utile H_{utile} necessario al processo di fusione del vetro e $H_{fumi,u}$, il calore sensibile dei fumi in uscita dal rigeneratore.

In **Figura 11** sono presenti altri due contributi energetici che però non saranno computati all'interno dell'analisi dal momento che non risultano attraversare il volume di controllo: $H_{fumi,i}$, il calore posseduto dai fumi che entrano nel rigeneratore per consentire il recupero di calore e H_{re} , il calore recuperato.

Nell'Equazione (1) è quindi rappresentata la formulazione dell'indicatore ideale di prestazione energetica per il processo di fusione sulla base delle considerazioni appena espresse.

$$I_{fusione} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{t vetro}} \right) = H_{utile} + H_{fumi,u} \quad (1)$$

Dove H_{utile} rappresenta il calore utile (kJ/t vetro) necessario nel processo di fusione del vetro, mentre $H_{fumi,u}$ rappresenta il calore sensibile dei fumi in uscita dal rigeneratore (kJ/t vetro)

Di seguito vengono analizzati i singoli contributi per giungere ad una formulazione finale dell'indicatore che possa essere utilizzata per valutare un riferimento ideale a partire dai dati raccolti su campo dalle singole aziende.

- H_{utile} - calore utile (kJ/t vetro)

$$H_{utile} = (1 - y_R) \Delta H^{\circ}_{chim} + \Delta H_{fuso}(T_u) \quad (2)$$

Il calore utile H_{utile} comprende sia il calore richiesto per la trasformazione chimica da materie prime a vetro fuso sia il calore sensibile immagazzinato fisicamente nella massa omogenea di vetro fuso a temperatura di uscita T_u .

T_u è la temperatura minima possibile tale che il vetro in uscita dal forno abbia le caratteristiche tecniche adeguate a permetterne la lavorazione nelle successive fasi (il vetro deve comportarsi come un fluido per poter scorrere nei canali condizionamento termico).

Nell'Equazione (2) per descrivere la formulazione del calore utile del processo di fusione si fa riferimento alla scomposizione identificata da Conradt [5].

Nell'Equazione (2), ΔH°_{chim} rappresenta la differenza di entalpia standard (25°C, pressione 1 bar) tra la carica da un lato e il vetro più i gas rilasciati dalla carica dall'altro lato:

$$\text{carica (25°C)} \rightarrow \text{vetro (25°C)} + \text{gas della carica (25°C)}$$

$\Delta H_{fuso}(T_u)$, invece, rappresenta la differenza di entalpia tra il vetro a 25°C e il vetro fuso a temperatura pari a T_u , temperatura di uscita.

y_R rappresenta la percentuale di rottame aggiunta alla carica: maggiore è questo termine, inferiore sarà il contributo energetico richiesto per la trasformazione chimica delle materie prime in vetro.

Di seguito, nell'Equazione (3), si procede a scomporre il primo termine dell'Equazione (2), ΔH°_{chim} (calore necessario per la trasformazione chimica in vetro fuso della carica (kJ/t di vetro)):

$$\Delta H^\circ_{chim} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{t vetro}} \right) = H^\circ_{vetro} + H^\circ_{gas} - H^\circ_{carica} \quad (3)$$

La formula comprende tre termini:

- 1 H°_{vetro} rappresenta l'entalpia standard del vetro (kJ/t vetro), calcolato a partire dalla sua composizione come media pesata delle entalpie standard di formazione dei composti costituenti il vetro (Equazione (4)):

$$H^\circ_{vetro} = \sum_y w_y H^\circ_y \quad (4)$$

dove w_y è la concentrazione massica del composto "y".

Oltre alla sabbia silicea (materiale vetrificante, costituente cioè la struttura base del vetro) ed al carbonato di sodio (materiale fondente, avente la funzione cioè di facilitare il passaggio del vetrificante allo stato liquido durante la fusione), tipicamente vengono aggiunti come stabilizzanti dolomiti e calcari sotto forma di carbonati, o in alternativa, nella loro forma parzialmente o totalmente calcinata come "dolomia" ($\text{MgO} + \text{CaCO}_3$) o come dolomite calcinata ($\text{MgO} + \text{CaO}$) e calce viva CaO , rispettivamente.

Si osserva che, dal punto di vista dell'efficienza della produzione, utilizzare prodotti parzialmente o completamente calcinati nella carica diminuisce la richiesta energetica.

- 2 H°_{gas} rappresenta l'entalpia standard di formazione dei gas generati a seguito della reazione di formazione del vetro (kJ/t vetro) ed è calcolato come la media pesata delle entalpie standard di formazione dei gas prodotti (Equazione(5)).

$$H^\circ_{gas} = \sum_x w_x H^\circ_x \quad (5)$$

dove w_x è la quantità di gas “x” generato per produrre 1 tonnellata di vetro (t/t vetro). Pertanto, la quantità di gas generati dalla reazione chimica per la generazione di una tonnellata di vetro è pari a (Equazione (6)):

$$m_{gas} = \sum_x w_x \quad (6)$$

- 3 H°_{carica} rappresenta l’entalpia standard di formazione delle materie prime (kJ/t vetro) e viene calcolata come somma pesata delle entalpie standard di formazione delle materie prime della carica (kJ/t vetro) come rappresentato in Equazione (7):

$$H^\circ_{carica} = \sum_z w_z H^\circ_z \quad (7)$$

dove w_z è la quantità del composto “z” contenuto nelle materie prime per produrre 1 tonnellata di vetro (t/t di vetro).

In **Tabella 4** sono riportate le entalpie standard di formazione dei principali componenti. Si faccia riferimento alla tabella in appendice per riferimenti a ulteriori componenti (**Tabella 5**).

Tabella 4. Entalpie standard dei principali componenti [5].

	H°[kJ/mol]
$K_2O \cdot 4SiO_2$	4315,8
$K_2O \cdot 2SiO_2$	2508,7
B_2O_3	1273,5
$Na_2O \cdot B_2O_3 \cdot 4SiO_2$	5710,9
$Na_2O \cdot B_2O_3$	1958,1
$2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$	9113,2
$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	4223,7
$2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$	3989,4
$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	6820,8
$Na_2O \cdot 3CaO \cdot 6SiO_2$	8363,8
$Na_2O \cdot 2CaO \cdot 3SiO_2$	4883,6
$Na_2O \cdot CaO \cdot 5SiO_2$	5934
SiO_2	908,3
$CaO \cdot TiO_2$	1660,6
$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	4223,7
$FeO \cdot Fe_2O_3$	1108,8
$FeO \cdot SiO_2$	1196,2
$CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$	3202,4
$CaO \cdot SiO_2$	1635,1
$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	7841,2

Nell’Equazione (8), si procede a scomporre il secondo termine dell’Equazione (2), $\Delta H_{fuso}(T_u)$ (la differenza di entalpia tra il vetro a 25°C e il vetro fuso a temperatura pari a T_u , temperatura di uscita (kJ/t di vetro)):

$$\Delta H_{fuso}(T_u) = H_{fuso,T_u} - H_{vetro}^{\circ} \quad (8)$$

dove, H_{fuso,T_u} è l'entalpia del vetro fuso a T_u (kJ/t vetro) e può essere a sua volta scomposto in due contributi seguendo la procedura descritta in [5], [13] (Equazione (9)):

$$H_{fuso,T_u} \left(\frac{kJ}{t_{vetro}} \right) = H_{fuso,1400}^{\circ} + Cp_{fuso} (T_u - T_{1400}) \quad (9)$$

Dove, $H_{fuso,1400}^{\circ}$ è l'entalpia standard del vetro fuso a 1400°C (temperatura massima nel bacino) e $Cp_{fuso} \times (T_u - T_{1400})$ è la differenza di entalpia del vetro fuso tra la temperatura di uscita T_u e 1400°C (kJ/t vetro). $H_{fuso,1400}^{\circ}$ e Cp_{fuso} sono calcolati come somme pesate a partire dalla composizione chimica del vetro (Equazione (10) e Equazione (11)):

$$H_{fuso,1400}^{\circ} = \sum_y w_y H_{fuso,1400,y}^{\circ} \quad (10)$$

$$Cp_{fuso} = \sum_y w_y Cp_y \quad (11)$$

dove, $H_{fuso,1400,y}^{\circ}$ è l'entalpia standard del componente "y" 1400°C, mentre Cp_y è il calore specifico del componente "y".

Si osserva che se la temperatura minima possibile di uscita T_u fosse 1400°C il secondo contributo nell'Equazione (9) sarebbe nullo.

- $H_{fumi,u}$ - calore sensibile dei fumi in uscita dal rigeneratore (kJ/t di vetro)

Dopo aver analizzato la scomposizione del primo termine dell'Equazione (1), ovvero il calore utile H_u , è ora possibile passare al secondo termine, rappresentato dal calore sensibile dei fumi in uscita dal rigeneratore. L'Equazione (12) ne descrive la formulazione:

$$H_{fumi,u} \left(\frac{kJ}{t_{vetro}} \right) = ((1 + \alpha st) y_{comb} + m_{gas}) Cp_{fumi,u} (T_{fumi,u} - T_0) \quad (12)$$

Dove, y_{comb} è il valore di combustibile immesso per tonnellata di vetro prodotto mentre $T_{fumi,u}$ è la temperatura minima teorica di uscita dei fumi (°C). Dal momento che la formulazione espressa in Equazione (1) deve rappresentare la prestazione energetica in condizione ideali per il processo di fusione del vetro, la temperatura di uscita dei gas dal forno in condizioni ideali sarà minima possibile compatibilmente con vincoli tecnologici (derivanti ad esempio dalle caratteristiche della linea trattamento fumi a valle del forno) e legislativi.

T_0 è la temperatura ambiente (°C), $\alpha st = \frac{m_{aria\ stechiometrica}}{m_{combustibile}}$ è il rapporto aria-combustibile stechiometrico e $Cp_{fumi,u} \left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right)$ è il calore specifico dei fumi in uscita dal rigeneratore.

Si osserva che i fumi all'uscita dal rigeneratore comprendono due contributi: la quantità di fumi stechiometrici prodotti dalla reazione di combustione nel forno $((1 + \alpha st) \cdot y_{comb})$ e la quantità di fumi prodotta dalla reazione di formazione del vetro (m_{gas}).

La formulazione può essere modificata facendo riferimento al calore utile H_u e al potere calorifico inferiore del combustibile LHV (Lower Heating Value) (Equazione (13)):

$$H_{fumi,u} = \frac{\left((1 + \alpha st) \cdot \left(\frac{H_{utile}}{LHV} \right) + m_{gas} \right) Cp_{fumi,u} \cdot (T_{fumi,u} - T_0)}{\left(1 - \frac{(1 + \alpha st) Cp_{fumi,u} (T_{fumi,u} - T_0)}{LHV} \right)} \quad (13)$$

2.3 Formulazione degli indici ideali per la formatura vetro cavo

L'indicatore teorico è relativo all'energia necessaria per soffiare il volume ideale (minimo) del contenitore parametrizzando la pressione di utilizzo (Equazione (14)).

$$I_{soffiaggio} \left(\frac{kJ}{kg \text{ vetro}} \right) = p \frac{V_{id}}{w_{id}} 10^{-3} \quad (14)$$

- p rappresenta la pressione dell'aria compressa (Pa)
- w_{id} rappresenta il peso del contenitore (kg di vetro/contenitore)
- V_{id} rappresenta il volume del contenitore (m³/contenitore)

2.4 Formulazione degli indici ideali per il processo Float

Per la formulazione dell'indicatore teorico del processo float si ipotizza di considerare il solo contributo energetico relativo all'energia necessaria per portare in fusione il bagno di stagno e all'energia fornita dal flusso di Azoto e Idrogeno (Equazione (15)).

$$I_{float} \left(\frac{kJ}{t \text{ vetro}} \right) = C_{fus,Sn} + C_{H_2} + C_{N_2} \quad (15)$$

Di seguito vengono scomposti i tre termini presenti nell'Equazione (15):

- 1 $C_{fus,Sn}$ rappresenta il calore per portare a fusione il bagno di stagno (kJ/(t vetro)) e può essere definito utilizzando l'Equazione (29):

$$C_{fus,Sn} \left(\frac{kJ}{t \text{ vetro}} \right) = R (Cp_{Sn} (T_{fus,Sn} - T_0) + \Delta H_{fus,Sn}) \quad (16)$$

Dove, R rappresenta il rapporto tra quantità di stagno e quantità di vero float prodotto $\left(\frac{kg \text{ stagno}}{t \text{ vetro}} \right)$, $\Delta H_{fus,Sn}$ rappresenta il calore di fusione dello stagno (kJ/kg), Cp_{Sn} rappresenta il calore specifico dello stagno (kJ/(kg K)) e $T_{fus,Sn}$ è la temperatura di fusione dello stagno (pari a 231,9 °C).

- 2 C_{H_2} rappresenta l'energia fornita dal flusso di idrogeno (kJ/(t vetro)) e può essere calcolata come in Equazione (17)

$$C_{H_2} = \Delta H_{H_2}(T; p) m_{H_2} \quad (17)$$

Dove $\Delta H_{H_2}(T; p)$ rappresenta l'energia specifica utilizzata per produrre idrogeno a temperatura T e pressione p di immissione del flusso (kJ/kg) e m_{H_2} rappresenta la quantità di idrogeno su tonnellate di vetro float prodotto (kg/t vetro)

- 3 C_{N_2} rappresenta l'energia fornita dal flusso di azoto (kJ/(t vetro)) e può essere calcolata come in Equazione (31)

$$C_{N_2} = \Delta H_{N_2}(T; p) m_{N_2} \quad (18)$$

Dove $\Delta H_{N_2}(T; p)$ rappresenta l'energia utilizzata per produrre azoto a temperatura T e pressione p di immissione del flusso (kJ/kg) e m_{N_2} rappresenta la quantità di azoto su tonnellate di vetro float prodotto (kg/t vetro).

2.5 Riepilogo informazioni richieste dal calcolo degli indicatori ideali del vetro

	Informazioni necessarie al calcolo
Fusione	❖ Composizione % vetro ❖ T_u = temperatura minima possibile tale che il vetro in uscita dal forno abbia le caratteristiche tecniche adeguate a permetterne la lavorazione nelle successive fasi ❖ y_R = percentuale di rottame aggiunta alla carica ❖ $Cp_{fumi,u}$ = calore specifico dei fum in uscita $\left(\frac{kJ}{kg \cdot K}\right)$ ❖ LHV = potere calorifico inferiore del combustibile (kJ/kg) ❖ $T_{fumi,u}$ = temperatura minima teorica di uscita dei fumi (°C)
Formatura vetro cavo	❖ p = pressione dell'aria compressa (Pa) ❖ w_{id} = peso contenitore (kg di vetro/contenitore) ❖ V_{id} = volume contenitore (m³/contenitore)
Processo Float cotto	❖ R = rapporto tra quantità di stagno e quantità di vero float prodotto $\left(\frac{kg \text{ stagno}}{t \text{ vetro}}\right)$ ❖ $\Delta H_{fus,Sn}$ = calore di fusione dello stagno (kJ/kg) ❖ Cp_{Sn} = calore specifico dello stagno (kJ/(kg K)) ❖ $T_{fus,Sn}$ = temperatura di fusione dello stagno (231,9 °C) ❖ T_0 = temperatura ambiente (°C) ❖ $\Delta H_{H_2}(T; p)$ = entalpia dell'idrogeno a Temperatura T e pressione p di immissione del flusso (kJ/kg) ❖ m_{H_2} = quantità di idrogeno su tonnellate di vetro float prodotto (kg/t vetro)

	❖ $\Delta H_{N_2}(T; p)$ = entalpia dell'azoto a Temperatura T e pressione p di immissione del flusso (kJ/kg) ❖ m_{N_2} = quantità di azoto su tonnellate di vetro float prodotto (kg/t vetro)
--	---

2.6 Interventi di riduzione dei consumi sulla base degli indici di consumo ideale

Gli indici di prestazione ideali ricavati in questo capitolo hanno premesso di identificare le principali linee d'azione per la riduzione dei consumi energetici nel settore del vetro:

- *Riduzione al minimo tecnico della temperatura di uscita dei fumi di scarico dall'impianto.* Tale riduzione dovrà essere naturalmente compatibile con eventuali limiti tecnici/legislativi legati sia a successive sezioni d'impianto (e.g. linee di trattamento fumi), temperature di emissione
- *Riduzione al minimo tecnico dell'eccesso d'aria,* al fine di ridurre le perdite per calore sensibile al camino.
- *Aumento della quota di vetro da riciclo nella carica del forno,* per ridurre il calore necessario alla trasformazione chimica della materia prima in vetro. Naturalmente compatibilmente con le necessità tecnologiche del processo ed i successivi utilizzi del prodotto.
- *Riduzione della pressione di soffiaggio dei contenitori*
- *Riduzione del volume ausiliario* (e.g. raffreddamento degli stampi) durante la fase di formatura.

Si sottolinea che tali interventi sono stati indentificati sulla base di indicatori di prestazione ideali. Pertanto, le azioni di miglioramento identificate riguardano solamente i parametri che compaiono nella trasformazione ideale. Interventi volti a ridurre le irreversibilità (e.g. perdite per irraggiamento e convezione dai forni) saranno individuati in fase successiva, a valle dell'elaborazione degli indicatori operativi e reali.

2.7 Conclusioni del capitolo

In questo capitolo sono stati formulati degli indicatori di riferimento ideale per la prestazione energetica nel settore del vetro.

In particolare, dopo una analisi globale del settore, la concentrazione del gruppo di ricerca si è focalizzata sull'analisi di tre processi ritenuti più significativi per il settore specifico. La definizione di tali processi è avvenuta in risultanza delle analisi condotte dall'Università di Salerno e alle riscontranze avute dai colloqui intercorsi con l'associazione di categoria Assovetro.

I processi analizzati sono stati:

- Fusione del vetro: processo che dalle materie prime produce il vetro fuso
- Formatura del vetro cavo
- Processo Float: processo cardine nella produzione del vetro piano

È stata quindi condotta un'analisi della letteratura scientifica finalizzata all'identificazione delle caratteristiche più importanti in termini di parametri di influenza e vettori energetici utilizzati e all'indagine delle caratteristiche fisiche, termodinamiche e chimiche del processo.

Da questo lavoro sono poi state definite delle formulazioni per gli indicatori di prestazione energetica ideale per il settore:

- Indicatore ideale termico per il processo di fusione del vetro
- Indicatore ideale elettrico per il processo di formatura del vetro cavo
- Indicatore ideale elettrico per il processo Float

Le analisi condotte e le conseguenti formulazioni definite dal gruppo di lavoro per gli indicatori di prestazione sono state poi condivise con l'associazione di categoria **Assovetro** per averne validazione.

3 Formulazioni di indici di riferimento per il settore del cemento, codice ATECO 23.51

3.1 Descrizione del settore analizzato

L'industria del cemento è rappresentata dal settore Ateco 23.51 "Produzione di cemento" che descrive la "produzione di cementi non polverizzati detti clinkers e di cementi idraulici, incluso il cemento Portland, il cemento alluminoso, il cemento di scoria e i cementi superfosfati e produzione di agglomerante cementizio".

Il processo produttivo del cemento inizia nella cava, dove avviene l'estrazione e la frantumazione primaria delle materie prime.

Dalla cava le materie prime sono trasportate nel sito produttivo e depositate in siti di stoccaggio dedicati, per poi essere prelevate e processate. Inizialmente subiscono una prima macinazione ed essiccazione, al fine di ottenere una polvere fine, definita "farina" (Macinazione del crudo). Successivamente, la farina prodotta viene cotta per produrre il clinker. Questo viene poi raffreddato e immagazzinato, oppure direttamente macinato (Macinazione del cotto) e miscelato col gesso e altri costituenti secondari ottenendo come prodotto finale il cemento (**Figura 12**).

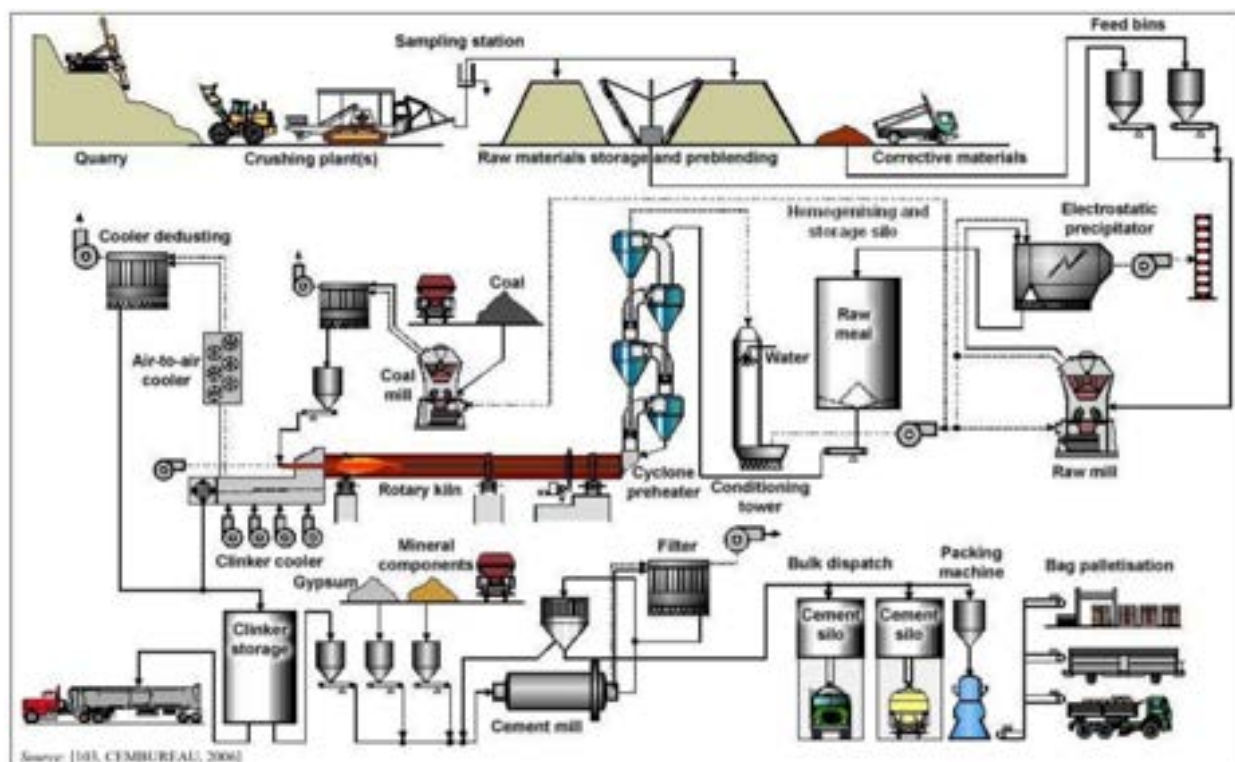


Figura 12. Rappresentazione del processo di produzione del cemento; Fonte: CEMBUREAU, 2006

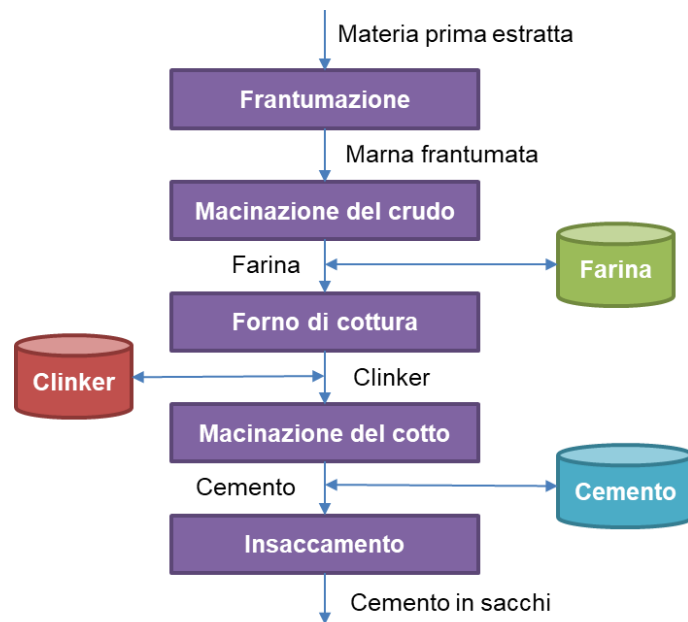


Figura 13. Schematizzazione del processo di produzione del cemento

In **Figura 13** è rappresentata una schematizzazione delle fasi principali del processo di produzione del cemento.

Il costo dell'energia nell'industria del cemento è significativo, tipicamente tra il 20 e il 40% dei costi operativi. Di conseguenza è grande l'attenzione per l'efficienza energetica in questo settore [14].

3.1.1 Processo di macinazione del crudo

La materia prima da cemento dopo essere stata trasportata dalla cava va frantumata ulteriormente. La miscela delle materie prime è convogliata all'interno di un molino dove subisce il processo di macinazione ed essiccazione dell'umidità presente prima di essere convogliata verso la linea di cottura.

Per effettuare l'essiccazione può essere recuperato calore dai gas esausti del forno, in modo tale da ridurre il consumo globale dell'impianto. Per evitare di vincolare però il funzionamento del molino a quello del forno, solitamente si predispone il sistema affinché il calore possa essere fornito in altro modo in caso di fermo del forno.

La miscela uscente dal molino è inviata al silo di omogeneizzazione e stoccaggio da dove potrà essere prelevata per poi andare alla linea cottura.

3.1.2 Processo di cottura del clinker

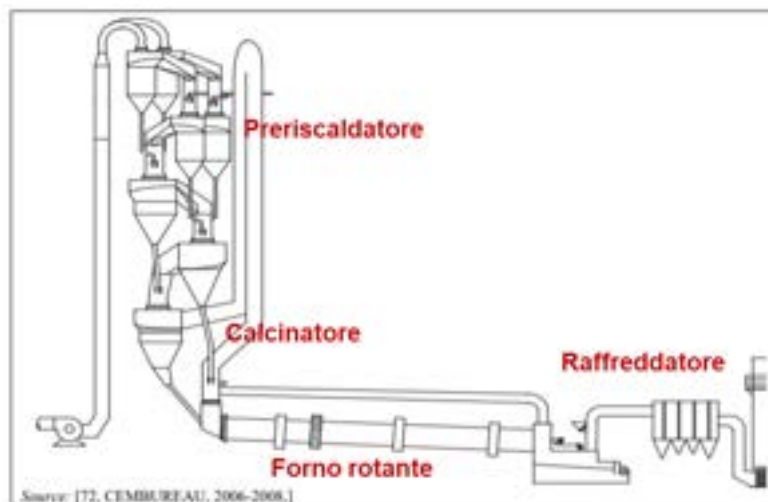


Figura 14. Rappresentazione degli elementi della linea di cottura del clinker

Nella cottura del clinker, la farina cruda viene alimentata al sistema del forno rotante dove viene essiccato, preriscaldato, calcinato e sinterizzato per produrre clinker.

Il clinker viene raffreddato con aria e quindi conservato. In [Figura 14](#) sono rappresentati gli elementi principali della linea cottura del clinker.

Le temperature di processo richieste sono elevate: temperature di carica del forno nella zona di sinterizzazione dei forni rotativi (rotary kiln) tra 1400 e 1500°C, e la temperatura della fiamma a circa 2000°C.

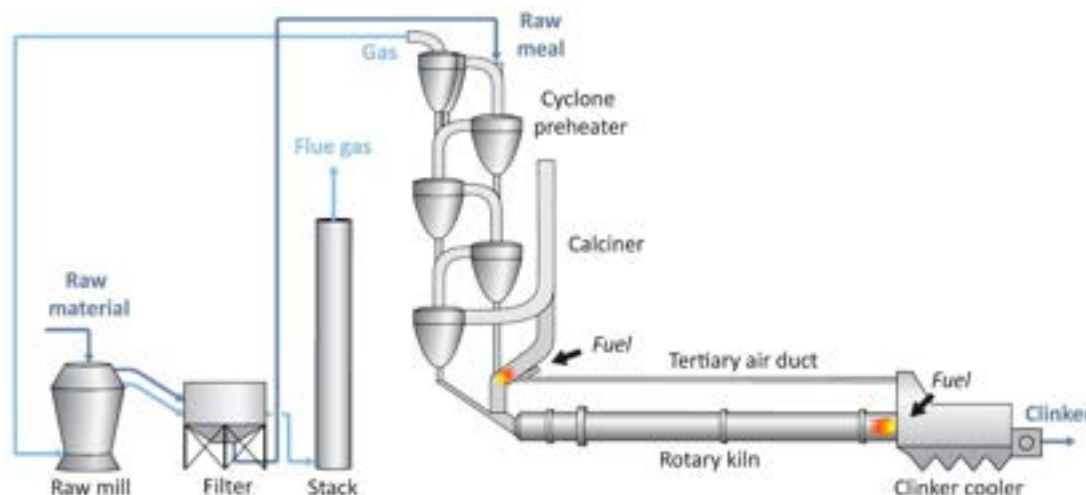


Figura 15. Rappresentazione degli elementi della linea di cottura del clinker con dettaglio dei flussi materiali coinvolti [Voldsund, M. et al., 2019]

In [Figura 15](#) sono rappresentati gli elementi della linea di cottura del clinker con dettaglio dei flussi materiali coinvolti.

Nel forno e nel preriscaldatore il flusso dei gas è in controcorrente rispetto al flusso del materiale solido.

La farina cruda proveniente dai silos di omogeneizzazione subisce un riscaldamento progressivo: viene immessa dalla sommità del preriscaldatore e termina la cottura nel forno trasformandosi in clinker, poi scaricato sulla griglia di raffreddamento.

Le materie prime si scaldano progressivamente perdendo dapprima l' H_2O (da 100 a 450 °C) e poi la CO_2 nel calcinatore (dotato di appositi bruciatori - da 600 a 950°C).

La torre di scambiatori di calore per permettere lo scambio tra il materiale in entrata al preriscaldatore e i gas caldi in uscita dal forno può essere composta da 4 a 5 stadi di cicloni: all'aumentare del numero di cicloni il recupero termico sarà quindi più elevato. La temperatura dei gas caldi in uscita è quindi dipendente dal numero di cicloni (comunque 300-400 °C).

In [Figura 16](#) è riportata la rappresentazione di un preriscaldatore a cicloni a 5 stadi [14].

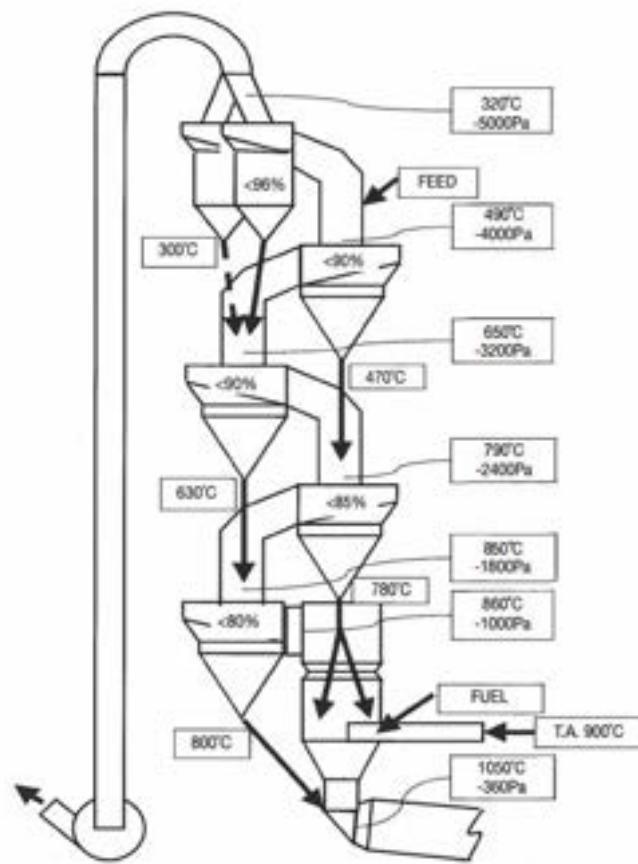


Figura 16. Rappresentazione di un Preriscaldatore a cicloni a 5 stadi con profili tipici di pressione e temperatura [15]

L'aria calda in uscita dal raffreddatore viene in gran parte recuperata come aria **secondaria** e **terziaria** di combustione (rispettivamente per il bruciatore principale e per la camera di calcinazione).

Il raffreddatore è parte integrante della linea di cottura ed influisce sul rendimento dell'impianto. Ha due funzioni:

- Il recupero del calore possibile dal clinker caldo (circa 1450°C) per restituirlo al processo
- La riduzione rapida della temperatura del clinker a circa 100-150°C allo scopo nell'assicurarne la tempra in modo che abbia struttura mineralogica e dimensioni dei cristalli appropriate

La tipologia di raffreddatore più diffusa è il raffreddatore a griglia.

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**.

3.1.3 Processo di macinazione del cotto

Il clinker prodotto dall'impianto di cottura viene macinato insieme a opportuni additivi.

Il materiale macinato in uscita dal molino viene separato in due flussi: la parte più grossolana rientra nel molino, la parte che invece ha raggiunto le caratteristiche di finezza volute costituisce il cemento finito.

3.2 Formulazione degli indici ideali per la macinazione del crudo

Per la macinazione a crudo della farina sono definiti due indicatori:

- uno per il consumo elettrico relativo alla potenza meccanica utilizzata per la macinazione

- uno per il consumo termico relativo all'essiccazione della farina

Al fine di definire un indicatore ideale per il consumo relativo alla macinazione del crudo si fa riferimento allo studio sulla macinabilità dei materiali prodotto da Bond [15], [16].

In particolare, utilizzando la teoria di Bond è possibile ottenere una valutazione della richiesta energetica necessaria per la macinazione, in relazione ad un determinato indice di lavoro di macinazione secondo Bond W_i .

L'indice di lavoro (W_i) indica i kWh necessari per frantumare 1 short ton (unità di misura della massa pari a 2000 libbre; 1 short ton = 907 kg) di un certo materiale da una dimensione teoricamente infinita ad una dimensione tale per cui l'80% del materiale frantumato sia in grado di attraversare un vaglio di maglia pari a 0,10 mm. Il riferimento ad una quantità passante all'80% è dovuta al fatto che nella realtà il materiale sarà composto da elementi appartenenti a diverse classi granulometriche.

L'indice di Bond esprime quindi la resistenza che un materiale oppone alla sua macinazione ed è un parametro dipendente da vari fattori: geometrici, strutturali e dinamici.

Di seguito, nell'Equazione (19), si riporta l'indice per il contributo elettrico:

$$I_{macinazione\ crudo,EE} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{t farina}} \right) = 10 C \left(\frac{W_{i_m}}{\sqrt{d}} - \frac{W_{i_m}}{\sqrt{D}} \right) z \quad (19)$$

In Equazione (19), C rappresenta un fattore di correzione applicato per distinguere il lavoro necessario qualora la macinazione avvenga a umido o a secco, ed assume i valori $C=1$ se la macinazione avviene ad umido e $C=1,3$ se avviene a secco. d_{crudo} e D_{crudo} rappresentano il diametro finale e il diametro iniziale delle particelle del materiale frantumato (espressi in μm), mentre W_{i_m} è l'indice di Bond del materiale frantumato e z è un fattore di conversione inserito per tenere conto dell'unità di misura tipica di W_{i_m} .

z risulterà quindi pari a $\frac{3600}{0,907} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} \frac{\text{short ton}}{\text{t}} \right)$ se W_{i_m} è espresso in $\frac{\text{kWh}}{\text{short ton}}$, mentre z risulterà quindi pari a 1 se W_{i_m} è espresso in $\frac{\text{kJ}}{\text{t}}$.

Al fine di definire un indicatore ideale per descrivere l'energia termica necessaria all'essiccazione che avviene nel molino del crudo si fa riferimento all'energia necessaria all'evaporazione di una data quantità di acqua.

Il contributo termico di essiccazione farina è quindi definito nell'Equazione (20):

$$I_{macinazione\ crudo,Et} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{t farina}} \right) = 2,272 \cdot 10^6 \Delta u\% \quad (20)$$

Dove, $\Delta u\%$ è la variazione di umidità percentuale della farina e si è assunto che il calore latente di evaporazione dell'acqua sia pari a $2,272 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$.

3.3 Formulazione degli indici ideali per la cottura del clinker

In **Figura 17** è rappresentato il volume di controllo definito per l'analisi della linea di cottura e di conseguenza per la formulazione del suo indice teorico di riferimento.

Vista la diffusione molto limitata della produzione di clinker bianco nel panorama italiano l'analisi è stata condotta facendo riferimento alla produzione di clinker grigio.

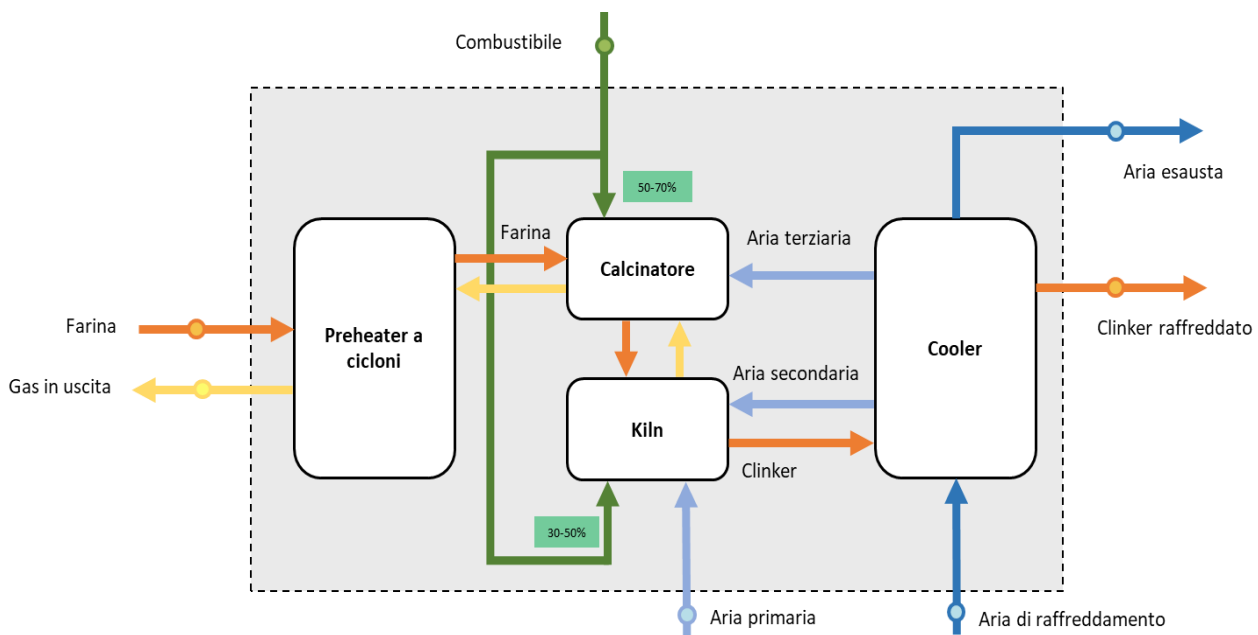


Figura 17. Rappresentazione dei flussi di materia attraverso il volume di controllo della linea cottura

La definizione della formulazione dell'indicatore ideale, riportato in Equazione (21) è stata condotta basandosi sulle seguenti ipotesi:

- Nella rappresentazione ideale non si considera l'apporto della polvere trasportata, di conseguenza il contributo relativo al calore sensibile della polvere trasportata è considerato nullo
- Il contributo relativo al calore sensibile clinker è considerato nullo nella formulazione dell'indicatore perché non sembrerebbero essere presenti vincoli tecnici o legislativi perché non possa uscire a T ambiente

$$I_{cottura} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg clinker}} \right) = C_{for} + C_{ev} + C_{gas_u} + C_{cool} - C_s \quad (21)$$

Di seguito vengono scomposti i cinque termini presenti nell'Equazione (21).

- C_{for} rappresenta il calore teorico di formazione del clinker (kJ/kg di clinker) e può essere calcolato per il particolare mix a partire dalla seguente formula presente in letteratura [15], [17] (Equazione (22):

$$C_{for} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg clinker}} \right) = 4,11Al_2O_3 + 6,48MgO + 7,646CaO - 5,116SiO_2 - 0,59Fe_2O_3 \quad (22)$$

Dove Al_2O_3 , MgO , etc. rappresentano le percentuali relative alla composizione chimica del clinker.

- C_{ev} rappresenta il calore necessario per l'evaporazione dell'umidità presente nella farina (kJ/kg di clinker) e può essere calcolata come espresso nell'Equazione (23).

$$C_{ev} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg clinker}} \right) = 2272 Kf \times u_{farina} \% \quad (23)$$

Dove Kf rappresenta il "Kiln feed to clinker factor", ovvero il rapporto tra farina in ingresso al kiln (kg) e 1kg di clinker. Questo indice è anche pari a $\frac{1}{1-Lol}$ dove Lol è "Loss of Ignition" (parametro tipico dei minerali, rappresenta la perdita a fuoco della farina ovvero la perdita di massa dovuta alla fuga di

sostanze volatili a causa della permanenza ad alte temperature; è stimata spesso intorno al 35%). $u_{farina}\%$ rappresenta la percentuale di umidità contenuta nel kiln feed, quindi nella farina.

- C_s rappresenta il calore sensibile della farina e dell'aria primaria in ingresso al forno (kJ/kg di clinker) e può essere calcolato come espresso nell'Equazione (24):

$$C_s \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg clinker}} \right) = Kf C_{p_{farina}} (T_{farina,in} - T_0) + m_{aria,in} C_{p_{aria,in}} (T_{aria,in} - T_0) \quad (24)$$

Dove $m_{aria,in}$ rappresenta il rapporto tra aria primaria e clinker prodotto dal processo. Dal momento che l'aria primaria viene generalmente riscaldata nel circuito di alimentazione del polverino, la sua temperatura ($T_{aria,in}$) è superiore alla temperatura ambiente ed il suo contributo energetico è quindi non nullo. $C_{p_{aria,in}}$ rappresenta il calore specifico dell'aria primario all'ingresso del forno $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$.

Anche, la farina subisce a sua volta, un primo riscaldamento, nel molino del crudo portando la sua temperatura di ingresso al forno ad un valore superiore alla temperatura ambiente. $C_{p_{farina}} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$ e $T_{farina,in}$ rappresentano rispettivamente il calore specifico e la temperatura della farina all'ingresso del forno.

- C_{gas_u} rappresenta il calore sensibile dei gas in uscita dalla torre del preriscaldatore (kJ/kg di clinker) e può essere calcolato tramite l'Equazione (25):

$$C_{gas_u} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg clinker}} \right) = m_{ex,gas} C_{p_{ex,gas}} (T_{out,g} - T_0) \quad (25)$$

Dove, $T_{out,g}$ rappresenta la temperatura minima teorica di uscita che i gas in uscita della torre del preriscaldatore possono avere nel rispetto dei limiti tecnologici imposti per poter essere utilizzati nel molino del crudo o per poter essere trattati prima dell'espulsione in atmosfera.

$C_{p_{ex,gas}}$ rappresenta il calore specifico dei gas in uscita dalla torre del preriscaldatore $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$, mentre $m_{ex,gas}$ rappresenta il rapporto tra la quantità di gas esausti e il clinker prodotto.

A tal proposito, si osserva che i gas in uscita saranno composti dai gas di combustione stechiometrica del combustibile, dalla CO_2 liberata dalla decarbonatazione della farina cruda e dal vapore acqueo dovuto sia all'umidità residua nella farina.

- C_{cool} rappresenta il calore sensibile dell'aria esausta in uscita dal raffreddatore (cooler exhaust) (kJ/kg di clinker) e può essere calcolato attraverso l'Equazione (26):

$$C_{cool} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg clinker}} \right) = m_{cool} C_{p_{aria,cool}} (T_{out,a} - T_0) \quad (26)$$

Dove $C_{p_{aria,cool}}$ rappresenta il calore specifico dell'aria esausta in uscita dal raffreddatore $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$, m_{cool} rappresenta la quantità di aria esausta rapportata alla quantità di clinker prodotto $\left(\frac{\text{kg cooler exhaust}}{\text{kg clinker prodotto}} \right)$ e $T_{out,a}$ rappresenta la temperatura minima teorica di uscita dell'aria in atmosfera ($^{\circ}\text{C}$).

3.4 Formulazione degli indici ideali per la macinazione del cotto

La formulazione relativa all'indice ideale per la macinazione del clinker è simile a quella utilizzata per descrivere il consumo energetico della macinazione del crudo (Equazione (27)).

A differenza di quest'ultimo però, nella macinazione del cotto abbiamo un unico indicatore, relativo al consumo elettrico relativo alla potenza meccanica utilizzata per la macinazione.

Non è presente, infatti, contributo termico rilevante come nel caso precedente.

$$I_{macinazione\ cotto,EE} \left(\frac{kJ}{tclinker} \right) = 10\ C \left(\frac{Wi_m}{\sqrt{d}} - \frac{Wi_m}{\sqrt{D}} \right) z \quad (27)$$

Nell'Equazione (27), C rappresenta il fattore di correzione applicato per distinguere il lavoro necessario qualora la macinazione avvenga a umido o a secco, ed assume valore pari a 1,3 in questo caso.

d_{cotto} e D_{cotto} rappresentano il diametro finale e il diametro iniziale delle particelle del materiale frantumato (espressi in μm), mentre Wi_m è l'indice di Bond del materiale frantumato e z è un fattore di conversione inserito per tenere conto dell'unità di misura tipica di Wi_m .

z risulterà quindi pari a $\frac{3600}{0,907} \left(\frac{kJ}{kWh} \frac{short\ ton}{t} \right)$ se Wi_m è espresso in $\frac{kWh}{short\ ton}$, mentre z risulterà quindi pari a 1 se Wi_m è espresso in $\frac{kJ}{t}$.

3.5 Riepilogo informazioni richieste dal calcolo degli indicatori ideali del cemento

	Informazioni necessarie al calcolo
Cottura	❖ Composizione % clinker ❖ Composizione % combustibile ❖ <i>calore specifico della farina all' ingresso</i> $\left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right)$ ❖ <i>calorespecifico dell'aria all' ingresso</i> $\left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right)$ ❖ <i>temperatura ambiente</i> ($^{\circ}C$) ❖ <i>temperatura aria primaria in ngresso</i>($^{\circ}C$) ❖ <i>temperatura farina in ingresso</i>($^{\circ}C$) ❖ <i>temperatura minima teorica di uscita dei gas</i>($^{\circ}C$) (temperatura minima teorica che i gas possono avere per entrare nel molino del crudo oppure per essere trattati prima dell'espulsione in atmosfera) ❖ Kf = Kiln feed to clinker factor = rapporto tra farina in ingresso al kiln (kg) e 1kg di clinker ❖ In alternativa al Kf può essere usato il parametro "Loss of Ignition" ❖ $u_{farina} \%$ = percentuale di umidità contenuta nel kiln feed (farina) ❖ $C_{p_{ex,gas}}$ = <i>calorespecificodeigas € uscita</i> $\left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right)$ ❖ $C_{p_{aria,cool}}$ = <i>calorespecificoariauscitacooler</i> $\left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right)$

	❖ $m_{cool} = \frac{kg_{coolerexhaust}}{kg_{clinkerprodotto}}$ ❖ temperatura minima teorica di uscita dell'aria in atmosfera dal raffreddatore (°C)
Macinazione a crudo	❖ $d_{crudo} = \text{diametrofinaleparticellecrudo}(\mu m)$ ❖ $D_{crudo} = \text{diametroinizialeparticellecrudo}(\mu m)$ ❖ $Wi_m = \text{indicediBonddelmaterialefrantumato}$ ❖ Variazione percentuale del contenuto di umidità della farina
Macinazione cotto	❖ $d_{cotto} = \text{diametrofinaleparticellecotto}(\mu m)$ ❖ $D_{cotto} = \text{diametroinizialeparticellecotto}(\mu m)$ ❖ $Wi_m = \text{indicediBonddelmaterialefrantumato}$

3.6 Interventi di riduzione dei consumi sulla base degli indici di consumo ideale

Gli indici di prestazione ideali ricavati in questo capitolo hanno premesso di identificare le principali linee d'azione per la riduzione dei consumi energetici nel settore del cemento:

- *Riduzione al minimo tecnico della temperatura di uscita dei fumi di scarico dall'impianto.* Tale riduzione dovrà essere naturalmente compatibile con eventuali limiti tecnici/legislativi legati sia a successive sezioni d'impianto (e.g. linee di trattamento fumi), temperature di emissione
- *Riduzione al minimo tecnico dell'eccesso d'aria,* al fine di ridurre le perdite per calore sensibile al camino.
- *Riduzione del trascinamento di polveri dal forno al fine di ridurre la capacità termica dei gas di coda.*

Si sottolinea che tali interventi sono stati indentificati sulla base di indicatori di prestazione ideali. Pertanto, le azioni di miglioramento identificate riguardano solamente i parametri che compaiono nella trasformazione ideale. Interventi volti a ridurre le irreversibilità (e.g. perdite per irraggiamento e convezione dai forni) saranno individuati in fase successiva, a valle dell'elaborazione degli indicatori operativi e reali.

3.7 Conclusioni del capitolo

In questo capitolo sono stati formulati degli indicatori di riferimento ideale per la prestazione energetica nel settore del cemento.

In particolare, dopo una analisi globale del settore, la concentrazione del gruppo di ricerca si è focalizzata sull'analisi di tre processi ritenuti più significativi per il settore specifico. La definizione di tali processi è avvenuta in risultanza delle analisi condotte dall'Università di Salerno e alle riscontranze avute dai colloqui intercorsi con l'associazione di categoria Federbeton.

I processi analizzati sono stati:

- Macinazione del crudo: processo che dalle materie prime produce la farina
- Cottura del clinker
- Macinazione del cotto: processo che dal clinker produce il cemento

È stata quindi condotta un'analisi della letteratura scientifica finalizzata all'identificazione delle caratteristiche più importanti in termini di parametri di influenza e vettori energetici utilizzati e all'indagine delle caratteristiche fisiche, termodinamiche e chimiche del processo.

Da questo lavoro sono poi state definite delle formulazioni per gli indicatori di prestazione energetica ideale per il settore:

- Indicatore ideale elettrico per il processo di macinazione del crudo
- Indicatore ideale termico per il processo di macinazione del crudo
- Indicatore ideale termico per il processo di cottura del clinker
- Indicatore ideale elettrico per il processo di macinazione del cotto

Le analisi condotte e le conseguenti formulazioni definite dal gruppo di lavoro per gli indicatori di prestazione sono state poi condivise con l'associazione di categoria **Federbeton** per averne validazione.

4 Cruscotto di indici di prestazione energetica

Gli indicatori ideali di consumo identificati per i settori del cemento e del vetro attraverso la metodologia descritta nelle sezioni 1,2 e 3 hanno permesso di redarre, in collaborazione con Università di Salerno un cruscotto di indicatori di prestazione energetica. In particolare, il CINTEST si è occupato dell'identificazione dei driver energetici, della definizione, validazione e sviluppo delle relazioni teoriche tra driver ed indice di prestazione (Vedi sezz. 1,,2,3) e della raccolta e trattamento dei dati necessari alla redazione del cruscotto. Università di Salerno ha provveduto allo sviluppo dell'applicativo basato su fogli di calcolo Excel. I risultati di tale attività sono stati presentati congiuntamente alle associazioni di categoria coinvolte (Vetro e Cemento) che hanno espresso dato la disponibilità a coinvolgere i loro associati nella compilazione dei cruscotti.

5 Conclusioni

Nel corso della seconda annualità del progetto la metodologia generale definita e proposta durante il 2019 è stata poi declinata nel dettaglio per alcuni settori industriali specifici definiti in collaborazione con ENEA: il settore del vetro e il settore del cemento.

Il gruppo di ricerca si è infatti concentrato sullo studio del processo produttivo dei due settori, il settore della produzione del vetro e il settore della produzione del cemento, analizzando le fasi principali del processo produttivo e le caratteristiche più importanti in termini di parametri di influenza e vettori energetici utilizzati e studiandone le caratteristiche fisiche, termodinamiche e chimiche.

È stata poi avviata un'analisi della letteratura tecnico-scientifica a supporto della definizione di indicatori di prestazione energetica di riferimento ideale per le principali fasi ritenute più significative, selezionate in concordanza con le analisi condotte dall'Università di Salerno.

In particolare, per il settore della produzione del vetro sono stati analizzati i processi relativi alla produzione del vetro cavo e piano. Andando ad approfondire l'analisi sono state quindi identificate delle formulazioni matematiche per gli indicatori di prestazione ideale per i seguenti processi:

- Processo di fusione
- Processo di formatura del vetro cavo
- Processo Float

Allo stesso modo, sono stati analizzati i processi relativi alla produzione del cemento. Andando ad approfondire l'analisi sono state identificate delle formulazioni matematiche per gli indicatori di prestazione ideale per i seguenti processi:

- Processo di macinazione del crudo
- Processo di cottura del clinker
- Processo di macinazione del cotto

Entrambe le analisi e le conseguenti formulazioni definite dal gruppo di lavoro per gli indicatori di prestazione sono state condotte con il supporto e il riscontro fornito dalle associazioni di categoria **Assovetro** e **Federbeton**, interpellate grazie alla collaborazione di ENEA.

Nella seguente annualità del progetto la medesima attività sarà replicata per arrivare a formulazioni specifiche di altri settori rilevanti per il panorama industriale italiano.

6 Appendice

6.1 Riferimenti aggiuntivi per la formulazione degli indicatori ideali relativi alla produzione del vetro

6.1.1 Calcolo delle entalpie standard e dei calori specifici

Per il calcolo delle entalpie standard e dei calori specifici del vetro si può fare riferimento ai valori da usare per i singoli componenti del composto riportati nella tabella seguente [5]:

Tabella 5. Calcolo delle entalpie standard e dei calori specifici

Composto k	-H° (kJ/mol)	-H _{fuso,1400}	C _{pfuso}
P ₂ O ₅ ·3CaO	4117,1	3417,1	324,3
P ₂ O ₅	1492	1138,5	181,6
Fe ₂ O ₃	823,4	550,2	142,3
FeO·Fe ₂ O ₃	1108,8	677,8	213,4
FeO·SiO ₂	1196,2	962,3	139,7
2FeO·SiO ₂	1471,1	1118,8	240,6
MnO·SiO ₂	1320,9	1085,3	151,5
2ZnO·SiO ₂	1643,1	1261,1	174,5
ZrO ₂ ·SiO ₂	2034,7	1686,2	149,4
CaO·TiO ₂	1660,6	1365,7	124,7
TiO ₂	903,7	741	87,9
BaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	4222,1	3454,3	473,2
BaO·2SiO ₂	2553,1	2171,1	241,4
BaO·SiO ₂	1618	1349,8	146,4
Li ₂ O·Al ₂ O ₃ ·4SiO ₂	6036,7	5235,4	498,7
Li ₂ O·SiO ₂	1648,5	1416,7	167,4
K ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂	7914	6924,9	765,7
K ₂ O·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	4217,1	3903,7	517,6
K ₂ O·4SiO ₂	4315,8	3697,8	410
K ₂ O·2SiO ₂	2508,7	2153,1	275,3
Na ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂	7841,2	6870,1	648,1
Na ₂ O·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	4163,5	3614,1	423,8
B ₂ O ₃	1273,5	1088,7	129,7
Na ₂ O·B ₂ O ₃ ·4SiO ₂	5710,9	4988	637,6
Na ₂ O·4B ₂ O ₃	5902,8	4986,7	704,2
Na ₂ O·2B ₂ O ₃	3284,9	2735,9	444,8
Na ₂ O·B ₂ O ₃	1958,1	1585,7	292,9
2MgO·2Al ₂ O ₃ ·5SiO ₂	9113,2	7994,8	1031,8
MgO·SiO ₂	1548,5	1318	146,4
2MgO·SiO ₂	2176,9	1876,1	205
CaO·MgO·2SiO ₂	3202,4	2733,4	355,6
2CaO·MgO·2SiO ₂	3876,9	3319,2	426,8
CaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	4223,7	3628,8	380,7
2CaO·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂	3989,4	3374	299,2

3Al₂O₃·2SiO₂	6820,8	5816,2	523,4
CaO·SiO₂	1635,1	1382	146,4
2CaO·SiO₂	2328,4	1868,2	174,5
Na₂O·2SiO₂	2473,6	2102,5	261,1
Na₂O·SiO₂	1563,1	1288,3	179,1
3Na₂O·8SiO₂ *)	9173	-	-
Na₂O·3CaO·6SiO₂	8363,8	7372,6	786,6
Na₂O·2CaO·3SiO₂	4883,6	4240,9	470,3
2Na₂O·CaO·3SiO₂	4763	4029,6	501,2
Na₂O·CaO·5SiO₂	5934	-	-
SiO₂	908,3	809,6	86,2

6.1.2 Calcolo di $H_{fumi,u}$

Calcolo di $H_{fumi,u}$ passo per passo (Equazione (13)):

$$y_{comb} \cdot LHV = H_{utile} + H_{fumi,u} \quad (28)$$

$$y_{comb} = \frac{H_{utile} + H_{fumi,u}}{LHV} \quad (29)$$

$$H_{fumi,u} = \left((1 + \alpha st) \cdot \left(\frac{H_{utile} + H_{fumi,u}}{LHV} \right) + m_{gas} \right) \cdot Cp_{fumi,u} \cdot (T_{fumi,u} - T_0) \quad (30)$$

$$\begin{aligned} & H_{fumi,u} \left(1 - \frac{(1 + \alpha st) \cdot Cp_{fumi,u} \cdot (T_{fumi,u} - T_0)}{LHV} \right) \\ &= \left((1 + \alpha st) \cdot \left(\frac{H_{utile}}{LHV} \right) + m_{gas} \right) \cdot Cp_{fumi,u} \cdot (T_{fumi,u} - T_0) \\ & H_{fumi,u} = \frac{\left((1 + \alpha st) \cdot \left(\frac{H_{utile}}{LHV} \right) + m_{gas} \right) \cdot Cp_{fumi,u} \cdot (T_{fumi,u} - T_0)}{\left(1 - \frac{(1 + \alpha st) \cdot Cp_{fumi,u} \cdot (T_{fumi,u} - T_0)}{LHV} \right)} \end{aligned} \quad (31)$$

6.2 Riferimenti aggiuntivi per la formulazione degli indicatori ideali relativi alla produzione del cemento

6.2.1 Determinazione della composizione di cemento prodotto in cottura a partire dalla composizione delle materie prime

Tramite le formulazioni di Bogue è anche possibile determinare la quantità teorica delle quattro fasi principali del cemento Portland a partire dalla formulazione delle materie prime [17], [18].

	CaO	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	SO₃	C₃S
C₃S	4,071	-7,600	-6,718	-1,430	-2,852	
C₂S		2,867				-0,754
C₃A			2,650	-1,692		
C₄AF	3,043					

Moltiplicando la quantità presente nelle materie prime riportate sulla prima riga per il coefficiente relativo e poi sommando i vari contributi si possono determinare le quantità dei quattro componenti principali del cemento.

6.2.2 Indice di lavoro di macinazione medio secondo Bond (W_i)

Nella seguente tabella sono riportati valori tipici dell'indice di lavoro di macinazione secondo Bond (W_i) per alcuni materiali più diffusi [16].

Materiale	Peso specifico	Indice di lavoro di Bond
<i>Bauxite</i>	2,38	9,45
<i>Clinker di cemento</i>	3,09	13,49
<i>Materia prima da cemento</i>	2,67	10,57
<i>Argilla</i>	2,23	7,1
<i>Argilla calcinata</i>	2,32	7,43
<i>Carbone</i>	1,63	11,37
<i>Dolomite</i>	2,82	11,31
<i>Gesso crudo</i>	2,69	8,16
<i>Calcare (per cemento)</i>	2,68	10,18
<i>Magnesite (cotta)</i>	5,22	16,8
<i>Arenaria</i>	2,68	11,53
<i>Scoria (di caldaia)</i>	2,93	15,76
<i>Scoria d'altoforno</i>	2,39	12,16

7 Riferimenti bibliografici

- [1] «Decreto direttoriale 30 aprile 2019 - Certificati bianchi. Guida operativa», *Mise*, 2019. <https://www.mise.gov.it/index.php/it/93-normativa/decreti-direttoriali/2039688-decreto-direttoriale-30-aprile-2019-certificati-bianchi-guida-operativa> (consultato apr. 19, 2021).
- [2] Assovetro, «Rapporto di Sostenibilità 2020». 2020.
- [3] M. Hubert, «Industrial Glass Processing and Fabrication», in *Springer Handbook of Glass*, J. D. Musgraves, J. Hu, e L. Calvez, A c. di Cham: Springer International Publishing, 2019, pagg. 1195–1231.
- [4] European Commission. Joint Research Centre. Institute for Prospective Technological Studies., *Best available techniques (BAT) reference document for the manufacture of glass: industrial emissions Directive 2010/75/EU: integrated pollution prevention and control*. LU: Publications Office, 2013.
- [5] R. Conradt, «II.24 - The industrial glass-melting process», in *The SGTE Casebook (Second Edition)*, K. Hack, A c. di Woodhead Publishing, 2008, pagg. 282–303.
- [6] V. Sardeshpande, U. N. Gaitonde, e R. Banerjee, «Model based energy benchmarking for glass furnace», *Energy Conversion and Management*, vol. 48, n. 10, pagg. 2718–2738, ott. 2007, doi: 10.1016/j.enconman.2007.04.013.
- [7] K. Tapasa e T. Jitwatcharakomol, «Thermodynamic calculation of exploited heat used in glass melting furnace», *Procedia Engineering*, vol. 32, pagg. 969–975, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.02.040.
- [8] R. Conradt, «Prospects and physical limits of processes and technologies in glass melting», *Journal of Asian Ceramic Societies*, vol. 7, n. 4, pagg. 377–396, ott. 2019, doi: 10.1080/21870764.2019.1656360.
- [9] Carbon Trust, «Monitoring and Targeting in the glass manufacturing industries». 1998.
- [10] E. Giacone e S. Mancò, «Energy efficiency measurement in industrial processes», *Energy*, vol. 38, n. 1, pagg. 331–345, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2011.11.054.
- [11] H. Mase e K. Oda, «Mathematical model of glass tank furnace with batch melting process», *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 38–39, pagg. 807–812, mag. 1980, doi: 10.1016/0022-3093(80)90536-0.
- [12] Thomas P. Seward III, «Modeling of Glass Making Processes for Improved Efficiency», DOE/EE41262-2, 809193, mar. 2003. doi: 10.2172/809193.
- [13] R. Conradt, «Chemical structure, medium range order, and crystalline reference state of multicomponent oxide liquids and glasses», *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 345–346, pagg. 16–23, ott. 2004, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2004.07.038.
- [14] C. Galitsky, E. Worrell, e C. Galitsky, «Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making. An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers», LBNL-54036-Revision, 927882, gen. 2008. doi: 10.2172/927882.
- [15] P. A. Alsop, *Cement Plant Operations Handbook*. Tradeship Publications Ltd, 2007.
- [16] W. H. Duda, *La fabbricazione del cemento: tecniche internazionali di processo nell'industria del cemento*. Milano: Ed. Tecniche, 1976.
- [17] H. F. Taylor, *Cement chemistry*. London: Academic Pr, 1990.
- [18] R. H. Bogue, «Calculation of the Compounds in Portland Cement», *INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY*, pag. 6, 1929.

8 Breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Il gruppo di ricerca coinvolto nelle attività relative al risparmio energetico è così composto:

- **Andrea Luigi Facci:** Professore Associato di Macchine a Fluido e sistemi energetici (ING-IND/08) presso l'Università degli Studi della Tuscia autore di più di 40 pubblicazioni scientifiche internazionali nell'ambito delle macchine e dell'efficienza energetica (H index = 18, 893 Citazioni, I10 index = 24). Titolare dei corsi di Fluidodinamica delle Macchine, Macchine e Sistemi Energetici e Motori a Combustione Interna e Sistemi per la Propulsione presso i corsi di Ingegneria Industriale e Ingegneria Meccanica dell'Università degli Studi della Tuscia. Coordinatore del corso di Laurea in Ingegneria Industriale e membro del collegio del Dottorato "Engineering for Energy and Environment".
- **Gianluca Rubino:** Professore Associato nel Settore Scientifico Disciplinare ING-IND/16 Tecnologie e Sistemi di Lavorazione presso l'Università degli Studi della Tuscia, autore di più di 43 pubblicazioni scientifiche internazionali nell'ambito delle Tecnologie ed i Sistemi di Lavorazione (H index = 13 Citazioni= 435). L'attività di ricerca scientifica è orientata verso i seguenti temi: lavorazioni non convenzionali, deposizione di rivestimenti duri e valutazione delle proprietà tribologiche, testing su rivestimenti e materiali organici ed inorganici e identificazione delle relazioni materiale-processo-prodotto, produzione e applicazioni di schiume metalliche e ceramiche. Titolare dei corsi di Tecnologie meccaniche, Tecnologie e lavorazione Speciali, Strumenti e tecnologie per la produzione additiva presso i corsi di Ingegneria Industriale e Ingegneria Meccanica dell'Università degli Studi della Tuscia. Membro del collegio del Dottorato "Engineering for Energy and Environment".
- **Mauro Scungio:** Ricercatore di Fisica Tecnica Industriale (Ing-IND/10). Le attività di ricerca dell'Ing. Mauro Scungio sono legate principalmente a temi relativi alla metrologia per il monitoraggio ambientale e alla termo-fluidodinamica numerica (CFD) per la simulazione della dispersione di inquinanti indoor e outdoor e in emissione da impianti. In particolare, tali attività prevedono la progettazione e l'esecuzione di appropriate campagne di misura in emissione ed esposizione, utilizzando specifica strumentazione di misura delle concentrazioni e delle distribuzioni dimensionali del materiale particolato (PM e polveri ultrafini), nonché campionatori di CO₂, sensori di temperatura, pressione, umidità e portata. A supporto delle attività sperimentali di misura, le simulazioni numeriche CFD mediante tecniche innovative vengono utilizzate per la simulazione della dispersione e della deposizione di sostanze inquinanti emesse da sistemi energetici e per la valutazione della loro ricaduta nelle zone limitrofe.
- **Annalisa Santolamazza:** Assegnista di ricerca di Impianti meccanici (ing-IND/17) presso l'Università degli Studi della Tuscia. L'attività di ricerca dell'Ing. Santolamazza è legata principalmente all'analisi e l'ottimizzazione delle performance operative ed energetiche degli impianti industriali. Ha conseguito un dottorato in "Ingegneria per la Progettazione e Produzione industriale", focalizzato al miglioramento della gestione della manutenzione attraverso tecniche di machine learning.