



Provincia Autonoma di Trento  
Agenzia provinciale per la protezione dell'ambiente



# IL CEMENTO

Caratteristiche, tipologie, tecnologie di produzione,  
migliori tecniche disponibili per il controllo degli impatti



a cura di  
***Maurizio Tava***

*I.D. Studio e analisi dei processi tecnologici e produttivi*

**2012**

# IL CEMENTO

1. COS'È IL CEMENTO .....	2
2. BREVISSIMA STORIA DEL CEMENTO.....	3
3. CARATTERISTICHE DEL CEMENTO .....	6
3.1 DEFINIZIONE .....	6
3.2 I PRINCIPALI COMPONENTI DEL CEMENTO .....	6
3.3 MATERIE PRIME DEL CEMENTO .....	13
4 LA PRODUZIONE DEL CEMENTO .....	15
4.1 PREPARAZIONE DELLA MISCELA CRUDA .....	15
4.2 COTTURA DELLA MISCELA CRUDA E PRODUZIONE DEL CLINKER.....	17
4.3 LE REAZIONI PER LA FORMAZIONE DEL CLINKER .....	22
4.4 PREPARAZIONE DEL CEMENTO.....	22
5 RECUPERO DI RIFIUTI E BIOMASSE IN CEMENTERIA .....	24
5.1 RECUPERO DI MATERIA .....	24
5.2 RECUPERO ENERGETICO COME COMBUSTIBILI ALTERNATIVI .....	24
6 LE MIGLIORI TECNICHE DISPONIBILI NEL SETTORE DEL CEMENTO .....	27
6.1 GENERALITÀ DEL SETTORE CEMENTIERO.....	28
6.2 VALUTAZIONE DEGLI ASPETTI AMBIENTALI DEL SETTORE.....	29
6.3 ASPETTI TECNICI E TECNOLOGICI SPECIFICI DEL SETTORE.....	30
6.4 LE TECNICHE DISPONIBILI PER L'INDUSTRIA DEL CEMENTO .....	35
7 VALUTAZIONE SULL'APPLICABILITÀ DELLE BAT .....	43
7.1 DEFINIZIONE DELLA MIGLIORE TECNICA DISPONIBILE .....	43
7.2 LE MIGLIORI TECNICHE DISPONIBILI ED APPLICABILI NEL SETTORE DEL CEMENTO.....	43

# IL CEMENTO

## 1. COS'È IL CEMENTO

Il cemento è legante costituito da una polvere inorganica, non metallica, finemente macinata.

Un **legante** è un materiale che, mescolato con acqua, forma una pasta di consistenza variabile, inizialmente plasmabile, ma che successivamente, perdendo gradualmente la sua plasticità, si rapprende (si dice che “fa presa”) e indurisce, sviluppando resistenza meccanica.

Sono detti **leganti aerei** quelli che induriscono a contatto con l'aria; sono chiamati **leganti idraulici** quelli che induriscono anche a contatto con l'acqua.

In particolare:

- i **leganti aerei (calce idrata e gesso)** si impiegano solo in strutture destinate a permanere a contatto con l'aria; si tratta di materiali aventi resistenze meccaniche medio-basse;
- i **leganti idraulici (cementi, calce idrauliche e agglomeranti cementizi)** possono essere impiegati in strutture che svolgono la loro attività sia a contatto con l'aria, sia immerse in acqua; dopo indurimento possono sviluppare resistenze meccaniche molto elevate.

Il **cemento** è il più diffuso e conosciuto dei leganti idraulici.

È **legante** in quanto ha la capacità di legare degli elementi solidi inerti.

È **idraulico** in quanto indurisce e si lega alle materie inerti combinandosi e reagendo con l'acqua.

Dopo indurimento assume consistenza lapidea. I fenomeni della presa e dell'indurimento idraulico si determinano a seguito di reazioni e processi di idratazione dei componenti idraulici presenti nel cemento per formare composti idrati (*silicati idrati di calcio* ed *alluminati idrati di calcio*), che mantengono solidità meccanica e stabilità dimensionale nel tempo, sia all'aria che sott'acqua.

Il cemento è un materiale fondamentale per le costruzioni edili e le opere di ingegneria civile. Correttamente dosato e mescolato con aggregati e con acqua, è in grado di produrre **calcestruzzi** e **malte** che si mantengono lavorabili per un tempo sufficiente alla loro posa in opera.

In Europa, l'uso del cemento e del calcestruzzo (una miscela di cemento, aggregati, sabbia e acqua) nelle grandi opere civili risale all'antichità.

Il **cemento Portland**, il più usato attualmente nelle costruzioni in calcestruzzo, è stato brevettato nel 1824.

La produzione dell'industria del cemento è in relazione diretta con l'andamento dell'edilizia e, quindi, più di ogni altro settore rispecchia da vicino la situazione economica generale.

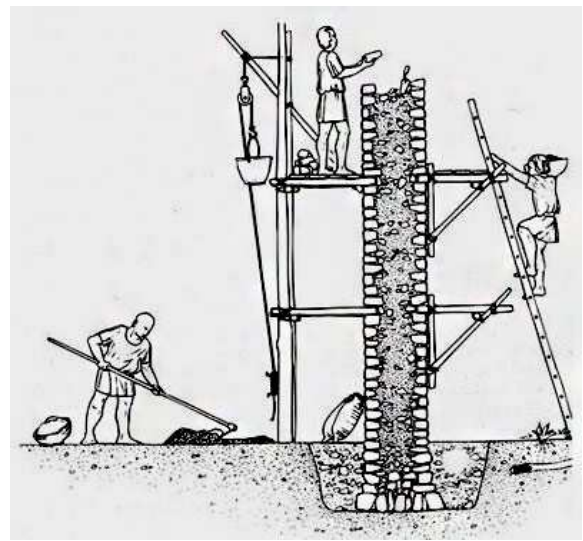
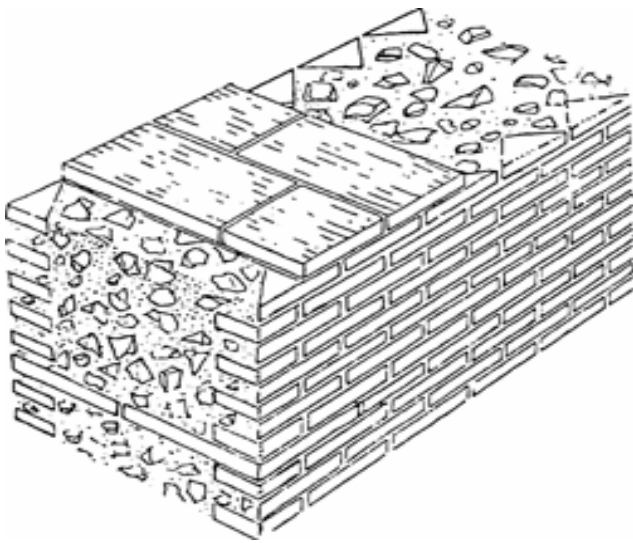


## 2. BREVISSIMA STORIA DEL CEMENTO

I primi leganti nelle costruzioni vennero utilizzati in Egitto nel III millennio a.C.; si trattava di **malta di gesso** impiegata per realizzare paramenti murari in conci di pietra.

I Romani dal III secolo a.C. iniziarono ad impiegare come legante nelle costruzioni edilizie la **calce aerea**, una malta a base di idrossido di calcio che, assorbendo l'anidride carbonica presente nell'aria, si indurisce molto lentamente trasformandosi in carbonato di calcio.

Una rivoluzione si ebbe a partire dal I secolo a.C. quando i Romani incominciarono a sostituire la sabbia costituente la malta con la **pozzolana** (*pulvis puteolana*), costituita da tufi, pomici e scorie vulcaniche sciolte, o con il **cocciopesto** (*Opus signinum* da Signa, la città dove venne impiegato per la prima volta), costituito da frammenti di laterizi finemente frantumanti.



Entrambi questi materiali presentano la cosiddetta **attività pozzolanica** o **comportamento pozzolanico**: in presenza di calce, a contatto con l'acqua si comportano come ottimi leganti idraulici, indurendo più della calce stessa, anche sott'acqua senza contatto con l'aria.

*"Le rovine Romane sopravvivono ai secoli grazie alle ceneri vulcaniche"*: questo è il segreto della lunga durata di molte opere realizzate dai romani nel mondo, soprattutto per l'uso intelligente delle ceneri vulcaniche nell'impasto cementizio.

Vitruvio nel II libro del *De Architectura* descrive la pozzolana di Baia e di Cuma affermando che essa *"fa gagliarda non solo ogni specie di costruzione ma in particolare quelle che si fanno in mare sott'acqua"*.

L'*opus caementitium*, utilizzato come calcestruzzo romano (calce, pozzolana e *caementa*), rivoluzionò le metodologie costruttive dell'antichità in quanto, a differenza della costruzione di muri in blocchi squadrati, consentiva la realizzazione di grossi edifici ed opere pubbliche in tempi brevi ed utilizzando un materiale di facile reperibilità, trasporto e messa in opera.





Con la Caduta di Roma e del suo Impero si ebbe un declino nel campo delle costruzioni e la tecnologia della pozzolana per tutto il medioevo fu abbandonata in favore del grassello di calce.

Soltanto in epoca rinascimentale, con la traduzione e rilettura dei testi latini di Plinio il Vecchio e di Vitruvio, si riscoprì il segreto del costruire secondo le conoscenze dei romani: del 1511 è la riedizione del *De Architectura* curata dal domenicano *Fra' Giocondo* (Giovanni Monsignori).

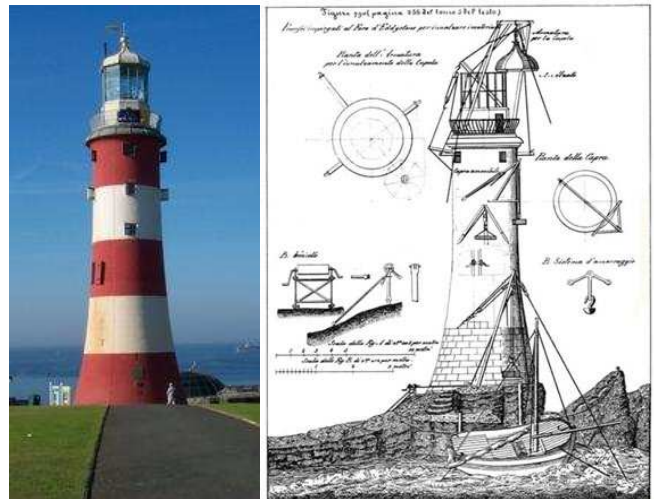
*Andrea Palladio* nel 1570 descrive una *calce nigra*, ottenuta per cottura di una pietra calcarea originaria del padovano, contenente impurità argillose, con caratteristiche idrauliche.

Nel '700 Francia ed Inghilterra furono all'avanguardia nell'impiego e nello sviluppo dei leganti idraulici nell'edilizia, in avvicinamento all'odierno cemento.

Nel 1756 l'ingegnere britannico *John Smeaton* inventò la **calce idraulica naturale**, che, anziché da una miscela di calce-pozzolana, fu ottenuta dalla cottura di calcare contenente una discreta quantità (circa 11%) di impurezze di argilla.

La prima calce idraulica venne impiegata nella costruzione di un faro off-shore per segnalare la presenza degli scogli noti come *Eddystone Rocks* al largo di Plymouth.

La **Smeaton's Tower** è stata smontata dalla sua posizione originaria nel 1870 e ricostruita sulla terraferma, a Plymouth nella contea di Devon, in Inghilterra, con funzione monumentale e di attrazione turistica.



*Il faro Smeaton's Tower*

La scoperta segnerà il passaggio dal calcestruzzo romano a quello moderno, per il quale, con l'ausilio della neonata scienza chimica, si riuscirà a governare un processo di sintesi che condurrà prima alla calce idraulica artificiale e poi al cemento.

Infatti, una volta scoperto che le impurità di silice e di allumina presenti nell'argilla che accompagnano alcuni calcari sono responsabili della formazione dei silicati ed alluminati di calcio, capaci di indurire sott'acqua, le sperimentazioni si indirizzarono nella cottura a temperatura sempre più elevata di miscele artificiali di calcare ed argilla.

A cavallo tra la il Settecento e l'Ottocento, soprattutto in Inghilterra ed in Francia, fiorirono brevetti, invenzioni, ed iniziative industriali che portarono alla produzione dei primi leganti idraulici industriali, chiamati **cementi**.

Nel 1786 *James Parker* fabbrica il primo cemento a presa rapida (*cemento Parker* o *romano*), cuocendo in forni da calce le concrezioni marnose contenute nelle argille del Tamigi.

Nel 1800 *Pierre-Charles Lesage* ottiene un legante di alta resistenza calcinando i ciottoli calcarei di Boulogne sur Mer.

Nel 1818 l'ingegnere francese *Louis Joseph Vicat* scopre che per ottenere un prodotto a comportamento idraulico non era necessario cuocere calcari argillosi naturali, ma era possibile utilizzare calcari puri ed argilla o altri alluminosilicati idrati in proporzioni ben più controllabili.

Introdusse la distinzione calci **idrauliche naturali ed artificiali**: naturale è il legante idraulico ottenuto per cottura di un calcare argilloso, che contiene già originariamente argilla, mentre è artificiale quello ottenuto per cottura di una miscela artificiale di calcare e argilla.

Riesce così a definire la formula della calce idraulica artificiale proponendo anche la prima classificazione delle calci idrauliche, per molti aspetti ancora valida.

Con il termine *calci idrauliche* si intendono prodotti derivati dalla calcinazione di calcari marnosi o marne calcaree (miscele naturali che presentano un certo tenore, dal 6 al 22%, di argille o altri alluminosilicati idrati) sottoposti a cottura a temperature generalmente comprese tra 1000 e 1250°C.

In tali condizioni si forma ossido di calcio (CaO) che successivamente si combina in parte con la silice e l'allumina dell'argilla formando silicati e alluminati di calcio idraulici, composti cioè che reagendo chimicamente con l'acqua formano idrati stabili ed insolubili che permettono al materiale di indurire e rimanere stabile anche sott'acqua (azione idraulica).

Nel **1824 Joseph Aspdin**, fabbricante di cemento di York, brevettò un cemento a lenta presa che chiamò **cemento Portland**, per la somiglianza di colore con le pietre da costruzione di calcare compatto estratte nell'isola di Portland, nella contea del Dorset (Inghilterra meridionale). Venne realizzato cuocendo le marne argillose a temperatura oltre 1300°C ed ottenendo un materiale che non conteneva più la vecchia calce "viva" da spegnere.

Fu *Isaac Charles Johnson* nel 1844 a mettere in evidenza l'importanza del processo di cottura ad alta temperatura, ben oltre i 600-900°C necessari per calce aerea e calce idraulica naturale per arrivare a circa 1600°C, al fine di combinare tutta la calce in silicati ed alluminati di calcio con inizio della vetrificazione e la formazione di clinker, per l'ottenimento di cementi a lenta presa.

Nel 1860 *Henry Louis Le Chatelier* stabilì la composizione chimica del cemento consentendo la produzione industrializzata del calcestruzzo.

Da allora il cemento Portland si diffuse dalla Gran Bretagna in tutto il mondo, con un progressivo abbandono delle calci idrauliche. Anche gli studi e le ricerche si moltiplicarono per comprendere le reazioni chimiche alla base del fenomeno di idratazione della polvere di cemento e per migliorarne le caratteristiche tecniche.

Nel 1896 il tedesco *Wilhelm Michaelis* ebbe la felice intuizione di aggiungere pozzolana al cemento Portland per migliorare l'idraulicità e l'impermeabilità del calcestruzzo per formazione di silicati ed alluminati di calcio idrati. Successivamente il **cemento pozzolanico**, oltre che con pozzolana naturale, venne realizzato anche con pozzolana artificiale (loppa, cenere volante, fumo di silice), sia co-macinata con il clinker sia aggiunta al cemento.

In **Italia** la produzione dei leganti idraulici iniziò nel 1856 a Palazzolo sull'Oglio, in uno stabilimento per la produzione della calce idraulica. La scelta della località dipese sia dalla disponibilità di idonee materie prime nei pressi del lago d'Iseo, sia dalla convenienza di produrre il legante vicino ai cantieri della ferrovia Venezia-Milano, allora in costruzione. La produzione proseguirà poi per la costruzione della stazione di Venezia.

Lo stesso stabilimento nel 1873 iniziò la produzione di cemento Portland artificiale, ma la vera data d'inizio della produzione di cemento Portland è il 1876, quando venne scoperto, in prossimità di Casale Monferrato, un giacimento di marne naturali, di composizione idonea a realizzare ottimi cementi per semplice cottura di materie prime con composizione adatta all'impiego.

*Lo stabilimento di Palazzolo*



### 3. CARATTERISTICHE DEL CEMENTO

#### 3.1 DEFINIZIONE

In edilizia con il termine **cemento**, o più propriamente **cemento idraulico**, si intende una varietà di materiali da costruzione, noti come leganti idraulici, che miscelati con acqua sviluppano prodotti idrati insolubili dotati di proprietà adesive (proprietà idrauliche).

Si tratta di una miscela di calcari e argille che, unita ad acqua e generalmente anche a sabbia o ghiaia, forma un impasto adesivo che dopo la presa diventa molto duro.

Il cemento è usato per tenere uniti mattoni, pietre ecc., per fare blocchi da costruzione, per gettate di elementi edilizi ed architettonici.

Con il termine cemento si intende in senso lato anche la **pasta cementizia** ottenuta aggiungendo acqua ad una miscela di cemento ed inerti come sabbia, ghiaia o pietrisco. In particolare si ottiene:

- **malta di cemento**, se la pasta di cemento è miscelata con aggregati fini (sabbia); le proporzioni ottimali sono 1-4-1: 1 parte di cemento, 4 parti di sabbia ed 1 parte di acqua;
- il cosiddetto **magrone**, utilizzato per riempimenti e getti di sottofondazione, se si impiega una miscela povera di cemento con ghiaia grossolana; le proporzioni sono generalmente 1-3-5-1: 1 parte di cemento: 3 parti di sabbia, 5 di ghiaia ed 1 di acqua;
- **calcestruzzo**, se vengono impiegati aggregati misti (sabbia, ghiaietto e ghiaia) secondo una determinata curva granulometrica; le proporzioni sono generalmente di 1-2-4-1: 1 parte di cemento, 2 parti di sabbia, 4 di ghiaia ed 1 di acqua;
- **cemento armato** o **calcestruzzo armato**, se il calcestruzzo viene accoppiato con un'armatura costituita da tondini d'acciaio, opportunamente posizionati all'interno del manufatto gettato in opera (normativamente definito *conglomerato cementizio armato*);
- **cemento armato precompresso** o **calcestruzzo armato precompresso (c.a.p.)**, se, nella realizzazione di travi fuori opera -per sopperire alla scarsa resistenza a trazione del conglomerato cementizio-, il calcestruzzo indurito viene messo in compressione con l'impiego di cavi di acciaio armonico.

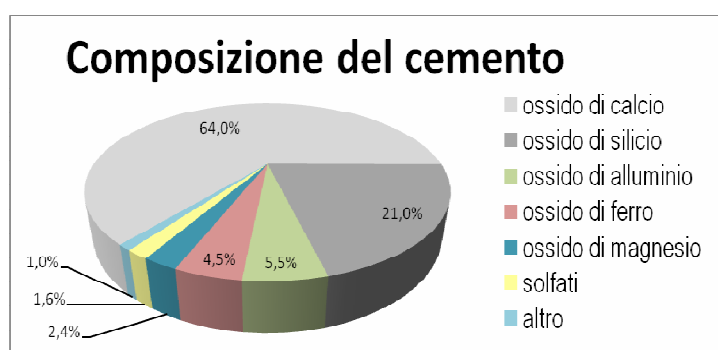
#### 3.2 I PRINCIPALI COMPONENTI DEL CEMENTO

Il prodotto base maggiormente utilizzato come legante nella preparazione di calcestruzzo è il **cemento Portland**.

Si ottiene dalla macinazione del clinker con l'aggiunta di gesso (*solfo di calcio idrato*) ed anidrite (*solfo di calcio anidro*) nella quantità necessaria (2-6%), con funzione di ritardante di presa.

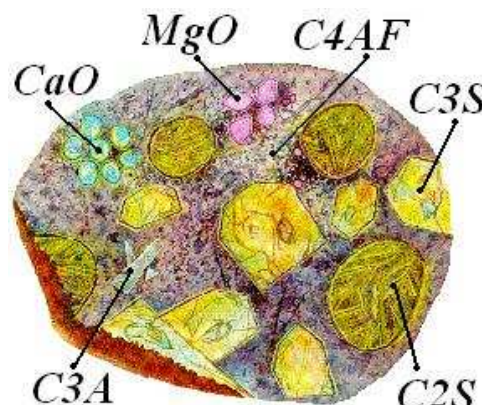
La polvere ottenuta è cemento pronto all'uso, la cui composizione tipica è la seguente:

- 64% ossido di calcio
- 21% ossido di silicio
- 5,5% ossido di alluminio
- 4,5% ossido di ferro
- 2,4% ossido di magnesio
- 1,6% solfati
- 1% altri, soprattutto acqua



Ad una analisi microscopica il cemento Portland presenta quattro componenti principali:

- **alite** (silicato tricalcio) **C3S**
- **belite** (silicato bicalcico) **C2S**
- **celite** (alluminato tricalcico) **C3A**
- **brownmillerite** (alluminato ferrito tetracalcico) **C4AF**



### 3.2.1 TIPI DI CEMENTO E COMPOSIZIONE

Dal 1993 la classificazione dei cementi è stata unificata a livello europeo secondo la normativa **UNI EN 197-1**, che stabilisce requisiti di **composizione** e di **resistenza**.

I prodotti della famiglia dei **cementi comuni** coperti dalla normativa EN/197-1 sono raggruppati in 5 principali tipi, 27 sottotipi e 6 classi di resistenza, per complessive 162 (27 × 6) possibili tipologie di cemento con caratteristiche diverse.

La **composizione** o proporzione tra i costituenti, oltre alle proprietà meccaniche, conferisce al prodotto idratato anche particolari caratteristiche di resistenza agli attacchi chimici o chimico-fisici.

Nella scheda seguente sono riassunti le caratteristiche salienti dei 5 tipi principali:

#### **Tipo I (CEM I) *Cemento Portland***

è costituito almeno per il 95% da clinker e solo in misura inferiore al 5% da costituenti minori. Sono i cementi generalmente utilizzati nella prefabbricazione di calcestruzzi armati semplici e precompressi.

#### **Tipo II (CEM II) *Cementi Portland Compositi***

a seconda del sottotipo sono addizionati con quantità variabili (dal 6 al 35%) di loppe granulate d'altoforno, fumi di silice, pozzolane, ceneri volanti, scisti calcinati o calcare. Hanno proprietà molto simili a quelle dei CEM I, che li rendono idonei al getto in opera o alla prefabbricazione di elementi in calcestruzzo armato normale e precompresso.

#### **Tipo III (CEM III) *Cementi d'altoforno (o siderurgici)***

contengono loppa d'altoforno (dal 36% al 95%) e sono particolarmente indicati per la realizzazione di opere di grosse dimensioni o nelle situazioni in cui il calcestruzzo è soggetto ad ambienti chimicamente aggressivi.

#### **Tipo IV (CEM IV) *Cementi pozzolanici***

contengono dall'11% al 55% di materiale pozzolanico naturale o artificiale e presentano elevata resistenza all'attacco chimico.

#### **Tipo V (CEM V) *Cementi Compositi***

sono costituiti da clinker (dal 20% al 40%), e da una miscela di loppa, pozzolana e ceneri volanti; sono adatti a realizzare calcestruzzi esposti ad ambienti mediamente aggressivi quali acqua di mare, acque acide, terreni solfatici, ecc..



Nella seguente tabella sono riportate le **composizioni** dei vari tipi (5) e sottotipi (27):

## TIPI DI CEMENTO E COMPOSIZIONE

Tipi principali	Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune)		UNI EN 197/1:2001 - Composizione (Percentuale in massa) <sup>a</sup>										Costituenti secondari	
			Costituenti principali											
			Clinker K	Loppa di altoforno S	Fumi di silice D <sup>b)</sup>	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato T	Calcare			
Naturale P	Naturale calcinata Q	Silicea V				Calcica W	L	LL						
<b>CEM I</b>	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
<b>CEM II</b>	Cemento Portland alla loppa	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland ai fumi di silice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alla pozzolana	CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alle ceneri volanti	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM I/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland allo scisto calcinato	CEM I/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
	Cemento Portland al calcare	CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
		CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
Cemento Portland al calcare	CEM I/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
	CEM I/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5	
	CEM II/A-M	80-94	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	6-20	-	-	0-5	
<b>CEM III</b>	Cemento d'altoforno	CEM II/B-M	65-79	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	21-35	-	-	0-5	
		CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM III/B		20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
<b>CEM IV</b>	Cemento pozzolanico <sup>c)</sup>	CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM IV/A	65-89	-	11-35	11-35	11-35	11-35	11-35	-	-	-	0-5	
CEM IV/B		45-64	-	36-55	36-55	36-55	36-55	36-55	36-55	-	-	-	0-5	
<b>CEM V</b>	Cemento composito <sup>c)</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30	18-30	18-30	-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	-	31-50	31-50	31-50	-	-	-	-	0-5	

a) I valori del prospetto si riferiscono alla somma dei costituenti principali e secondari

b) La proporzione di fumi di silice è limitata al 10%

c) Nei cementi Portland compositi CEM II/A-M e CEM II/B-M, nei cementi pozzolanici CEM IV/A e CEM IV/B e nei cementi CEM V/A e CEM V/B i costituenti principali diversi dal clinker devono essere dichiarati nella denominazione del cemento.

La **resistenza** del cemento dipende dalla finezza di macinazione, che influisce sul rapporto fra *silicato tricalcico* e *silicato bicalcico*: maggiore è la finezza di macinazione, maggiore è il tenore di *silicato tricalcico* rispetto a quello *bicalcico* e più rapido lo sviluppo della resistenza meccanica.

Per ogni tipo di cemento sono potenzialmente disponibili 3 classi di resistenza standard a rottura per compressione, a distanza di 28 giorni dal getto:

- **32,5** MPa,
- **42,5** MPa,
- **52,5** MPa,

e per ognuna di esse, sono individuate 2 classi di resistenza iniziale (a 2 o 7 giorni):

- la prima **ordinaria** contrassegnata con la lettera **N**,
- la seconda **elevata** contrassegnata con la lettera **R**.

Pertanto secondo le UNI EN 197/1 esistono le seguenti classi di **resistenza** del cemento, per le quali sono definiti anche i tempi di inizio presa:

Classe	Resistenza a compressione (MPa)		Tempo inizio presa
	iniziale (a 2 o 7 gg)	standard a 28 giorni	
<b>32,5 N</b>	a 7 giorni $R \geq 16$	$32,5 \leq R \leq 52,5$	$t \geq 75$ min
<b>32,5 R</b>	a 2 giorni $R \geq 10$	$32,5 \leq R \leq 52,5$	$t \geq 75$ min
<b>42,5 N</b>	a 2 giorni $R \geq 10$	$42,5 \leq R \leq 62,5$	$t \geq 60$ min
<b>42,5 R</b>	a 2 giorni $R \geq 20$	$42,5 \leq R \leq 62,5$	$t \geq 60$ min
<b>52,5 N</b>	a 2 giorni $R \geq 20$	$R \geq 52,5$	$t \geq 45$ min
<b>52,5 R</b>	a 2 giorni $R \geq 30$	$R \geq 52,5$	$t \geq 45$ min



Su ogni sacco è riportato un codice alfanumerico, che identifica esattamente il tipo, il sottotipo, la classe di resistenza ed il tipo di indurimento.

Nel caso di cementi a basso calore di idratazione deve essere riportata anche la sigla LH.

Per esempio il codice del normale cemento **Portland 425** a resistenza iniziale ordinaria è **CEM I 42,5 N**.

### 3.2.2 CEMENTI SPECIALI

I cementi speciali sono cementi che si ottengono allo stesso modo del Portland, ma che hanno caratteristiche differenti da questo a causa della diversa composizione percentuale dei componenti.

#### Cementi resistenti ai solfati

Per contrastare l'attacco acido dei solfati presenti nelle acque superficiali o sotterranee si utilizzano cementi Portland (Tipo I, II, III, IV) ad alto tenore di ferro (cementi ferrici) ed a basso modulo calcareo, che in idratazione producono minori quantità di calce libera. Ottimi risultano i cementi pozzalatici e d'altoforno.

A seconda della **resistenza chimica ai solfati** i cementi si distinguono in M.R.S. (moderata resistenza), A.R.S. (alta resistenza) e AA.R.S (altissima resistenza).

#### Cementi resistenti al dilavamento della calce

Abbastanza simili sono i cementi resistenti all'azione dilavante di acque pure o ricche di anidride carbonica, che tendono a dissolvere la calce o trasformarla in bicarbonato solubile.

A seconda della **resistenza al dilavamento della calce** i cementi si distinguono in M.R.D. (moderata resistenza), A.R.D. (alta resistenza) e AA.R.D (altissima resistenza).

Per resistenze maggiori risulta necessario utilizzare delle protezioni superficiali quali guaine, resine o pitture impermeabilizzanti.



### Cementi a basso calore di idratazione

Sono impiegati per applicazioni in cui è necessario evitare l'instaurarsi di tensioni interne che possono favorire la disgregazione del calcestruzzo, come in getti massivi nei quali la parte interna tende a raffreddarsi molto più lentamente della parte corticale.

Si tratta di **cementi tipo LH**, confezionati con Portland ferrico a basso tenore di alite (C3S) e celite (C3A), costituenti principali del clinker che producono maggiore calore di idratazione, macinati in maniera più grossolana rispetto a quelli comuni, per rallentare la velocità di idratazione.

Per getti di calcestruzzo in sbarramenti di ritenuta di grandi dimensioni si dovranno utilizzare **cementi tipo VHL** a bassissimo calore di idratazione conformi alla norma UNI EN 14216.



### Cemento a presa rapida

Si utilizza da solo o miscelato con sabbia (malta) ed è indicato per piccoli lavori di fissaggio e riparazione; avendo la caratteristica di rapprendere in pochi minuti dalla miscelazione con acqua, per opere maggiori non si avrebbe il tempo per effettuare un buon getto.

Si produce in modo analogo al cemento Portland tradizionale, ma con temperature di cottura inferiori. La velocità di presa dipende anche degli additivi e dalla quantità di gesso in miscela.



### Cemento alluminoso (cemento fuso)

È un prodotto del tutto particolare con elevati tenori di alluminio (40-80%), ottenuto dalla cottura sino a fusione quasi completa (1550-1600°C) di una miscela di bauxite e calcare, colata in lingotti raffreddati, poi macinati con mulini a palle. È un cemento che presenta un rapidissimo indurimento con elevata resistenza meccanica a breve scadenza, anche a bassa temperatura, e un'elevata resistenza ai solfati e all'azione dilavante dell'acqua.

Tuttavia ha un elevato calore d'idratazione e la resistenza meccanica e la durabilità vengono compromesse nel tempo a causa di un progressivo rilascio di acqua che genera porosità e permeabilità.

Può dunque essere impiegato come additivo nelle malte tradizionali per realizzare intonaci refrattari, per lavorare in climi freddi e laddove non occorra una resistenza meccanica particolare.

La normativa italiana proibisce l'utilizzo del cemento alluminoso per opere in calcestruzzo armato.





### Cemento Portland bianco

Con caratteristiche di lavorabilità, presa e resistenza meccanica analoghe a quelle degli altri cementi, i cementi bianchi vengono prevalentemente impiegati nelle strutture architettoniche, nella prefabbricazione, nel calcestruzzo a faccia vista ed ove siano richieste particolari valenze estetiche.

Per migliorarne la brillantezza viene aggiunto marmo macinato ed è miscelato con inerti di color bianco. Sono cementi a bassissimo contenuto di ferro (e manganese), che conferisce al normale cemento Portland il colore grigiastro ed un grigio più scuro al cemento ferrico.

Per supplire all'azione fondente del ferro ( $Fe_2O_3$ ) si aggiungono fluorite ( $CaF_2$ ) e/o criolite ( $Na_3AlF_6$ ).



### Cemento Portland colorato

Si ottengono miscelando cemento bianco con un pigmento colorato. È importante che il pigmento non contenga sostanze nocive sia per l'idratazione del cemento sia per la durabilità del calcestruzzo.

### Leganti idraulici microfini

Si tratta di cementi, o altri leganti idraulici, macinati con un'elevatissima finezza che li rende idonei alla preparazione di miscele idrauliche per iniezioni, che possono permeare nei sistemi porosi o fessurati con vuoti accessibili ed intercomunicanti. Si impiegati soprattutto nei trattamenti di restauro, consolidamento ed impermeabilizzazione di strutture ed elementi architettonici ovvero di consolidamento di terreni incoerenti o rocce fessurate.

### Cementi espansivi

Sono costituiti da una miscela di cemento e additivi espansivi e vengono utilizzati per compensare gli effetti negativi dovuti al ritiro e scongiurare possibili distacchi di getti in forme metalliche armanti (inghisaggio o grouting) o di iniezioni di miscele liquide in pressione dietro il rivestimento definitivo di gallerie (tunnelling).

Esistono malte a base di **cementi fortemente espansivi** che vengono utilizzate per le demolizioni e tagli di rocce e calcestruzzi senza produzione di rumore, vibrazioni e lanci di detriti.





### 3.2.3 SICUREZZA E RISCHI PER LA SALUTE DEGLI UTILIZZATORI

#### Alcalinità

In fase di utilizzazione, la miscela costituita da cemento Portland unito all'acqua è fortemente alcalina (circa **pH 13**) per la liberazione di idrossidi di calcio, sodio e potassio.

A seguito di un contatto prolungato possono manifestarsi irritazioni cutanee che durano qualche ora (dermatite irritante o da contatto). A causa dell'effetto caustico, durante il suo impiego è dunque opportuno l'utilizzo di guanti a protezione delle mani ed occhiali per proteggere gli occhi da spruzzi. In caso di contatto, occorre lavare immediatamente con abbondante acqua.

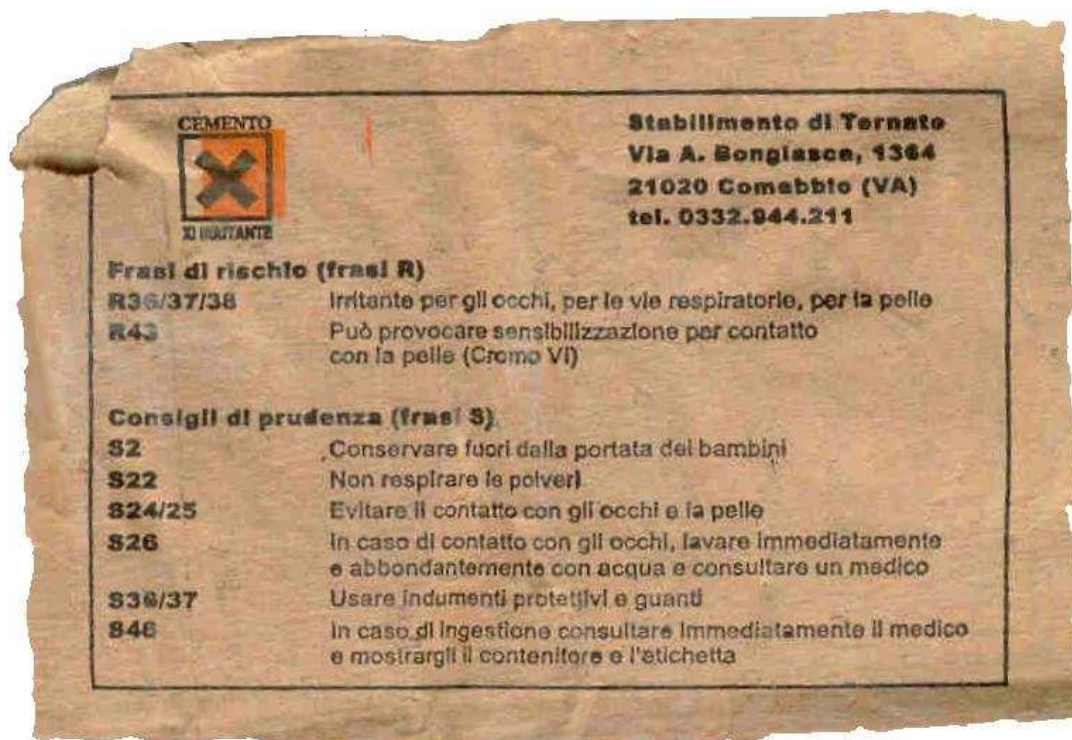
Una volta indurito, il cemento può essere invece toccato senza problemi.

#### Presenza di cromo

Nel cemento, in relazione alle materie prime ed ai combustibili impiegati, può essere contenuta una certa quantità di cromo esavalente, che, in quanto idrosolubile, può penetrare attraverso il contatto con la pelle non protetta. Oltre all'attività cancerogena e mutagena, in soggetti particolarmente sensibili provoca fenomeni allergici che hanno come conseguenza la cosiddetta dermatite allergica.

Per questo motivo in molti paesi il tenore massimo di cromo VI è regolamentato. In Europa per esempio non deve superare le 2 parti per milione (2 mg/kg).

Per ridurre eventuali contenuti maggiori è possibile aggiungere al cemento additivi particolari (polveri di *solfato stannoso* o *solfato ferroso*), la cui efficacia tuttavia è limitata ad un periodo che varia da tre a sei mesi. Per queste ragioni sull'imballaggio del cemento o dei preparati contenenti cemento devono figurare informazioni riguardanti la data di confezionamento del prodotto, nonché le condizioni ed il periodo di conservazione che garantiscono l'efficacia dell'agente riducente. Nel caso di prodotto venduto sfuso, le stesse indicazioni sono presenti sulla bolla di accompagnamento.



### 3.3 MATERIE PRIME DEL CEMENTO

Per la formulazione del cemento, a seconda del tipo e delle proprietà desiderate, viene utilizzato il componente base, **clinker di cemento Portland** e piccole quantità di **solfo di calcio**, con l'eventuale aggiunta di altri materiali inorganici naturali o artificiali, che conferiscono ai cementi caratteristiche peculiari.

#### 3.3.1 COMPONENTI DI BASE

##### Clinker di cemento Portland

Le materie prime per la produzione del clinker Portland sono minerali naturali, o materiali sostitutivi, contenenti:

- ossido di calcio  $CaO$  (44%),  
( $CaCO_3$  ~ 80%)
- ossido di silicio  $SiO_2$  (14,5%),
- ossido di alluminio  $Al_2O_3$  (3,5%),
- ossido di ferro  $Fe_2O_3$  (2,0%),
- ossido di magnesio  $MgO$  (1,6%).



*Clinker di cemento Portland*

Vengono impiegate marne, che in genere hanno naturalmente la composizione desiderata, estratte in miniere, in sottoterraneo o a cielo aperto, normalmente poste in prossimità della fabbrica.

In alcuni casi per correggere la composizione è necessario aggiungere argilla, calcare, oppure minerale di ferro, bauxite (contenente alluminio) o altri materiali residui di fonderia.

La cottura della miscela ad alte temperature porta alla formazione dei quattro composti mineralogici principali: *alite* (C3S), *belite* (C2S), *celite* (C3A) e *brownmillerite* (C4AF).

I primi due composti (75-85%) conferiscono le caratteristiche di resistenza meccanica al cemento indurito, gli altri due partecipano ai fenomeni della presa.

##### Solfato di calcio (gesso o anidrite)

Viene aggiunto al clinker, come solfato di calcio semidrato o anidro, con la funzione di regolatore di presa, rallentando la reazione dell'alluminato tricalcico.

Eccessive quantità di gesso provocano espansioni e fessurazioni del cemento plastico.

#### 3.3.2 ALTRI COMPONENTI

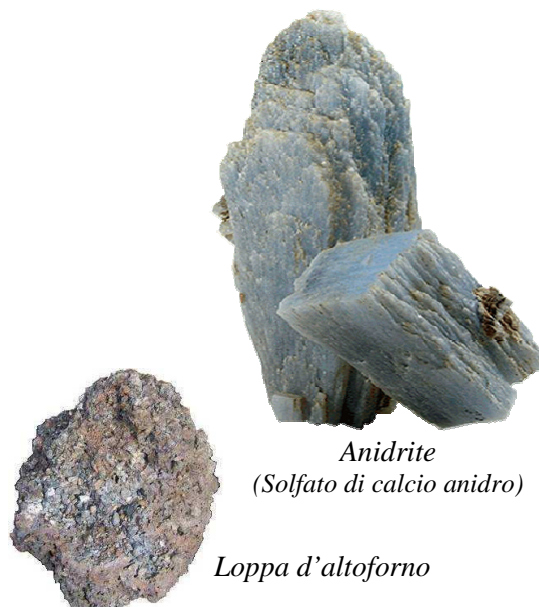
##### Loppa granulata d'altoforno

È ottenuta per brusco raffreddamento di una scoria fusa proveniente dalla fusione in altoforno dei minerali di ferro e quando è attivata ha proprietà idrauliche.

##### Fumo di silice

È un sottoprodotto dell'industria di produzione al forno elettrico del silicio metallico e delle leghe ferro – silicio, derivante dalla ricondensazione di silice in polvere finissima allo stato vetroso (silice amorfa all'85-98%) e con elevata attività pozzolanica.

Il fumo di silice viene utilizzato in misura massima del 10 % per il confezionamento di calcestruzzi ad alta resistenza e durabilità.



*Anidrite*  
(Solfato di calcio anidro)

*Loppa d'altoforno*

### Materiali pozzolanici

I materiali pozzolanici sono sostanze naturali o industriali silicee o silico-alluminose.

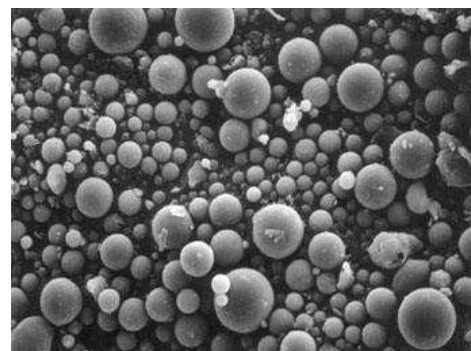
Pur non reagendo spontaneamente, in presenza di calce libera ed acqua si induriscono come i leganti idraulici. Sono naturali le **pozzolane** di origine vulcanica; sono naturali calcinate sostanze di origine naturale attivate mediante trattamento termico.



### Ceneri volanti

Sono le polveri fini ottenute dall'abbattimento dei fumi di impianti di combustione a carbone, costituite da ossido di calcio reattivo, biossido di silicio reattivo ad ossido di alluminio.

Ove sia prevalentemente silicea presenta proprietà pozzolaniche, mentre se prevale la componente calcica può avere anche proprietà idrauliche.



### Scisto calcinato

Si ottiene da scisti argillosi impregnati di bitume (scisti bituminosi) che, dopo calcinazione a circa 800°C, si trasformano in silicato bicalcico e alluminato monocalcico. Macinato finemente possiede pronunciate proprietà idrauliche, nonché un comportamento pozzolanico per la presenza significativa di ossido di silicio reattivo.

### Calcare

È una roccia naturale costituita essenzialmente da carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

L'aggiunta di calcare, finemente macinato, al cemento ne migliora alcune proprietà chimico-fisiche, accelerando l'idratazione e l'indurimento iniziale e riducendo il ritiro.



### Argilla

Miscela di minerali a granulometria molto fine tra cui in genere prevalgono silicati idrati di alluminio, magnesio e ferro, accompagnati da componenti minori di quarzo e calcare.

### Additivi

Eventuali altri additivi sono aggiunti per conferire particolari proprietà al cemento, in quantità comunque inferiore all' 1,0% in massa del cemento. Fra essi si annoverano:

- *fluidificanti*, per ottenere buona lavorabilità pur con basso rapporto acqua/cemento;
- *acceleranti*, per ridurre i tempi di presa e di indurimento;
- *ritardanti*, per ripartire in un maggiore tempo lo sviluppo del calore di idratazione;
- *aeranti*, per creare nella massa 1-2% di microbolle (diametro 0,1 mm), conferendo al cemento buona resistenza al gelo e migliorando la lavorabilità.

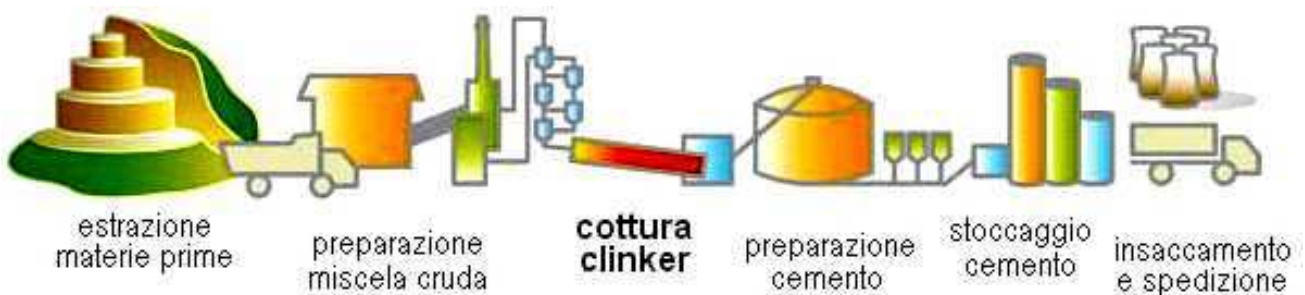
Sono anche disponibili prodotti che producono contemporaneamente alcuni degli effetti descritti.



## 4 LA PRODUZIONE DEL CEMENTO

A grandi linee la fabbricazione del cemento Portland si può suddividere in tre fasi tipiche:

- preparazione della miscela grezza dalle materie prime: i componenti principali (calcare 80% e argilla 20%) vengono frantumati e macinati dando origine alla *farina* (la miscela cruda).
- produzione del clinker: la *farina* viene riscaldata a circa 1500° C in forni rotanti e, attraverso complesse reazioni chimiche, viene trasformata in *clinker* (il materiale cotto).
- preparazione del cemento: il clinker viene macinato finemente con l'aggiunta di una piccola quantità di gesso, ottenendo il *cemento comune*, il **Portland**. Aggiungendo, in questa fase, altri componenti si ottengono *cementi speciali*.



Ogni fase comprende poi una serie di operazioni che nell'insieme compongono il particolare e complesso ciclo produttivo del cemento.

### 4.1 PREPARAZIONE DELLA MISCELA CRUDA

#### 4.1.1 ESTRAZIONE MATERIE PRIME

Come già ampiamente riferito le materie prime impiegate, tutte molto diffuse in natura, sono rocce costituite prevalentemente da **carbonato di calcio** nonché da **argille** e **calcarei marnosi**, contenenti oltre al carbonato di calcio, anche notevoli percentuali di silicato di alluminio e ferro.

La loro estrazione avviene generalmente da cave a cielo aperto situate nei pressi dello stabilimento con tecniche diverse, a seconda della durezza, della giacitura e della conformazione dei luoghi.

Il sistema di coltivazione più in uso è il *metodo a gradoni*, con il quale il materiale viene scavato a stadi sovrapposti l'uno all'altro (gradoni), rispettando determinate altezze, larghezze, e pendenze dei fronti in funzione sia della natura, stratificazione e stabilità del suolo, sia della tecnica estrattiva.

La qualità delle materie prime viene periodicamente verificata ai fini dell'ottenimento della corretta composizione della miscela cruda, in funzione del prodotto desiderato.





#### 4.1.2 FRANTUMAZIONE

I materiali ottenuti in cava vengono sottoposti a frantumazione grossolana per ottenere un prodotto omogeneo, di pezzatura a dimensioni massime generalmente non superiori a 100 – 150 mm, costituito da una corretta miscela dei diversi costituenti, da avviare agli ulteriori trattamenti.

La frantumazione può essere eseguita in cava con frantoi mobili, o in cementeria mediante impianti a martelli, a mascelle, ad urto, ecc, previa eventuale rottura dei blocchi più grossi con martelloni pneumatici montati su mezzi cingolati. In questo caso, se la cava è in adiacenza allo stabilimento, il trasporto del materiale estratto può avvenire con dumper o mediante moderni sistemi meccanici automatizzati.



*Frantoio mobile*



*Frantoio a martelli*



*Frantoio a mascelle*

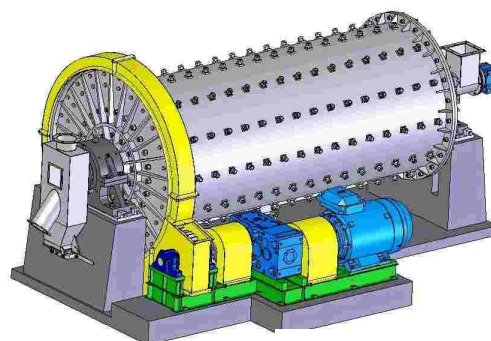


*Frantoio a cilindri dentati*

#### 4.1.3 PREPARAZIONE DELLA MISCELA CRUDA (FARINA)

Per l'ottenimento di una farina cruda di composizione sufficientemente costante nel tempo ed idonea per essere sottoposta al trattamento termico di cottura, il materiale frantumato viene sottoposto alle seguenti operazioni:

- **preomogeneizzazione** (eventuale) – effettuata in appositi impianti per garantire una perfetta miscelazione preliminare del materiale, ove proveniente da fonti diverse;
- **essiccazione/macinazione del crudo** – operazioni normalmente effettuate congiuntamente in mulini a sfere termoventilati, impiegando preferibilmente aria calda recuperata dal processo di cottura ovvero prodotta da un bruciatore ad olio combustibile; l'essiccazione è necessaria nei processi di cottura per via secca o semisecca;
- **omogeneizzazione della farina cruda** - effettuata in sili attraverso agitazione pneumatica e/o meccanica della *farina cruda* prima dell'avvio alla fase di cottura.



*Mulino a sfere*

#### 4.1.4 CONTROLLO CARATTERISTICHE DI QUALITÀ DELLA FARINA

Viene effettuato con elevata frequenza su campioni di *farina cruda* prelevati all'uscita del mulino. I parametri controllati riguardano le caratteristiche chimiche e granulometriche.

## 4.2 COTTURA DELLA MISCELA CRUDA E PRODUZIONE DEL CLINKER

La fase di cottura della miscela cruda per produrre il clinker Portland (materiale cotto) è il *cuore* del ciclo tecnologico del cemento. Durante la cottura avvengono le trasformazioni che portano alla formazione dei composti idraulici essenziali del cemento, influenzandone significativamente le caratteristiche qualitative e prestazionali.

La chimica fondamentale del processo di produzione del cemento è basata su:

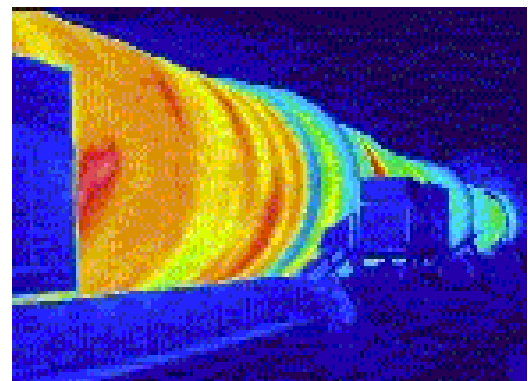
- calcinazione** – decomposizione del carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) a circa  $900^\circ\text{C}$  per formare ossido di calcio ( $\text{CaO}$ , calce) e liberare anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ );
- clinkerizzazione** – reazione dell'ossido di calcio ad alte temperature, tipicamente  $1400\text{-}1500^\circ\text{C}$ , con silice, allumina e ossido ferroso per formare silicati, alluminati e ferriti di calcio che compongono il clinker.

Per il processo di cottura viene impiegato uno speciale forno costituito da un enorme cilindro rotante orizzontale con leggera inclinazione, chiamato *forno Kiln*.

Il *forno a tino verticale* si usa ancora per la produzione della calce, o per impianti più piccoli destinati a produrre cementi speciali.

Il forno rotante consiste in un cilindro di acciaio con diametro di 3-6 m, lunghezza di 55 - 200 m, rapporto lunghezza/diametro di 10:1 e 38:1. Il cilindro ha un'inclinazione del 2,5-4,5% e ruota intorno al proprio asse, appoggiato su sostegni, con velocità di 0,5-4,5 giri/min.

La combinazione dell'inclinazione del cilindro e del movimento di rotazione fanno sì che il materiale avanzi lentamente lungo il cilindro stesso verso la zona più calda.



*Il forno rotante*

### 4.2.1 I PRINCIPALI PROCESSI DI COTTURA

Le principali tecnologie impiegate nel processo di cottura del clinker sono:

- **Processo a via secca:** La farina cruda (umidità  $> 1\%$ ) viene alimentata in polvere al preriscaldatore o al precalcinatore o, più raramente, ad un forno lungo.
- **Processo a via semi-secca:** la farina cruda essiccata viene pellettizzata, formando dei granuli con acqua, e alimentata (umidità 10-20%) ad un preriscaldatore a griglia situato prima del forno.
- **Processo a via semi-umida:** 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.
- **Processo a via umida:** le materie prime sono alimentate in forma di melma (umidità 32-40%; slurry) direttamente nel forno oppure in un apposito essiccatore.

La produzione di *clinker* a via umida è in disuso per l'elevato consumo termico della metodologia. Una buona parte dell'energia termica è utilizzata per l'evaporazione dell'acqua contenuta nella melma. La produzione di *clinker* tramite la via semisecca, a causa dell'umidità contenuta nella farina alimentata, viene sempre meno utilizzata.

**Nelle più moderne cementerie il *clinker* viene prodotto utilizzando il processo a via secca.**

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 processo di cottura, per produrre il *clinker*, la miscela cruda (farina per i *processi a via secca* o melma per i *processi a via umida*) viene in ogni caso sottoposta, in sequenza, a:

- **essiccazione, preriscaldamento,**
- **calcinazione,**
- **sinterizzazione.**

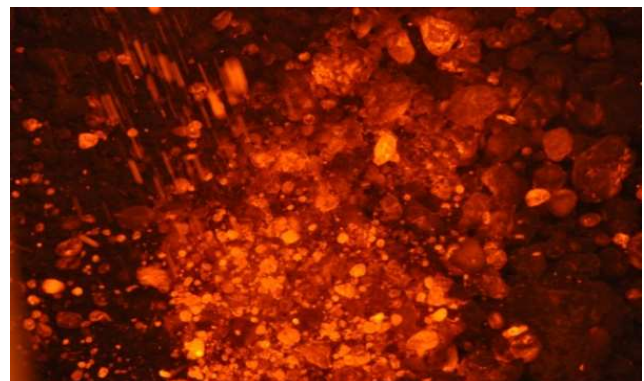
È inoltre importante che la temperatura della zona di cottura del forno sia intorno a 1400-1500°C e la temperatura della fiamma di circa 2000°C.

**Preparazione dei combustibili**

I combustibili impiegati nel forno di cottura sono normalmente **carbone** e **coke di petrolio**; solo in taluni casi o in emergenza viene utilizzato **olio combustibile**, molto più raramente **gas metano**.

Nel caso di impiego di carbone/coke di petrolio debbono essere previsti sistemi di stoccaggio (carbonile), macinazione/essiccazione, nonché trasporto, stoccaggio e dosaggio del polverino.

Il combustibile viene alimentato al forno mediante apposito bruciatore posto assialmente nella parte terminale del cilindro rotante, talché la direzione dei prodotti della combustione risulta in controcorrente rispetto ai materiali in cottura provenienti dalla zona di essiccazione/calcinazione.



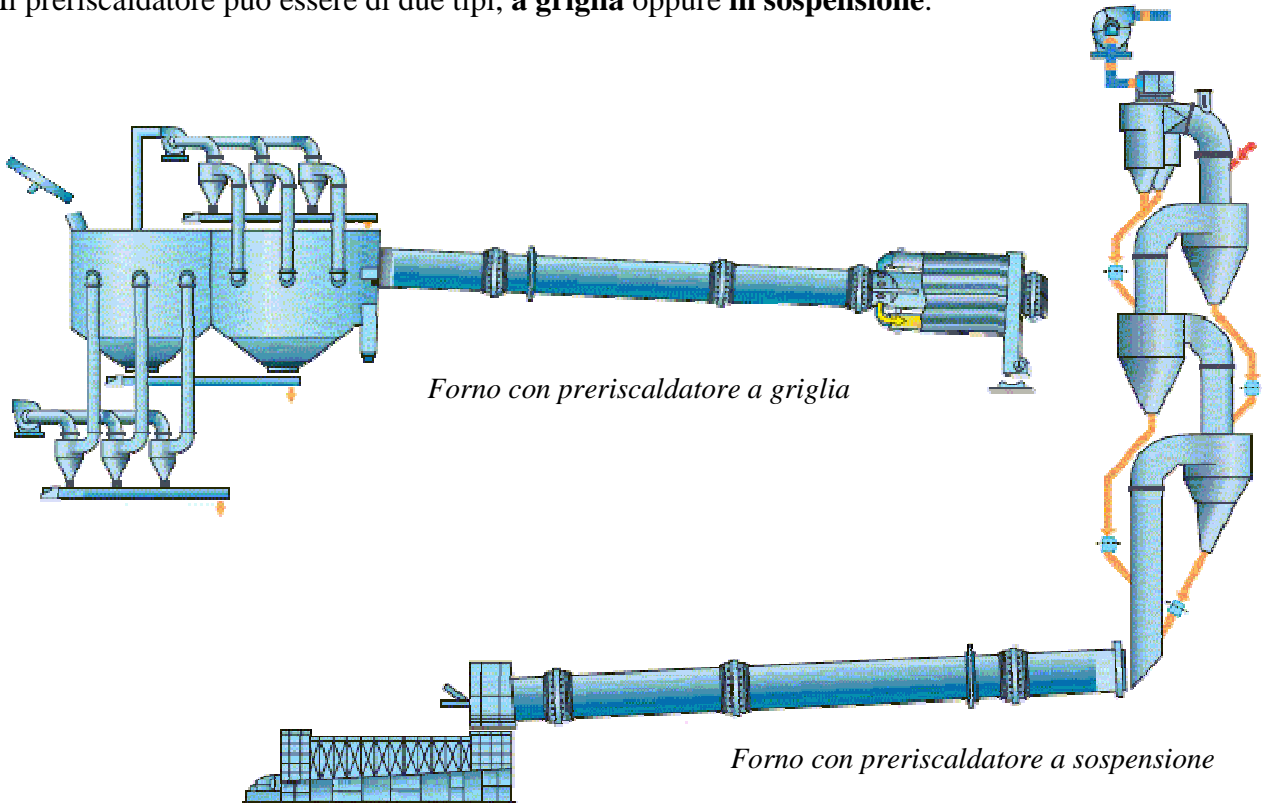


## 4.2.2 I FORNI

I **forni rotanti lunghi** (anche oltre 200 m, con rapporto lunghezza/diametro fino a 38:1), aventi produzioni elevate (fino ad oltre 3.600 t/giorno), sono adatti per tutti i processi e sono progettati per svolgere lungo il loro percorso tutte le fasi (essiccare, preriscaldare, calcinare e sinterizzare).

I **forni rotanti con preriscaldatore** hanno tipicamente un rapporto lunghezza/diametro compreso tra 10:1 e 17:1, e sono tanto più corti quanto più efficiente è il preriscaldatore/precalcinatore.

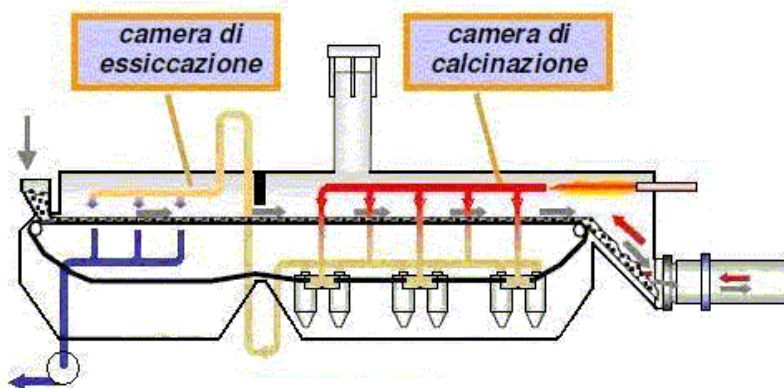
Il preriscaldatore può essere di due tipi, **a griglia** oppure **in sospensione**.



### Preriscaldatore a griglia

Nota come *forno Lepol*, sviluppando parte del processo di cottura in un impianto fisso esterno al forno (talora dotato di bruciatore ausiliario), consente di ridurre la lunghezza del forno rotante, diminuendo in tal modo anche le perdite di calore con aumento del rendimento energetico.

Viene impiegato nel processo a via semisecca (e semiumida), alimentando alla griglia un tappeto di granuli (~ 20 cm) formati dal *piatto granulatore* con aggiunta d'acqua (o biscotti filtrati ed estrusi).



*Griglia Lepol (schema)*



La griglia è racchiusa in un tunnel diviso in due sezioni, una per l'**essiccazione** e un'altra per la **calcinazione**, suddivise da un divisorio avente un'apertura per la griglia.

I gas caldi provenienti dal forno a 1000-1100°C vengono fatti passare più volte attraverso la griglia ricoperta di granuli, prima nella sezione di calcinazione e poi, a 250-300°C, in quella di essiccazione. In uscita dalla camera di essiccazione si sono raffreddati fino a 90-150°C.

I granuli si riscaldano a circa 150°C in camera di essiccazione ed a 700-800°C in calcinazione.

### **Preriscaldatore in sospensione**

Viene impiegato nel sistema a via secca. La farina cruda essiccata viene **preriscaldata**, ed anche parzialmente **calcinata**, mentre è tenuta in sospensione con i gas caldi provenienti dal forno in un sistema di cicloni in serie. Gli stadi dei cicloni sono usualmente in numero compreso tra quattro e sei e sono disposti uno sull'altro a formare una torre di altezza variabile tra 50 e 120 m.

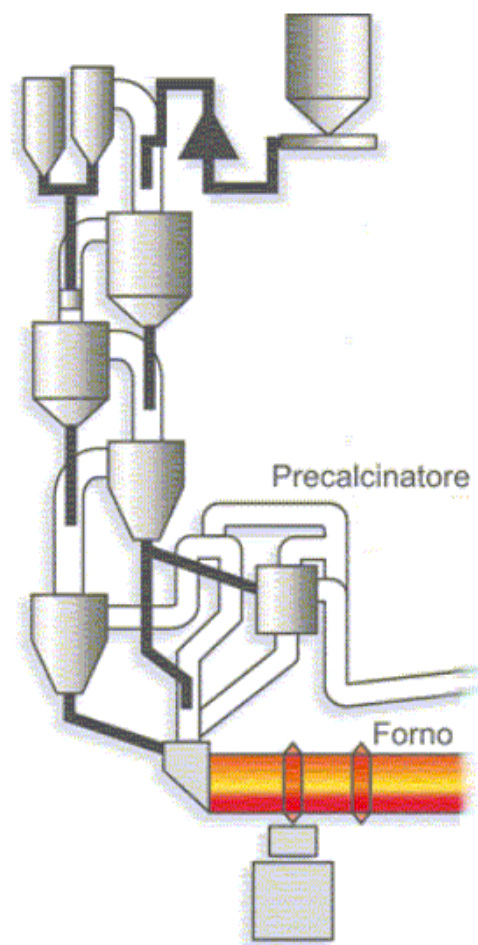
Lo stadio in posizione più elevata può essere costituito da due cicloni paralleli per una migliore separazione della polvere. Il gas esausto proveniente dal forno fluisce attraverso i vari cicloni dal basso verso l'alto.

La farina cruda finemente macinata si mescola con il gas esausto in controcorrente; essa è separata dal gas nei cicloni e si ricongiunge ad esso prima dello stadio di cicloni successivo.

Questa procedura si ripete per ogni stadio finché il materiale viene scaricato dall'ultimo ciclone nel forno rotante. Questo processo ciclico di miscelazione, separazione e rimescolamento avviene a temperatura elevata per ottimizzare lo scambio termico.

Il gas esausto, con temperatura di circa 330°C, viene di norma utilizzato per essiccare le materie prime in alimentazione al mulino crudo. Quando la farina entra nel forno rotante, la calcinazione è già avvenuta per circa il 30%.

Per completare la calcinazione nei forni più moderni è presente anche un precalcinatore, la cui camera di combustione è inserita fra forno e preriscaldatore, che usa come aria comburente i gas caldi provenienti dal raffreddatore del clinker. In entrata al forno la farina cruda ha una temperatura di circa 870°C ed è quasi completamente calcinata.



### **I gas esausti del forno**

In tutti i sistemi di cottura i gas esausti vengono convogliati in un dispositivo di abbattimento (filtro elettrostatico o a tessuto), che trattiene la polvere prima dell'immissione in atmosfera.

Nei processi a via secca, i gas esausti hanno una temperatura relativamente alta e normalmente forniscono calore per il mulino del crudo, quando questo è in funzione (marcia combinata).

### 4.2.3 I RAFFREDDATORI DEL CLINKER

Il raffreddatore del clinker è parte integrante della linea di cottura ed influisce in misura determinante sul rendimento e sull'economicità dell'impianto.

Esso svolge una duplice funzione:

- recuperare quanto più calore possibile dal clinker caldo (1450°C) per restituirlo al processo;
- ridurre rapidamente la temperatura del clinker a 100-150°C, per fissarne la composizione mineralogica ed ottimizzare le caratteristiche di reattività del cemento.

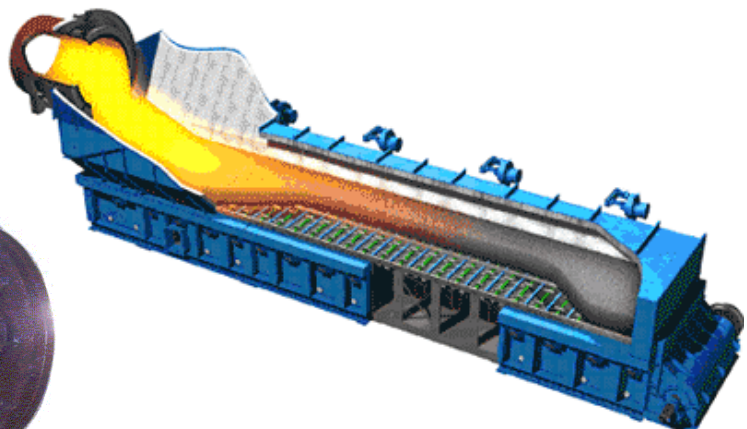


Il calore viene recuperato preriscaldando a 800-900°C l'aria secondaria impiegata per il processo di cottura e per la calcinazione, ovvero per l'essiccazione della farina cruda o del combustibile solido durante le rispettive fasi di macinazione.

Due sono i tipi principali di raffreddatore:

- rotante
  - tubolare dal forno rotante il clinker passa ad un tubo rotante analogo dotato di sollevatori che disperdono il prodotto nel flusso d'aria;
  - a satelliti dal forno il clinker passa attraverso aperture disposte circolarmente sul mantello collegate a 9-11 tubi raffreddatori, ciascuno dotato di dispositivi interni per sollevare e disperdere il clinker; la temperatura di uscita del clinker può essere ulteriormente controllata iniettando acqua nei tubi o sul mantello;
- a griglia
  - mobile il clinker viene scaricato su una griglia (griglia Recupol) analoga alla griglia Lepol e raffreddato da una corrente d'aria insufflata dallo scomparto inferiore attraverso il letto di clinker;
  - alternata lo spostamento del clinker è favorito dal movimento alternativo delle griglie; si distinguono due zone di raffreddamento:
    - di recupero, con impiego dell'aria come comburente,
    - più a valle, per un ulteriore raffreddamento il cui recupero è riservato all'essiccamento delle materia prime o del carbone.

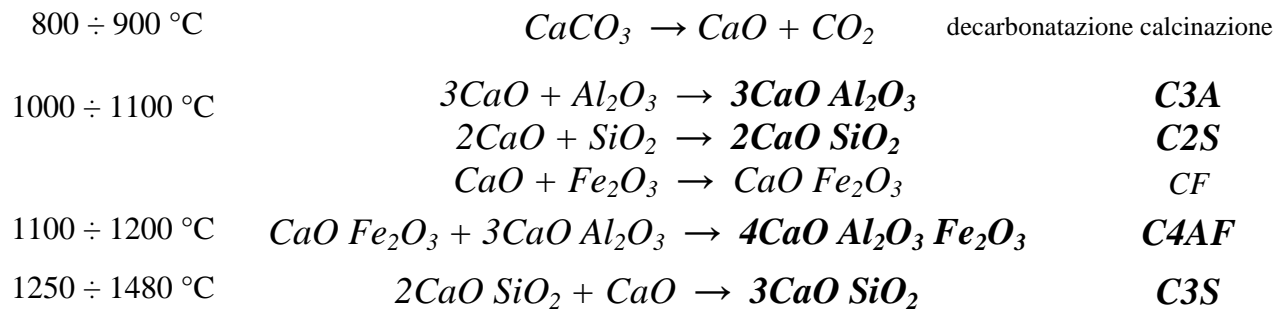
*Raffreddatore rotante tubolare*



*Raffreddatore a griglia mobile*

### 4.3 LE REAZIONI PER LA FORMAZIONE DEL CLINKER

Durante il processo di cottura, nei range di temperatura indicati, si producono le seguenti reazioni:



La composizione finale del clinker sarà costituita dalle seguenti percentuali in peso:

- 50% **C3S** (silicato tricalcio *alite*),
- 25% **C2S** (silicato bicalcico *belite*),
- 12% **C3A** (alluminato tricalcico *celite*),
- 8% **C4AF** (alluminato ferrito tetracalcico *brownmillerite*).



### 4.4 PREPARAZIONE DEL CEMENTO

All'uscita dal raffreddatore, in attesa delle lavorazioni successive, il clinker viene trasferito in sili di stoccaggio mantenuti in leggera depressione rispetto all'ambiente esterno da impianti di abbattimento che prevengono la dispersione delle polveri.

Sul prodotto vengono regolarmente effettuati controlli di qualità per testarne le caratteristiche.

Nei sili i diversi clinker sono lasciati stagionare per un conveniente periodo di tempo e poi passati alla macinazione. Trattandosi di un prodotto base per la fabbricazione delle svariate tipologie di cemento, talora, il clinker di cemento Portland viene venduto tal quale o trasferito come semilavorato ad altri stabilimenti per la operazioni di trasformazione in cemento.

#### 4.4.1 MACINAZIONE DEL COTTO E DOSAGGIO COSTITUENTI

Il ciclo di produzione del cemento dal punto di vista tecnologico culmina con la macinazione in polvere fine del clinker Portland in miscela con gesso, come regolatore dei tempi di presa, ed altri componenti (quali pozzolana naturale, cenere volante, loppa basica d'altoforno, calcare), che conferiscono specifiche proprietà, per ottenere i cementi compositi commercializzati e contemplati dalla normativa vigente. La macinazione finale del cemento è un'operazione molto importante perché contribuisce in modo determinante allo sviluppo delle sue prestazioni meccaniche (resistenza) e reologiche (lavorabilità).

La macinazione del cotto può essere effettuata anche in impianti diversi dai luoghi di produzione del clinker.

Il dosaggio del clinker e degli altri costituenti viene eseguito in proporzioni accuratamente prestabilite mediante il **nastro pesatore di alimentazione** e la miscela è resa omogenea durante il processo di macinazione, che riduce il materiale allo stato di polvere finissima.



Mulino verticale a rulli

La macinazione viene generalmente eseguita con mulini tubolari a sfere, mulini verticali a pista e rulli o presse a rulli. La maggior parte dei mulini lavora a circuito chiuso, separando il cemento della finezza richiesta dal materiale macinato e riciclando nel mulino il materiale grossolano.

Il cemento prodotto, a seconda del tipo, viene stoccato in vari silos per mezzo di pompe pneumatiche e trattenuto per un idoneo intervallo di maturazione.

I silos sono grandi strutture in cemento armato, presidiati da depolverazione a tessuto filtrante.



*Mulino tubolare a sfere*

#### **4.4.2 CONTROLLO DI QUALITÀ**

Sul prodotto finito sono svolti i necessari controlli di qualità volti ad assicurare, in condizioni economiche competitive, una produzione di leganti idraulici di qualità costante, conformi alle pertinenti normative tecniche e in grado di soddisfare le varie esigenze di impiego.

Tale compito è affidato al laboratorio di stabilimento che provvede a tutti i controlli interni:

- esame di tutte le materie prime e dei combustibili;
- scelta ottimale dei componenti della miscela cruda e il loro proporzionamento in funzione della composizione mineralogica ideale prescelta per il clinker;
- monitoraggio della composizione della farina cruda per verificarne la correttezza e per minimizzare le variazioni di composizione del materiale di cottura;
- controllo del processo tecnologico e produttivo, compreso il controllo delle emissioni;
- analisi chimica e prove fisiche sul cemento per assicurarne la conformità alle specifiche.

Su prodotto finito vengono effettuati specifici controlli sul contenuto di *Cromo IV* solubile, sostanza che penetrando attraverso la pelle può indurre dermatite allergica; per tale composto la normativa (Dir 2003/53/CE – DM 10 maggio 2004) fissa un limite di in 2 ppm. Oltre al controllo interno, tutte le Aziende associate ad AITEC si affidano ad un organismo esterno (ITC-CNR) per controllare e certificare la rispondenza del prodotto ai requisiti prescritti dalle norme.

#### **4.4.3 INSACCAMENTO E DISTRIBUZIONE**

Dopo l'assegnazione alla pertinente classe prevista dalle norme anche ai fini dell'etichettatura, i cementi vengono avviati alla distribuzione confezionati in sacchi (20-25%) o sfusi (75-80%).

Quando il cemento viene insaccato, viene estratto dal silo di deposito e inviato ad un impianto automatico di insaccamento, presidiato da un sistema di abbattimento e recupero polveri.

Si riempiono sacchi, di carta particolarmente resistente, del peso di 25 (e 50) kg che vengono impilati su palletts da 20 q.li e temporaneamente stoccati in magazzino, in attesa di essere prelevati e caricati su autocarro per la consegna.

Sui sacchi sono riportati i codici relativi alla tipologia di cemento contenuto, come descritti al paragrafo 3.2.1.

Nel caso di caricamento del cemento sfuso su autocisterne sono perlopiù impiegati sistemi pneumatici a ciclo chiuso, senza emissioni in atmosfera.





## 5 RECUPERO DI RIFIUTI E BIOMASSE IN CEMENTERIA

Nel ciclo di produzione del cemento si possono utilizzare e valorizzare sostanze e materiali derivanti da altri processi produttivi e di consumo, sia come **apportatori di materia**, sia come **combustibili di sostituzione**, contribuendo alla soluzione delle problematiche dello smaltimento dei rifiuti, senza interferire negativamente con la qualità del prodotto e senza provocare alcun impatto ambientale aggiuntivo.

### 5.1 RECUPERO DI MATERIA

L'attività di riutilizzo, nel ciclo di fabbricazione del cemento, di materiali residuali derivanti da altri processi produttivi e di consumo è consentita nel rispetto delle norme tecniche che definiscono specificamente i materiali recuperabili nonché le condizioni di esercizio degli impianti e le caratteristiche merceologiche del prodotto ottenuto. I materiali recuperati sono: scaglie di laminazione, loppa d'altoforno, allumina, gessi chimici, ceneri volanti, fumi di silice, ecc. .

Tali rifiuti vengono utilizzati sia nella miscela generatrice per la produzione del clinker (come fondenti e/o come equilibratori della composizione chimica della farina), sia come correttivi nella produzione del cemento, in parziale sostituzione del clinker e delle materie prime naturali (calcare, marna, gesso, pozzolana, ...), evitando in tal modo gli impatti ambientali negativi conseguenti al depauperamento delle cave ed allo smaltimento di materiali in discarica.

In relazione alle caratteristiche chimico-fisiche ed alle ridotte percentuali di impiego – disciplinate dalla norma UNI EN 197/1 (norma tecnica di prodotto), che definisce i requisiti dei leganti idraulici –, il recupero come materia di questi rifiuti non pericolosi non comporta alcuna variazione qualitativa delle emissioni rispetto alle normali condizioni di esercizio con le materie prime tradizionali, né variazioni delle caratteristiche merceologiche dei cementi prodotti.

### 5.2 RECUPERO ENERGETICO COME COMBUSTIBILI ALTERNATIVI

I forni da cemento, per le loro caratteristiche intrinseche e per le modalità di effettuazione dei processi di cottura, sono ormai da tempo riconosciuti a livello internazionale come ottimi impianti in cui effettuare attività di **coincenerimento con recupero energetico** di combustibili non convenzionali, con eccellenti risultati sia sotto il profilo tecnologico sia per quanto concerne l'aspetto ambientale. Ciò ancor più tenendo conto che l'energia termica rappresenta l'onere più rilevante nel processo di produzione del cemento.

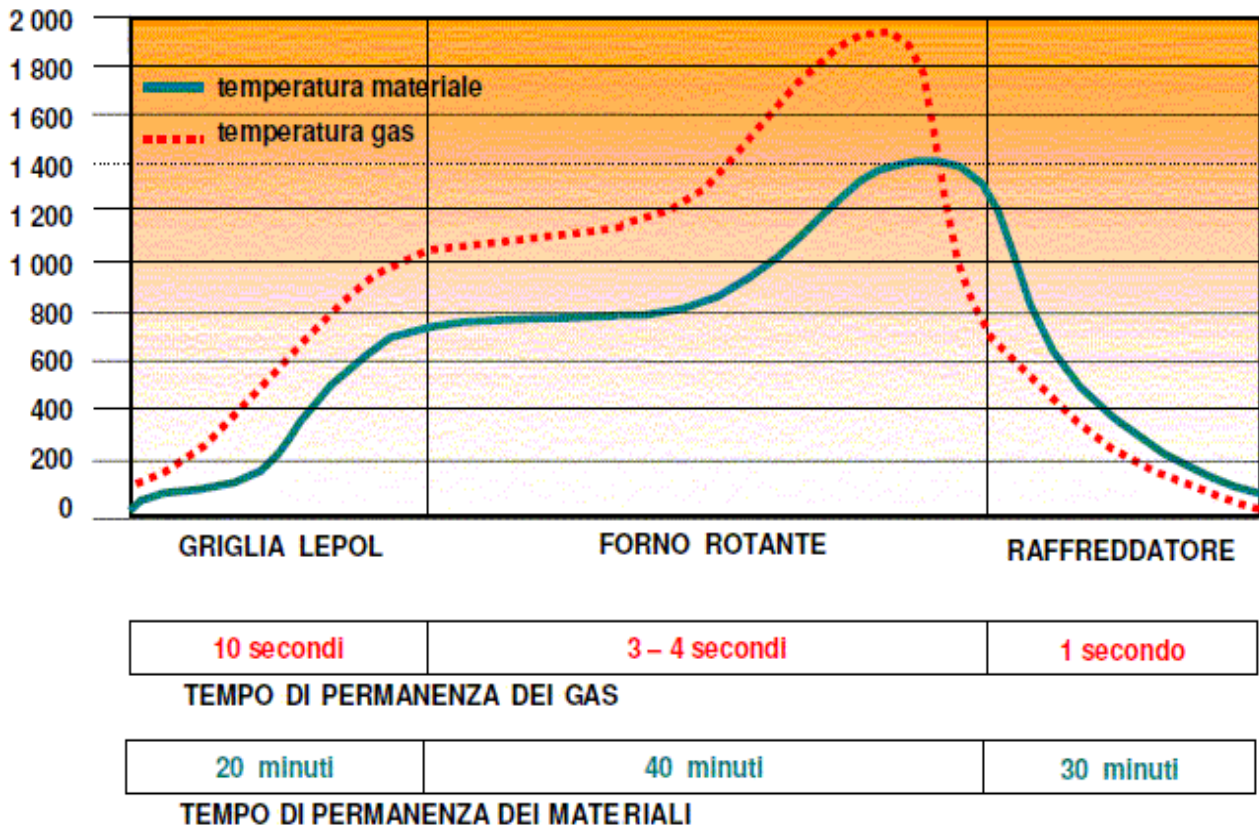
D'altronde anche i combustibili tradizionali impiegati in cementeria (*bit-oil* e *pet-coke*) risultano essere i combustibili più problematici del punto di vista ambientale, senza che ciò si ripercuota negativamente sulle emissioni residue, che risultano caratterizzate da polveri a spiccata matrice basica (con elevata reattività nei confronti di sostanze acide quali gli ossidi di zolfo), abbattute con elevatissima efficienza da sistemi di depolverazione impiegati.

La possibilità di coincenerimento di rifiuti dipende dalle caratteristiche tecnologiche del forno, che, per le sue caratteristiche costruttive e le condizioni di esercizio, garantisce:

- elevate temperature in corrispondenza dell'inserimento dei combustibili non convenzionali (1800 – 2000°C al bruciatore principale), nel tamburo rotante (1450°C durante la cottura del clinker) e nel forno secondario (850 – 1000 °C nella griglia di preriscaldamento e calcinazione);
- elevati tempi di permanenza dei fumi ad alta temperatura (da 5 sec – via semisecca, a 10 sec – via secca), nettamente maggiori di quelli di inceneritori o altri impianti termici;
- atmosfera ossidativa nel tamburo ed elevata inerzia termica del sistema di cottura, che assicura buone condizioni di combustione-ossidazione per lungo periodo anche in caso di improvvisa interruzione dell'alimentazione di combustibili.

Tali condizioni favoriscono:

- la distruzione termica dei composti organici
- l'adsorbimento di componenti gassose come HCl, HF o SO<sub>2</sub> e composti alcalini;
- reazioni chimiche di inertizzazione dei metalli pesanti nel clinker da cemento.



*Profilo termico e tempi di permanenza dei gas e dei materiali nel forno da cemento a via semisecca*

Anche dal punto di vista del bilancio ambientale globale, il coincenerimento dei rifiuti combustibili in forni da cemento garantisce i seguenti indubbi vantaggi:

- risparmio di combustibili convenzionali di origine fossile (carbone, coke, olio combustibile) nella fabbricazione del cemento, senza modifica quali-quantitativa delle emissioni del forno;
- risparmio di combustibili fossili nella distruzione di rifiuti;
- riduzione delle emissioni globali di inquinanti rispetto ad altri metodi di smaltimento;
- assenza di ceneri e residui di combustione, che rimangono inglobate nel clinker, senza pregiudizio per la qualità del cemento.

Non è un caso che, nel periodo di emergenza successivo alla diffusione della malattia nota all'opinione pubblica come *morbo della mucca* (BSE - *encefalopatia spongiforme bovina*), i forni da cemento siano stati individuati come impianti idonei a risolvere correttamente il problema dello smaltimento delle giacenze di grandi quantità di farine animali.

Con legge 49/2001 per i cementifici è stato istituito l'obbligo di coincenerimento del materiale proteico di origine animale in parziale sostituzione del combustibile tradizionale per un quantitativo termicamente equivalente.

Oltre alle farine animali, fra le diverse categorie di rifiuti impiegabili ed ormai diffuse in cementeria, in sostituzione di quota parte di combustibili convenzionali, si annoverano:

- combustibile derivato da rifiuti (CDR-RDF);
- fanghi essiccati da depurazione di acque civili (DSS - Dried Sewage Sludges);
- olii esausti ed emulsioni oleose;
- gomma e pneumatici fuori uso;
- plastiche e resine non clorurate;
- residui della lavorazione del legno;
- segature impregnate di solventi, vernici, morchie;
- solventi usati;
- carta e rifiuti di cartiera.

I diversi tipi di rifiuti da impiegare come combustibili sono sottoposti ad eventuali pretrattamenti al di fuori del cementificio effettuati a cura del fornitore o da Ditte specializzate nel trattamento dei rifiuti.

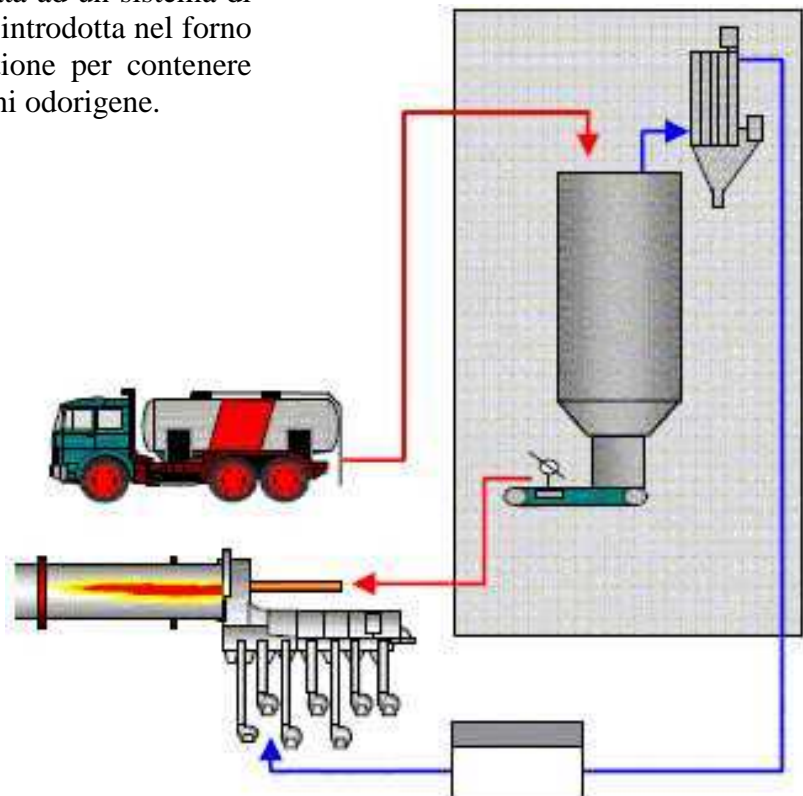
Pertanto essi devono essere solo stoccati presso il cementificio e quindi dosati per essere immessi nel forno al bruciatore principale.

I rifiuti liquidi vengono trattati ed utilizzati alla stregua dei tradizionali combustibili liquidi.

Nel caso solidi allo stato polveroso, l'autocisterna scarica e travasa il rifiuto combustibile con sistemi meccanici (coclee, elevatori, ...) o pneumaticamente in un silo di idonea capacità, da dove viene poi estratto per essere avviato a cocombustione nel forno rotante in corrispondenza della fiamma del bruciatore principale.

Lo stoccaggio è completamente chiuso a tenuto in depressione; l'aria aspirata è avviata ad un sistema di depolverazione e successivamente introdotta nel forno come aria secondaria di combustione per contenere anche eventuali potenziali emissioni odorigene.

*Sistema di approvvigionamento e stoccaggio di rifiuti solidi impiegati come combustibili.*

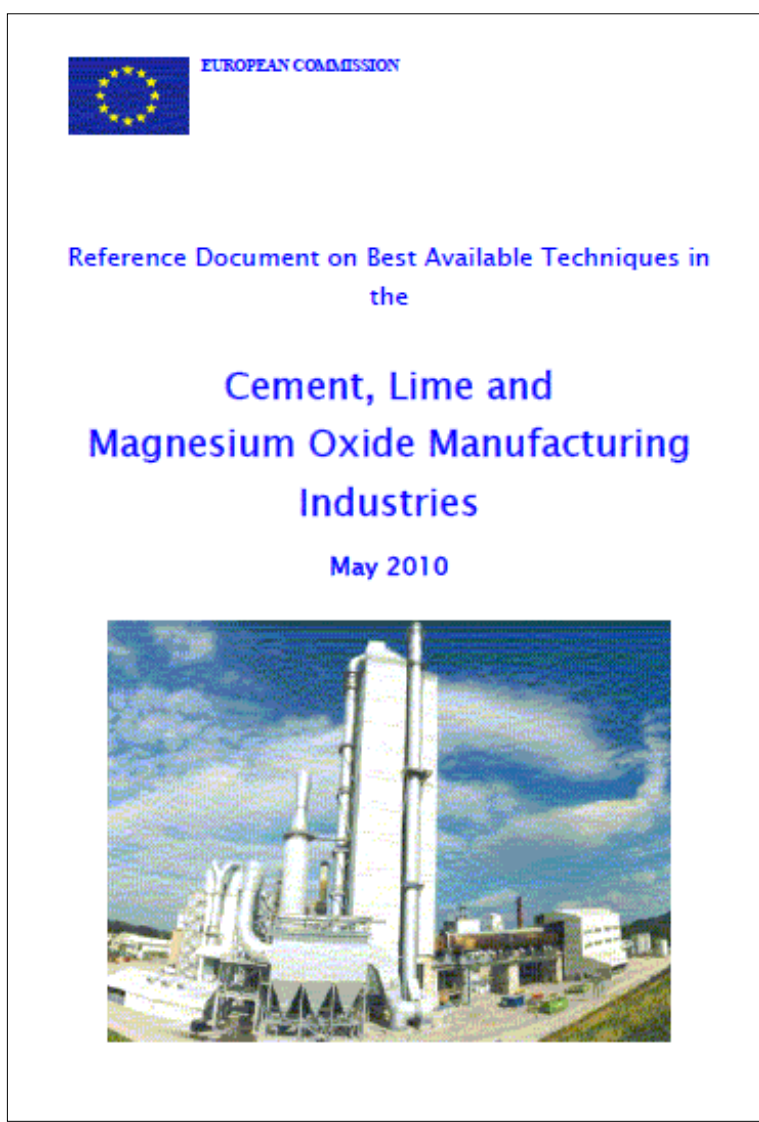


## 6 LE MIGLIORI TECNICHE DISPONIBILI NEL SETTORE DEL CEMENTO

La produzione del cemento rientra nella disciplina IPPC al punto 3.1 dell'allegato I della direttiva 2008/1/CE, ovvero:

**Impianti destinati alla produzione di clinker da cemento in forni rotativi la cui capacità di produzione supera 500 tonnellate al giorno e impianti destinati alla produzione di calce viva in forni rotativi la cui capacità di produzione supera 50 tonnellate al giorno o in altri tipi di forni aventi una capacità di produzione di oltre 50 tonnellate al giorno.**

Il documento di riferimento sulle migliori tecniche disponibili (BAT Reference Document - BRef) relativo al settore “**Industrie del cemento, della calce e dell'ossido di magnesio**” (CLM - Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries) è stato adottato, nella sua versione aggiornata, nel maggio 2010.



Migliori Tecniche Disponibili ai sensi della **direttiva 2010/75/UE** (IED)



## 6.1 GENERALITÀ DEL SETTORE CEMENTIERO

Il cemento è un materiale fondamentale per le costruzioni e le opere di ingegneria civile.

La produzione mondiale di cemento è di circa 3.300 Mt/anno (2010); più della metà della produzione e dei consumi spetta alla Cina.

L'attuale produzione di cemento nell'Unione Europea, in contrazione rispetto ai primi anni del 2000, è attorno a 200 milioni di tonnellate, corrispondenti a circa il 6% della produzione mondiale. I consumi annuali pro-capite si aggirano sui 400 kg.

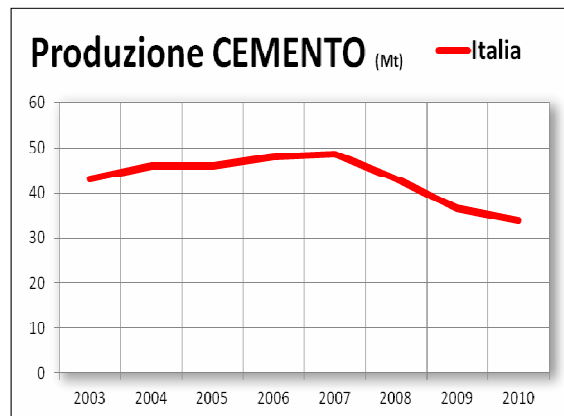
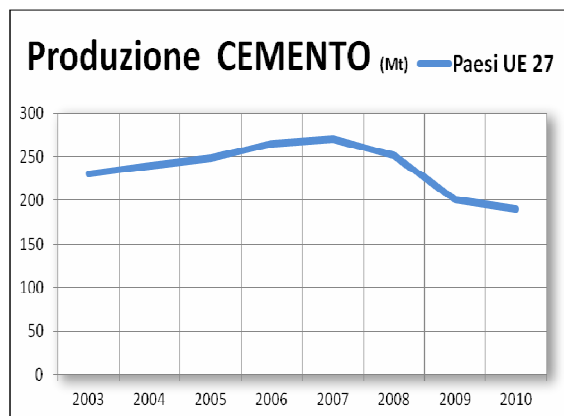
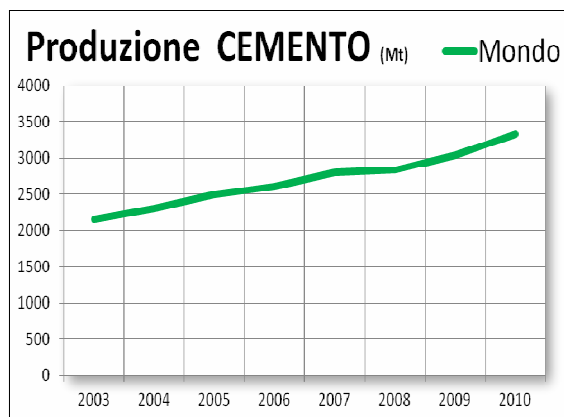
Nella UE sono presenti

- 268 impianti, con un totale di 377 forni, che effettuano il ciclo completo di produzione di clinker e di successiva trasformazione in cemento finito;
- 90 impianti che effettuano sola macinazione del cemento (mulini);
- 2 impianti che producono solo clinker, senza la successiva macinazione.

**La dimensione tipica di un forno da cemento è di circa 3.000 tonnellate di clinker/giorno.**

L'Italia, con circa 34,5 milioni di tonnellate all'anno, è attualmente il maggior produttore di cemento della UE. I consumi annui pro-capite sono pari a circa 600 kg.

Aziende	n° impianti	% produzione
<b>Italcementi</b>	<b>24</b>	<b>26,0</b>
<b>Buzzi Unicem</b>	<b>13</b>	<b>17,9</b>
<b>Colacem</b>	<b>7</b>	<b>14,6</b>
<b>Cementir</b>	<b>4</b>	<b>6,7</b>
<b>Holcim</b>	<b>3</b>	<b>5,6</b>
<b>Sacci</b>	<b>6</b>	<b>5,4</b>
<b>Cementi Rossi</b>	<b>4</b>	<b>5,4</b>
<b>Cementerie Aldo Barbetti</b>	<b>2</b>	<b>3,8</b>
<b>Cementizillo</b>	<b>2</b>	<b>2,5</b>
<b>Cal.me.</b>	<b>3</b>	<b>1,9</b>
<b>Cementeria di Monselice</b>	<b>1</b>	<b>1,8</b>
<b>Cementi Moccia</b>	<b>1</b>	<b>0,8</b>
<b>Cementi della Lucania</b>	<b>1</b>	<b>0,5</b>
<b>Altre aziende (15)</b>	<b>16</b>	<b>7,1</b>
<b>Totale</b>	<b>87</b>	<b>100</b>



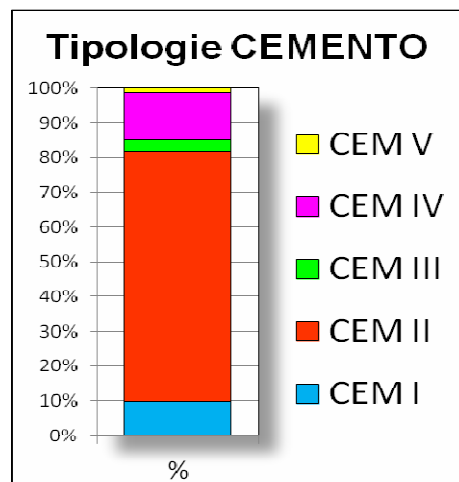
In Italia sono presenti 28 aziende con 87 stabilimenti (vedi tabella), di cui:

- 58 impianti a ciclo completo, con un totale di 80 forni (tutti a via secca o semisecca),
- 29 impianti con sola macinazione.

Il 56% della produzione italiana è cemento ad alta ed altissima resistenza (classi 42,5 e 52,5) ed il 44% cemento normale (classe 32,5).

Quanto alla ripartizione qualitativa della produzione, il cemento maggiormente prodotto in Italia risulta essere di gran lunga il **Portland di miscela (CEM II)**, che pesa il 72 % circa della produzione nazionale; all'interno di tale categoria il Portland composito al calcare costituisce il 66% della produzione. Seguono:

- cemento pozzolanico (CEM IV) (13,5%),
- Portland normale (CEM I) (9,9%),
- cemento d'altoforno (CEM III) (3,5%),
- cemento composito (CEM V) (1,1%).

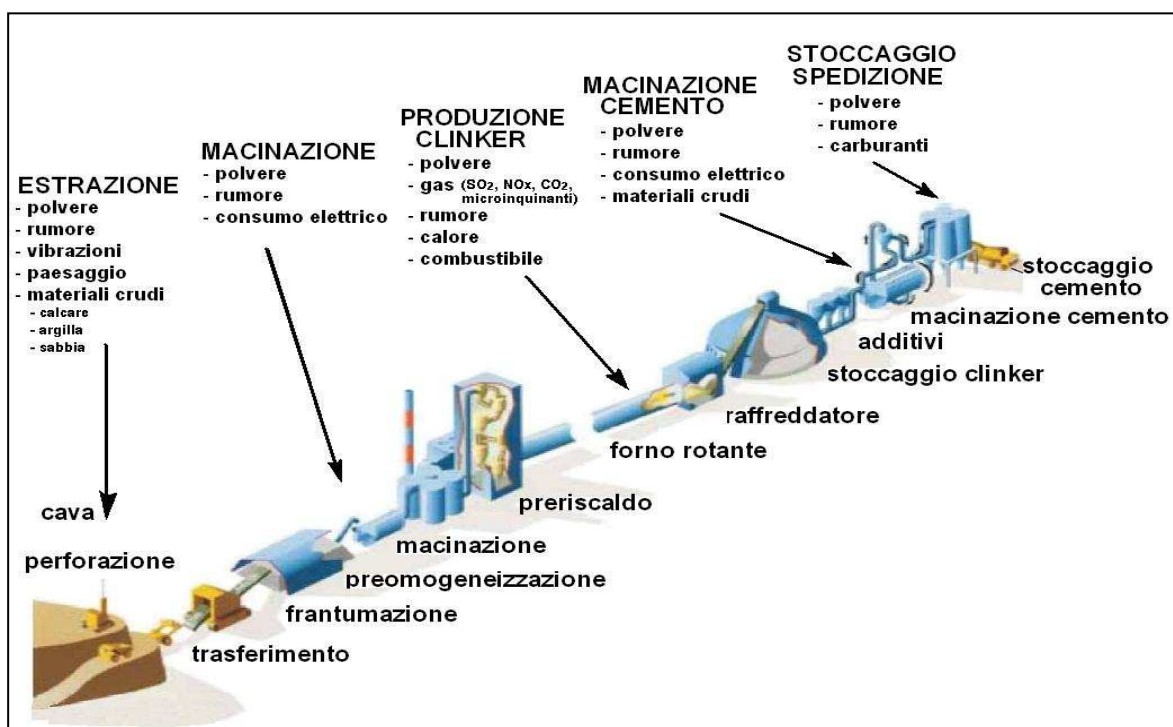


## 6.2 VALUTAZIONE DEGLI ASPETTI AMBIENTALI DEL SETTORE

Gli impatti ambientali più significativi del ciclo di produzione di cemento derivano dal processo di cottura del clinker: il **consumo di energia** e le **emissioni in atmosfera**.

Inoltre il **consumo di materie prime**, soprattutto calcari e marne, ancorché queste siano molto diffuse in natura, assume rilevanza per le elevate quantità di materiale estratto.

Il tipo e la quantità di inquinanti atmosferici dipende da diversi parametri, fra i quali le materie prime ed combustibili utilizzati, nonché il tipo di processo adottato.



*Impatti ambientali del ciclo di produzione del cemento*

L'adozione di misure primarie di carattere generale - quali l'ottimizzazione del controllo di processo, l'impiego di moderni sistemi gravimetrici di alimentazione dei combustibili solidi, l'installazione di raffreddatori ottimizzati e di sistemi esperti per la gestione dell'energia elettrica -, oltre che migliorare la qualità del clinker e ridurre i costi di produzione, assicurano anche il contenimento del consumo energetico e delle emissioni atmosferiche.

Meno importanti sono gli impatti dovuti agli scarichi in acqua ed alla produzione di rifiuti.

Lo scarico di acque è normalmente limitato al convogliamento delle acque meteoriche e delle acque di raffreddamento. L'acqua eventualmente utilizzata nel processo (sia umido che semisecco) è totalmente emessa sotto forma di vapore dal camino dell'impianto di cottura.

Anche il problema dei rifiuti in cementeria è decisamente marginale in quanto il materiale che può risultare da operazioni di depolverazione viene normalmente riutilizzato nell'ambito del ciclo tecnologico, giacché si tratta di materie/prodotti riutilizzabili.

Attenzione particolare deve essere poi prestata, in relazione alla collocazione dell'insediamento, alla produzione di rumore e di eventuali odori.

## 6.3 ASPETTI TECNICI E TECNOLOGICI SPECIFICI DEL SETTORE

### 6.3.1 CONSUMO DI MATERIE PRIME

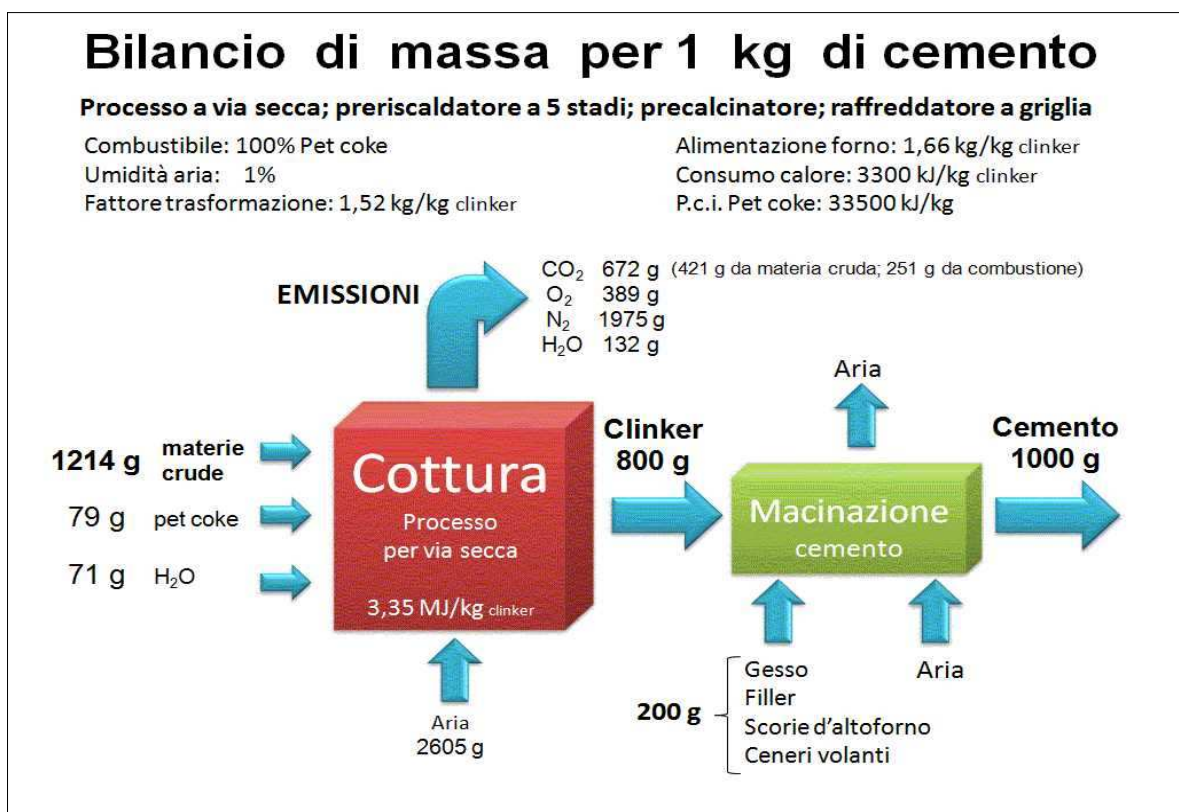
La fabbricazione del cemento, è basata essenzialmente sull'impiego di materie prime costituite da risorse naturali non rinnovabili approvvigionate mediante estrazione dalle cave.

Si tratta di **calcare** ed **argilla**, ma anche di gesso, pozzolana impiegati come correttivi per la miscela cruda o per il cemento.

Per produrre 1 kg di clinker, il consumo medio tipico di materie prime nell'UE è di 1,52 kg. La differenza è rappresentata essenzialmente dalle emissioni in atmosfera di anidride carbonica liberata nella reazione di calcinazione ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ).

Per produrre il cemento, al clinker viene aggiunto gesso (circa 50 g/kg cemento) ed altre aggiunte minerali (circa 150 g/kg cemento), cosicché per la produzione di 1 kg di cemento si utilizzano mediamente circa 1,4 kg di materie prime minerali.

Nella seguente figura è mostrato il bilancio di massa per la produzione di 1 kg di cemento utilizzando il processo a secco con pet-coke come combustibile.



### 6.3.2 UTILIZZO DELL'ENERGIA

Nella produzione del cemento i costi energetici – connessi al consumo di combustibile e di energia elettrica – rappresentano mediamente il 40% dei costi complessivi.

Circa l'80% dell'energia viene impiegata in forma di apporto **termico** per il forno di cottura. Il restante 20% del fabbisogno globale, in forma di energia **elettrica**, viene utilizzato prevalentemente (oltre l'80%) per il funzionamento dei mulini (macinazione del crudo e macinazione del cemento) e dei ventilatori esaustori (forno/mulino crudo e mulino cemento).

I consumi specifici di energia elettrica sono pari a circa **90-130 kWh/t cemento**.

Per quanto riguarda i consumi termici specifici, a fronte di un consumo teorico del processo di combustione (reazioni chimiche) di 1.700-1.800 MJ/t clinker, il consumo termico effettivo, in dipendenza delle diverse tipologie di forni e di processi impiegati, oscilla nei seguenti intervalli:

- **3.000 – 3.350 MJ/t clinker** per processo a via secca mediante forni equipaggiati con preriscaldatore a cicloni multistadio e precalcinatore;
- 3.100 - 4.200 MJ/t clinker per i forni rotanti a via secca dotati di preriscaldatori a cicloni;
- 3.300 - 4.500 MJ/t clinker per processo a via semi-secca/semi-umida (forni Lepol);
- 4.500 - 5.000 MJ/t clinker per i forni lunghi a via secca;
- 5.000 - 6.000 MJ/t clinker per i forni lunghi a via umida;
- 3.100 - 4.200 MJ/t clinker per i forni a tino.

### 6.3.3 LE EMISSIONI IN ATMOSFERA

Il processo si caratterizza per l'impatto ambientale causato in via principale dalle **polveri aerodisperse**, originate dalla movimentazione e dalla frantumazione di materie prime e del prodotto finito (cemento) che si presentano prevalentemente sotto forma di polveri fini e finissime.

Le emissioni gassose, principalmente **ossidi di zolfo** ed **ossidi di azoto**, sono ascrivibili esclusivamente alle combustioni nelle fasi di cottura ed essicca-macinazione. Ossidi di azoto (NOx), ossidi di zolfo (SOx) e polveri sono considerati *inquinanti rilevanti* nel processo di fabbricazione del cemento e per essi si impone l'adozione di specifiche tecniche di abbattimento.

Sono inoltre considerati *inquinanti di interesse* il **monossido di carbonio** (CO) ed i **composti organici** totali (COT).

La seguente tabella riporta i dati caratteristici delle emissioni dei forni di cottura clinker europei.

Valori di emissione dei forni di cottura del clinker (valori europei)

	concentrazione	massa specifica
NOx (come NO <sub>2</sub> )	<500 - 3000 mg/Nm <sup>3</sup>	<1 – 6 kg/t clinker
SO <sub>2</sub>	<10 - 3500 mg/Nm <sup>3</sup>	<0,2 – 7 kg/t clinker
Polveri	5 - 200 mg/Nm <sup>3</sup>	0,01 – 0,4 kg/t clinker
CO	500 - 2000 mg/Nm <sup>3</sup>	1 – 4 kg/t clinker
COT	5 - 500 mg/Nm <sup>3</sup>	0,01 – 1 kg/t clinker
CO <sub>2</sub>	400 - 520 g/Nm <sup>3</sup>	0,8 – 1,04 t/t clinker
HF	<0,4 - 5 mg/Nm <sup>3</sup>	<0,8 – 10 g/t clinker
HCl	<1 - 25 mg/Nm <sup>3</sup>	<2 – 50 g/t clinker
PCDD/F	<0,1 - 0,5 ng/Nm <sup>3</sup>	<200 – 1000 ng/t clinker
Metalli (Hg, Cd, Tl)	0,01 - 0,3 mg/Nm <sup>3</sup>	200 – 1000 mg/t clinker
(As, Co, Ni, Se, Te)	0,001 - 0,1 mg/Nm <sup>3</sup>	2 – 200 mg/t clinker
(Sb,Pb,Cr,Cu,Mn,V,Sn,Zn)	0,005 - 0,3 mg/Nm <sup>3</sup>	10 – 600 mg/t clinker
<b>Nota:</b>	i dati espressi in concentrazione sono valori indicativi riferiti a medie annue con tenore di O <sub>2</sub> attorno al 10%. I valori relativi alla massa sono riferiti ad una portata specifica di 2000 Nm <sup>3</sup> /t di clinker.	



Oltre all'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), prodotta dalla combustione dei combustibili e dalla calcinazione di CaCO<sub>3</sub>, altri inquinanti caratteristici sono acido fluoridrico (HF), acido cloridrico (HCl), policlorodibenzodiossine e policlorodibenzofurani (PCDD/F). Meno rilevante, ma da segnalare, è anche l'emissione di composti ammoniacali, in dipendenza dalla qualità delle materie prime.

Molti composti gassosi che derivano dall'ossidazione dei combustibili o dalla trasformazione delle materie prime in clinker sono spontaneamente assorbiti o condensano nella farina cruda, che fluisce in controcorrente rispetto ai gas di combustione, soprattutto sul materiale calcinato ad elevato contenuto di ossido di calcio, che possiede un alto potere adsorbente nei confronti delle sostanze acide, come HCl, HF e SO<sub>2</sub>.

## **Polveri**

Le emissioni di polveri tradizionalmente costituiscono il principale aspetto ambientale caratterizzante la produzione del cemento.

Le principali fonti di polveri in forma convogliata sono riconducibili a:

- mulini del crudo,
- forni,
- raffreddatori del clinker,
- mulini del cemento,
- insaccatrici.

In tutti questi impianti grossi volumi di gas fluiscono attraverso materiali polverosi. I moderni sistemi di depolverazione (precipitatori elettrostatici e filtri a tessuto) garantiscono nelle normali condizioni di esercizio emissioni di polveri a livelli inferiori a 20 mg/Nm<sup>3</sup>.



Emissioni diffuse possono liberarsi durante lo stoccaggio e la movimentazione di materiali e combustibili solidi allo stato polveroso ed in carenza di adeguate pulizie, anche da piazzali e superfici stradali.

## **Biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>)**

L'emissione di CO<sub>2</sub> ammonta a circa 800-1000 kg/t di clinker, in dipendenza dal tipo di processo (fabbisogno calorico) e del combustibile (tenore di carbonio). Circa il 60% deriva dal processo di calcinazione, mentre il restante 40% è legato alla combustione del combustibile.

Nel caso di processi molto efficienti (fabbisogno calorico 3000 MJ/t di clinker) con l'impiego di carbon fossile (p.c.i. 30 MJ/kg e tenore di C 88%) l'emissione di CO<sub>2</sub> da combustione ammonta a 320 kg/t di clinker, mentre usando metano l'emissione si riduce a circa 250 kg/t.

## **Monossido di carbonio (CO)**

Le emissioni di CO dipendono da una non corretta combustione, per una irregolare alimentazione del combustibile solido, ma anche soprattutto dal contenuto di sostanza organica presente nel crudo (1,5 - 1,6 g di carbonio organico per ogni kg di clinker).

In caso di combustione al 3% di ossigeno, i composti organici presenti nella farina cruda per l'85-95% si convertono in CO<sub>2</sub> e per il 5-15% in CO.

La concentrazione di CO può arrivare anche a 1.000 mg/Nm<sup>3</sup> ed in caso di cattiva combustione superare addirittura 2.000 mg/Nm<sup>3</sup> con picchi a 5000 mg/Nm<sup>3</sup>.

In questo caso è necessario adottare un sistema automatico di esclusione dell'elettrofiltrazione, per prevenire i rischi di esplosione.

## Composti organici

Le emissioni di COV nei forni da cemento, per le condizioni ossidanti, di alta temperatura e per i lunghi tempi di permanenza, risultano modeste in condizioni di esercizio normale; possono aumentare in fase di avvio o di fermata.

I COV si generano soprattutto nelle fasi di preriscaldamento e precalcinazione per volatilizzazione delle sostanze organiche presenti nella farina cruda.

Le concentrazioni tipiche di COV in emissione dai forni da cemento si aggirano fra 1 e 80 mg/Nm<sup>3</sup>, ma in alcuni casi si può arrivare anche a 120 mg/Nm<sup>3</sup> ed oltre, in dipendenza delle particolari caratteristiche delle materie prime.

## Microinquinanti organici

Qualsiasi combustione in presenza di cloro e di materiale organico può potenzialmente dar luogo alla formazione di policlorodibenzodiossine e policlorodibenzofurani (PCDD e PCDF).

Tuttavia, a causa del lungo tempo di permanenza nel forno (circa 20 s) e delle elevate temperature (> 1200°C), le emissioni di PCDD e PCDF dai forni da cemento sono sicuramente modeste. Anche il fenomeno di riformazione per sintesi (*de novo syntesis*) entro l'intervallo di temperature di raffreddamento da 450° a 200°C non si presenta nei sistemi dotati di preriscaldatore, in quanto il raffreddamento dei gas che preriscaldano le materie prime è molto rapido entro tale intervallo.

Si è rilevato che i forni di cottura clinker europei rispettano ampiamente il valore limite imposto dalla legislazione europea per gli inceneritori di rifiuti, pari a 0,1 ng I-Teq/Nm<sup>3</sup>. Le misurazioni eseguite su numerosi forni (con preriscaldatore in sospensione e forni Lepol) nel corso degli ultimi dieci anni hanno evidenziato una concentrazione media pari a 0,02 ng I-Teq/Nm<sup>3</sup>.

## Metalli e loro composti

Le polveri emesse contengono piccole quantità di composti metallici, quali arsenico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg), piombo (Pb), tallio (Tl) e zinco (Zn). La fonte principale di polveri contenenti metalli è il forno, comprendente preriscaldatore, precalcinazione e raffreddatore del clinker.

Infatti le materie prime ed i combustibili contengono sempre metalli, in concentrazioni anche fortemente variabile; le potenziali emissioni dei metalli sono influenzate da meccanismi molto complessi che dipendono dalla volatilità dei metalli stessi e dei loro composti.

I composti **non volatili** (Ba, Be, Cr, As, Ni, V, Al, Ti, Ca, Fe, Mn, Cu e Ag) tendono a rimanere nel processo e lasciano il forno sotto forma di costituente del clinker. La loro emissione, in forma particellata, è generalmente molto bassa e dipende soltanto delle quantità in ingresso e dell'efficienza del sistema di depolverazione.

I composti **semivolatili** (Sb, Cd, Pb, Se, Zn, K e Na) subiscono un *ciclo interno* di vaporizzazione nelle zone ad alta temperatura e ricondensazione sul materiale in fase di preriscaldamento, tendendo ad accumularsi ma rimanendo in massima parte nel clinker.

Anche i composti metallici **volatili** formano cicli interni vaporizzando ad alta temperatura e condensando sulle particelle delle materie prime a temperature più basse. Esse tuttavia sfuggono molto più facilmente al processo.

**Tallio e mercurio** e rispettivi composti volatilizzano con particolare facilità ed altrettanto fanno, anche se in misura minore, **cadmio, piombo, selenio** e loro composti.

I metalli formano altresì un ciclo esterno quando la polvere separata dai depolveratori, insieme con i composti volatili condensati, viene reimpressa nella farina cruda.

### 6.3.4 PRODUZIONE DI RIFIUTI

Il processo di fabbricazione del cemento non è direttamente responsabile di emissioni solide, ovvero non produce rifiuti, talché non sussiste l'oneroso e complesso problema del loro smaltimento.

Unici rifiuti, da smaltire secondo le normative vigenti, rimangono gli oli esausti dei motoriduttori ed i materiali speciali assimilabili ai rifiuti urbani (imballi, maniche filtranti, ecc.) provenienti dagli uffici e dalle operazioni di manutenzione programmata.

### 6.3.5 EMISSIONI SONORE

La produzione del cemento comprende fasi lavorative caratterizzate da emissioni acustiche con potenze sonore molto elevate, quali le operazioni di macinazione (materie prime, cemento e combustibili solidi). Meno rumorose sono le operazioni connesse all'impiego di macchine operatrici (ventilatori, compressori, ...) e le fasi di trasporto dei materiali.

### 6.3.6 ODORI

Le emissioni di odori assai raramente costituiscono un problema per gli impianti cementieri ben eserciti. Può essere talora fonte di odori lo zolfo del combustibile o i fumi che originano da componenti organici (cherogeni) presenti nelle materie prime.

Può inoltre causare l'emissione di maleodori la presenza di ammoniaca nelle materie prime e la cattiva gestione di un impianto di abbattimento degli NO<sub>x</sub> mediante riduzione selettiva non catalitica (SNCR) con l'impiego di ammoniaca.

Generalmente non sono fonte di odore i rifiuti introdotti come combustibile (CDR, fanghi, ...), in quanto la combustione avviene ad alta temperatura, in ambiente fortemente ossidante e con tempi di permanenza molto elevati. Attenzione invece deve essere posta nelle eventuali fasi di preparazione e stoccaggio.

### 6.3.7 SCARICHI IDRICI

Il ciclo tecnologico del cemento è caratterizzato da limitati fabbisogni idrici (raffreddamento, servizi, e usi igienico-sanitari), con sostanziale assenza di cause di inquinamento.

Anche i ridotti quantitativi di acqua di processo vengono in generale riciclati al processo: nel processo per via umida o semiumida l'acqua di disidratazione della materia prima viene riutilizzata per la macinazione o per la formazione delle focacce di melma (slurry).

L'umidità in ingresso al forno o al raffreddatore del clinker viene completamente vaporizzata.

L'acqua meteorica di dilavamento dei piazzali, viene normalmente scaricata nei corpi idrici, con eventuale trattamento di decantazione e di disoleazione. L'acqua proveniente dagli scarichi civili viene depurata in fosse biologiche oppure conferita in pubblica fognatura.

### 6.3.8 CONTAMINAZIONI DEL SUOLO

Anche il rischio di contaminazione del suolo risulta contenuto ed eventualmente circoscritto ad eventi incidentali di piccola entità.

Sono potenziali fonti di inquinamento depositi o serbatoi di oli combustibili ed oli lubrificanti, apparecchiature elettriche contenenti fluidi dielettrici, depositi di rifiuti.



## 6.4 LE TECNICHE DISPONIBILI PER L'INDUSTRIA DEL CEMENTO

Nel valutare le tecniche disponibili per il settore del cemento vengono prese in esame quelle che in generale consentono di raggiungere un livello elevato di tutela ambientale, comprendendo anche i sistemi di gestione, le misure di prevenzione, l'integrazione fra processi, la cui combinazione può dare risultati ottimali.

Vengono inoltre considerate le possibilità di riciclo e riutilizzo di materiali ed energia.

### 6.4.1 IL CONSUMO DI MATERIE PRIME

Il recupero di materiali residuali come materie prime può ridurre l'utilizzo di risorse naturali, purché venga garantito un controllo adeguato delle sostanze introdotte nel forno.

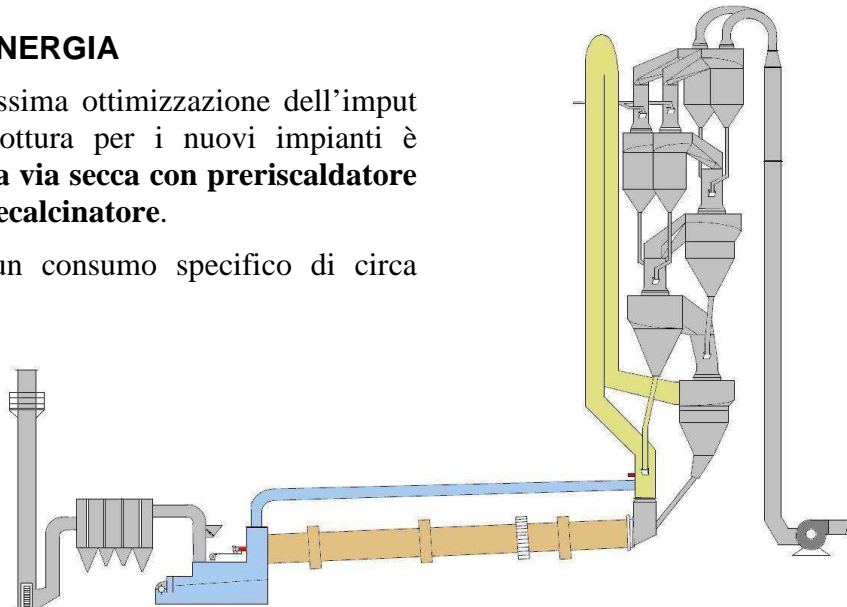
È possibile anche il riciclo delle polveri di abbattimento alimentandola direttamente nel forno o aggiungendola alla farina (fattore limitante è la percentuale di metalli alcalini), oppure mescolandola con il clinker per ottenere le diverse tipologie di cemento.

### 6.4.2 IL CONSUMO DI ENERGIA

Lo stato dell'arte per la massima ottimizzazione dell'imput energetico delle linee di cottura per i nuovi impianti è rappresentato da **forni corti a via secca con preriscaldatore a cicloni a cinque stadi e precalcinatore**.

Questa configurazione ha un consumo specifico di circa **2.900-3.200 MJ/t<sub>clinker</sub>**.

*Processo a via secca  
con preriscaldatori  
e precalcinatore*



L'adeguamento di impianti esistenti allo standard è in generale legato ad un intervento più ampio volto ad incrementare la capacità produttiva dell'impianto.

Le misure e le tecniche di ottimizzazione dell'energia termica possono essere attuate nelle varie unità che costituiscono l'impianto:

- *raffreddatore clinker* sistemi moderni con uniforme distribuzione dell'aria;
- *forno* alta capacità, corretta geometria, condizioni operative stabili ed uniformi, ottimizzazione dell'alimentazione del combustibile e del processo di combustione, aria quasi stechiometrica ma condizioni ossidanti;
- *calcinatore* basse perdite di carico, calcinazione spinta, distribuzione uniforme in alimentazione al forno;
- *preriscaldatore* basse perdite di carico ed alto recupero termico, 3-6 stadi di cicloni, uniformità di distribuzione dell'aria e della farina cruda;
- *essico-macinazione* composizione omogenea ed essiccazione spinta della materia cruda e dei combustibili.



Per la minimizzazione dei consumi elettrici è possibile utilizzare sistemi di gestione della potenza ed apparecchiature ad alta efficienza energetica, come mulini a rulli ad alta pressione per la macinazione del clinker e ventilatori a velocità variabile, sostituendo le vecchie apparecchiature.

Per ridurre i consumi energetici specifici, espressi per unità di cemento prodotto (MJ/kg cemento), è possibile ridurre il contenuto di clinker nel cemento finito. Questa tecnica, che riduce anche le emissioni specifiche, consiste nell'incremento delle cariche e delle aggiunte (p.es. sabbia, scorie, calcare, ceneri volanti e pozzolana) in fase di macinazione.

L'aumento dei costi dell'energia incide sulla convenienza nell'implementazione delle varie misure.

#### **6.4.3 OTTIMIZZAZIONE DEL CONTROLLO DI PROCESSO**

L'ottimizzazione del processo di cottura del clinker è usualmente applicata per ridurre il consumo termico, migliorare la qualità del clinker e prolungare la vita utile delle attrezzature (del refrattario di rivestimento, per esempio) stabilizzando i parametri di processo. Rientrano nelle procedure di ottimizzazione misure quali l'omogeneizzazione della miscela del crudo, la garanzia del dosaggio uniforme del carbone e il miglioramento del funzionamento del raffreddatore, nonché la formazione e l'addestramento del personale e l'installazione di sistemi esperti di controllo in grado di monitorare parametri significativi del processo.

Un funzionamento del forno stabile, regolare e prossimo ai valori di progetto, influisce positivamente anche su tutte le emissioni del forno, come, ad esempio, su NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO e polveri.

#### **6.4.4 SCELTA DEL COMBUSTIBILE E DELLE MATERIE PRIME**

La scelta oculata ed il controllo attento delle sostanze che vengono immesse nel forno possono ridurre sensibilmente le emissioni.

Per esempio, limitando il contenuto di zolfo nelle materie prime e nei combustibili, è possibile ridurre le emissioni di SO<sub>2</sub>. Lo stesso vale per materie prime e combustibili contenenti altre sostanze, per esempio azoto, metalli e composti organici.



## 6.4.5 TECNICHE PER IL CONTENIMENTO DEGLI INQUINANTI

### Emissioni di Polveri

Per le emissioni convogliate derivanti dal forno, dal raffreddatore del clinker e dai mulini, si utilizzano comunemente precipitatori elettrostatici o filtri a tessuto, entrambi con efficienza >99,99% in condizioni normali. Con l'abbattimento delle polveri vengono separate anche sostanze contenute o adsorbite sulle polveri, come metalli e diossine.

Per gli altri sistemi di aspirazione e captazione delle polveri (movimentazione, stoccaggio, insaccamento, ...) si utilizzano filtri a tessuto.

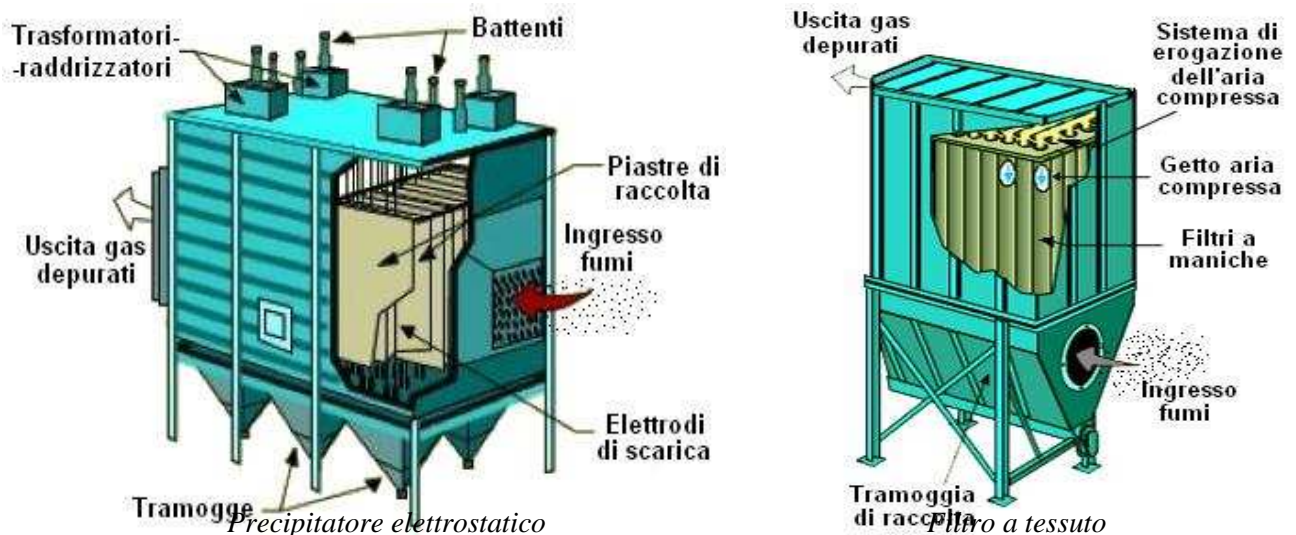
- **Precipitatori elettrostatici (ESP – Electrostatic Precipitator)** Il principio di funzionamento è basato sull'attrazione delle particelle di polvere indotta da un campo elettrostatico generato lungo il percorso delle particelle stesse; le piastre di raccolta vengono ciclicamente battute o fatte vibrare per staccare la polvere e raccoglierla nella tramogge sottostanti. Caratteristica peculiare dei precipitatori elettrostatici è di poter operare anche in presenza di temperature elevate (fino a quasi 400°C) e di elevata umidità. I fattori che influiscono sull'efficienza dell'elettrofiltro, oltre alla forma ed alla superficie degli elettrodi, sono la potenza del campo elettrostatico, la velocità di flusso dei gas, il tenore di umidità, la concentrazione di SO<sub>2</sub>.

I moderni precipitatori elettrostatici adeguatamente dimensionati, associati ad un buon condizionamento dei gas e ad una pulizia ottimale dell'apparecchiatura, possono ridurre i livelli di emissione fino a 10-20 mg/Nm<sup>3</sup> (20-30 mg/Nm<sup>3</sup> per gli elettrofiltri degli anni '70-'80).

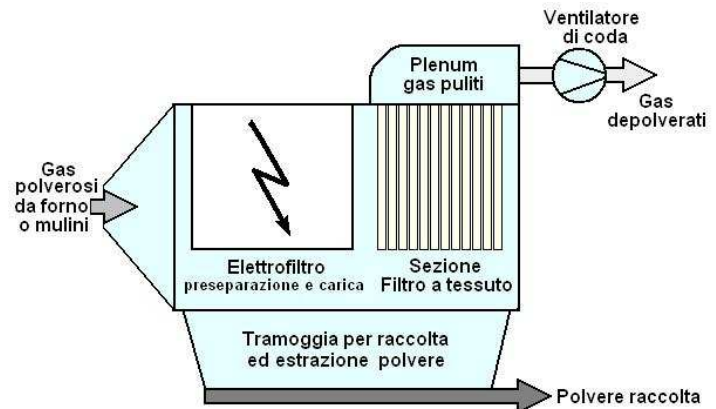
- **Filtri a tessuto (FF - Fabric Filter)** Il principale meccanismo di filtrazione si basa sull'effetto setaccio esercitato dal tessuto: mentre l'aria attraversa l'elemento filtrante la polvere viene intercettata dalle fibre superficiali o profonde del tessuto. L'effetto filtrante aumenta mano a mano che lo spessore dello strato di polvere prende consistenza, ma, poiché con l'intasamento aumentano le perdite di carico, è necessario procedere ad una periodica pulizia mediante specifici sistemi di controlavaggio ad aria, o di scuotimento meccanico, con vibrazione, ad aria compressa, ad ultrasuoni, ecc. .

Il filtro a tessuto è generalmente costituito da più compartimenti dotati di sensori in grado di evidenziare eventuali cedimenti delle maniche, che possono essere individualmente isolati per l'effettuazione delle operazioni di manutenzione e per la sostituzione di maniche rotte.

I moderni filtri a tessuto garantiscono livelli di emissione di polveri <5 mg/Nm<sup>3</sup>, rimuovendo anche le eventuali sostanze che sono adsorbite dal particolato, quali diossine e metalli.



- **Filtri ibridi** sono la combinazione di un filtro elettrostatico e di un filtro a tessuto nello stesso dispositivo; essi sono generalmente il risultato di una conversione di un filtro elettrostatico esistente per migliorarne l'efficienza riutilizzando la vecchia struttura.



## Emissioni di NOx

Le emissioni di NOx sono uno dei principali problemi dell'industria del cemento a seguito delle elevate temperature richieste dal processo. Per la riduzione ed il controllo degli NOx possono essere impiegate una combinazione di tecniche e misure primarie e secondarie. Per motivi ambientali, di sicurezza ed economici è comunque preferibile inizialmente impiegare misure primarie integrate.

### Misure primarie:

- **Raffreddamento della fiamma** effettuato con aggiunta di acqua nel combustibile o alla fiamma; l'efficienza può arrivare al 40% con un lieve incremento dei consumi e delle emissioni di CO<sub>2</sub> (0,1-1,5%).
- **Bruciatori Low NOx** il carbone e l'aria sono immessi nel forno attraverso tubi concentrici, il carbone centralmente e l'aria primaria (al 6-10% del quantitativo stechiometrico) a d alta velocità attraverso il canale esterno; la configurazione, nelle migliori condizioni di progetto ed esercizio, consente riduzione degli NOx fino al 30%.
- **Combustione a più stadi** la tecnologia dell'ignizione a più stadi (normalmente quattro) può essere impiegata solo nei forni con cicloni preriscaldatori e calcinatore; il primo stadio è rappresentato dal bruciatore in testa al forno rotante; il secondo stadio è un bruciatore (anche con combustibili in pezzatura – CDR) all'imbocco del forno che crea atmosfera riducente che decompone NOx sviluppati in sinterizzazione; il terzo stadio avviene nel calcinatore con parte di aria terziaria in atmosfera riducente; il quarto stadio è l'aggiunta della aria terziaria residua per completare la combustione nel calcinatore (top air); con la combustione a stadi ottimizzata si raggiungono valori di emissione <700 mg/Nm<sup>3</sup>.
- **Combustione a metà forno** può essere impiegata nei forni lunghi a via umida e a via secca creando una zona riducente a metà forno ottenuta con l'introduzione intermittente, una volta per ogni rotazione del forno, di combustibili in pezzatura a lenta combustione (pneumatici, ...) ove le temperature sono comprese tra 900 e 1000°C; nei pochi forni predisposti sono state riscontrate efficienze di riduzione del 20-40%.
- **Aggiunta di mineralizzatori del clinker** l'aggiunta di mineralizzatori al crudo (p.es fluoruro di calcio, con attenzione a non esagerare per contenere le emissioni di HF) consente di migliorare la qualità del clinker e ridurre la temperatura e la formazione di NOx della zona di sinterizzazione; la riduzione degli NOx è attorno al 10-15%.
- **Ottimizzazione del processo** con l'applicazione di tecniche e misure integrate di controllo e di ottimizzazione dei processi e delle condizioni di funzionamento del forno (ossigeno ed omogeneità combustibile), le emissioni di NOx possono essere contenute a valori compresi fra 500 e 1000 mg/Nm<sup>3</sup>.



## Misure e tecniche secondarie:

- **Riduzione selettiva non catalitica (SNCR)** il sistema consente di ridurre NO ad N<sub>2</sub> con l'iniezione di reagenti NH<sub>2</sub>-X (ammoniaca o soluzioni acquose di ammoniaca, urea, o precursori di NH<sub>3</sub>) nella finestra di temperatura tra 830 e 1050 °C ed adeguati tempi di permanenza; le condizioni si verificano nei forni con preriscaldatore a cicloni e nei forni con precalcinatore, mentre nei forni Lepol a livello della calcinazione.

In presenza di temperature troppo basse si libera ammoniaca non reagita (la cosiddetta "fuga" di NH<sub>3</sub>) che arricchisce e rende inutilizzabili le polveri abbattute.

Con l'applicazione della tecnica si ottengono efficienze idonee per raggiungere livelli di emissione di 500-800 mg/Nm<sup>3</sup>. L'impiego di soluzioni di ammoniaca al 25% riduce i pericoli connessi al trasporto ed allo stoccaggio dell'ammoniaca.

- **Riduzione selettiva catalitica (SCR)** il sistema comporta la riduzione di NO e NO<sub>2</sub> a N<sub>2</sub> con l'aiuto di NH<sub>3</sub> e di un catalizzatore, ad una temperatura di circa 300-400 °C, riscontrabile a monte dei sistemi di depolverazione. Questa tecnica, testata in impianti a via secca e semisecca, risulta molto promettente, con efficienze potenziali fino al 85-95%.

Gli impianti devono comunque essere progettati per effluenti polverosi. Nei sistemi a via semisecca l'impianto è inserito fra i settori di calcinazione ed essiccazione.



*Impianto SCR*



*Catalizzatore*

## Emissioni di SO<sub>x</sub>

Per contenere le emissioni di SO<sub>2</sub> è necessario innanzitutto considerare **misure primarie** di ottimizzazione del processo, tra le quali rientrano la regolarizzazione del funzionamento del forno prevenendo condizioni riducenti in cottura, la scelta del corretto tenore di ossigeno, delle materie prime e dei combustibili. In particolare aumentando il livello di ossigeno nella zona di ingresso al forno si aumenta la capacità di assorbimento di SO<sub>2</sub> nella carica.

Nei casi in cui tali misure non fossero sufficienti, si possono impiegare **tecniche di abbattimento**:

**Aggiunta di adsorbenti** si impiegano calce viva (CaO), calce spenta (Ca(OH)<sub>2</sub>) o ceneri volanti attivate ad alto tenore di CaO iniettati nei gas esausti o inseriti nella carica del forno. Il sistema è più adatto per forni a via secca con preriscaldatori a cicloni.

La temperatura ideale per l'adsorbimento è di >600 °C. L'efficienza è attorno a 60-80% e si raggiungono valori di concentrazione <200 – 400 mg/Nm<sup>3</sup>.



**Scrubber a umido** è una tecnica ormai consolidata nel settore del cemento che impiega una soluzione di lavaggio contenente una adsorbente ( $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$  o  $\text{CaCO}_3$ ), trasformando  $\text{SO}_2$  in solfato di calcio biidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), gesso che viene impiegato nel cemento come agente modulante. Il sistema offre rendimenti  $> 90\%$ , raggiungendo valori di concentrazione  $< 10 - 300 \text{ mg/Nm}^3$ , e risulta inoltre efficace anche per  $\text{HCl}$ , polveri e  $\text{NH}_3$ .

Lo scrubber a secco è andato in disuso anche perché il gesso semiidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ ) ottenuto è dannoso per il cemento e doveva essere ricircolato al forno o smaltito.

**Carboni attivi** il sistema, non molto utilizzato per le complicazioni legate alla necessità di gestire il carbone saturo come rifiuto pericoloso, è idoneo ad abbattere anche  $\text{COV}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$  e polveri residue da filtrazione; può prevedere l'iniezione di carbone nel gas esausto o la filtrazione del gas depolverato su un letto fisso, periodicamente sostituito; in quest'ultimo caso il carbone saturo può essere usato come combustibile, restituendo le sostanze adsorbite al sistema che può fissarle nel clinker. Le concentrazioni di  $\text{SO}_2$  in emissione risultano  $< 50 \text{ mg/Nm}^3$ .

## Emissioni di CO

Le emissioni di CO, oltre che per difetto della combustione, possono derivare dalla presenza di materiale organico nella farina cruda.

Particolarmente problematiche risultano punte di CO (CO trip), per il pericolo di scoppio in presenza di filtri elettrostatici. A tal fine sono installati sistemi di monitoraggio in continuo del CO con tempi di risposta molto rapidi, per poter escludere automaticamente il sistema di abbattimento (con rilevanti emissioni di polvere).

Anche i filtri a tessuto in situazioni critiche possono presentare problemi per la presenza di cariche elettrostatiche, cosicché si impiegano maniche di tessuto in fibra conduttrice o dotate di maglie metalliche collegate a massa alla piastra che sostiene le maniche stesse.

Selezione delle materie prime, miglioramento e stabilizzazione della combustione ed ottimizzazione del sistema di alimentazione del combustibile sono i sistemi per ridurre le concentrazioni di CO e minimizzare la possibilità del manifestarsi di punte.

## Emissioni di Composti organici volatili

In condizioni normali, le emissioni di composti organici volatili (VOC) sono generalmente basse; valori di un certo rilievo possono dipendere del contenuto di composti organici volatili nella materia prima che viene utilizzata presso l'impianto.

Pertanto materie prime o rifiuti contenenti materiale organico non dovrebbero essere alimentate al forno attraverso il percorso della farina cruda o come combustibile in precalcinazione.

In caso di valori elevati di COV può essere impiegato l'adsorbimento su carboni attivi.

## Emissioni di Acido cloridrico (HCl) ed Acido fluoridrico (HF)

Per contenere le emissioni di questi inquinanti è decisivo l'impiego di materie prime e combustibili con bassi tenori di cloro e fluoro. È inoltre possibile impiegare tecniche secondarie quali l'iniezione di assorbenti o scrubber.

I composti del cloro tendono a condensare ed essere assorbiti come cloruri alcalini dal materiale in alimentazione e dalla polvere nella zona a  $700-900^\circ\text{C}$ , mostrando una circolazione interna fra il forno ed il preriscaldatore.

Il fluoro viene in gran parte catturato nel clinker ovvero legato stabilmente alla polvere in forma di fluoruro di calcio ( $\text{CaF}_2$ ).

## **Emissioni di policlorodibenzodiossine (PCDD) e policlorodibenzofurani (PCDF)**

Anche per questi inquinanti le concentrazioni sono normalmente molto basse (<0,05 I-Teq ng/Nm<sup>3</sup>).

Tuttavia è possibile adottare misure primarie tendenti all'ottimizzazione ed alla stabilizzazione della marcia del forno nonché alla selezione e controllo di combustibili e materie prime, soprattutto con riferimento al contenuto di cloro, evitando di utilizzare rifiuti come combustibile nei periodi di avvio o di arresto.

Inoltre per ridurre la possibilità di riformazione delle diossine (*de novo synthesis*) è molto importante il rapido raffreddamento dei fumi fra 400 e 200°C, normalmente ottenuto con forni dotati di precalcinatore e preriscaldatore.

Anche in questo caso, in presenza di elevate concentrazioni di PCDD/PCDF, è comunque possibile impiegare sistemi di adsorbimento su carbone attivo.

## **Emissioni di Metalli pesanti**

I metalli non-volatili rimangono in larga misura nel processo uscendo con il clinker, mentre i volatili (Mercurio e Tallio) tendono ad accumularsi con cicli interni (evaporazione-condensazione) ed esterni (riciclo polveri) ed a sfuggire nelle emissioni. Poiché i metalli (ad eccezione del Mercurio) sono in gran parte legati alle polveri, il loro contenimento è strettamente associato all'abbattimento delle polveri stesse: l'efficace rimozione della polvere riduce anche le emissioni dei metalli.

Pertanto dovrebbe essere controllato l'impiego delle materie prime, almeno in relazione al contenuto dei metalli volatili.

L'aumento dei metalli volatili nelle emissioni può essere ridotto parzialmente o completamente interrompendo i cicli, agendo in particolare sul ciclo esterno, evitando il riciclo delle polveri nella farina cruda, aggiungendola eventualmente nella fase di macinazione cemento.

Per minimizzare l'emissione di mercurio è possibile ridurre la temperatura dell'aeriforme in emissione, ovvero rimane sempre l'opzione dell'adsorbimento su carbone attivo; questa tecnica offre efficienze del 85-95% con valori di emissione del mercurio di 0,01-0,03 mg/Nm<sup>3</sup>.

### **6.4.6 RIFIUTI E SCARTI DI PROCESSO**

Normalmente non rappresentano un problema per l'industria del cemento.

In generale le polveri di abbattimento possono essere riciclate nelle materie crude o mescolate per la preparazione del cemento finito; il fattore limitante sono il contenuto di metalli o di cloro. Per i materiali non riciclabili possono comunque essere trovati impieghi alternativi.

**Per l'elevata efficienza degli impianti di abbattimento e l'efficacia delle procedure di controllo e gestione, l'industria del cemento si propone come valida alternativa alle tradizionali modalità di smaltimento dei rifiuti, derivanti da altri cicli produttivi o di consumo.**

### **6.4.7 RUMORE**

Le emissioni di rumore si verificano lungo tutta la catena del processo, dalle attività in cava alla spedizione dei prodotti finiti, soprattutto presso frantoi, molini, compressori e ventilatori.

L'abbattimento del rumore deve preferibilmente essere effettuato direttamente sulle fonti, mediante misure e tecniche che prevedano la delimitazione con isolamento dalle vibrazioni degli impianti e delle attività rumorose, l'isolamento acustico di edifici e strutture, realizzazione di muri o barriere vegetali a protezione di aree delicate, il rivestimento e l'insonorizzazione di condotti e ventilatori, la chiusura di porte e finestre.

### 6.4.8 ODORI

L'emissione di odori da idrocarburi può essere evitata con filtri a carbone attivo o alimentando il materiale grezzo responsabile degli odori stessi nella zona calda del forno.

Se l'odore dipende dallo zolfo si può sostituire il combustibile o le materie prime.

Nel caso di odori provenienti da depositi di rifiuti utilizzati come materie prime o combustibili, i luoghi di stoccaggio possono essere coperti o completamente confinati.

### 6.4.9 STRUMENTI DI GESTIONE AMBIENTALE

Per una migliore prestazione ambientale, oltre all'applicazione della migliore tecnica, è importante che l'impianto venga condotto e gestito nella maniera più efficace ed efficiente.

È il concetto di **Sistema di Gestione Ambientale (SGA)** inteso come strumento dinamico da utilizzare per risolvere i problemi di progettazione, costruzione, manutenzione, gestione e dismissione dell'impianto, in modo sistematico e documentabile.

Un **Sistema di Gestione Ambientale** comprende la struttura organizzativa, le responsabilità, le prassi, le procedure, i processi e le risorse per sviluppare, implementare, mantenere, revisionare e controllare la politica ambientale, secondo un modello dinamico iterativo di continuo miglioramento:

*plan – do – check - act*

L'attuazione ed il rispetto di un SGA indirizza l'attenzione dell'operatore sulle prestazioni ambientali dell'impianto, impegnandolo al continuativo rispetto delle condizioni di autorizzazione.

*progetta–fai–verifica–agisci.*



## 7 VALUTAZIONE SULL'APPLICABILITÀ DELLE BAT

### 7.1 DEFINIZIONE DELLA MIGLIORE TECNICA DISPONIBILE

In sede di valutazione sull'applicabilità della *Migliore Tecnica Disponibile* si devono tenere in considerazione i principi generali che stanno alla base della **direttiva 2010/75/UE** del 24 novembre 2010 (la c.d. Direttiva IED – *Industrial Emission Directive*) - evoluzione della **direttiva 96/61/CE**, poi riscritta nella **direttiva 2008/01/CE** -, ed in particolare:

- devono essere prese opportune misure di prevenzione dell'inquinamento, applicando in particolare le migliori tecniche disponibili;
- deve essere evitata la produzione di rifiuti, provvedendo per quanto possibile al loro recupero ovvero alla loro eliminazione contenendo gli impatti sull'ambiente;
- l'energia deve essere utilizzata in modo efficace.
- devono essere prese le misure necessarie per prevenire gli incidenti e limitarne le conseguenze;
- le tecniche, per esser considerate "disponibili", devono essere sviluppate su una scala che, tenendo conto di costi e vantaggi, ne consenta l'applicazione in condizioni economicamente e tecnicamente valide nell'ambito del pertinente comparto industriale.

I documenti sulle BAT non forniscono norme vincolanti, ma hanno la finalità di fornire linee guida ed obiettivi per il settore industriale, per le autorità e per l'opinione pubblica, sui livelli di emissione e consumo conseguibili con l'impiego di specifiche misure e tecniche.

Le condizioni appropriate per ciascun caso specifico da prevedere nell'autorizzazione, dovranno essere definite tenendo conto degli obiettivi della direttiva IPPC e delle criticità locali.

Le *Migliori tecniche disponibili* per una specifica installazione di solito sono quindi l'impiego di una singola o di una combinazione di BAT fra quelle elencate.

### 7.2 LE MIGLIORI TECNICHE DISPONIBILI ED APPLICABILI NEL SETTORE DEL CEMENTO

Per l'individuazione delle migliori tecniche disponibili ed applicabili si è fatto riferimento al documento **BRef CLM** relativo alle industrie manifatturiere del cemento, calce e ossido di magnesio (*Reference Document on Best Available Techniques Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries*) del maggio 2010.

Per ogni BAT, fra parentesi è indicata la numerazione progressiva riportata dal citato documento.

#### 7.2.1 Sistema di Gestione Ambientale (SGA)

L'impegno del top management è preconditione per il successo nell'applicazione di un **Sistema di Gestione Ambientale**, il quale deve comprendere l'azione ciclica di miglioramento continuo secondo il modello dinamico reiterativo *plan – do – check – act* (1).

#### 7.2.2 Misure generali primarie

**Stabilizzazione della marcia del forno** mediante ottimizzazione del processo con l'impiego di sistemi computerizzati di controllo automatico, e moderni sistemi gravimetrici di alimentazione del combustibile. I benefici ottenuti riguardano sia le emissioni sia i consumi energetici (2).

Attenta **selezione e controllo di tutte le materie prime** immesse nel forno al fine di evitare e/o ridurre le emissioni (3).

Regolare **monitoraggio e misurazione delle emissioni e dei parametri di processo** (4).



### 7.2.3 Scelta del processo e consumo energetico

Per i nuovi impianti e le modifiche sostanziali, la migliore tecnologia impiantistica è il **forno a via secca, con preriscaldatore multistadio e precalcinatore**. Il valore del bilancio termico associato alla BAT è di 2.900 – 3.300 MJ/t di clinker (5).

**Minimizzazione del consumo di energia termica** mediante la combinazione di sistemi di ottimizzazione dei parametri del forno e del precalcinatore, di recupero del calore in eccesso per il preriscaldamento della farina e dell'aria di processo, e per l'essiccazione delle materie prime, nonché la parziale sostituzione dei combustibili convenzionali con rifiuti (6).

**Riduzione del contenuto di clinker** nel cemento e nei prodotti di cemento (7).

Impiego di **sistemi di cogenerazione** in impianti di produzione combinata di calore ed energia, ove possibile ed economicamente valido (8).

Massima riduzione dei consumi elettrici impiegando **sistemi di gestione dell'energia**, nonché mulini ed altre apparecchiature elettriche ad alta efficienza energetica (9).

### 7.2.4 Impiego di rifiuti

Applicazione di sistemi di **controllo della qualità dei rifiuti** utilizzati come materia prima e/o combustibile nel forno per cemento (10).

Alimentazione di rifiuti contenenti sostanze volatili in zone ad **elevata temperatura** (> 850–1100°C) e con **adeguati tempi di permanenza** (> 2 secondi). Alimentazione costante e sospensione dell'impiego in fasi critiche come avviamento ed arresto (11).

Applicazione di sistemi di **Gestione della sicurezza nella manipolazione di rifiuti pericolosi** (12).

Inoltre, nel caso di co-incenerimento dei rifiuti, devono essere rispettati i requisiti della direttiva sull'incenerimento dei rifiuti (WID).

### 7.2.5 Emissioni di Polveri

Riduzione e **prevenzione delle emissioni di polveri fuggitive** dovute a lavorazioni polverose in ambienti aperti o confinati (13).

Utilizzo di sistemi di **depolverazione delle emissioni convogliate basati sulla filtrazione a secco**, con garanzie di concentrazioni in emissione sul breve periodo < 10 mg/Nm<sup>3</sup> (BAT AEL) (14).

Impiego di sistemi di depolverazione a secco per le emissioni del forno (15) e per le emissioni del raffreddatore e dei mulini (16), con garanzie di concentrazioni in emissione < 10-20 mg/Nm<sup>3</sup>, come media giornaliera (BAT AEL); con filtri a tessuto ed elettrofiltri moderni si raggiungono livelli ben più bassi.

### 7.2.6 Emissioni gassose

**Abbattimento degli NO<sub>x</sub>** applicando, anche in combinazione, misure e tecniche primarie (raffreddamento della fiamma, bruciatori LowNO<sub>x</sub>, combustione a metà forno, ...), combustione a stadi con calcinazione ed ottimizzazione del mix di combustibili, e tecniche secondarie basate su sistemi di riduzione non catalitici (SNCR) o catalitici (SCR), questi ultimi ancora in fase di sviluppo per i forni a via secca (17). I valori di emissione BAT-AEL sono pari a 200-450 mg/Nm<sup>3</sup> per i forni con preriscaldatori a cicloni e 400-800 mg/Nm<sup>3</sup> per forni lunghi o con griglia Lepol.

Nel caso di SNCR è necessario mantenere il processo operativo stabile ed alimentare NH<sub>3</sub> con una buona distribuzione stechiometrica, per mantenere le emissioni di NH<sub>3</sub> < 30 mg/Nm<sup>3</sup>, come valore medio giornaliero, con oscillazioni fino oltre a 50 mg/Nm<sup>3</sup> (18).

**Contenimento delle emissioni di SO<sub>x</sub>** o abbattimento delle emissioni del forno con aggiunta di adsorbenti o con scrubber ad umido. I valori di emissione BAT-AEL sono pari a 50-400 mg/Nm<sup>3</sup>, in dipendenza del contenuto di zolfo delle materie prime (19).

**Ottimizzazione dei processi di macinazione delle materie prime** (per il processo a via secca) che agiscono da abbattimento della SO<sub>2</sub> proveniente dal forno di cottura (20).

Nel caso di impiego di elettrofiltri, **massimo contenimento delle punte di CO** (meno di 30 minuti/anno) che impongono il by-pass dell'elettrofiltro stesso (misure in continuo del CO) (21).

**Contenere le emissioni di TOC** dal forno evitando di alimentare nel sistema del forno con il materiale crudo materie prime con un elevato contenuto di composti organici volatili (22).

Utilizzare materie prime e rifiuti (materia cruda o combustibile) a basso contenuto di Cloro e di Fluoro, per **contenere le emissioni di HCl** a livelli inferiori a 10 mg/Nm<sup>3</sup> (BAT AEL) (23) e **contenere le emissioni di HF** a livelli inferiori a 1 mg/Nm<sup>3</sup> (BAT AEL) (24).

**Evitare o contenere le emissioni di PCDD/F** nelle emissioni del processo di cottura applicando, anche in combinazione, misure riguardanti l'accurata selezione delle materie prime in relazione alla presenza di cloro, rame e composti organici volatili, dei combustibili per quanto concerne cloro e rame (soprattutto in calcinazione), evitando o limitando altresì l'utilizzo di rifiuti contenenti materiali organici clorurati e sospendendo il coincenerimento di rifiuti nelle fasi critiche come avvio ed arresto; ove necessario adottare tecniche di rapido raffreddamento dei gas di scarico del forno a temperatura < 200°C, riducendo il tempo di residenza e l'ossigeno a temperature comprese tra di 300 e 450°C; BAT-AEL per PCDD/F <0,05 - 0,1 ng I-TEQ/Nm<sup>3</sup> (media 6-8 ore (25).

### 7.2.7 Emissione di metalli

**Contenere le emissioni di metalli** selezionando materie prime a basso contenuto di metalli volatili (soprattutto mercurio), applicando sistemi di qualità per garantire la qualità dei rifiuti introdotti nel processo, impiegando efficienti sistemi di depolverazione; i valori BAT-AEL sono: Hg < 0,05 mg/Nm<sup>3</sup>, Σ(Cd, Tl) < 0,05 mg/Nm<sup>3</sup>, Σ(As, Sb, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V) < 0,5 mg/Nm<sup>3</sup> (26).

Per quanto concerne complessivamente il contenimento degli inquinanti, la seguente tabella riporta i **Livelli di emissione associati alle BAT** (BAT-AEL) riferiti ai forni di cottura del clinker.

*Livelli di emissione dei forni di cottura del clinker associati alle BAT (BAT-AEL)*

Parametri		BAT-AEL concentrazione	
Polveri		< 10	mg/Nm <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub> (come NO <sub>2</sub> )	Forno con preriscaldatori a cicloni	200 - 450	mg/Nm <sup>3</sup>
	Forno lungo o con griglia Lepol	400 - 800	mg/Nm <sup>3</sup>
SO <sub>x</sub> (come SO <sub>2</sub> )		50 - 400	mg/Nm <sup>3</sup>
NH <sub>3</sub>	con impianti SNCR	< 30	mg/Nm <sup>3</sup>
HCl		< 10	mg/Nm <sup>3</sup>
HF		< 1	mg/Nm <sup>3</sup>
PCDD/F		< 0,05 - 0,1	ng/Nm <sup>3</sup>
Metalli	(Hg)	< 0,05	mg/Nm <sup>3</sup>
	(Cd, Tl)	< 0,05	mg/Nm <sup>3</sup>
	(As, Sb, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V)	< 0,5	mg/Nm <sup>3</sup>

## 7.2.8 Scarti di processi e rifiuti

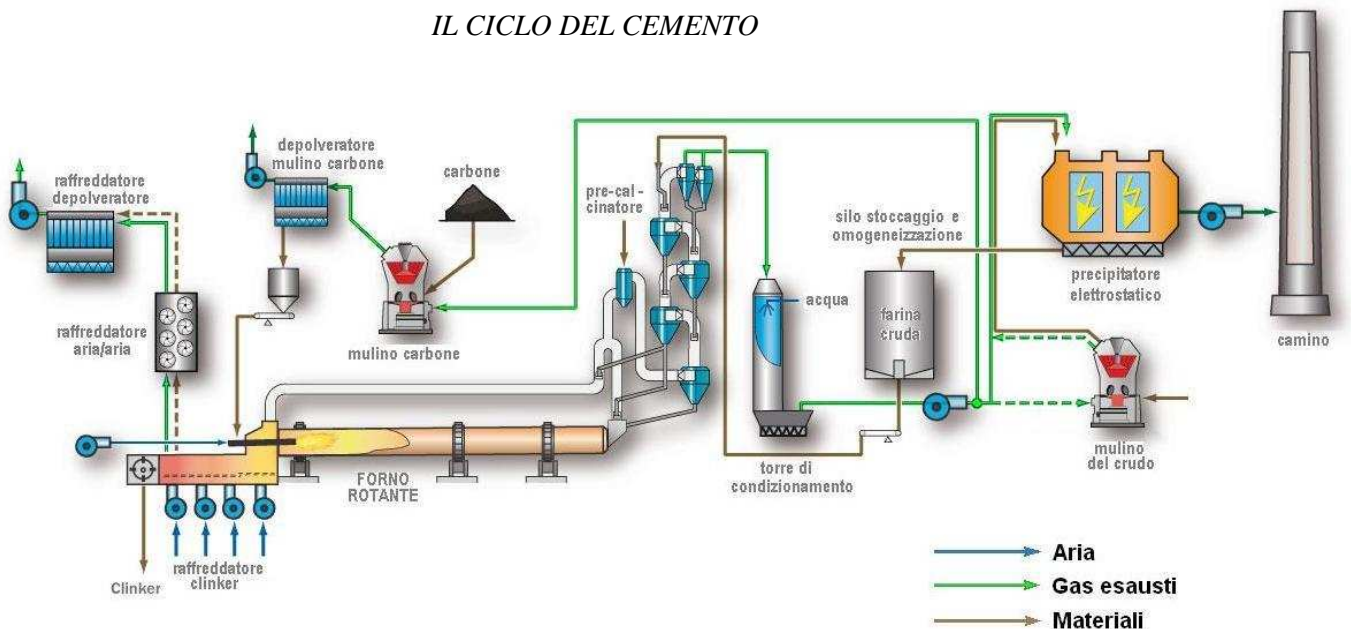
Riutilizzare, per quanto possibile, le polveri abbattute nel processo, ovvero, quando possibile, riutilizzarle quale componente di altri prodotti commerciali (27).

## 7.2.9 Rumore

**Riduzione al minimo delle emissioni sonore** derivanti dalle lavorazioni applicando, anche in combinazione, misure e tecniche che prevedano il confinamento con l'isolamento dalle vibrazioni degli impianti e delle attività rumorose, l'isolamento acustico di edifici e strutture, realizzazione di muri o barriere vegetali a protezione di aree delicate, il rivestimento e l'insonorizzazione di condotti e ventilatori, la chiusura di porte e finestre (28).

oooooooooooo

### IL CICLO DEL CEMENTO



*Riposo*



## **Patocche di Le Corbusier**

opera di Graziano Spinosi

Cemento armato – grandezza naturale – 1994

Collezione privata – Sant'Arcangelo di Romagna