

3. Cementi

■ Cementi comuni

● Classificazione dei cementi comuni

La norma UNI EN 197-1, *Cemento – Parte 1: Composizione, specifiche e criteri di conformità per cementi comuni*, elenca anzitutto i costituenti minerali che, oltre al clinker di cemento Portland, possono entrare nella composizione dei cementi comuni (►TABELLA 1).

La norma classifica i **cementi comuni europei** in 5 tipi (I, II, III, IV, V), caratterizzati dalla percentuale decrescente del costituente principale (il clinker).

Eccetto il tipo I (cemento Portland), ogni tipo è suddiviso in un certo numero di sottotipi, A, B, C..., come risulta dalla ►TABELLA 2. Si hanno quindi i tipi e i sottotipi sotto elencati.

- CEM I → *Cemento Portland*; contiene praticamente solo clinker (almeno il 95%).
- CEM II → *Cemento Portland di miscela* (17 sottotipi). Ogni sottotipo contiene, oltre al clinker, uno dei costituenti della ►TABELLA 2, la cui percentuale può essere del 6-20% (A) oppure del 21-35% (B) (►1); fa eccezione il *cemento Portland composito* (CEM II/A-M e CEM II/B-M), che contiene, oltre al clinker, una miscela di tutti i costituenti elencati nella ►TABELLA 1.
- CEM III → *Cemento di altoforno* (3 sottotipi); è costituito da clinker e da loppa, della quale sono previste 3 percentuali: 36-65% (A), 66-80% (B), 81-95% (C). Si distingue dal *cemento Portland alla loppa* CEM II-S per il minore contenuto di clinker.
- CEM IV → *Cemento pozzolanico* (2 sottotipi); è costituito da clinker con percentuali del 65-89% (A) o del 45-64% (B) e da una miscela di pozzolana,



►1 Per esempio, la sigla:

- CEM II/A-P indica un cemento Portland di miscela che contiene pozzolana naturale (P) nella percentuale (A) del 6-20% (*cemento Portland alla pozzolana*);
- CEM II/B-L indica un cemento Portland di miscela che contiene calcare (L) nella percentuale (B) del 21-35% (*cemento Portland al calcare*).

TABELLA 1 Costituenti minerali dei vari tipi di cemento comune

Componenti		Sigla	Caratteristiche
Clinker di cemento Portland		K	Sviluppa forte calore di idratazione e presenta bassa resistenza agli attacchi chimici. Contribuisce alla resistenza meccanica in tempi brevi (2-7 giorni).
Loppa d'altoforno		S	Diversamente dalla pozzolana ha la caratteristica di indurire, sia pure lentamente, anche in assenza di calce. Sviluppa, rispetto al clinker, minore calore di idratazione.
Pozzolana	naturale	P	Sviluppa, rispetto al clinker, minore calore di idratazione; ha buona resistenza agli attacchi chimici.
	industriale	Q	È una scoria vetrosa della lavorazione di leghe metalliche non-ferrose, non impiegata in Italia.
Ceneri volanti	silicee	V	Sono polveri recuperate dai fumi di combustione delle centrali termoelettriche. È disponibile in Italia la cenere volante di tipo siliceo (dalla combustione del carbone); non è disponibile quella di tipo calcico (dalla combustione della lignite).
	calciche	W	
Scisti calcinati		T	Sono residui della torrefazione di scisti argillosi impregnati di bitume, non impiegati in Italia.
Calcare		L	Unico costituente privo di caratteristiche idrauliche, produce cementi di granulometria fine e con minore percentuale di clinker, riducendo il calore di idratazione.
Microsilice		D	Sottoprodotto del processo produttivo del silicio metallico o delle leghe metalliche ferro-silicio, si presenta in polvere finissima. È usata più spesso come additivo del calcestruzzo.
Filler		F	Materiali inorganici naturali o artificiali finissimi, funzionano come <i>riempitivi</i> , migliorando la lavorabilità degli impasti.

TABELLA 2 Tipi di cemento e composizione (UNI EN 197)

Tipo di cemento	Denominazione	Sigla	Clinker K	Loppa d'altoforno granulata S	Microsilice D	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato T	Calcare L	Costituenti secondari
						naturale P	industriale Q	silicica V	calcea W			
I	Cemento Portland	I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Cemento Portland alla loppa	II/A-S II/B-S	80-94 65-79	6-20 21-35	—	—	—	—	—	—	—	0-5 0-5
	Cemento Portland alla microsilice	II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	0-5
	Cemento Portland alla pozzolana	II/A-P II/B-P II/A-Q II/B-Q	80-94 65-79 80-94 65-79	— — — —	— — — —	6-20 21-35 — 21-35	— — 6-20 —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	0-5 0-5 0-5 0-5
II	Cemento Portland alle ceneri volanti	II/A-V II/B-V II/A-W II/B-W	80-94 65-79 80-94 65-79	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	6-20 21-35 — 21-35	— — — —	— — — —	— — — —	0-5 0-5 0-5 0-5
	Cemento Portland allo scisto calcinato	II/A-T II/B-T	80-94 65-79	— —	— —	— —	— —	— —	6-20 21-35	— —	— —	0-5 0-5
	Cemento Portland al calcare	II/A-L II/B-L	80-94 65-79	— —	— —	— —	— —	— —	— —	6-20 21-35	— —	0-5 0-5
	Cemento Portland composito	II/A-M II/B-M	80-94 65-79	— —	— —	6-20 ⁽⁵⁾ 21-35 ⁽⁵⁾	— —	— —	— —	— —	— —	— —
III	Cemento d'altoforno	III/A III/B III/C	35-64 20-34 5-19	36-65 66-80 81-95	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	0-5 0-5 0-5
	Cemento pozzolanico	IV/A IV/B	65-89 45-64	— —	— —	11-35 36-55	— —	— —	— —	— —	— —	0-5 0-5
	Cemento composito	V/A V/B	40-64 20-39	18-30 31-50	— —	18-30 31-50	— —	— —	— —	— —	— —	0-5 0-5



FIGURA 1 a) CEM III/A 42,5 N → Cemento d'altoforno. b) CEM V/A 32,5 R → Cemento composito a rapido indurimento.

microsilice e cenere silicea. Si distingue dal *cemento Portland alla pozzolana* CEM II-P per il minore contenuto di clinker.

- CEM V → *Cemento composito* (2 sottotipi), costituito da ridotte percentuali di clinker, 40-64% (A) oppure 20-39% (B), e da una miscela di loppa, pozzolana e cenere silicea. Si distingue dal *cemento Portland composito* CEM II/M perché quest'ultimo è più ricco di clinker e più povero di costituenti minerali.

Ciascun sottotipo di cemento comune può essere fornito in tre diverse classi di resistenza (32,5 N - 42,5 N - 52,5 N).

I tre numeri indicano (in N/mm^2) la soglia minima di resistenza meccanica a compressione, misurata a 28 giorni di stagionatura, detta *resistenza normalizzata* (N).

Nei cementi a rapido indurimento gli stessi numeri sono invece seguiti dalla lettera R, che indica la capacità del cemento di raggiungere, oltre alla resistenza normalizzata, una prefissata *resistenza alle brevi stagionature*, in genere ottenuta dopo 2 giorni (7 per CEM I).

In pratica, sia un cemento di classe 32,5 N, sia un cemento di classe 32,5 R devono superare la resistenza di $32,5 \text{ N/mm}^2$ dopo 28 giorni, ma il cemento di classe 32,5 R deve *anche* superare una prefissata resistenza meccanica (10 N/mm^2) dopo 2 giorni (► FIGURA 1).

Poiché ognuno dei 25 diversi sottotipi di cemento comune può essere disponibile in 6 diverse classi di resistenza, è dunque possibile avere $25 \times 6 = 150$ tipi di cemento comune. In realtà nessuna nazione produce tutti i possibili sottotipi, per irreperibilità locale di alcuni costituenti o per assenza di specifica tradizione. E neppure sono sempre prodotte, per ogni sottotipo, tutte le classi di resistenza, per oggettive difficoltà tecnologiche. Per esempio, un cemento di altoforno CEM III/C o pozzolanico CEM IV/B, a basso contenuto di clinker e quindi con più lunghi tempi di presa, potranno essere prodotti solo nella classe 32,5 (N o R), perché non riusciranno mai a raggiungere la resistenza alle brevi stagionature prevista per le classi 42,5 o 52,5.

Tipi di cemento Portland

- Oltre al Portland detto “ordinario” sono disponibili cementi di diversa composizione per **usi specifici**. I vari tipi sono classificati secondo la **norma ASTM C 150-74 e C 175** sulla base della **composizione**.

Tabella III – *Cementi Portland A.S.T.M. (C 150-74).*

Tipo		C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	$CaSO_4$	CaO lib.
I	- ordinario	49	25	12	8	2,9	0,8
II	- (modificato) a moderata resistenza ai solfati e moderato calore di idratazione	46	29	6	12	2,8	0,6
III	- a rapido indurimento	56	15	12	8	3,9	1,3
IV	- a basso calore di idratazione	30	46	5	13	2,9	0,3
V	- resistente ai solfati	43	36	4	12	2,7	0,4

- **Tipo III-Rapido indurimento:**

elevati tenori di C_3S associati a basso tenore di C_2S .

Si ottiene aumentando opportunamente il dosaggio del calcare e controllando la finezza di macinazione. Quanto più è fine il cemento tanto più sono rapide le reazioni di idratazione.

- **Tipo II e V-Resistenza ai solfati**

la resistenza ai solfati è data dalla riduzione del tenore di C_3A .

Se questa è di media entità si ottiene un Portland modificato (tipo II) con moderata resistenza ai solfati.

Se la riduzione è drastica il contenuto di alluminato tricalcico è inferiore al 5% la resistenza ai solfati diventa molto elevata.

- **Tipo IV-A basso calore di idratazione**

Il calore che si sviluppa nella stagionatura viene ridotto riducendo la percentuale dei componenti che si idratano velocemente, producendo rapido sviluppo di calore e cioè C_3S e C_3A

Costituente	Calore di idratazione cal/g	Portland tipo	Calore di idratazione a 25°C, cal/g
C_3S	120	I	68,0
C_2S	62	III	83,2
C_3A	207	IV	46,6
C_4AF	100		

- La riduzione del tenore di C_3S comporta ovviamente un aumento percentuale di C_2S e quindi uno **sviluppo più lento delle resistenze meccaniche** (tipo IV vs tipo I)
- I **cementi a basso calore di idratazione** sono impiegati in **costruzioni voluminose e massicce** (dighe) nelle quali il calore rimane nelle zone più interne della struttura ove si raggiungono anche temperature di 60-80 °C.
Lo **smaltimento** di tale calore richiederebbe tempi molto lunghi, **fino ad 1 anno**.
- Il **gradiente termico** sottoporrebbe la struttura ad elevate tensioni che potrebbero portare ad **estese fessurazioni** con scadimento delle resistenze meccaniche.

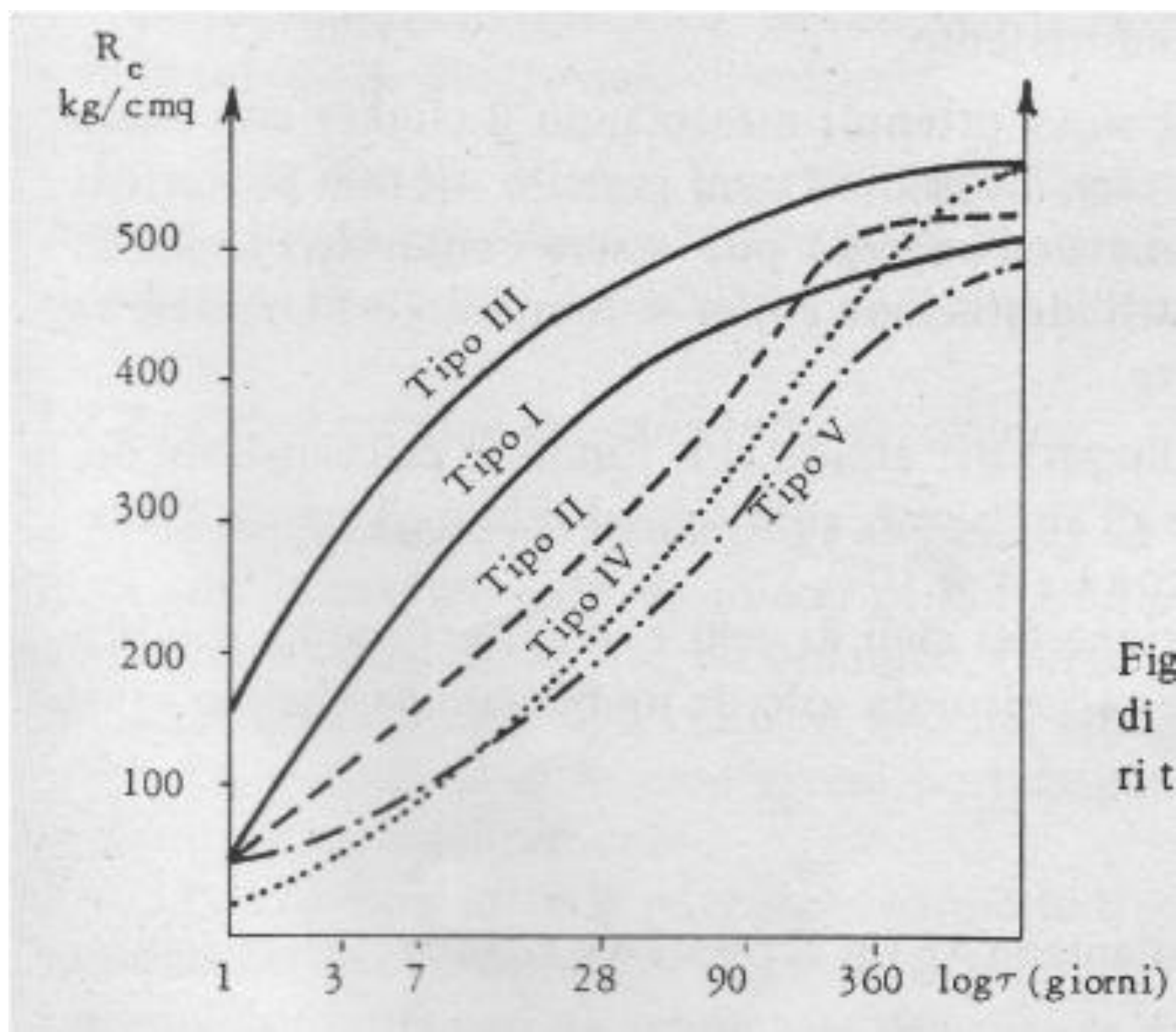


Fig
di
ri t

Altri cementi derivati dal Portland

- L'inconveniente principale dei cementi Portland è la **scarsa resistenza alle acque aggressive** dovuta alla **presenza di Ca(OH)_2** liberata dalla idratazione di C_3S e C_2S .
- Per questo motivo sono prodotti **cementi “derivati” dal Portland** che presentano minore o nulla sensibilità alle acque aggressive. Si tratta del:
 - ✓ **cemento pozzolanico**
 - ✓ **cemento d'altofrono**

Cemento pozzolanico

- secondo la ASTM C 618-73 si definisce la
come segue *Pozzolana*:

“ogni materiale siliceo o silico-alluminoso che in forma finemente suddivisa in presenza di acqua reagisce a temperatura ambiente con idrossido di calcio formando composti cementanti”

- Le pozzolane sono la soluzione al problema della deteriorabilità del cemento Portland in presenza di acque aggressive ad elevato contenuto di CO_2 .
- Le pozzolane reagiscono con la calce di idrolisi impedendone la carbonatazione e la conseguente dissoluzione.

Proprietà pozzolaniche di un materiale

- ✓ **elevato contenuto di silice**
- ✓ silice presente deve essere **reattiva** cioè in forma **amorfa** e non cristallina
- ✓ **elevata superficie specifica**
- ✓ esistono **pozzolane e materiali ad attività pozzolanica** sia **naturali** che **artificiali**

NATURALI	VULCANICHE	Pozzolane laziali e campane	fase vetrosa originata dal brusco raffreddamento del materiale lavico fuso espulso per eruzioni di tipo esplosivo.
		Tufi pozzolanici	Terra di Santorino Trass renano Mooler danese Gaizes francese
	NON VULCANICHE: Residui silicei		dilavamento di rocce silicee: Silice di Viterbo Terra di Sacrofano
			depositi organici: Terra di diatomee Tripoli Farina fossile
ARTIFICIALI	Argille cotte		per calcinazione a 500°-900° di argille
	Ceneri volanti (fly ash - ASTM C311, C340, C350, C402)		formate per rapido raffreddamento delle particelle fuse di cenere uscenti dai camini dei forni a carbone (dalla ganga che accompagna il carbone)

Tabella VI – *Composizione chimica % di alcuni materiali pozzolanici.*

Componente	Pozzolane laziali	Pozzolane campane	Ceneri volanti	Trass Renano	Santorino
SiO ₂	45-47	53-64	30-50	59,70	64,34
Al ₂ O ₃	15-23	17-20	15-40	20,85	10,88
Fe ₂ O ₃	6-12	4-6	5-10	4,42	6,44
CaO	8-9	3-4	3-10	1,77	3,62
MgO	1-3	1-2	1-5	1,29	2,77
Na ₂ O + K ₂ O	3-4	5-13	0,2-1	10,04	10,88

Cosa si intende per cemento pozzolanico ?

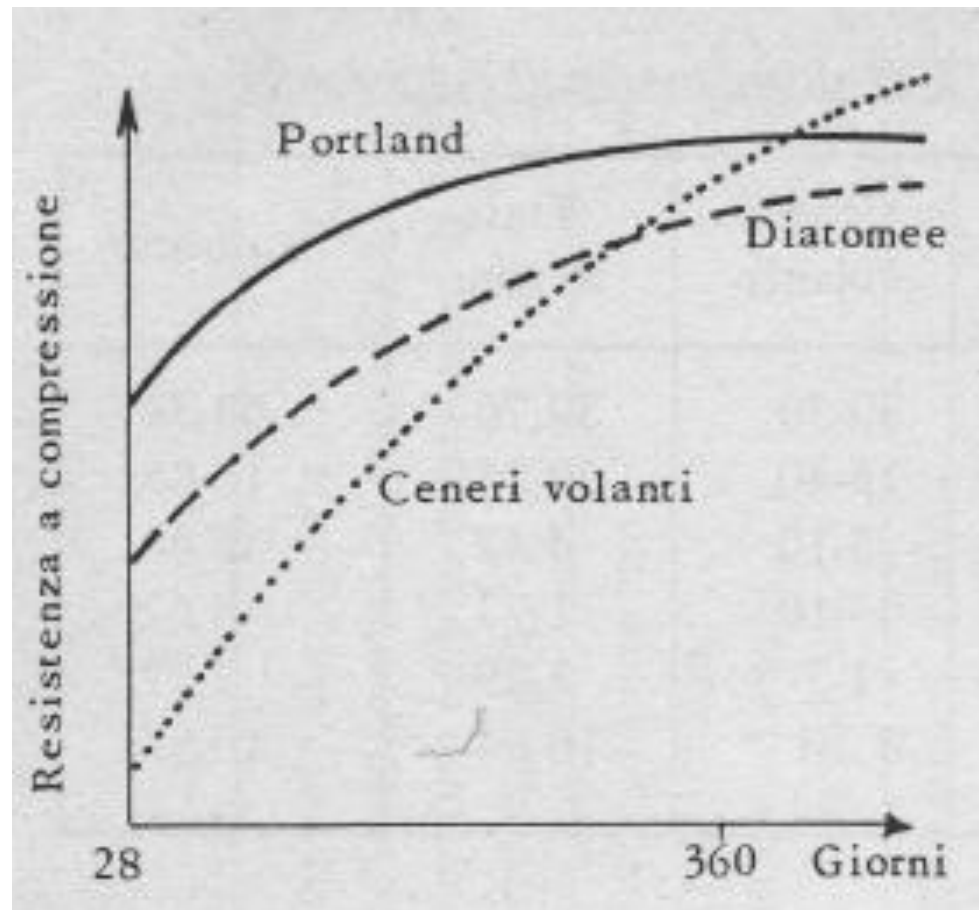
- ✓ miscela **omogenea** ottenuta con la macinazione di clinker di Portland e di pozzolana o di altro materiale a comportamento pozzolanico, con la quantità di gesso necessaria.
- ✓ al fine avere una miscela omogenea la pozzolana deve essere portata per macinazione allo stesso grado di finezza del cemento.

- Poichè le **diverse pozzolane** hanno **diverso tenore di silice reattiva**, la **quantità ottimale** di pozzolana o materiale pozzolanico da aggiungere deve essere **determinata volta per volta** facendo provini di clinker addizionati di quantità crescenti di pozzolana. La presenza di eccesso di pozzolana provoca il decadimento delle proprietà meccaniche del manufatto cementizio.
- **troppa pozzolana**...nociva perchè di per sè non è un legante e porterebbe decremento proprietà meccaniche;
- **troppa poca pozzolana**...lascerebbe troppa calce libera ed il cemento non sarebbe resistente alle acque aggressive.

Idratazione cemento pozzolanico

- **La quantità di acqua richiesta è la stessa del Portland eccetto per materiali pozzolanici porosi e finemente suddivisi;**
- **Indurimento avviene in due stadi:**
 - (1) idratazione del clinker di Portland con formazione di calce di idrolisi**
 - (2) reazione della pozzolana con la calce di idrolisi che porta alla formazione di silicati e silico-alluminati idrati (a seconda del tipo di materiale pozzolanico usato) di composizione e struttura analoghe a quelle del gelo CSH**

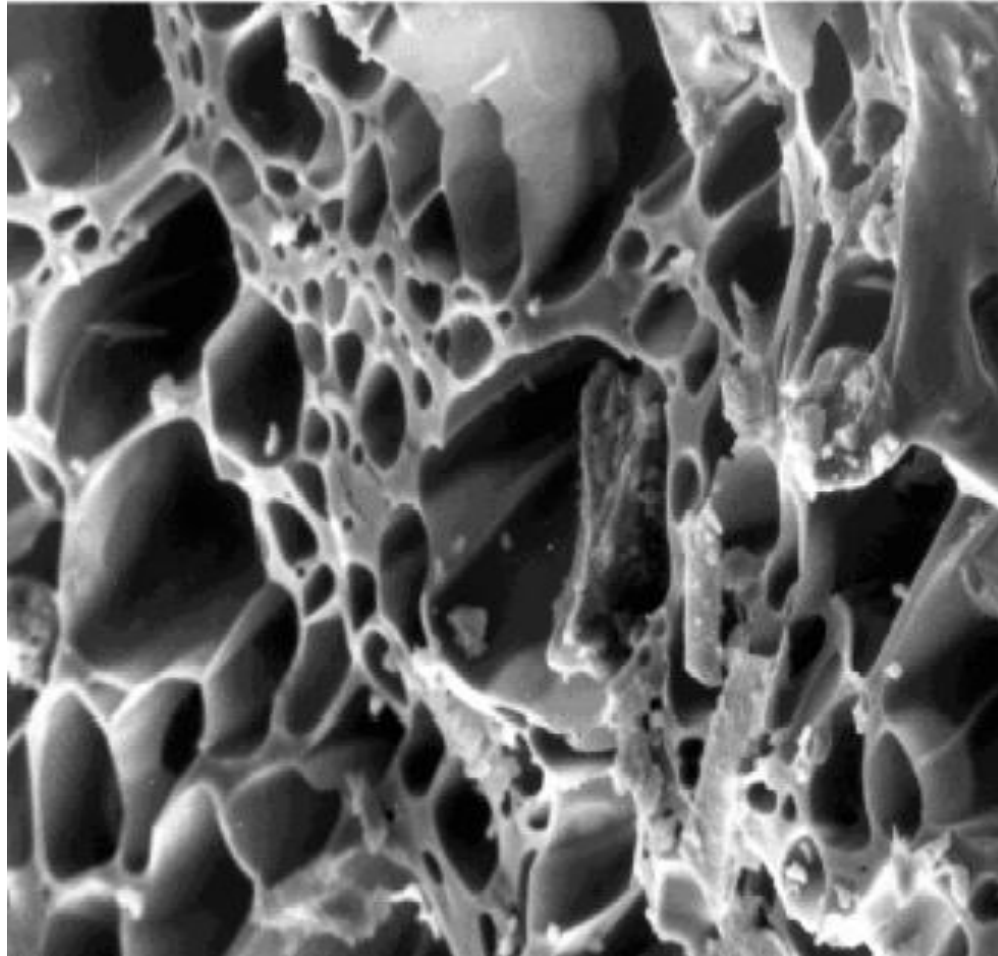
- Il **secondo stadio di idratazione** è piuttosto **lento** quindi inizialmente le **resistenze meccaniche** sono **inferiori** rispetto a quelle del **Portland ordinario**.



Proprietà cemento pozzolanico

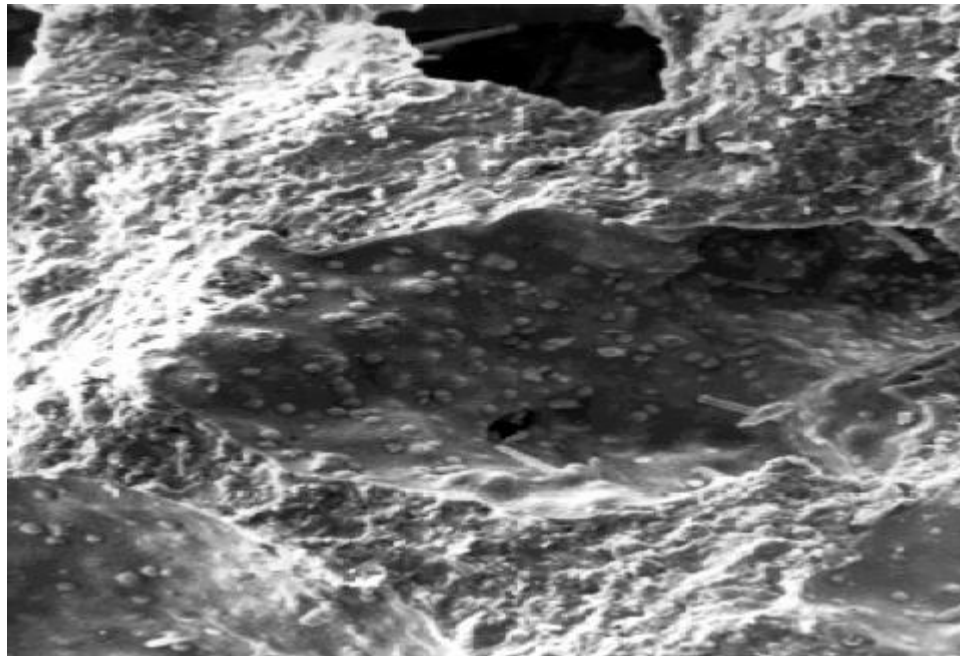
- **resistenza alle acque aggressive**
- **basso calore di idratazione:** a causa lenta idratazione della pozzolana il calore si sviluppa gradualmente permettendo la posa in opera anche di getti spessi nei quali l'impiego di Portland porterebbe a notevoli stress termici
- **minore porosità :** successiva e continua formazione di gelo secondario riempie i pori del gelo primario
- **applicazioni principali:** opere destinate a rimanere a contatto con acque aggressive o marine, getti interrati, getti massicci e manufatti impermeabili...in pratica utilizzato per strutture portuali e dighe

Pozzolana di Bacoli (1000 x)



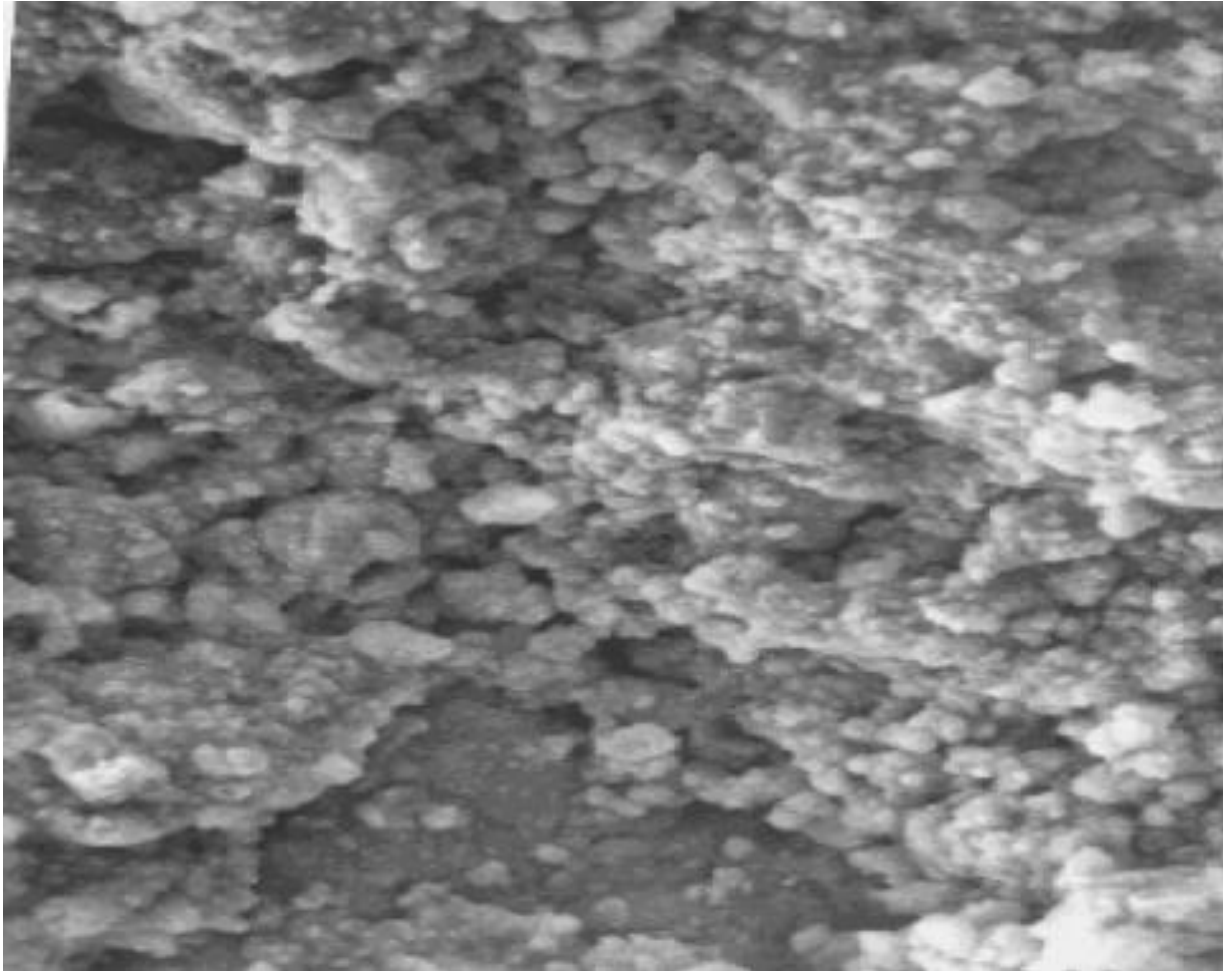
Pozzolana laziale (1000X)

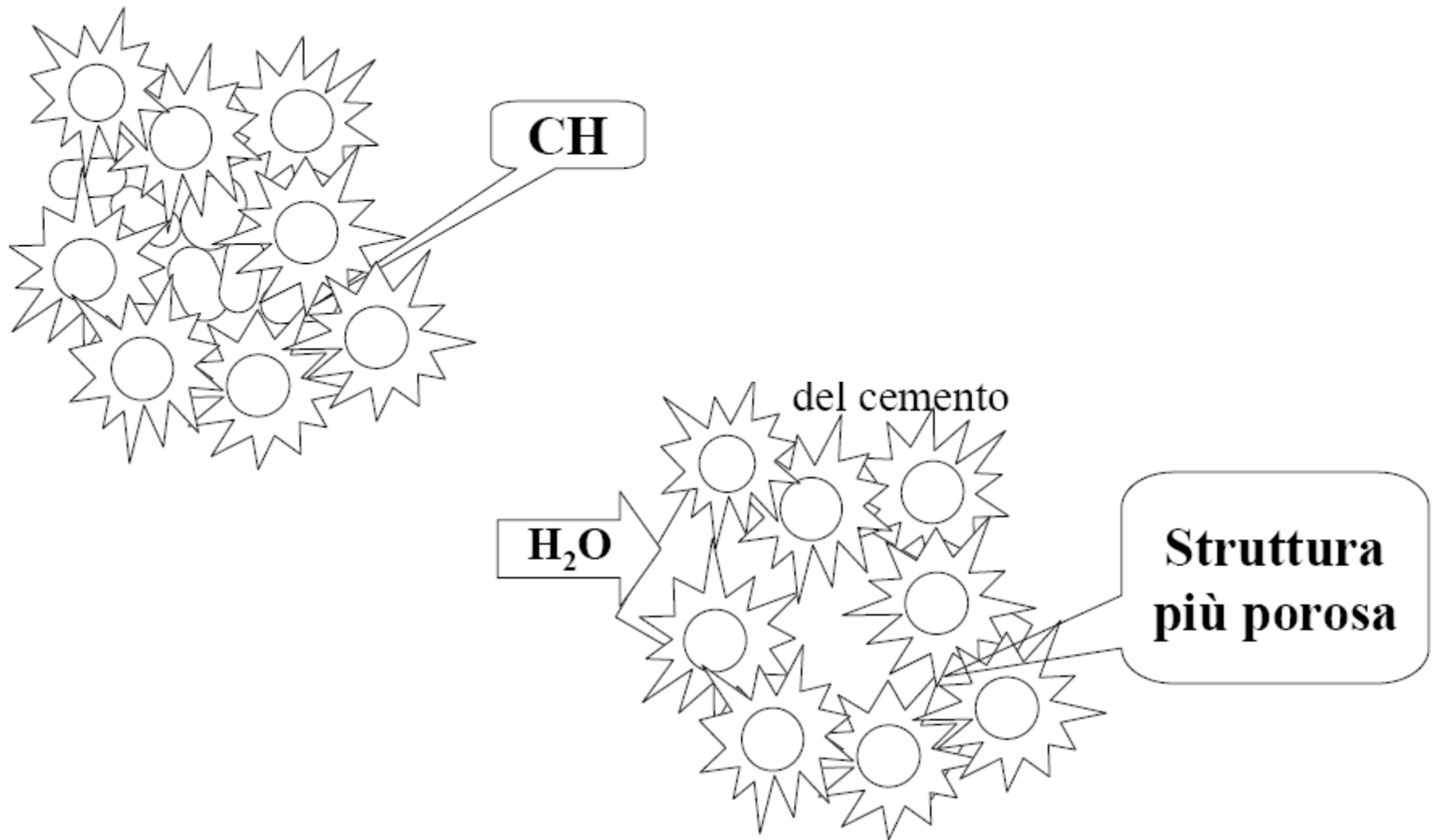
Metamorfismo della struttura vetrosa originaria con formazione di elementi cristallizzati



Pozzolana viterbese

Aggregazione di particelle di silice residuali
di forma tondeggianti





Cementi d'alto forno (ASTM C 205 e C 358)

- A differenza del cemento pozzolanico i cementi d'altoforno contengono come **componente fondamentale le loppe di altoforno** e come **componente accessorio il clinker di Portland**

Loppe d'altoforno

- le loppe sono il **sottoprodotto** che si origina negli altoforni nel corso della **produzione della ghisa**, i due materiali si ottengono in pari quantità.
- Gli **ossidi principali** sono gli stessi del **Portland** ma la **composizione è diversa**.
- Le loppe presentano **proprietà leganti** solo se **finemente macinate** ed impastate con **acqua** in presenza di **attivatori della loppa** (idrossido di calcio o solfato di calcio).

Tabella VII – *Composizione delle loppe basiche di altoforno.*

Componente	%
CaO	30-50
SiO ₂	28-38
Al ₂ O ₃	8-24
MgO	1-18
Fe ₂ O ₃	1-3
CaS	1-5

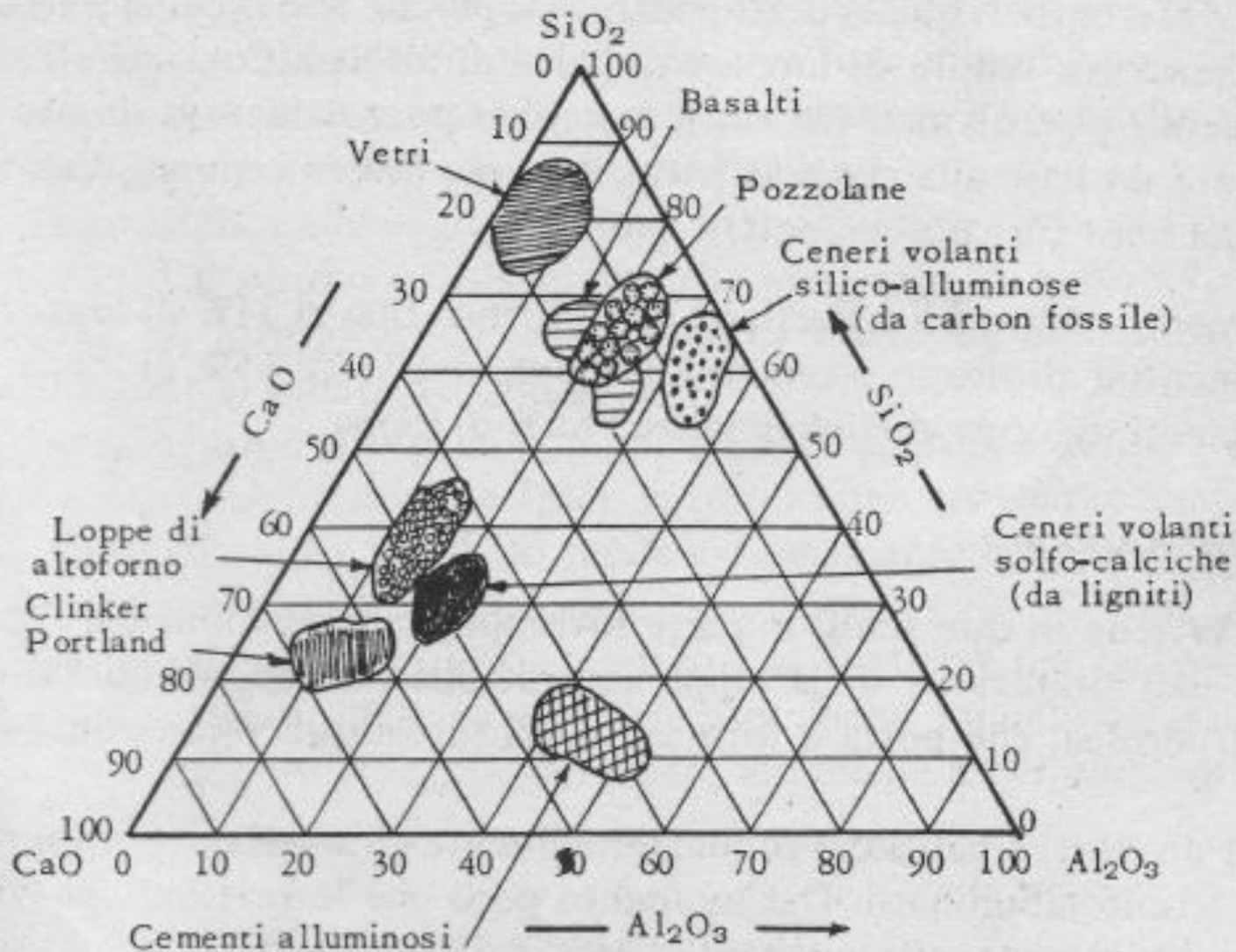


Fig.I.17 – Diagramma ternario della composizione delle loppe in confronto con altri materiali.

Fabbricazione cementi d'altoforno

“miscela omogenea ottenuta con la macinazione di clinker di Portland e di loppa d'altoforno con la quantità di gesso necessaria”

Esistono **diversi cementi di altoforno** a seconda del contenuto di loppa:

Cementi siderurgici: loppa fino al 35 %

Cementi d'altoforno: loppa 35-85 %

Cementi di loppa al clinker: oltre 85% loppa

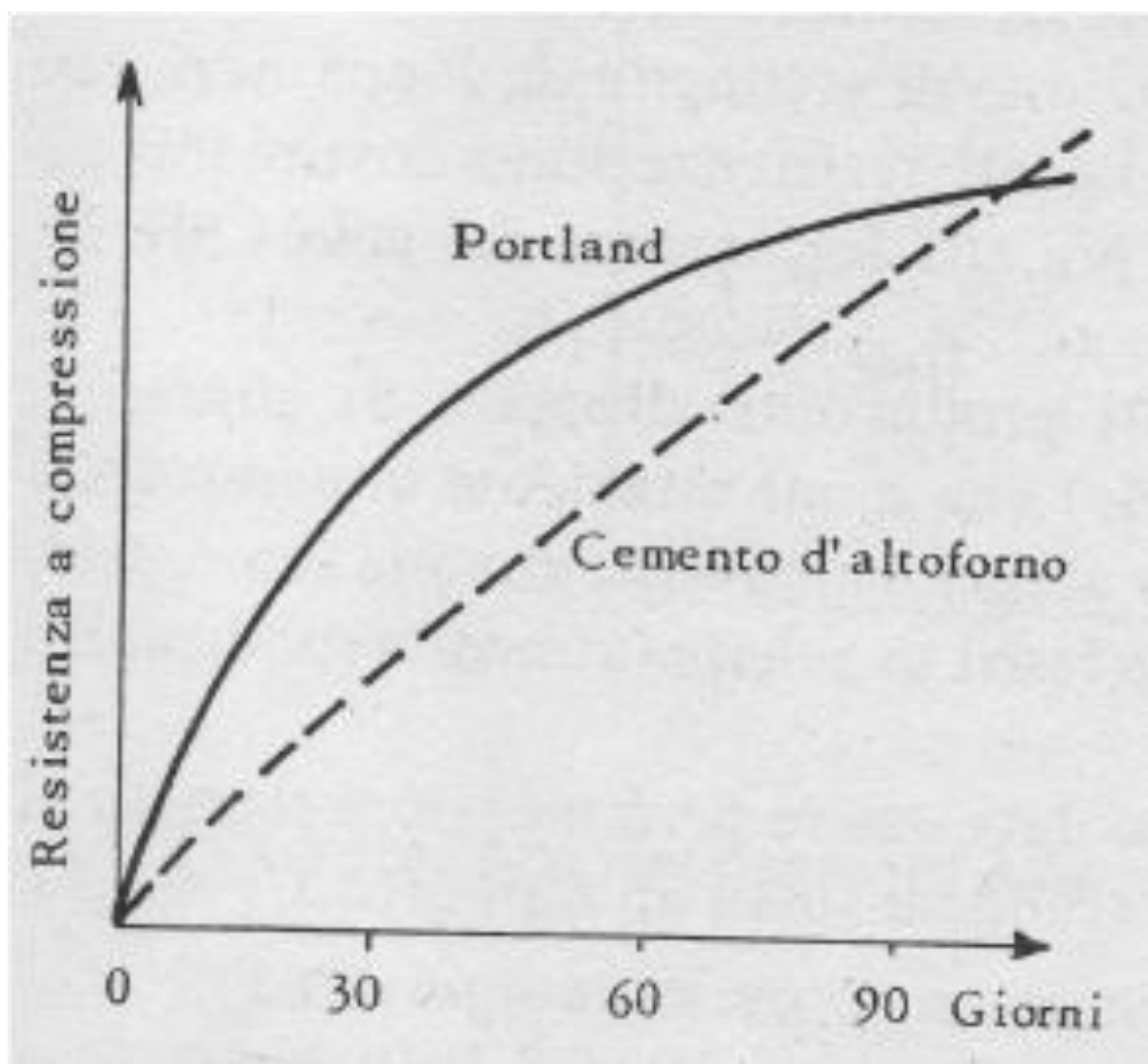
Idratazione

- Avviene in due stadi

(1) idratazione del Portland

(2) idratazione della loppa contemporanea alla reazione della loppa con la calce di idrolisi con formazione di silicati idrati ed alluminati di calcio idrati.

- Stessi prodotti di idratazione del Portland:
gelo CSH e trisolfoalluminato (ettringite)
- **reazioni della loppa molto lente, basso calore di idratazione, basse resistenze meccaniche iniziali**, alle **lunghe stagionature** la resistenza **supera** anche di molto quella del **Portland ordinario**.
- La calce di idrolisi viene poi gradualmente eliminata dalla reazione con i costituenti della loppa.



Proprietà

- **Costruzioni massicce** (calore idratazione inferiore al pozzolanico, detto anche cemento freddo) **opere idrauliche** e per opere in **ambienti umidi**
 - ✓ Dipendono rapporto loppa/clinker
 - ✓ Buona resistenza acque aggressive non vi è calce libera
 - ✓ se loppa supera 65% cemento molto compatto che lo rende molto poco permeabile alle acque aggressive