

LA PRODUZIONE DEL CALCESTRUZZO ANTICO E MODERNO

MARIO COLLEPARDI

Dipartimento di Scienze dei Materiali e della Terra, Università di Ancona.

ABSTRACT

Modern concrete can be distinguished from the old one substantially for two main parameters: type of binder and type of aggregate.

The binder used by the Romans was initially lime and subsequently a mixture of lime and natural or artificial pozzolan (a volcanic earth or ground tile respectively). The mixture of lime and pozzolan, was replaced by hydraulic lime in the 18th century. Portland cement, discovered by Aspdin in 1824, has been widely used in the present century when reinforced concrete structures have been successfully developed.

The main difference in aggregate is substantially based on the particle size distribution, which is discontinuous in the old concrete and well-graded according a continuous curve in the modern concrete.

1. INTRODUZIONE

Da un punto di vista scientifico il calcestruzzo può essere definito come un materiale composito formato da elementi lapidei tenuti assieme da un collante di natura inorganica costituito da una miscela di acqua e legante, essendo il legante a sua volta una polvere ottenuta per cottura e macinazione di pietre naturali.

Con questa definizione il calcestruzzo, generalmente associato ad un materiale da costruzione moderno impiegato soprattutto in questo secolo, include in realtà anche altri materiali compositi largamente impiegati nell'antichità almeno alcuni secoli prima di Cristo.

Da un punto di vista etimologico il termine "calcestruzzo" deriva dal latino *calcis structio*, cioè struttura a base di calce. In realtà, il termine utilizzato da Vitruvio (1), contemporaneo dell'Imperatore Augusto, per definire un conglomerato molto simile al calcestruzzo che attualmente impieghiamo per la realizzazione delle strutture, costituito da rottami di pietra o mattone mescolati con calce, sabbia ed acqua, era *opus caementitium*. Soprattutto per le opere idrauliche, o comunque esposte all'azione delle acque piovane, la sabbia veniva sostituita in parte o in tutto da pozzolana di origine vulcanica (*pulvis puteolana*) o da coccio pesto. Il rottame di pietra usato per confezionare il calcestruzzo - non più grosso di una mano secondo Vitruvio - veniva indicato con il termine di *caementum* dal verbo *caedo* che significa "taglio in pezzi" da cui deriva anche l'italiano "incido", cioè "taglio dentro". Il termine *caementum* dal latino classico, divenuto *cementum* nel

latino volgare, conservò prima il significato originale di "rottame di pietra", per poi assumere nel tardo Medioevo, con il termine italiano di "cemento" il significato di tutto il conglomerato, cioè dell'attuale calcestruzzo.

Solo alla fine del diciottesimo secolo il termine "cemento" assunse quello attuale di legante, mentre al conglomerato venne definitivamente assegnato il termine di "calcestruzzo".

Al di là degli aspetti semantici, la principale differenza che caratterizza il calcestruzzo antico da quello moderno consiste soprattutto nel diverso tipo di legante impiegato: nel calcestruzzo antico, il legante è costituito da calce e pozzolana, o ancora da prodotti nei quali la calce è accompagnata da impurità (silice e allumina) che le conferiscono proprietà peculiari simili a quelle del cemento (calce idraulica); nel calcestruzzo moderno, invece, il legante è costituito dal cemento Portland o da miscele di questo con loppa d'altoforno e pozzolana. La transizione dal calcestruzzo antico a quello moderno, sulla base del tipo di legante, è graduale ed incerta, ma può essere per semplicità e comodità storicamente individuata nel 1825, anno in cui venne assegnato all'Inglese Aspdin il brevetto sull'invenzione del cosiddetto "cemento Portland".

Una seconda importantissima differenza, che contraddistingue il calcestruzzo antico da quello moderno è l'importanza che in quest'ultimo ha assunto lo studio sulla natura, sulla dimensione e sulla distribuzione granulometrica degli elementi lapidei (aggregati o inerti): è all'inizio di questo secolo che si verifica un notevole progresso nella conoscenza sull'ottimizzazione della distribuzione particellare degli elementi lapidei da destinare alla produzione del calcestruzzo.

Nella Tabella 1 sono indicati gli altri parametri (additivi, composizione, miscelazione, trasporto, cassetatura, compattazione e stagionatura) che, accanto a quelli ora menzionati (legante ed inerti), hanno condizionato il modo di produrre e mettere in opera i calcestruzzi antichi e moderni.

In questo articolo vengono esaminate le evoluzioni del calcestruzzo antico a quello moderno ponendo l'attenzione sui progressi compiuti sui due parametri più importanti: il legante e l'inerte.

Tabella 1 - Principali differenze tra calcestruzzo antico e moderno

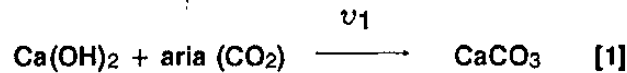
	CALCESTRUZZO ANTICO	CALCESTRUZZO MODERNO
Legante	- calce - calce, pozzolana - calce idraulica	- cemento Portland - cemento pozzolanico - cemento d'altoforno
Aggregati (inerti)	- sabbia e rottami grossi di pietre naturali o artificiali (mattoni)	- sabbia e ghiaia o pietrisco con distribuzione granulometrica continua
Additivi		- fluidificanti, superfluidificanti, aeranti, acceleranti ritardanti, ecc.
Composizione	- suggeriti rapporti tra sabbia, calce, pozzolana e rottami di pietra	- importanza del rapporto acqua/cemento
Miscelazione	- manuale	- con mezzi meccanici (betoniere)
Trasporto	- solo a breve distanza	- anche a lunga distanza con autobetoniere e pompe
Casserature	- paramenti in mattoni o pietre (permanent)	- metalliche, di legno, di plastica (rimovibili)
Compattazione	- rudimentale con mazze di ferro	- molto efficace, con mezzi meccanici (vibratori ad ago o a parete)
Stagionatura		- protezione del getto con teli, nebulizzatori di acqua, pellicole anti-evaporanti

2. DALLA CALCE AL CEMENTO NEL CALCESTRUZZO ANTICO E MODERNO

Prima dell'avvento del calcestruzzo, le grandi costruzioni, per lo più destinate a santuari e fortificazioni, venivano realizzate in tempi lunghissimi mediante accostamento di grandi blocchi squadrati (*saxum quadratum* secondo Vitruvio): per esempio (2), nell'esecuzione, peraltro incompiuta, del grande tempio di Apollo a Didíma occorsero più di quattro secoli (dal 332 a.C. fino al 130 d.C.) per la difficoltà di movimentare e di allocare grossi blocchi in pietra, ciascuno in una ben determinata posizione; al contrario, occorsero solo sette anni (dal 118 al 125 d.C) per terminare la costruzione in calcestruzzo del Pantheon e della sua straordinaria cupola.

Infatti, nelle antiche costruzioni in calcestruzzo, i paramenti in mattoni o in pietre squadrate, che fungevano da casseri permanenti, venivano rapidamente riempiti di malta all'interno della quale venivano poi conficcati a mano, più o meno regolarmente, i rottami di pietra e mattone (Fig. 1).

Se il legante della malta era costituito soltanto dalla calce, l'indurimento del calcestruzzo avveniva molto lentamente e risultava, anche in tempi molto lunghi, di modesta entità se confrontato con il grado di indurimento conseguibile in una malta da allettamento e soprattutto da intonaco. La ragione di questo diverso comportamento della malta nel calcestruzzo e nell'intonaco sono da attribuire alla particolare reazione che provoca l'indurimento della calce. Infatti, il progressivo consolidamento di una malta a base di calce è dovuto alla reazione della calce con l'anidride carbonica presente nell'aria ed alla produzione di carbonato di calcio:



Questo processo coinvolge abbastanza rapidamente tutto lo spessore dell'intonaco per l'elevata estensione superficiale della malta a contatto con l'aria, meno rapidamente la malta di allettamento a causa del lento processo di diffusione della CO₂ attraverso il giunto tra mattoni o pietre, e ancor più lentamente l'intera massa del calcestruzzo separata dall'aria, e quindi dalla CO₂, attraverso i paramenti in pietra o mattone. In alcune antiche costruzioni murarie in calcestruzzo confezionato con legante a base di calce, sono state trovate, anche a distanza di moltissimi secoli, quantità significative di calce non ancora trasformata in carbonato di calcio e quindi non ancora indurita.

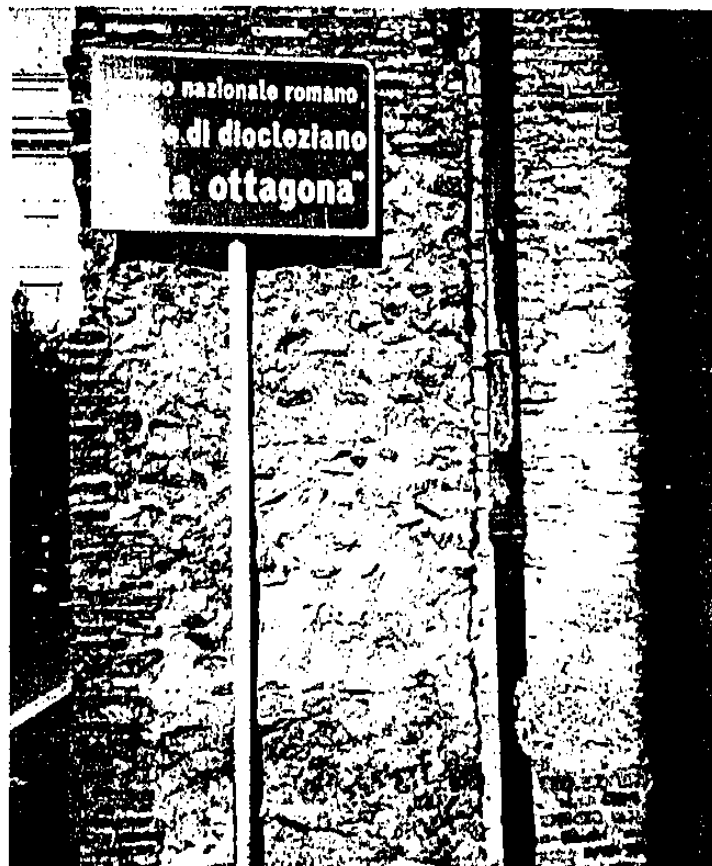
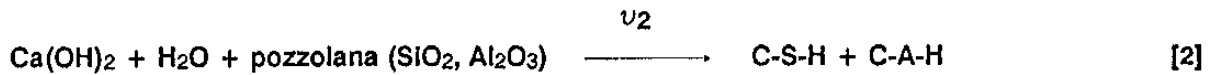


Fig. 1 - Esempio di calcestruzzo antico in sezione.

La scoperta della pozzolana segnò un rivoluzionario progresso nelle antiche costruzioni in calcestruzzo. Scrive Vitruvio nel capitolo VI del secondo dei suoi dieci libri sull'Architettura (1) che la pozzolana di Bala o di Cuma "fa gagliarda non solo ogni specie di costruzione ma particolarmente quelle che si fanno in mare sott'acqua". Oggi sappiamo che la pozzolana può essere definita un materiale (naturale o artificiale) di natura inorganica, prevalentemente costituito da silice e allumina mal cristallizzate o completamente amorfe, che di per sé non possiede alcuna caratteristica legante (mescolata con acqua non indurisce), ma che è in grado di attivare significativamente l'indurimento della calce e di rendere resistente all'azione dell'acqua il conglomerato indurito. Noi oggi sappiamo anche che l'azione della pozzolana si esplica attraverso la formazione di alluminati idrati di calcio (C-A-H) e soprattutto di silicati idrati di calcio (C-S-H) grazie alla reazione della calce con l'allumina e la silice amorfa della pozzolana:



La velocità (ν_2) con cui avviene questa reazione è molto maggiore di quella (ν_1) con cui si esplica il processo di carbonatazione della calce e ciò giustifica il più rapido indurimento di una malta a base di calce-pozzolana rispetto a quello di una malta con sola calce. Inoltre, data la diversa microstruttura dei prodotti finali (C-S-H e C-A-H invece di CaCO_3), la matrice legante è porosimetricamente più compatta e meccanicamente più resistente oltre che insensibile all'azione dilavante dell'acqua. Infine, una malta a base di calce-pozzolana è in grado di indurire autonomamente e rapidamente anche al di fuori del contatto dell'aria: proprio quest'ultimo aspetto della reazione calce-pozzolana ne ha determinato il successo quale legante della malta destinata alla produzione dell'antico calcestruzzo. In sostanza, il processo di indurimento di un calcestruzzo a base di calce dipendeva fortemente dal grado di penetrazione dell'aria attraverso i paramenti in pietra o mattoni, risultando paradossalmente tanto più scadente l'indurimento del calcestruzzo quanto più compatto ed impenetrabile risultava il giunto di malta tra i mattoni e le pietre dei paramenti.

Val la pena di precisare che mentre nei mediocri calcestruzzi a base di calce l'indurimento è dovuto soltanto alla carbonatazione, nei più resistenti calcestruzzi a base di calce e pozzolana la reazione pozzolanica [2] avviene in realtà senza che sia esclusa la carbonatazione [1] ed entrambi i processi concorrono alla scomparsa della calce.

La capacità del calcestruzzo di calce-pozzolana non solo di indurire all'interno di casseforme impenetrabili all'aria, ma anche e soprattutto di indurire sott'acqua, era ben nota a Vitruvio che, nel capitolo XII del quinto libro (1), a proposito delle costruzioni dei porti, scrive: "Queste costruzioni nell'acqua così sembrano doversi fare: si prenda l'arena da quelle regioni che da Cuma si estendono fino al promontorio di Minerva (nota: pozzolana) e si adoperi in modo che nel calcestruzzo due parti di arena corrispondono ad una di calce. Indi nel luogo, che sarà stato stabilito, si calino dentro l'acqua cassoni senza fondo formati con travicelli e legami di legno rovere, e fortemente si fissino con ritegni: di poi con rastrelli si eguagli e si spurghi quella parte di fondo di mare che rimane dentro i medesimi, indi vi si gettino cementi (nota: rottami di pietre) mescolati col calcestruzzo formato come di sopra si è scritto, fintantochè venga riempito di costruzione il vuoto interno dei calcestruzzi".

Con la caduta dell'Impero Romano, soprattutto lontano da Roma, iniziò un lento ma inesorabile declino nelle qualità delle costruzioni e si è molto discusso fino alla metà del diciottesimo secolo (3) su quale fosse il segreto che i Romani possedevano per la produzione del loro gagliardo calcestruzzo. In realtà il segreto, tutt'altro che nascosto, era rintracciabile tra le righe delle opere di Vitruvio. E' già stato menzionato il brano di Vitruvio sull'importanza dell'impiego delle pozzolane, ma val la pena ancora di citare altri brani tutti presi dal secondo dei suoi dieci libri, quello dedicato alle caratteristiche dei materiali:

A proposito della sabbia: "Nelle costruzioni fatte con cementi (nota: con rottame di pietra, cioè nelle costruzioni in calcestruzzo) devesi in primo luogo aver cura di trovar l'arena che sia atta al mescolamento della materia e che non sia commista alla terra Fra tutte sarà ottima quella, che sfregata colle mani, cigola; quella ch'è terrosa manca d'asperità; però se sparsa sopra una bianca veste, poi scossa e scrollata non lascerà macchia nè terra attaccata sarà pure idonea La (sabbia) marina poi ha questo di più, che i muri quando sarà tirato sopra di quelli l'intonaco, trasudando salsedine, si dissolvono" (e per questo nel primo libro Vitruvio consiglia di lavare con acqua fluviale la sabbia marina).

Tabella 2 - Principali caratteristiche dei calcestruzzi antichi a base di calce o calce-pozzolana

CARATTERISTICA	CALCESTRUZZO ANTICO A BASE DI:	
	CALCE	CALCE-POZZOLANA
Prodotto responsabile dell'indurimento	CaCO ₃	C-S-H, C-A-H
Velocità di indurimento	v_1	$v_2 > v_1$
Grado finale di indurimento (R_c = resistenza meccanica a compressione)	mediocre ($R_c = 2-4 \text{ N/mm}^2$)	accettabile ($R_c = 10-20 \text{ N/mm}^2$)
Presenza di aria (CO ₂)	Indispensabile per l'indurimento	non necessaria per l'indurimento
Comportamento all'acqua	mediocre	ottimo

A proposito della calce: *"Avendo spiegato i diversi generi dell'arena, si dee porre in opera tutta la diligenza intorno alla calce affinché sia cotta di pietra bianca o di selce; e quella che sarà di pietra più compatta e più dura sarà utile nella fabbricazione (del calcestruzzo) quella di pietra porosa nell'intonacato"*. Val la pena di sottolineare che le indicazioni sulla compattezza e sul colore bianco della pietra da cuocere indirizzassero i *calcis coctores* verso la scelta di una pietra che oggi noi sappiamo essere di calcare puro, e quindi verso un alto contenuto di CaO nel prodotto della cottura e verso un'elevata grassezza della calce spenta, Ca(OH)₂; al contrario la presenza di impurità, che rendevano il calcare poroso e colorato, finivano con il diminuire il contenuto di CaO nella pietra cotta e, quindi, con l'aumentare la magrezza della calce spenta. E per non lasciar dubbi sulla qualità della calce Vitruvio suggerisce ancora: *"Quando poi sarà fatta la macerazione (nota: spegnimento) e diligentemente preparata per l'opera, si prenda un'ascia, e come si fende il legname, così si faccia alla calce macerata nella vasca: se coll'ascia si incontreranno sassolini (nota: noi oggi sappiamo che i "sassolini" erano in realtà dovuti ad un eccesso di cottura del CaO) non sarà ben macinata; se si estrarrà fuori il ferro asciutto e netto indicherà essere la calce magra e secca; se poi rimarrà attaccata intorno al ferro a guisa di glutine, indicherà essere grassa e ben macerata, e sarà ciò prova più che sufficiente per crederla ben preparata"*.

Ed, inoltre, a proposito delle proporzioni nelle malte: *"Quando la calce sarà estinta, allora si mescoli alla materia in guisa che, se l'arena fosse fossile, si confondono tre parti di questa ed una calce. Se sarà fluviale o marina una di questa con due di arena e così vi sarà giusta proporzione del miscuglio. E se nella fluviale o marina si aggiungerà una terza parte di mattone pesto e vagliato, ciò formerà la composizione della materia ancora migliore per l'uso"*. Per la confezione del calcestruzzo Vitruvio suggerisce: pezzi di tufo con una malta costituita da pozzolana (2 parti) e calce (1 parte); per i pavimenti: 3 parti di rottami di mattoni ed una parte di calce oppure cinque parti di pietra frantumata (per dimensione contenibile in una mano) con due parti di calce; oppure ancora: 2 parti di pietra frantumata con 1 parte di coccio pesto ed 1 parte di calce.

Ed, infine, a proposito della messa in opera, sia Vitruvio che Plinio il vecchio, nella sua "Storia naturale", raccomandano di battere e costipare tanto le malte degli intonaci quanto i calcestruzzi soprattutto nelle fondazioni con l'uso di mazze di ferro (3), la qualcosa fa ritenere quanto fosse importante, per la buona riuscita della costruzione, l'impiego di malte e calcestruzzi con la minore quantità di acqua possibile.

Il declino della qualità nelle costruzioni iniziata con la caduta dell'Impero Romano e proseguito per tutto il Medioevo può essere oggi spiegato non già sulla base di un segreto non tramandato ma piuttosto per aver disatteso le raccomandazioni di Vitruvio. Ed infatti le fornaci di calce inizialmente molto curate nei dettagli costruttivi furono sostituite da rudimentali forni di campagna che generavano molto incotto nella calce; furono sempre più impiegate sabbie sporche ed inquinate da argilla; si abbandonò l'uso della pozzolana vulcanica e del coccopesto; ed infine si trascurò la tecnica di costipare adeguatamente malte e calcestruzzi confezionati con poca acqua.

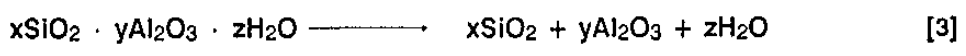
Con il risveglio umanistico, soprattutto dopo il quattordicesimo secolo, si tradussero e si rilessero i testi latini di Plinio il Vecchio e di Vitruvio del quale fu tradotta in italiano la sua opera per la prima volta nel 1484 a Venezia in un'edizione priva di disegni e con non pochi errori nel testo. Nel 1511 il domenicano Giovanni Monsignorini, più noto come Fra Giocondo, curò una riedizione dell'opera di Vitruvio corretta e ricca di illustrazioni, cui seguirono numerosissime altre traduzioni fin quasi alla fine dell'800. Così, soprattutto in Francia nel '700, si riscoprì, attraverso numerosissime e controverse sperimentazioni, l'arte del ben costruire opere in calcestruzzo: le pubblicazioni di Lorient (4) e De La Faye (5) apparentemente svelarono il segreto dei Romani per l'ottenimento di nuove malte e calcestruzzi dotati di elevata resistenza meccanica ed impermeabilità. Ma l'architetto Rondelet (6) concluse che la qualità dei nuovi materiali di Lorient e De La Faye era del tutto paragonabile a quella dei corrispondenti materiali prodotti dai Romani purché se ne seguissero le raccomandazioni di produzione secondo le dettagliate descrizioni di Vitruvio.

Una vera e rivoluzionaria scoperta, invece, fu quella della calce idraulica in sostituzione della miscela di calce e pozzolana per la produzione di calcestruzzi meccanicamente più resistenti e soprattutto impermeabili da destinare alle opere idrauliche. L'impiego della calce idraulica, precursore del cemento Portland che seguirà poco dopo, presenta rispetto alla calce il vantaggio di indurire autonomamente senza la necessaria presenza dell'aria, pur in assenza di pozzolana non disponibile ovunque.

La scoperta della calce idraulica può essere datata intorno al 1750 quando un pioniere dell'ingegneria civile, l'inglese John Smeaton sperimentò positivamente, per la costruzione del faro di Eddystone particolarmente esposto all'azione delle onde marine, una nuova calce ottenuta per cottura di un calcare che - contravvenendo alle raccomandazioni di Vitruvio - conteneva una discreta quantità (circa l'11%) di impurezze argillose.

In una pubblicazione successiva del 1791 (7) Smeaton descrive i criteri con i quali scegliere i calcari adatti alla produzione della calce idraulica: se la pietra da cuocere si scioglieva completamente in acido nitrico il prodotto della cottura era in grado di dare una calce grassa ma incapace di indurire sott'acqua; se, al contrario, la pietra da cuocere lasciava un residuo argilloso insolubile in acido e nel contempo veniva cotta "con una buona quantità di fuoco" il prodotto della cottura, ancorché lento nello spegnersi, era in grado di indurire sott'acqua.

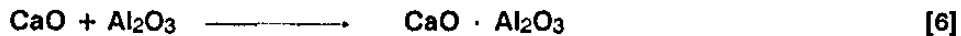
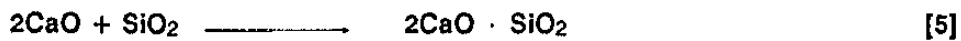
Noi oggi sappiamo che nella cottura di un calcare argilloso, oltre alla reazione di termodecomposizione dell'argilla a circa 500°C:



e del calcare a 850°C:



si verificano anche le reazioni che portano alla sintesi di silicati e alluminati di calcio purché la temperatura sia ben superiore a 850°C:



In sostanza accanto alla calce vengono a formarsi due prodotti (il silicato bicalcico e l'alluminato monocalcico) ai quali verrebbero attribuite, secondo la moderna interpretazione scientifica, le proprietà idrauliche di una calce siffatta.

La scoperta della calce idraulica segna la transizione dal vecchio al nuovo calcestruzzo, giacchè gli sperimentatori, soprattutto con l'ausilio della nuova scienza chimica appena nata con Lavoisier, sono in grado di governare un nuovo processo di sintesi che porterà prima alla calce idraulica artificiale e più tardi al moderno cemento Portland. Infatti, una volta scoperto che le impurità di silice e di allumina, presenti nell'argilla che accompagnano naturalmente alcuni calcari, sono responsabili della formazione dei silicati ed alluminati di calcio capaci di indurire anche sott'acqua, iniziarono le sperimentazioni nella cottura di miscele artificiali di calcare ed argilla a temperatura sempre più elevate fino ad arrivare ad una rudimentale scorificazione del prodotto finale.

Soprattutto in Inghilterra ed in Francia, tra la fine del '700 e l'inizio dell'800 fiorirono invenzioni, brevetti ed iniziative industriali che portano alla produzione dei primi leganti idraulici industriali, chiamati cementi, quali:

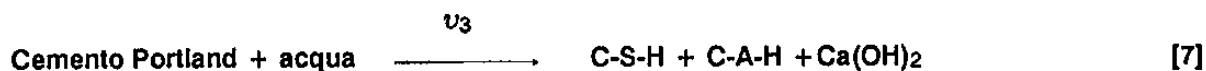
- il *cemento di Parker* o *cemento romano*, prodotto con un brevetto inglese del 1796 (8);
- il *cemento naturale* prodotto in Francia sulla base degli studi pubblicati da Vicat nel 1818 (9);
- il *cemento di Frost* prodotto in Inghilterra nel 1811 (10);
- il *cemento inglese* dello stesso Frost sulla base di un brevetto successivo del 1822 (3);
- il *cemento Portland* di Aspdin prodotto in Inghilterra sulla base del suo brevetto del 1824 (3).

E' difficile stabilire il momento della transizione tra la calce idraulica di Smeaton (prodotta con un calcare che conteneva naturalmente circa l'11% di argilla come "impurezza") ed i successivi cementi nei quali il contenuto di argilla veniva progressivamente aumentato fino al 40% mediante miscelazione artificiale di calcare con argilla. Anche perchè, come successivamente fu scoperto dall'inglese Johnson (11), un punto chiave del processo produttivo del cemento Portland - mantenuto oscuro nel brevetto di Aspdin con cui si identifica l'invenzione del moderno cemento - era la temperatura di cottura: affinchè si possa parlare di cemento occorre arrivare alla completa combinazione della calce con la silice e l'allumina dell'argilla. E per raggiungere questo obiettivo non è sufficiente diminuire il contenuto di calcare in favore di quello dell'argilla, ma occorre anche elevare la temperatura di cottura ben al di sopra di 850°C per arrivare alla parziale fusione del prodotto finito (*clinker*). La rivendicazione di Johnson sull'importanza della temperatura di cottura fu riconosciuta ufficialmente dai produttori di cemento inglesi che indicarono in Johnson l'inventore del *clinker*.

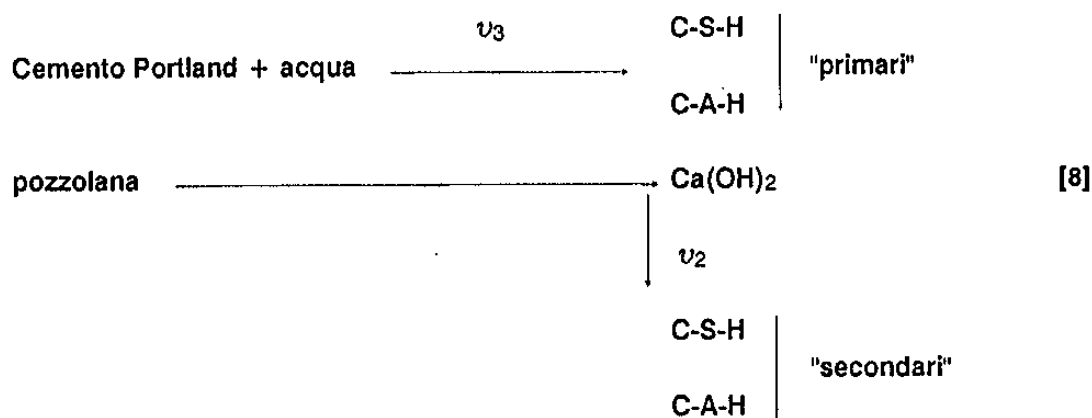
La distinzione tra calce idraulica e cemento rimase a lungo incerta e controversa ed oggi noi possiamo condividere l'opinione di Vicat (12): qualunque legante idraulico che venga messo in opera previo spegnimento (per convertire l'ossido di calcio libero in idrossido) deve essere chiamato "calce idraulica"; qualunque legante idraulico che venga messo in opera senza spegnimento (per la completa combinazione dell'ossido di calcio con la silice e l'allumina dell'argilla) deve essere chiamato cemento.

I successivi progressi nel campo dei cementi, in gran parte basati sugli studi del grande chimico-fisico Le Chatelier (13), hanno in sostanza perfezionato il processo produttivo indirizzando la composizione verso la presenza di quei costituenti mineralogici ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ e $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) maggiormente capaci di contribuire ad un rapido indurimento, senza trascurare l'importanza dei componenti come il $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ed il $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ indispensabili all'ottenimento del clinker ad una temperatura ragionevolmente bassa. Dal punto di vista chimico la reazione tra cemento Portland ed

acqua porta ad un sistema [C-S-H + C-A-H + Ca(OH)₂] attraverso il processo [7] non molto dissimile da quello raggiungibile attraverso la reazione pozzolanica [2]:



con la sostanziale differenza che il processo avviene con una velocità v_3 molto maggiore di quella v_2 con cui gli stessi silicati ed alluminati idrati (C-S-H e C-A-H) si generano per reazione tra calce e pozzolana. Inoltre, la formazione della calce di idrolisi tra i prodotti dell'idratazione del cemento stimolò la fantasia di un altro pioniere della chimica del cemento, il tedesco Michaelis (14), il quale propose l'aggiunta di pozzolana al cemento Portland affinché, combinandosi con la calce di idrolisi, migliorasse l'idraulicità e l'impermeabilità del calcestruzzo attraverso l'ulteriore produzione di C-S-H e C-A-H. Nello schema che segue viene sinteticamente mostrata la produzione di C-S-H e C-A-H "primari" (formati per idratazione del cemento Portland) e di C-S-H e C-A-H "secondari" (formati a seguito della reazione tra calce di idrolisi e pozzolana):



L'intuizione di Michaelis ebbe un seguito industriale soprattutto in Italia dove all'inizio di questo secolo cominciò la produzione industriale di cemento pozzolanico favorita dalla disponibilità di ottime pozzolane naturali di origine vulcanica, le stesse collaudate per due millenni nella produzione di calcestruzzi e malte a base di calce e pozzolana.

Più recentemente, infine, le pozzolane sintetiche (cenere volante, fumo di silice, ecc.) provenienti tutte da altri processi industriali hanno rilanciato in tutti i Paesi industrializzati il ruolo della pozzolana in vista di due importantissimi obiettivi di questo fine secolo:

- ridurre i consumi energetici grazie alla parziale sostituzione del cemento Portland con pozzolana;
- utilizzare vantaggiosamente i rifiuti solidi (non tossici) di altri processi industriali nel *mare magnum* delle costruzioni in calcestruzzo.

3. IL RUOLO DELL'INERTE NEL CALCESTRUZZO ANTICO E MODERNO

Si è già accennato nel precedente capitolo all'importanza annessa da Vitruvio alla qualità della sabbia ed in particolare alla presenza di sostanze argillose e terrose ritenute deleterie. In questo settore, soprattutto con il contributo dell'analisi chimica strumentale, sono stati compiuti enormi progressi nell'individuare altre sostanze nocive che debbono essere escluse dai materiali lapidei (solfati, cloruri, silice amorfa, ecc.) affinché questi siano da considerare idonei alla produzione di un moderno calcestruzzo.

Tuttavia, in questo articolo verrà posta l'attenzione sulla principale differenza tra gli inerti raccomandati da Vitruvio e quelli oggi impiegati nella moderna produzione industriale di calcestruzzo. Questa differenza consiste nel concetto di assortimento granulometrico praticamente assente nella produzione dell'antico calcestruzzo ed invece essenziale in una produzione moderna dove viene posto l'accento sulla economicità del prodotto e sulla qualità del materiale.

Nella Fig. 2 sono schematicamente illustrate le distribuzioni granulometriche di due ipotetici inerti, a parità di pezzatura massima di 30 mm, impiegati nella produzione di calcestruzzo antico e moderno. Nella foto della Fig. 3 sono mostrate a confronto le varie frazioni di inerti impiegate mediamente per confezionare un calcestruzzo antico o moderno.

Nel calcestruzzo antico venivano di fatto impiegati come inerti miscele di sabbia (0-5 mm) e rottami di pietra o mattoni (30-50 mm), risultando praticamente assenti le frazioni intermedie.

Nel calcestruzzo moderno, invece, ci si pone l'obiettivo di impiegare inerti quanto più assortiti dalla sabbia finissima alla pezzatura più grossa attraverso l'impiego anche delle frazioni intermedie: in queste condizioni, infatti, si minimizza il volume dei vuoti interstiziali tra gli elementi lapidei e si riduce pertanto il volume di matrice cementizia (acqua + cemento) necessaria al riempimento di questi vuoti. Il raggiungimento di questo obiettivo ha due benefiche conseguenze: da una parte riduce il costo del calcestruzzo riducendo il quantitativo del componente più costoso (cemento); dall'altra minimizza una serie di inconvenienti tecnici (ritiro, deformazione viscosa, gradienti termici) tutti causati da un eccesso di cemento e tutti capaci di peggiorare il quadro fessurativo nelle strutture in calcestruzzo.

Il problema delle fessurazioni delle strutture in calcestruzzo assume, ovviamente, una rilevanza notevolmente maggiore nelle moderne strutture armate in vista dei conseguenti fenomeni corrosivi dei ferri favoriti proprio dall'insorgere delle fessure del calcestruzzo.

La prima pubblicazione scientifica nella quale si accenna all'importanza degli inerti "plurigranulari" in confronto a quelli "monogranulari" appare nel 1870 ad opera dell'inglese Higgins (15), il quale sottolinea quest'aspetto del problema in vista di un miglioramento delle proprietà meccaniche del conglomerato.

In realtà, il primo contributo scientifico, nel quale il problema dell'assorbimento granulometrico dell'inerte viene affrontato per minimizzare i vuoti interstiziali tra gli inerti, è quello offerto da Fuller e Thompson (16) attraverso l'equazione

$$P = 100 (d/D)^q \quad [9]$$

dove P è la percentuale di passante attraverso un vaglio di apertura d , D è la massima dimensione dell'inerte, e q è un numero molto piccolo prossimo a zero. Successivamente Andreasen ed Anderson (17) suggeriscono di assumere per q un valore pari a 0.5 arrivando pertanto all'espressione

$$P = 100 (d/D)^{1/2} \quad [10]$$

nota come equazione di Fuller.

Lo stesso obiettivo fu raggiunto da Furnas (18) attraverso il concetto di rapporto dei vuoti: anziché attraverso lo studio delle granulometrie, gli inerti vengono tra loro empiricamente combinati al fine di minimizzare i vuoti interstiziali e quindi il contenuto di cemento necessario a riempirli.

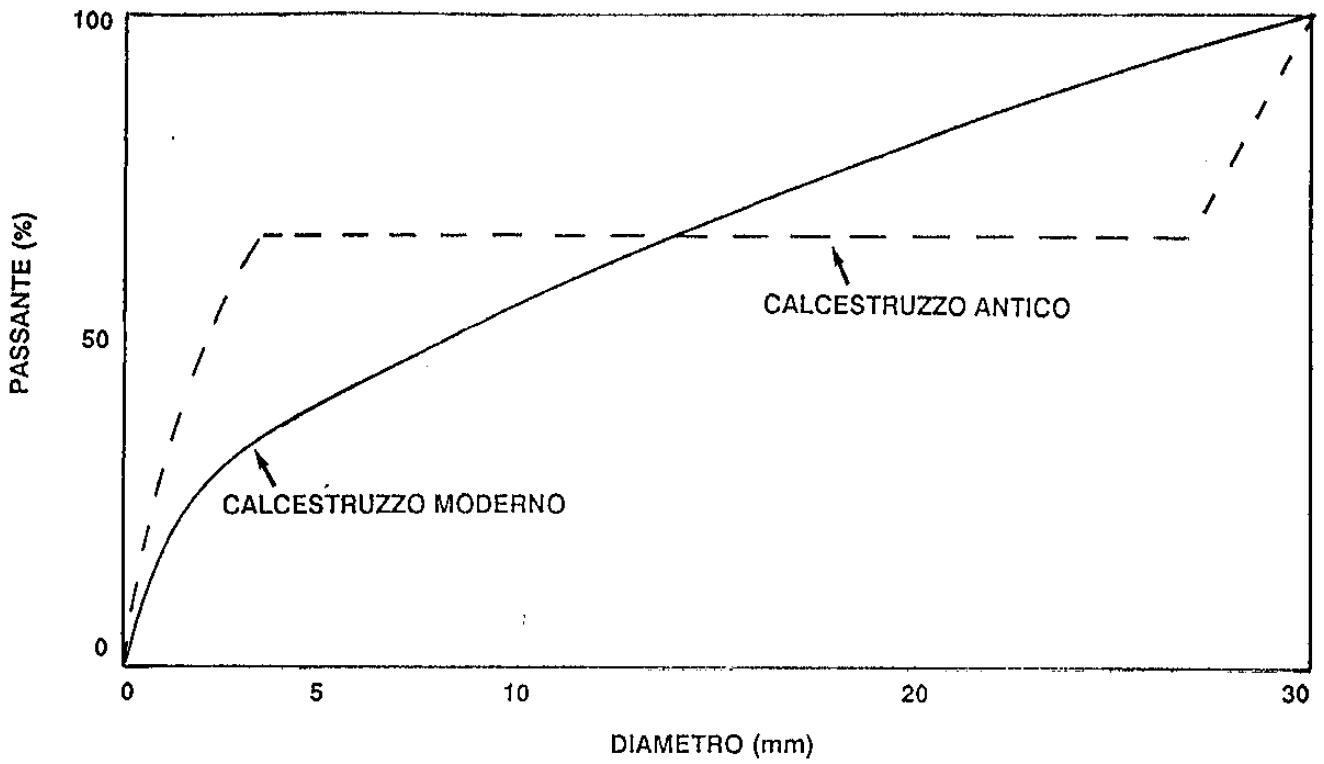


Fig. 2 - Distribuzione granulometrica degli aggregati impiegati per il confezionamento del calcestruzzo antico e moderno.

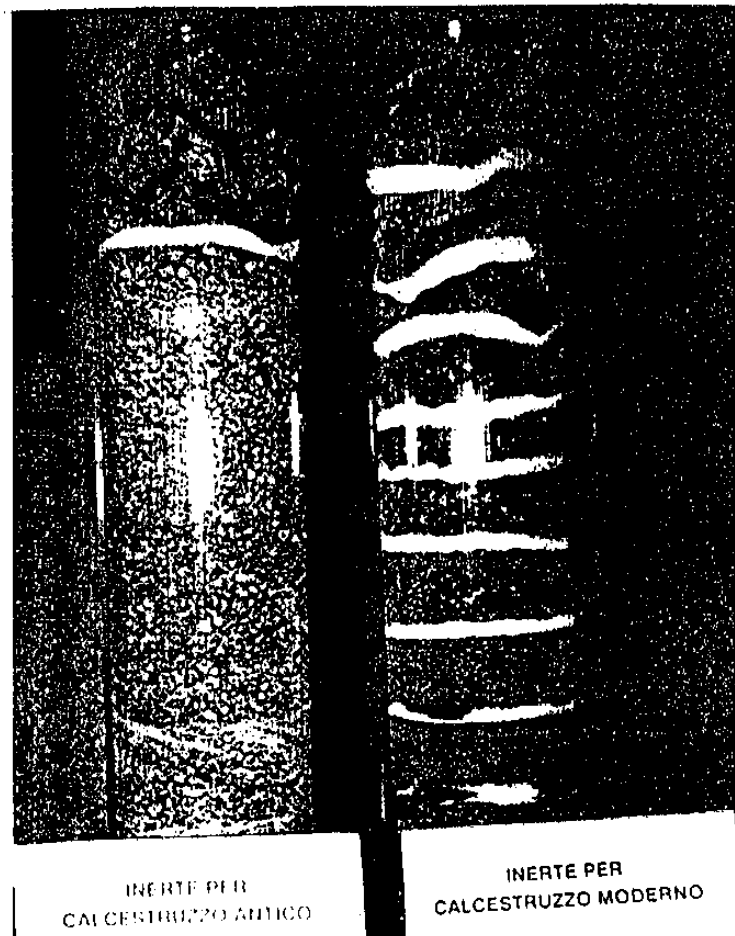


Fig. 3 - Inerti per calcestruzzo antico e moderno.

Il problema della distribuzione granulometrica ottimale degli Inerti fu, infine, affrontato da Bolomey (19) con un'ottica leggermente diversa e sicuramente più moderna, in quanto più vicina alle esigenze pratiche di produzione industriale del calcestruzzo. Bolomey suggerì un'equazione leggermente più complessa rispetto a quella di Fuller [10]:

$$P = \frac{A - C + (100 - A) (d/D)^{1/2}}{100 - C} \quad 100 \quad [11]$$

dove A è una costante che dipende dal tipo di inerte (naturale o frantumato) e dalla lavorabilità del calcestruzzo fresco, e C rappresentante la percentuale di cemento rispetto a tutti i solidi (cemento + inerti) presenti nel calcestruzzo.

In sostanza Bolomey, più di Fuller e Thompson, si avvicina alla realtà industriale di una produzione centralizzata del calcestruzzo nei moderni impianti di betonaggio e propone, per uno stesso valore di D , diverse curve granulometriche ciascuna ottimizzata in vista del particolare calcestruzzo che deve essere prodotto: la curva granulometrica di Bolomey, infatti, è modulata a seconda che il calcestruzzo sia più o meno ricco di cemento, a seconda dell'inerte disponibile (naturale o frantumato), ed a seconda, infine, delle specifiche proprietà reologiche del calcestruzzo richiesto sul cantiere (asciutto, plastico, fluido).

Val la pena di segnalare che il progresso conseguito in meno di mezzo secolo nello specifico settore della granulometria degli inerti è divenuto possibile con lo sviluppo tecnologico che si è verificato nel settore della frantumazione delle rocce per produrre inerti di granulometria prefissata, in quello del mescolamento (betoniere), del trasporto (autobetoniere) e della messa in opera (pompe) del calcestruzzo. Infine, i recenti progressi nel campo dell'informatica e dell'automatizzazione sempre più renderà agevole una produzione di inerti conforme ad una curva granulometrica prefissata in base ai dati del processo (tipo di inerte, dosaggio di cemento, lavorabilità).

4. CONCLUSIONI

La transizione del calcestruzzo antico e quello moderno può essere datata grosso modo intorno al 1824, con l'invenzione del cemento Portland.

In realtà la produzione su vasta scala del calcestruzzo moderno è cresciuta significativamente in questo secolo soprattutto con il progressivo sviluppo delle strutture in c.a. e c.a.p..

Le principali differenze tra le due tecnologie consistono in:

- impiego di legante a base di calce, calce-pozzolana o calce idraulica nel calcestruzzo antico, ed a base di cemento Portland (o di cementi di miscela con pozzolana e loppa d'altoforno) nel calcestruzzo moderno;
- impiego di inerti a granulometria fortemente discontinua e non-controllata nel calcestruzzo antico, e di inerti a granulometria continua oltre che prefissata nel calcestruzzo moderno: proprio la cura nel controllo granulometrico degli inerti distingue un produttore di calcestruzzo moderno da chi, invece, seguita a produrre un calcestruzzo con criteri non conformi ad un vero processo industriale.

BIBLIOGRAFIA

- (1) B. Galliani, "Dell'Architettura Libri Dieci di M. Vitruvio Pollione", Ed. A. Dozio, Milano (1832).
- (2) J. P. Adam, "L'arte di costruire presso i Romani, materiali e tecniche", Ed. Longanesi & C., Milano 1984.
- (3) C. Gorla, "Storia, tecnologia ed applicazioni, I Parte: Evoluzione storica dei leganti e dei conglomerati, dall'empirismo alla loro conoscenza razionale", Fratelli Fabbri Editore, Milano (1976).
- (4) A. Lorient "Memoire sur une decouverte sur l'art de batir", Ed. M. Lambert, Paris (1774).
- (5) P. De La Faye "Recherches sur la preparation que le Romains donnoient à la chaux dont ils se servoient sur la composition et'emploi de leurs mortiers", Paris (1777).
- (6) J. Rondelet, "L'art de batir", Paris (1805).
- (7) J. Smeaton "A narrative of the building of the Eddystone Lighthouse", Ed. H. Hughes, London (1791).
- (8) F. Gooding and P. E. Halstead, "The early history of Cement in England", Third International on the Chemistry of Cement, pg. 1-29, London (1952).
- (9) J. L. Vicat, "Recherches experimentales sur les chaux hydrauliques, les betons et les mortiers ordinaires" (1818).
- (10) A. Davis, "A hundred years of Portland Cement Concrete", Publisher Ltd., London (1927).
- (11) J. C. Johnson, "The building News", London (1880).
- (12) J. L. Vicat, "Mortiers et ciments calcaires", Paris (1828).
- (13) H. Le Chatelier, "Recherches sur la constitution des mortiers hydrauliques", Paris (1887).
- (14) W. Michaelis, "Deutsche Toepper und Ziegler Zeitung", 24, 1882, Tonindustrie Zeitung (1896).
- (15) B. Higgins, "Experiments and observations made with view of improving the art of compositing and applying calcerous cements and preparing quick lime", London (1870).
- (16) N. B. Fuller, S. E. Thompson, Trans. ASCE, 59, 67 (1907).
- (17) A. H. M. Andreasen, J. Anderson, Kolloid-Z, 49, 217 (1929).
- (18) C. C. Furnas, Department of Commerce, Bureau of Mines, Serial N° 2894, Reports of Investigation, 1-10 (1928).
- (19) J. Bolomey, Revue Matèr. Constr. Trav. Publ., Edition C, pg. 147 (1947).