

GIANFRANCO PERRI

A Brindisi: un laboratorio naturale per lo studio del calcestruzzo marittimo romano

Publicato su il7 Magazine del 20 settembre 2024

È comunemente risaputo che gli antichi romani nelle loro costruzioni utilizzarono ampiamente e sapientemente il calcestruzzo pozzolanico – quello che come legante dei frammenti pietrosi dell’aggregato impiegava la pozzolana – ottenendo risultati ingegneristici di grande qualità tecnologica, ma forse non è altrettanto ben conosciuto che quegli stessi Romani seppero utilizzare precocemente quel magnifico e versatile materiale da costruzione anche nelle loro opere marittime, realizzando importanti resistenti e durature strutture immerse nelle acque del mare.

Per produrre la malta per il loro calcestruzzo i Romani non utilizzavano cementi cotti in forno come li conosciamo noi, ma producevano il legante cementizio facendo interagire, mischiando cioè, opportunamente la già da tempo conosciuta calce idrata – ricavata aggiungendo acqua alla calce viva a sua volta ottenuta dalla cottura a 800°-900° del calcare naturale frantumato – con “specifiche” ceneri vulcaniche. La malta così ricavata, al consolidarsi seccandosi, presentava maggiore resistenza e durabilità rispetto alle altre malte antiche già ben conosciute, che erano ottenute aggiungendo alla calce idrata polvere e frammenti minuscoli di quarzo o di altri generici materiali pietrosi. Controversa è la data d’origine di tale innovativa tecnologia romana ma, ovviando i dettagli delle varie teorie e delle tante storie diffuse al rispetto, non si dovrebbe essere troppo fuorvianti assegnandola a un arco di tempo collocabile a cavallo tra la Repubblica e l’Impero. «Indagini geochimiche e petrografiche condotte sulle malte presenti in strutture di calcestruzzo risalenti alla fine della Repubblica, indicano che già prima del I secolo a.C. i costruttori romani cominciarono a sperimentare l’uso delle ceneri vulcaniche provenienti da differenti depositi presenti nel paesaggio romano, fino a poi standardizzare l’uso di una “specificata” cenere vulcanica scoriacea durante l’era augustea.» [*“Methods of determining the date of Roman concrete monuments”* di E. B. Van Deman in *American Journal of Archaeology* N.16, 2010]

Mentre la moderna polvere di cemento è il prodotto industriale – il clinker poi finemente macinato – ottenuto con la cottura a temperatura elevata intorno ai 1500° di miscele terrose composte essenzialmente da calcari e argille, la cenere vulcanica – la romana *pulvis* – è il prodotto naturale polveroso emesso da un’eruzione piroclastica esplosiva ed è composta da vetro, cristalli e particelle di rocce derivati dal magma, cioè dalla roccia allo stato fuso. Mentre il tufo vulcanico – che in questo caso non è quello delle case brindisine, di tutt’altra origine – è la roccia, generalmente abbastanza tenera e friabile, che si forma quando la cenere vulcanica con il tempo si litifica, consolidandosi grazie allo sviluppo di cementanti minerali naturali. La pozzolana, infine, è semplicemente un tipo “specifico” di cenere vulcanica, la *pulvis puteolanus*, così chiamata perché eruttata nel distretto vulcanico dei Campi Flegrei che circonda la baia di Pozzuoli, l’antica Puteoli: un materiale siliceo alluminoso che di per sé non ha capacità cementizia, ma che in presenza di umidità reagisce chimicamente con l’idrossido di calcio per formare composti con proprietà altamente cementizie. Da non confondere con gli additivi pozzolanici, che son tutt’altra cosa, comunemente impiegati in applicazioni specifiche delle moderne tecnologie del cemento. A Roma, in particolare, le ceneri pozzolaniche furono prima estratte da depositi alluvionali presenti in città e poi dalle colate piroclastiche delle pozzolane rosse del medio Pleistocene eruttate nell’intorno dei vicini Colli Albani.



Carota di calcestruzzo romano estratta a Egnazia il 15 maggio 2008



Carotaggio sottomarino effettuato a Egnazia il 15 maggio 2008

Ebbene, mentre i calcestruzzi confezionati con i leganti cementizi prodotti con le malte calcaree antiche, oltre ad essere meno resistenti e meno duraturi erano anche poco resistenti all'acqua deteriorandosi notevolmente in caso di saturazione prolungata, le malte cementizie vulcaniche romane confezionavano calcestruzzi che oltre ad essere più resistenti e duraturi, non soffrivano per niente al contatto con l'acqua, neppure con l'acqua marina, anzi, tutt'altro! Con alcune ceneri piroclastiche "specifiche" – le pozzolane – la loro miscela con la calce si solidificava e induriva perfettamente anche stando sommersa dall'acqua di mare, e il calcestruzzo fresco così confezionato poteva essere posizionato in casseforme parzialmente inondate o addirittura completamente sommerse: l'ideale quindi, per poter creare frangiflutti e massicce strutture portuali.

Gli ingegneri romani del I secolo a.C. inoltre, che evidentemente possedevano anche eccellenti capacità empiriche, in base alla loro esperienza pratica selezionavano la cenere appropriata alle diverse e specifiche esigenze costruttive. Anche se in genere tutte le ceneri vulcaniche scoriacee impiegate presentano una distribuzione dei grani con una grande proporzione di particelle di dimensioni sabbiose, la malta dei calcestruzzi di tutte le strutture marittime portuali investigate, pur variando nei suoi dettagli compositivi, in ognuno dei casi, anche nel lontano porto di Pompeiopoli in Turchia, fa uso di una cenere vulcanica piroclastica che sempre assomiglia a quella dei depositi di cenere vulcanica poco consolidata eruttati dai Campi Flegrei o dagli altri distretti vulcanici del Golfo di Napoli: la pozzolana. E nel Portus di Augusto, le malte di pozzolana usate per le strutture marine sembrano essere state realizzate con *pulvis* importata dal Golfo di Napoli, mentre le strutture a terra sono state realizzate con *pulvis* locale, grigio scura e arrossata.

In definitiva, le varie indagini analitiche effettuate hanno rivelato che tutti i calcestruzzi portuali romani campionati, presentano nel complesso forti somiglianze: in termini di composizioni macro e microscopiche, di caratteristiche materiali e di proprietà fisiche. Anche se esistono variazioni, le somiglianze delle strutture di calcestruzzo dei siti portuali romani analizzate su una vasta geografia fanno supporre che i costruttori adottarono un approccio metodico, ragionato e coerente per la costruzione delle strutture marittime, attenendosi per le malte usate in mare a una miscela compositiva e a una procedura di installazione, piuttosto rigorose. È veramente impressionante osservare come gli antichi ingegneri portuali romani abbiano prodotto per diversi secoli lungo tutta la costa dell'intero Mediterraneo un materiale da costruzione essenzialmente uniforme, ideale per la costruzione di porti e altre strutture marittime.

La maggior parte degli studi sul calcestruzzo romano antico – e ce ne sono stati veramente tanti – si sono naturalmente concentrati su strutture terrestri piuttosto che marittime, e i campioni di antichi intonaci malte e calcestruzzi romani provenienti da monumenti e strutture presenti in Italia e all'estero per lo studio delle loro proprietà, solo in pochi casi sono stati ottenuti tramite carotaggio profondo, mentre è risaputo che la raccolta di pezzi di antico calcestruzzo parzialmente disgregati dall'azione atmosferica o scheggiati con un martello, può portare a campioni compromessi. D'altra parte, la ricerca focalizzata specificamente alle caratteristiche dei materiali cementizi romani in ambienti saturi d'acqua, è stata ancor più limitata ed è stata concentrata unicamente su malte e intonaci e non su calcestruzzi.

Per sopperire a tale carenza conoscitiva, nel 2001 è stato ideato – da C. J. Brandon (Londra), R. L. Hohlfelder (Università del Colorado), J. P. Oleson (Università di Victoria) e M. D. Jackson (Università di Berkeley) – lo "Studio sul Calcestruzzo Marittimo Romano (ROMACONS)", un programma di ricerca multidisciplinare, incentrato sulla raccolta e analisi di grandi carote di calcestruzzo rigorosamente estratte da antiche strutture marittime romane, storicamente

riconosciute, accuratamente selezionate e ben datate. Tra il 2002 e il 2009, un totale di 36 carotaggi profondi sono stati prelevati da 12 diversi siti marittimi intorno al Mediterraneo, uno dei quali, nel 2008, a Egnazia. Successivamente, con la partecipazione di molti altri studiosi, su tutti i 36 carotaggi recuperati sono state condotte approfondite indagini basate su tecniche microscopiche, analisi chimiche e test meccanici. I risultati della ricerca sono stati presentati nel testo “*Building for Eternity*” di C. J. Brandon, R. L. Hohlfelder, M. D. Jackson e J. P. Oleson, pubblicato da Oxbow Books in UK & USA nel 2014. Testo che gli autori hanno voluto dedicare “*ai maestri costruttori sconosciuti dell'antica Roma che hanno sfidato e domato il mare*”.

Ebbene, particolarmente importante per il programma della riferita ricerca internazionale fu proprio Brindisi, sia perché il 15 maggio del 2008 a Egnazia – a 54 Km a nordovest di Brindisi – si eseguì il carotaggio (di 9 centimetri di diametro lungo circa 2,5 metri, in un calcestruzzo romano appartenente ad un molo del I secolo a.C. oggi sommerso in mare più di 3 metri a conseguenza del prolungato bradisismo che ha interessato tutta l'area) e sia, e soprattutto, perché dal 13 al 21 settembre del 2004 nelle acque del seno di ponente del porto interno di Brindisi fu costruita una pila sperimentale sommersa, di ben 8 metri cubi di volume con un calcestruzzo per la cui confezione e posa in opera, oltre a utilizzare nel possibile solo gli stessi materiali e strumenti che sarebbero stati disponibili ai costruttori romani, si seguirono le procedure romane originali descritte da Vitruvius [*De architectura*, circa il 30 al 22 a.C.].

Per tutti gli impegnativi lavori condotti a Brindisi e a Egnazia su un arco di tempo superiore ai cinque anni, il progetto ROMACONS poté contare con diverse entusiastiche collaborazioni locali, tra cui, principalmente: la Lega Navale di Brindisi con il suo presidente ammiraglio Renato Fadda; Italcementi Brindisi con Francesco Retta, Fabrizio Orlandino, Peppino Brescia, Antonio Vendeita e Mario Colucci; e la dottoressa Rita Auriemma dell'Università del Salento.

La carota di calcestruzzo estratta a Egnazia offrì, tra l'altro, la peculiarità del ritrovamento di un piccolo pezzo di legno incorporato nella malta cementizia, che l'analisi al Carbono14 datò tra 200 e 50 a.C. Una gamma d'età che, con il porto di Egnazia ipotizzato essere dell'era augustea o solo un po' prima, risultò “stranamente” tra le più precoci ottenute con il C14 dai vari campioni analizzati nel progetto ROMACONS, compresi quelli provenienti dal Golfo di Napoli, dove si può ragionevolmente presumere che gli antichi costruttori romani abbiano sviluppato per la prima volta un effettivo calcestruzzo marino.

La pila sperimentale di Brindisi fu costruita nel mare di fronte alla Lega Navale, in un punto in cui la profondità dell'acqua era di circa 1,65 metri con l'estremo superiore della pila a 0,10 metri s.l.m. Il procedimento costruttivo seguito prevede l'umidificazione della calce spenta con acqua marina per formare una pasta rigida e quindi l'immediata incorporazione del *pulvis puteolanus* in un rapporto di volume tra pozzolana e calce di 2:1 nella parte inferiore della pila e di 2,7:1 nella metà superiore. La pozzolana vulcanica utilizzata proveniva dai depositi poco consolidati di cenere pomicea di Bacoli, nella cinta metropolitana napoletana confinante con Pozzuoli, il cui territorio vulcanico fa parte dei Campi Flegrei. Per l'aggregato grosso – *caementum* – del calcestruzzo si utilizzarono frammenti pietrosi di 10 a 15 centimetri, ottenuti mediante il martellamento manuale di blocchi tufacei vulcanici di mediana resistenza, in quantità tale da occupare a opera ultimata le stesse proporzioni volumetriche del 35% che erano state mediamente misurate nei nuclei di calcestruzzo estratti dalle antiche costruzioni romane, risultandone necessari 2,8 metri cubi per formare gli 8 metri



La pila sperimentale di Brindisi presso la Lega Navale di Brindisi – settembre 2004



Blocchi di tufo ridotti manualmente in pietre per l'arido del calcestruzzo – Brindisi settembre 2004

cubi previsti della pila. Gli altri 5,2 metri cubi – il 53 % del volume totale della pila – li avrebbe occupati la malta pozzolanica indurita, per ottenere i quali bisognava prepararne circa 8 di pasta cementizia fresca a sua volta confezionata mescolando 5,33 metri cubi di pozzolana con 2,67 di calce spenta in pasta.

La posa in opera – il getto – dell'intera pila si effettuò durante un periodo di sette giorni, con una pausa per ogni notte. Successivamente, il calcestruzzo carotato dalla pila sperimentale fu analizzato e studiato in laboratorio e poi comparato con quello estratto con uguale procedimento dalle strutture storiche romane, e a tal fine anche i campioni cilindrici di Brindisi furono estratti con lunghi carotaggi di 9 centimetri di diametro effettuati seguendo una prestabilita successione temporale: a 6 mesi dalla costruzione il 19 marzo 2005, a 12 mesi il 17 novembre 2005, a 24 mesi il 22 novembre del 2006, a 42 mesi il 14 maggio 2008 e infine a 60 mesi dalla costruzione, nel novembre del 2009.

Giacché in passato c'erano stati solo tentativi occasionali di replicare la malta romana, e solo su piccola scala senza neanche seguire un procedimento costruttivo comprovatamente antico, quelle carote brindisine, oltre a mostrare per il calcestruzzo della pila sperimentale una struttura dalla sorprendente somiglianza con quella delle vere antiche pile studiate nel progetto ROMACONS, fornirono importanti ed unici dati sulla resistenza e sulla mineralogia della malta in evoluzione, nonché sul calcestruzzo vitruviano nelle varie fasi del suo indurimento.

Mi scuso per l'eccesso dei miei inevitabili rigurgiti ingegneristici e, naturalmente, risparmio ai miei pur pazienti lettori i numerosi e minuziosi dettagli troppo tecnici dei risultati delle analisi condotte sui campioni di calcestruzzo estratti dalle carote dei calcestruzzi romani e della pila sperimentale di Brindisi – densità, porosità, rigidità, permeabilità, chimica, mineralogia e quant'altro – comunque consultabili nel paper [*“Chemical and engineering characteristics of Ancient Roman hydraulic concrete”*] di E. Gotti e Al, 2008: https://lc.cx/tO_ZBj] le cui conclusioni – tra quelle meno analitiche – indicano quanto segue:

«Anche se la formula vitruviana adottata per confezionare il calcestruzzo pozzolanico sperimentale di Brindisi ha prodotto un risultato abbastanza compatibile con le attese, probabilmente un rapporto più alto della pozzolana rispetto alla calce (più alto cioè del 2:1 e 2,7:1 utilizzati) avrebbe portato il calcestruzzo prodotto sperimentalmente a valori di capacità – che in termini di resistenza a compressione del calcestruzzo carotato sono stati dell'ordine di 50 Kg/cm² – più in linea con quelli dei campioni testati del calcestruzzo romano antico, la cui resistenza si aggira mediamente intorno ai 60-80 Kg/cm². Potrebbe essere accaduto che Vitruvio nel suo manuale abbia voluto seguire una supposta regola accademica ideale piuttosto che la pratica effettiva. Poiché la calce era il componente più costoso della malta, infatti, una minore proporzione di calce rispetto alla pozzolana contribuiva a ridurre i costi e pertanto, gli appaltatori potrebbero aver voluto risparmiare rispetto alla miscela 'ideale' di Vitruvio per poi scoprire che in tal modo, in realtà, stavano producendo un calcestruzzo di maggior resistenza.»

In effetti, anche tra le conclusioni qualitative più generali del progetto ROMACONS, tra parecchio altro, si può leggere:

«Il calcestruzzo delle strutture marittime romane, pur possedendo una evidente straordinaria longevità in acqua di mare, non ha in genere una resistenza alla compressione particolarmente elevata se la si compara con quella dei calcestruzzi moderni, mentre la malta pozzolanica usata come legante in quegli stessi calcestruzzi ha una resistenza elevata paragonabile con quella delle malte cementizie moderne. Del calcestruzzo romano, infatti, erano relativamente deboli soprattutto gli aggregati, cioè i componenti pietrosi – *caementa* – che erano per lo più di origine piroclastica e meno frequentemente rocce calcaree, giacché i costruttori non disponevano di mezzi meccanici

sufficientemente potenti da poter frantumare le rocce calcaree molto solide e resistenti. Del resto, i costruttori romani probabilmente non avevano speciale interesse in perseguire grandi capacità per le loro strutture di calcestruzzo marittimo in termini di resistenza al carico compressivo, giacché i carichi generati da modesti edifici e magazzini sovrastanti quelle strutture marittime, sarebbero stati comodamente distribuiti sulle superfici sufficientemente ampie di un molo, senza quindi la necessità di dover disporre su di essi grandi carichi concentrati. Invece, giustamente, alle strutture portuali gli ingegneri romani richiedevano soprattutto di rimanere ancorate sul fondale marino, di resistere alla forza d'impatto delle onde e di continuare coese quando sottoposte all'erosione delle stesse. Qualità tutte associate alla natura della malta.»

Naturalmente, dopo la conclusione del progetto ROMACONS e la conseguente pubblicazione nel 2014 dell'interessantissimo testo con i suoi risultati e le sue conclusioni, negli ultimi dieci anni le ricerche su questo affascinante tema storico ingegneristico sono proseguite, sia da parte degli stessi studiosi del ROMACONS che da parte di altri ricercatori scientifici, però il progetto ROMACONS costituirà per sempre una pietra miliare e con quello, anche Brindisi resterà testimone, ancora una volta e a pieno titolo, negli annali della storia e della cultura romana.



Luogo del carotaggio sottomarino - EGN 2008.01 – effettuato a Egnazia il 15 maggio 2008



Carota di calcestruzzo romano del I secolo A.C. estratta a Egnazia il 15 maggio 2008



Ultima carota di calcestruzzo estratta dalla pila sperimentale di Brindisi nel novembre 2009



Costruzione del cassero per il getto della pila sperimentale nel porto di Brindisi – settembre 2004



Carotaggio della pila sperimentale a Brindisi dal 2005 al 2009

Quel laboratorio naturale per studiare il calcestruzzo marittimo romano

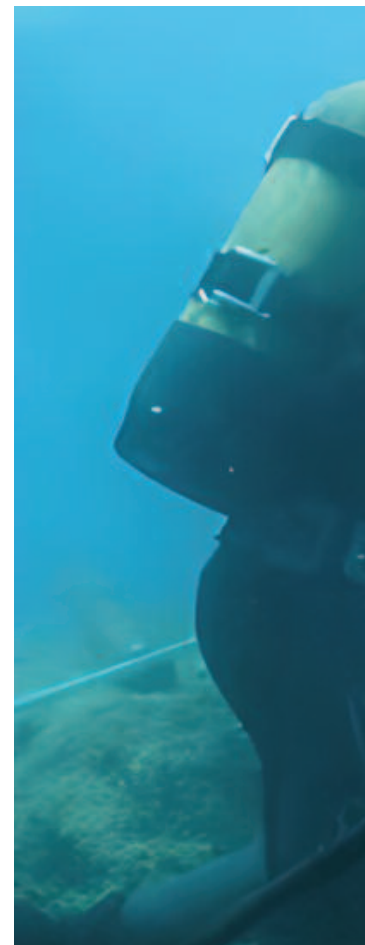
di Gianfranco Perri

È risaputo che gli antichi romani nelle loro costruzioni utilizzarono ampiamente e sapientemente il calcestruzzo pozzolanico – quello che come legante dei frammenti pietrosi dell'aggregato impiegava la pozzolana – ottenendo risultati ingegneristici di grande qualità tecnologica, ma forse non è altrettanto ben conosciuto che quegli stessi Romani seppero utilizzare precocemente quel magnifico e versatile materiale da costruzione anche nelle loro opere marittime, realizzando importanti resistenti e durature strutture immerse nelle acque del mare.

Per produrre la malta per il loro calcestruzzo i Romani non utilizzavano cementi cotti in forno come li conosciamo noi, ma producevano il legante cementizio facendo interagire, mischiando cioè, opportunamente la già da tempo conosciuta calce idrata – ricavata aggiungendo acqua alla calce viva a sua volta ottenuta dalla cottura a 800°-900° del calcare naturale frantumato – con “specifiche” ceneri vulcaniche. La malta così ricavata, al consolidarsi seccandosi, presentava maggiore resistenza e durabilità rispetto alle altre malte antiche già ben conosciute, che erano ottenute aggiungendo alla calce idrata polvere e frammenti minuscoli di quarzo o di altri generici materiali pietrosi. Controversa è la data d'origine di tale innovativa tecnologia romana ma, oviando i dettagli delle varie teorie e delle tante storie diffuse al rispetto, non si dovrebbe essere troppo fuorvianti assegnandola a un arco di tempo collocabile a cavallo tra la Repubblica e l'Impero. «Indagini geochemiche e petrografiche condotte sulle malte presenti in strutture di calcestruzzo risalenti alla fine della Repubblica, indicano che già prima del I secolo a.C. i costruttori romani cominciarono a sperimentare l'uso delle ceneri vulcaniche provenienti da differenti depositi presenti nel paesaggio romano, fino a poi standardizzare l'uso di una “specificata” cenere vulcanica scoriacea durante l'era augustea.» [“Methods of determining the date of Roman concrete monuments” di E. B. Van Deman in American Journal of Archaeology N.16, 2010]

Mentre la moderna polvere di cemento è il prodotto industriale – il clinker poi finemente macinato – ottenuto con la cottura a temperatura elevata intorno ai 1500° di miscele terrose composte essenzialmente da calcari e argille, la cenere vulcanica – la romana pulvis – è il prodotto

naturale polveroso emesso da un'eruzione piroclastica esplosiva ed è composta da vetro, cristalli e particelle di rocce derivati dal magma, cioè dalla roccia allo stato fuso. Mentre il tufo vulcanico – che in questo caso non è quello delle case brindisine, di tutt'altra origine – è la roccia, generalmente abbastanza tenera e friabile, che si forma quando la cenere vulcanica con il tempo si litifica, consolidandosi grazie allo sviluppo di cementanti minerali naturali. La pozzolana, infine, è semplicemente un tipo “specifico” di cenere vulcanica, la pulvis puteolanus, così chiamata perché eruttata nel distretto vulcanico dei Campi Flegrei che circonda la baia di Pozzuoli, l'antica Puteoli: un materiale siliceo alluminoso che di





per sé non ha capacità cementizia, ma che in presenza di umidità reagisce chimicamente con l'idrossido di calcio per formare composti con proprietà altamente cementizie. Da non confondere con gli additivi pozzolanici, che son tutt'altra cosa, comunemente impiegati in applicazioni specifiche delle moderne tecnologie del cemento. A Roma, in particolare, le ceneri pozzolaniche furono prima estratte da depositi alluvionali presenti in città e poi dalle colate piroclastiche delle pozzolane rosse del medio Pleistocene eruttate nell'intorno dei vicini Colli Albani. Ebbene, mentre i calcestruzzi confezionati con i leganti cementizi prodotti con le malte calcaree antiche, oltre ad essere meno resistenti e meno

LE IMMAGINI Carotaggio sottomarino effettuato a Egnazia il 15 maggio 2008, a sinistra la pila sperimentale di Brindisi presso la Lega Navale – settembre 2004

duraturi erano anche poco resistenti all'acqua deteriorandosi notevolmente in caso di saturazione prolungata, le malte cementizie vulcaniche romane confezionavano calcestruzzi che oltre ad essere più resistenti e duraturi, non soffrivano per niente al contatto con l'acqua, neppure con l'acqua marina, anzi, tutt'altro! Con alcune ceneri piroclastiche "specifiche" – le pozzolane – la loro miscela con la calce si solidificava e induriva perfettamente anche stando sommersa dall'acqua di mare, e il calcestruzzo fresco così confezionato poteva essere posizionato in caserme parzialmente inondate o addirittura completamente sommerse: l'ideale quindi, per poter creare frangiflutti e massicce strutture portuali. Gli ingegneri romani del I secolo a.C. inoltre, che evidentemente possedevano anche eccellenti capacità empiriche, in base alla loro esperienza pratica selezionavano la cenere appropriata alle diverse e specifiche esigenze costruttive. Anche se in genere tutte le ceneri vulcaniche scoriaee impiegate presentano una distribuzione dei grani con una grande proporzione di particelle di dimensioni sabbiose, la malta dei calcestruzzi di tutte le strutture marittime portuali investigate, pur variando nei suoi dettagli compositivi, in ognuno dei casi, anche nel lontano porto di Pompei o in Turchia, fa uso di una cenere vulcanica piroclastica che sempre assomiglia a quella dei depositi di cenere vulcanica poco consolidata eruttati dai Campi Flegrei o dagli altri distretti vulcanici del Golfo di Napoli: la pozzolana. E nel Portus di Augusto, le malte di pozzolana usate per le strutture marine sembrano essere state realizzate con pulvis importata dal Golfo di Napoli, mentre le strutture a terra sono state realizzate con pulvis locale, grigio scura e arrossata.

In definitiva, le varie indagini analitiche effettuate hanno rivelato che tutti i calcestruzzi portuali romani campionati, presentano nel complesso forti somiglianze: in termini di composizioni macro e microscopiche, di caratteristiche materiali e di proprietà fisiche. Anche se esistono variazioni, le somiglianze delle strutture di calcestruzzo dei siti portuali romani analizzate su una vasta geografia fanno supporre che i costruttori adottarono un approccio metodico, ragionato e coerente per la costruzione delle strutture marittime, attenendosi per





le malte usate in mare a una miscela compositiva e a una procedura di installazione, piuttosto rigorose. È veramente impressionante osservare come gli antichi ingegneri portuali romani abbiano prodotto per diversi secoli lungo tutta la costa dell'intero Mediterraneo un materiale da costruzione essenzialmente uniforme, ideale per la costruzione di porti e altre strutture marittime.

La maggior parte degli studi sul calcestruzzo romano antico – e ce ne sono stati veramente tanti – si sono naturalmente concentrati su strutture terrestri piuttosto che marittime, e i campioni di antichi intonaci malte e calcestruzzi romani provenienti da monumenti e strutture presenti in Italia e all'estero per lo studio delle loro proprietà, solo in pochi casi sono stati ottenuti tramite carotaggio profondo, mentre è risaputo che la raccolta di pezzi di antico calcestruzzo parzialmente disgregati dall'azione atmosferica o scheggiati con un martello, può portare a campioni compromessi. D'altra parte, la ricerca focalizzata specificamente alle caratteristiche dei materiali cementizi romani in ambienti saturi d'acqua, è stata ancor più limitata ed è stata concentrata unicamente su malte e intonaci e non su calcestruzzi.

Per sopperire a tale carenza conoscitiva, nel 2001 è stato ideato – da C. J. Brandon (Londra), R. L. Hohlfelder (Università del Colorado), J. P. Oleson (Università di Victoria) e M. D. Jackson (Università di Berkeley) – lo “Studio sul Calcestruzzo Marittimo Romano (ROMACONS)”, un programma di ricerca multidisciplinare, incentrato sulla raccolta e analisi di grandi carote di calcestruzzo rigorosamente estratte da antiche strutture marittime romane, storicamente riconosciute, accuratamente selezionate e ben datate. Tra il 2002 e il 2009, un totale di 36 carotaggi profondi sono stati prelevati da 12 diversi siti marittimi intorno al Mediterraneo, uno dei quali, nel 2008, a Egnazia. Successivamente, con la partecipazione di molti altri studiosi, su tutti i 36 carotaggi recuperati sono state condotte approfondite indagini basate su tecniche microscopiche, analisi chimiche e test meccanici. I risultati della ricerca sono stati presentati nel testo

LE IMMAGINI Blocchi di tufo ridotti manualmente in pietre per l'arido del calcestruzzo – Brindisi, settembre 2004

“Building for Eternity” di C. J. Brandon, R. L. Hohlfelder, M. D. Jackson e J. P. Oleson, pubblicato da Oxbow Books in UK & USA nel 2014. Testo che gli autori hanno voluto dedicare “ai maestri costruttori sconosciuti dell'antica Roma che hanno sfidato e domato il mare”.

Ebbene, particolarmente importante per il programma della riferita ricerca internazionale fu proprio Brindisi, sia perché il 15 maggio del 2008 a Egnazia – a 54 Km a nordovest di Brindisi – si eseguì il carotaggio (di 9 centimetri di diametro lungo circa 2,5 metri, in un calcestruzzo romano appartenente ad un molo del I secolo a.C. oggi sommerso in mare più di 3 metri a conseguenza del prolungato bradisismo che ha interessato tutta l'area) e sia, e soprattutto, perché dal 13 al 21 settembre 2004 [20 anni fa] nelle acque del seno di ponente del porto interno di Brindisi fu costruita una pila sperimentale sommersa, di ben 8 metri cubi di volume con un calcestruzzo per la cui confezione e posa in opera, oltre a utilizzare nel possibile solo gli stessi materiali e strumenti che sarebbero stati disponibili ai costruttori romani, si seguirono le procedure romane originali descritte da Vitruvius [De architectura, circa il 30 al 22 a.C.].

Per tutti gli impegnativi lavori condotti a Brindisi e a Egnazia su un arco di tempo superiore ai cinque anni, il progetto ROMACONS poté contare con diverse entusiastiche collaborazioni locali, tra cui, principalmente: la Lega Navale di Brindisi con il suo presidente ammiraglio Renato Fadda; Italcementi Brindisi con Francesco Retta, Fabrizio Orlandino, Peppino Brescia, Antonio Vendaite e Mario Colucci; e la dottoressa Rita Auriemma dell'Università del Salento.

La carota di calcestruzzo estratta a Egnazia offrì, tra l'altro, la peculiarità del ritrovamento di un piccolo pezzo di legno incorporato nella malta cementizia, che l'analisi al Carbono14 datò tra 200 e 50 a.C. Una gamma d'età che, con il porto di Egnazia ipotizzato essere dell'era augustea o



LE IMMAGINI Carota di calcestruzzo romano estratta a Egnazia il 15 maggio 2008, sotto Costruzione del cassero per il getto della pila sperimentale nel porto di Brindisi – settembre 2004

solo un po' prima, risultò “stranamente” tra le più precoci ottenute con il C14 dai vari campioni analizzati nel progetto ROMACONS, compresi quelli provenienti dal Golfo di Napoli, dove si può ragionevolmente presumere che gli antichi costruttori romani abbiano sviluppato per la prima volta un effettivo calcestruzzo marino.

La pila sperimentale di Brindisi fu costruita nel mare di fronte alla Lega Navale, in un punto in cui la profondità dell'acqua era di circa 1,65 metri con l'estremo superiore della pila a 0,10 metri s.l.m. Il procedimento costruttivo seguito prevede l'umidificazione della calce spenta con acqua marina per formare una pasta rigida e quindi l'immediata incorporazione del pulvis puteolanus in un rapporto di volume tra pozzolana e calce di 2:1 nella parte inferiore della pila e di 2,7:1 nella metà superiore. La poz-

zolana vulcanica utilizzata proveniva dai depositi poco consolidati di cenere pomicea di Bacoli, nella cinta metropolitana napoletana confinante con Pozzuoli, il cui territorio vulcanico fa parte dei Campi Flegrei. Per l'aggregato grosso – caementum – del calcestruzzo si utilizzarono frammenti pietrosi di 10 a 15 centimetri, ottenuti mediante il martellamento manuale di blocchi tufacei vulcanici di mediana resistenza, in quantità tale da occupare a opera ultimata le stesse proporzioni volumetriche del 35% che erano state mediamente misurate nei nuclei di calcestruzzo estratti dalle antiche costruzioni romane, risultandone necessari 2,8 metri cubi per formare gli 8 metri cubi previsti della pila. Gli altri 5,2 metri cubi – il 53 % del volume totale della pila – li avrebbe occupati la malta pozzolanica indurita, per ottenere i quali bisognava prepararne circa 8 di pasta cementizia fresca a sua volta confezionata mescolando 5,33 metri cubi di pozzolana con 2,67 di calce spenta in pasta.

La posa in opera – il getto – dell'intera pila si effettuò durante un periodo di sette giorni, con una pausa per ogni notte. Successivamente, il calcestruzzo carotato dalla pila sperimentale fu ana-





lizzato e studiato in laboratorio e poi comparato con quello estratto con uguale procedimento dalle strutture storiche romane, e a tal fine anche i campioni cilindrici di Brindisi furono estratti con lunghi carotaggi di 9 centimetri di diametro effettuati seguendo una prestabilita successione temporale: a 6 mesi dalla costruzione il 19 marzo 2005, a 12 mesi il 17 novembre 2005, a 24 mesi il 22 novembre del 2006, a 42 mesi il 14 maggio 2008 e infine a 60 mesi dalla costruzione, nel novembre del 2009. Giacché in passato c'erano stati solo tentativi occasionali di replicare la malta romana, e solo su piccola scala senza neanche seguire un procedimento costruttivo comprovatamente antico, quelle carote brindisine, oltre a mostrare per il calcestruzzo della pila sperimentale una struttura dalla sorprendente somiglianza con quella delle vere antiche pile studiate nel progetto RO-

LE IMMAGINI Ricostruzione ideale di Portus presso Fiumicino nel 42 a.C. - Affresco del secolo XVI- Galleria Vaticana, sotto Luogo del carotaggio sottomarino - EGN 2008.01 – effettuato a Egnazia il 15 maggio 2008

MACONS, fornirono importanti ed unici dati sulla resistenza e sulla mineralogia della malta in evoluzione, nonché sul calcestruzzo vitruviano nelle varie fasi del suo indurimento.

Mi scuso per l'eccesso dei miei inevitabili rigurgiti ingegneristici e, naturalmente, risparmio ai miei pur pazienti lettori i numerosi e minuziosi dettagli troppo tecnici dei risultati delle analisi condotte sui campioni di calcestruzzo estratti dalle carote dei calcestruzzi romani e della pila sperimentale di Brindisi – densità, porosità, rigidità, permeabilità, chimica, mineralogia e quant'altro – comunemente consultabili nel

paper ["Chemical and engineering characteristics of Ancient Roman hydraulic concrete" di E. Gotti e Al, 2008: https://lc.cx/tO_ZBj] le cui conclusioni – tra quelle meno analitiche – indicano quanto segue: «Anche se la formula vitruviana adottata per confezionare il calcestruzzo pozzolanico sperimentale di Brindisi ha prodotto un risultato abbastanza compatibile con le attese, probabilmente un rapporto più alto della pozzolana rispetto alla calce (più alto cioè dei 2:1 e 2,7:1 utilizzati) avrebbe portato il calcestruzzo prodotto sperimentalmente a valori di capacità – che in termini di resistenza a compressione del calcestruzzo carotato sono stati dell'ordine di 50 Kg/cm² – più in linea con quelli dei campioni testati del calcestruzzo romano antico, la cui resistenza si aggira mediamente intorno ai 60-80 Kg/cm². Potrebbe essere accaduto che Vitruvio nel suo manuale

