

Malte per il restauro di opere d'arte antiche

Dopo un cenno alle tecniche diagnostiche avanzate, che consentono una compiuta caratterizzazione dei materiali antichi, ai fini della riproduzione di malte quanto più fedeli a quelle del passato, si procede alla trattazione di quelle: a base di calce, di calce idraulica naturale e di calce idraulica artificiale “pozzolanica”.

Per ognuna di esse vengono discussi i differenti fattori che ne determinano il comportamento all'impiego, con riferimento: alle modalità di preparazione, alla presa ed indurimento, alla natura dei prodotti d'idratazione, alla durata della stagionatura, alla resistenza meccanica, alla porosità totale ed alla distribuzione delle dimensioni dei pori (che influenzano trasporto d'umidità e durabilità), al tipo di aggregato (natura, distribuzione granulometrica, morfologia), al rapporto legante/aggregato, alla microstruttura del prodotto finito. Si pone infine in luce la possibilità del ricorso a malte cosiddette “bastarde”.

La raccolta del complesso dei dati agevolerà la scelta del tipo di malta più appropriato all'intervento di restauro da effettuare. Il termine “storico” viene adottato per indicare strutture realizzate prima della fine del XIX secolo. Esse sono state create impiegando malte antiche, ossia materiali compositi complessi, con una grandissima varietà di contenuto sia di tipo di inerte, sia di aggiun-

te minerali (“pozzolaniche”, mattoni frantumati (cocciopesto). Come legante è stata dapprima utilizzata calce aerea, il cui impiego risale sicuramente alle prime età della preistoria (neolitica, eneolitica), anche se risulta adoperata, con maggiore frequenza, nella quarta età, quella del bronzo (1).

La scoperta di un legante a comportamento idraulico, atto, cioè, a far presa ed indurire anche in ambiente subacqueo, si attribuisce invece ai Fenici. Ad essi si addebita la preparazione di malte confezionate con calce aerea e sabbia vulcanica dell'antica Thera (isola di Santorini).

Dai Fenici l'impiego della calce si è trasmesso ai Greci, ai Romani ed a tutta la civiltà mediterranea, fino al XIX secolo, gradualmente scomparendo per effetto della scoperta del cemento Portland. Il degrado di strutture storiche, in ogni tempo avvertita, ha suggerito nel XX secolo, in concomitanza con l'impiego massivo del cemento nell'edilizia, di sostituire, per interventi di restauro, malte a base di calce con malte a base di cemento, sia per la scarsa resistenza meccanica delle prime, sia per il lungo tempo d'indurimento.

I risultati di tale sostituzione si sono rivelati, però, deludenti, perché hanno provocato un notevole peggioramento dello stato delle strutture preesistenti. L'impiego di cemento è apparso ben

presto potenzialmente pericoloso per l'alta resistenza a compressione che, anziché un effetto favorevole, ha ingenerato una sorta di problemi, per cicli di cristallizzazione e/o d'idratazione della consistente frazione di sali solubili recati, per una certa tendenza alla contrazione, responsabile della rottura e del distacco della malta dalla struttura antica. È noto che le strutture murarie antiche vanno soggette a "movimenti" di una certa entità, originati da scorrimento viscoso e da effetti termici, meglio assorbiti dalle malte di calce, più cedevoli e più deformabili, grazie alla presenza di un'ampia zona plastica. Una malta da restauro eccessivamente resistente reprime infatti tali "movimenti", generando forze che causano rottura.

Norme guida per la preparazione di malte da restauro non ancora ne esistono, ma si suggeriscono, in forma di raccomandazione, limiti di accettazione di proprietà fisiche e meccaniche. Si raccomanda che malte per restauro non rilascino sali solubili o prodotti nocivi e non siano più resistenti della pietra da costruzione, né eccessivamente più resistenti della malta originaria. Siano prodotte con materie prime quanto più possibile simili a quelle che furono impiegate per la preparazione delle malte antiche e con tecniche quanto più possibile analoghe. Si ritiene inoltre irrinunciabile una compatibilità spinta fra la nuova malta ed i componenti originari della struttura. Tale compatibilità coinvolge differenti aspetti: compatibilità chimica fra malta di apporto e materiale preesistente (pietra o mattone e malta di allet-

tamento); compatibilità fisica, in relazione ai processi di solubilità e di trasporto d'acqua; compatibilità strutturale e meccanica. La resistenza di una malta da restauro deve pertanto risultare simile, il più possibile, a quella della malta originaria.

Principali cause di degrado delle strutture storiche sono: il movimento d'acqua e delle soluzioni saline attraverso la muratura per capillarità e la cristallizzazione dei sali. La risalita capillare di acqua nelle strutture costituisce infatti una ricorrente causa di degrado. Gli interventi di restauro inappropriati, eseguiti nel XX secolo, hanno prodotto estesi vuoti e perdita di costituenti della malta legante, richiedendo spesso la colmatura dei vuoti di maggiori dimensioni.

Questa Nota si propone di far luce sul complesso dei parametri che determinano il comportamento delle malte di calce, al fine di una scelta, quanto più appropriata, per interventi di restauro di strutture antiche. La scelta di una malta da restauro si presenta critica. Ciò che soprattutto si richiede per la sua formulazione concerne l'individuazione dei componenti, il carattere cementante del legante, il rapporto legante/aggregato.

A tale scopo si impone, come primo passo, una completa caratterizzazione dei materiali che hanno concorso alla realizzazione della struttura in esame.

Fino agli anni 1970-80, la caratterizzazione delle malte storiche ha riposato, più che altro, su analisi chimiche per via umida, che, il più spesso, non hanno consentito un'approfondita conoscenza della natura dei differenti com-

ponenti della malta. Per una compiuta loro identificazione si può oggi ricorrere alla microscopia tramite polarizzazione della fluo-rescenza, che consente l'identificazione della differente natura degli inerti, di quella delle varie aggiunte minerali, del tipo di legante e della struttura dei pori (2).

Le tecniche di analisi automatizzate d'immagine, od i metodi manuali di analisi composizionale attraverso puntatore, e/o selezione di un particolare segmento di acquisizione dati, possono esser usate per determinare i rapporti di miscela, il rapporto legante/aggregato, la distribuzione delle dimensioni dell'aggregato e la presenza di vuoti d'aria (2).

La scelta della metodologia analitica più appropriata al caso specifico, dipende principalmente dal problema che deve esser risolto e dalla quantità di materiale disponibile.

Per una riproduzione fedele delle malte antiche è necessario conoscere le caratteristiche composizionali e di comportamento di quelle che furono impiegate per realizzare le relative strutture.

I leganti delle malte antiche

Sono state usate nel tempo: calce aerea, calce idraulica naturale e calce idraulica artificiale "pozzolanica". In epoca romana, per la preparazione delle malte è stata impiegata calce aerea, che veniva spenta con un quantitativo d'acqua in eccesso rispetto a quello stechiometrico, così da ottenere quella massa plastica, untuosa al tatto, cui si dà il nome di grassello. All'atto della messa

in opera, ad esso veniva addizionato un inerte, od una sabbia attiva alla calce.

Le addizioni prevalentemente usate sono state: inerti calcarei, sabbia silicea, mattoni frantumati, vere pozzolane, in rapporto legante/aggregato variabile da 1:1.5 ad 1:3. Nelle malte di calce con addizione di inerti, a brevi stagionature viene eliminato l'eccesso d'acqua d'impasto ed ha luogo il ritiro. Quasi in pari tempo inizia il processo di carbonatazione, che trasformerà l'idrossido di calcio in calcite.

È ben noto che tali malte impiegano molti anni per carbonatarsi. A brevi stagionature (28 giorni) il grado di carbonatazione è ancora trascurabile. Tra 28 e 365 giorni di stagionatura si registra un notevole incremento di resistenza a compressione e flessione (3). Dal *De Architectura* di Marco Pollio Vitruvio (4) si rileva che i Romani avevano redatto una classificazione delle aggiunte. Le sabbie di Baia e di Cuma, ossia le vere pozzolane, venivano considerate atte a fornire, mescolate alla calce aerea, un impasto suscettibile di far presa ed indurire anche in ambiente marino, mentre altre sabbie erano considerate idonee a fornire malte per costruzioni soltanto in ambiente subaereo.

L'addizione alla calce aerea di prodotti con essa reattivi, a comportamento, cioè, "pozzolanico", modifica il meccanismo d'indurimento che, in massima parte, è addebitabile alla reazione del vetro soffiato con la calce ed alla conseguente formazione di un silicato di calcio idrato di bassa basicità e di alluminati di

calcio idrati, che impediscono il degrado delle strutture destinate a vivere in ambiente subacqueo.

Per opere destinate a venire in contatto con acque i Romani hanno fatto largo uso di malte a base di calce idraulica artificiale “pozzolanica”, costituite da due parti di pozzolana ed una di calce, come testimoniano il Porto di Pozzuoli, il Molo Traiano di Civitavecchia, il Molo di Nerone ad Anzio ed altro. In assenza di vere pozzolane, i Romani hanno anche addizionato alla calce aerea frammenti di piastrelle e stoviglie, com'è probabilmente il caso delle malte di allettamento delle Mura Adriane in Bretagna (2).

Ma prima di scoprire le straordinarie virtù di alcune rocce piroclastiche: la pozzolana naturale, le pozzolane napoletane, i tufi vulcanici di Santorini e del Reno (Trass) (5), sin da tempi antichi Greci e Romani, per la preparazione di malte, hanno impiegato inerti silicei o calcarei.

Malte di calce aerea

La matrice legante di malte di calce antiche consta infatti, nella maggior parte dei casi, di calcite finemente cristallizzata, originatasi per carbonatazione della calce spenta. Dimensione e tessitura di tali cristalli è stata regolata dalle condizioni ambientali. Un aumento della frazione legante migliora, entro certi limiti, la resistenza e rende più compatta la struttura, interrotta, invece, dalla presenza di aggregati che ne intralciano la connessione. Il processo di carbonatazione viene facilitato dalla

porosità, determinata dall'incremento della frazione legante, con conseguente miglioramento della resistenza meccanica.

Contrariamente alle malte di cemento, le malte di calce più porose denunciano anche più alta resistenza meccanica, a seguito di un aumento del grado di carbonatazione. La calcite di neoformazione riempie infatti i pori della pasta. Se però il rapporto legante/aggregato cresce troppo e supera quello di 2:1, il numero dei vuoti aumenta e la resistenza meccanica si abbassa.

Morfologia e distribuzione granulometrica dell'aggregato influenzano la resistenza della malta. Una morfologia a spigoli vivi, quale quella di aggregati calcarei, favorisce l'accomodamento nella matrice e la conseguente compattezza della struttura, ben più di una morfologia a grani tondeggianti, quale quella degli aggregati silicei.

Una distribuzione dell'aggregato compresa fra 0,1 ed 1 mm, ha consentito di raggiungere, dopo 400 giorni di stagionatura, una resistenza a compressione di 4N/mm^2 , per malte con rapporto legante/aggregato 1:1 od 1:2 (3).

Porosità totale, distribuzione della dimensione dei pori e superficie specifica influenzano trasporto d'umidità e proprietà meccaniche. Distribuzione e volume dei pori regolano anche la resistenza al gelo. Il rilevamento della porosità delle malte antiche si presenta molto complesso, per effetto della varietà dei componenti adoperati, tutti con differente struttura dei pori. Sono stati rilevati pori capillari di dimensioni com-

prese fra 0,1 e 100 μ m (2), accomodati all'interno del legante ed all'interfaccia legante/aggregato. Tale porosità si sviluppa nelle prime fasi dell'indurimento, nel corso dell'essiccazione e dei processi d'idratazione e, in tempo successivo, è anche influenzata dal processo di carbonatazione. I pori superiori a 100 μ m si sviluppano per intrappolamento d'aria nel corso dell'impasto. All'aumentare del quantitativo d'acqua d'impasto aumenta anche la porosità ed il diametro dei pori. Paste con rapporto acqua/calce più alto assorbono anche un quantitativo d'acqua maggiore, ciò che può costituire una causa di degrado della struttura (6). A miscele per restauro a base di calce è stato recentemente proposto di aggiungere anche idrossido di bario, in considerazione della più alta velocità di carbonatazione (7). Il carbonato di bario di neoformazione, direttamente legato alla superficie dei cristalli di calcite, aumenta anche la forza di coesione con la pietra originaria.

Malte di calce idraulica naturale

Più tardi è stata usata per secoli come legante di malte antiche anche calce idraulica naturale, ottenuta per trattamento termico di calcari, a moderato contenuto d'argilla (6.5-20%), a temperatura alquanto superiore a quella che presiede alla produzione della calce aerea (> 900°C).

La fase minerale rilevata in queste malte antiche risulta più comunemente il silicato di calcio idrato di bassa basicità. Esso provoca indurimento e genera una rete, nei cui vuoti si acco-

moda l'idrossido di calcio destinato a successiva carbonatazione. Anche quest'ultimo partecipa all'indurimento, poiché solo una frazione della calce totale può combinarsi con la silice e l'allumina recate dall'argilla. La rete, nei cui vuoti alloggia la calce idrata, conferisce alla malta resistenza all'acqua (8).

I prodotti d'idratazione che si originano nelle malte che recano come legante calce idraulica naturale, differiscono soltanto quantitativamente da quelli che si neoformano per idratazione di miscele costituite da calce aerea e vere pozzolane nel rapporto 1:3. I costituenti che conferiscono possibilità di vita anche in ambiente subacqueo sono sempre il silicato di calcio idrato di bassa basicità e gli alluminati di calcio. Essi si formano infatti tanto per reazione nel forno di cottura fra ossido di calcio, silice ed allumina recate dalla frazione argilla, quanto, assai più lentamente, alla temperatura ordinaria, in presenza d'acqua, per reazione fra idrossido di calcio, silice ed allumina, recate dal vetro soffiato che costituisce la pozzolana.

Per interventi di restauro la calce idraulica naturale manifesta migliore compatibilità del cemento verso il materiale preesistente, così come buona compatibilità manifestano anche le calce idrauliche artificiali "pozzolaniche", siderurgiche, o quelle, che come aggiunta attiva, recano metacaolino. Verranno preferite per restauro di opere destinate a vivere in ambiente subacqueo o marino. A brevi stagionature (fino a 28 giorni), la resistenza meccanica di malte preparate con calce idraulica naturale,

a rapporto calce/aggregato 1:1 od 1:2 è, in massima parte, addebitabile all'idratazione dei silicati ed alluminati di calcio. A medio termine (28-182 giorni) la differenza non varia gran che, poiché è ancora scarsa la carbonatazione della calce libera. A lungo termine (182-365 giorni), la carbonatazione della calce ed il silicato di calcio idrato portano la resistenza meccanica a livelli significativi (9). Una distribuzione granulometrica dell'aggregato compresa fra 0,1 ed 1 mm innalza tale resistenza.

Un aumento del contenuto di legante aumenta la porosità della malta e, favorendo la carbonatazione della calce, incrementa la resistenza meccanica. Un aumento del contenuto d'aggregato favorisce la formazione di pori più grossi. Il rapporto più consigliabile legante/aggregato appare pertanto quello di 1:2 (9).

Malte "bastarde"

Al fine di contrastare gli inconvenienti posti in luce dall'impiego di malte di calce, da un lato, e di quelle di cemento, dall'altro, è stato recentemente proposto di ricorrere a malte "bastarde" (8), (10) per restauri di opere d'arte storiche. Esse sono preparabili per miscelazione di calce idrata e di cemento Portland ed appaiono dotate di buona plasticità. Il cemento infatti è duro e non conferisce plasticità all'impasto.

Contrariamente alle malte cementizie, le malte "bastarde" ad alta percentuale di calce presentano un'ampia zona plastica che comporta flessibilità e risulta atta ad assorbire le sollecitazioni

provocate dai "movimenti" delle muraure antiche. Le malte "bastarde", grazie alla presenza anche del cemento, denunciano minor tempo di presa e d'indurimento ed una resistenza meccanica non molto più alta di quella delle malte di calce. Malte con più del 50% di cemento non presentano zona plastica, accusando comportamento elastico fino a rottura, perché l'aumento del contenuto di cemento restringe tale zona. Il rapporto legante/aggregato esercita una notevole influenza sui valori di resistenza meccanica. Il passaggio di tale rapporto da 1:4 ad 1:2 determina un aumento di resistenza dell'ordine del 40% (10).

Al fine di migliorare le proprietà meccaniche, sono recentemente stati studiati gli effetti della sostituzione del 10% di cemento Portland con fumo di silice, sulla microstruttura di malte "bastarde" con rapporti in volume cemento/calce/sabbia 1:1:6 (11).

È stato posto in luce che, a sette giorni, la resistenza risulta più bassa e la porosità più alta di quella di una malta di riferimento. A 28 giorni, però, la situazione si inverte. Aumenta la resistenza e la porosità si riduce. Ciò sembra addebitabile al decorso di una reazione "pozzolanica", con formazione di un silicato di calcio idrato di tipo I che, anziché all'interfaccia pasta/aggregato, come nelle malte di cemento Portland prive di calce, si colloca invece nei pori capillari più grossi della pasta.

Conclusioni

Al fine di realizzare validi interventi di restauro di opere antiche, è buona

norma non ricorrere a malte di cemento che, per resistenza a compressione ben più elevata di quella delle malte preesistenti, per presenza di sali solubili e per una tendenza alla contrazione, causano un netto peggioramento delle strutture. È pertanto opportuno impiegare malte di calce preparate con materie prime quanto più possibile simili a quelle impiegate per la preparazione delle malte antiche, individuandone, mediante tecniche analitiche avanzate, il complesso dei componenti, il carattere cementante del legante, il rapporto legante/aggregato.

Idonee sembrano anche malte cosiddette “bastarde”, preparabili per miscelazione di calce idrata e di cemento Portland, ad alta percentuale di calce. Esse, conservando un'ampia zona plastica, assicurano l'assorbimento dei “movimenti” cui vanno soggette le murature antiche

Bibliografia.

Sersale R., *La storia della calce dall'antichità ai nostri giorni*. Proceedings Intern. Lime Congress. Esagrafica, Roma, 5-22 (1990).

Elsen J., *Microscopy of historic mortars - a review*. Cem. Concr. Res., 36, 1416-1424 (2006).

Lanas J., Alvarez J.I. *Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behaviour*. Cement Concrete Res., 33, 1867-1876 (2003).

Pollio Vitruvio M. *De Architectura*. Ed. F. Granger. De Loeb Classical Library. Cambridge University Press, 1931-45.

Sersale R., *Analogie costituzionali fra il “trass” renano ed il tufo giallo napoletano*. Rend. Acc. Sci. fis. mat., Napoli, 4, 26, 3-9 (1959).

Arandigoyen M., Pérez Bernal J.L., Bello Lopez M.A., Alvarez J.I. *Lime-pastes with different kneading water: Pore structure and capillary porosity*. Applied Surface Sci., 252, 1449-1459 (2005).

Karatasios I., Kilikoglou V., Colston B., Theoulakis P., Watt D., *Setting process of lime-based conservation mortars with barium hydroxide*. Cement Concrete Res., 37, 886-893 (2007).

Sersale R., *Degrado e restauro conservativo delle murature: il ruolo della Chimica Applicata ai 9*.

Lanas J., Pérez Bernal J.L., Bello M.A., Alvarez Galindo J.I., *Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars*. Cement Concrete Res., 34, 2191-2201 (2004).

Arandigoyen M., Alvarez J.I., *Pore structure and mechanical properties of cement-lime mortars*. Cement Concrete Res., 37, 767-775 (2007).

Gleize P.J.P., Muller A., Roman H.R., *Microstructural investigation of silica fume-cement-lime mortars*. Cement Concrete Composites, 25, 171-175 (2003).

