

STUDY OF THE COMPOSITION OF HISTORICAL MORTARS OF THE ROMAN ARENA IN PADOVA.

G. Biscontin, A. Bakolas, E. Zendri, D. Zancanaro

Dipartimento di Scienze Ambientali, Università di Venezia

Abstract

The purpose of this research is to characterize the original mortars and those of the successive constructive interventions of the Arena of Padua, with an appropriate methodology of investigation and evaluate their behaviour in urban environment and durability in relation to the construction period. The research is carried out on homogeneous and a little perturbed samples taken from the masonry structure on zones of well-known constructive history. The samples are investigated by granulometric, X-ray diffraction (XRD), infrared spectroscopy (FT-IR), intrusion mercury porosimetry (MIP) and thermal analyses (TG-DTG).

The obtained results indicate mixtures of hydraulic nature with the provisioning of the raw materials for the preparation of the mortars probably of local provenance. The mixtures show a good state of conservation, with the roman ones presenting higher characteristics of durability.

INTRODUZIONE

Il problema della caratterizzazione delle malte nelle murature storiche a base sia di calce che di altri leganti e la valutazione delle loro caratteristiche chimico-fisiche e fisico-meccaniche è un problema assai complesso. Spesso non è chiaro se un componente sia presente come derivato del legante o come parte dell'aggregato. Le reazioni di presa e indurimento dei leganti, specie quelli antichi, non sono ben conosciuti neanche le trasformazioni che subiscono i componenti in funzione del tempo [1, 2]. Le interazioni legante-aggregato e materiali-ambiente complicano ulteriormente la loro caratterizzazione. Inoltre bisogna considerare che si opera su sistemi perturbati e l'interpretazione dei dati viene affrontata tenendo conto di questo fatto.

L'esigenza della caratterizzazione delle malte antiche nasce da una forte richiesta nel settore del restauro, per tecniche e materiali usati nel passato, proprio dai negativi risultati che si sono verificati negli ultimi anni con l'utilizzo di materiali incompatili con la struttura muraria [3]. Le analisi hanno lo scopo di identificare la natura dei leganti e aggregati impiegati per il confezionamento delle malte, il rapporto legante/aggregato, la granulometria dell'aggregato, i composti estranei presenti e la microstruttura dei materiali. In base a questi dati tramite il processo del "reverse engineering", sarà possibile formulare degli impasti compatibili con la struttura muraria per il restauro delle murature storiche. Tuttavia la ricostruzione della composizione di

partenza è spesso una impresa piuttosto ardua ed in ogni caso sarà il risultato di complementari tecniche di indagine [1, 2].

L'obiettivo di questa indagine è la caratterizzazione delle malte impiegate per la costruzione dell'Arena di Padova e quelle impiegate negli interventi successivi, tramite una metodologia analitica appropriata, messa a punto per la caratterizzazione di questi materiali in termini chimico-fisici e individuare possibili analogie di tecnologia e composizione. Inoltre vengono anche affrontate le tematiche inerenti il comportamento degli impasti in relazione all'impatto ambientale urbano in cui sono situati e la loro durabilità in funzione dell'epoca di messa in opera.

MATERIALI E METODI

Campionamento

I campioni sono stati prelevati dalla muratura dell'anello esterno dell'anfiteatro romano di Padova costruito nel I° secolo a.c., in zone con storia costruttiva nota, in modo da poter individuare tecnologie e comportamento dei diversi periodi storici ed all'interno dei periodi storici stessi. La scelta dei campioni è stata fatta considerando vari aspetti, quali accessibilità, orientazione, altezza, leggibilità e stato di conservazione in modo da avere dei campioni omogenei e poco perturbati. I prelievi sono rappresentativi del I° secolo d.c. (periodo romano, campioni originali), del XIII° secolo (periodo medievale, tamponamento dei forni) e della fine del XVI°-inizio del XVII° secolo (ulteriori interventi di tamponamento). Tutti i campioni prelevati sono malte di allettamento, mentre due dei campioni di epoca romana fanno parte del sacco murario.

Analisi

I campioni sono stati esaminati con una procedura analitica che è stata eseguita con le seguenti tecniche:

-I campioni dopo frazionamento sono stati setacciati con una serie di setacci (ISO 565) da 4 a 0.063 mm per avere informazioni sui singoli componenti e la loro distribuzione granulometrica.

-Spettroscopia infrarossa (FT-IR) e diffrazione ai raggi X (XRD) sono state impiegate per la caratterizzazione dal punto di vista chimico e mineralogico dei campioni totali e sulla frazione più fine (<0.063 mm), costituita prevalentemente dal legante.

-Analisi termiche (TG-DTG) sono state eseguite per determinare quantitativamente i vari composti identificati con FT-IR e XRD e per determinare la natura dei leganti e degli inerti impiegati per il confezionamento degli impasti con una metodologia appropriata. Le analisi vengono eseguite sul campione totale e sulla frazione più fine (<0.063 mm) nell'intervallo di temperatura 25-1000 °C con un gradiente di 10 °C/min in atmosfera di azoto.

-La porosimetria a mercurio è stata utilizzata per avere informazioni sulle caratteristiche microstrutturali delle malte e di conseguenza sul loro stato di conservazione.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Le distribuzioni delle frazioni ottenute dall'analisi granulometrica dei campioni dopo frazionamento ci danno già una prima indicazione sulle caratteristiche tecnologiche dei materiali esaminati, che oltre la curva o istogramma della distribuzione dimensionale dei costituenti, ci danno anche il rapporto

legante/aggregato (L/A). Come legante si considera l'ultima frazione (<0.063 mm) ottenuta dopo l'analisi costituita prevalentemente di legante nonostante ci si trovano, a seconda dei casi, delle percentuali più o meno significative di inerte, distinguibili al microscopio ottico e meglio quantificabili tramite analisi chimiche. Questo dato come pure tutti gli altri ottenuti, non vanno letti da soli, ma interpretati in relazione a tutti i dati globali ottenuti dalle diverse analisi effettuate sia chimiche che fisiche.

Le distribuzioni granulometriche relative ai campioni di malta di epoca romana (Fig.1), si presentano abbastanza omogenee nonostante si tratti di malte del sacco romano che presentano per la loro tecnologia di confezionamento una grande disomogeneità. L'aggregato in questi campioni è distribuito con maggior frequenza nella frazione superiore ai 4 mm che presenta valori del 20% e nell'intervallo 0.063-0.25 mm con la presenza dei frammenti di cotto, mentre la frazione legante presenta dei valori inferiori al 30%. Il campione R7 invece presenta una distribuzione completamente diversa rispetto agli altri con una percentuale della frazione legante abbastanza elevata (attorno il 60%). Questa differenza di distribuzione di questo campione sarebbe da attribuire alla differente tecnologia di preparazione dell'impasto, facente parte di una malta di allestimento di un doppio corso di mattoni romani e non di un sacco murario.

Le malte del XIII° secolo (Fig.2) presentano delle distribuzioni abbastanza omogenee nonostante qualche deviazione dalla tendenza generale. I campioni nella frazione più fine nella maggioranza riportano percentuali comprese tra il 30-40%. Nell'aggregato invece i campioni presentano maggior frequenza di distribuzione nell'intervallo 0.063-0.5 mm, mentre è più rara la dimensione di frammenti a granulometria superiore. Fanno eccezione due campioni (M14,16) che presentano nella frazione superiore i 4 mm percentuali superiori il 10%. Questa differenza di comportamento è con ogni probabilità legata a tecnologie diverse all'interno dello stesso periodo storico.

Le malte del XVI-XVII° (Fig.3) secolo presentano delle distribuzioni granulometriche abbastanza simili tra di loro. Nella frazione più fine, metà dei campioni supera il 30% in peso, mentre l'altra metà presenta dei valori attorno al 20%. L'inerte si distribuisce con maggior frequenza nell'intervallo 0.063-0.5 mm, con l'assenza praticamente di frammenti di dimensioni più grandi.

Dall'esame complessivo delle distribuzioni granulometriche si può notare che le malte del XIII° secolo e quelle posteriori si presentano abbastanza simili tra di loro e con un L/A medio di 0.51 e 0.47 rispettivamente, mentre quelle del periodo romano sono abbastanza diverse.

La diffrazione ai raggi X (XRD) sul campione totale (Tab.1) mostra su tutti i campioni la prevalenza di quarzo e di calcite come componenti principali, accompagnati da dolomite, albite, muscovite, clinocllore, illite, biotite e in qualche caso si è notata la presenza di gesso. La composizione dei campioni sembra omogenea, il che ci fa presupporre l'impiego di inerti della stessa natura e di provenienza locale. La presenza invece di illite e clinocllore, potrebbe essere attribuita a impurezze fillosilicatiche, oppure ai frammenti di cotto spesso osservati negli impasti e soprattutto a quelli di epoca romana che ci farebbe dedurre delle temperature di cottura non proprio elevate. Comunque l'analogia di composizione ci induce a pensare all'utilizzo di sabbie locali provenienti dal fiume Brenta, che presentano composizione analoga [4].

L'analisi XRD, effettuate sulla frazione più fine, non ha rilevato la presenza di componenti idraulici; ciò nonostante, non si esclude il loro impiego negli impasti, perché potrebbero essere in forma non cristallina (allo stato di gel).

oppure potrebbero essere al di sotto dei limiti di rivelabilità della tecnica impiegata.

Tabella 1: Diffrazione X dei campioni totali

Camp.	Composizione
	Malte del I° secolo (periodo romano)
R3	Quarzo, Calcite, Dolomite, Albite, Muscovite, Gypsum, Illite, Clin.
R7	Quarzo, Calcite, Dolomite, Albite, Muscovite, Illite, Gypsum
R8	Quarzo, Calcite, Dolomite, Albite, Muscovite, Biotite, Clin., Gypsum
	Malte del XIII° secolo
M1	Quarzo, Calcite, Dolomite, Albite, Muscovite, Biotite, Illite, Clinoc.
M2	Quarzo, Calcite, Dolomite, Albite, Muscovite, Biotite, Illite, Clinoc.
M5	Quarzo, Calcite, Dolomite, Albite, Muscovite, Illite, Clinochlore
M9	Quarzo, Calcite, Dolomite, Albite, Illite, Clinochlore
M10	Quarzo, Calcite, Dolomite, Albite, Muscovite, Illite, Clinochlore
M12	Quarzo, Calcite, Dolomite, Albite, Muscovite, Biotite, Illite, Clinoc.
M14	Quarzo, Calcite, Dolomite, Albite, Muscovite, Biotite, Illite, Clinoc.
M16	Quarzo, Calcite, Dolomite, Albite, Muscovite, Illite, Clinochlore
M18	Quarzo, Calcite, Dolomite, Albite, Muscovite, Illite, Clinochlore
	Malte del XVI°-XVII° secolo
B7	Quarzo, Calcite, Dolomite, Albite, Muscov., Biotite, Illite, Clinoc.
B8	Quarzo, Calcite, Dolomite, Albite, Muscovite, Illite, Clinochlore
B11	Quarzo, Calcite, Dolomite, Albite, Muscovite, Biotite, Clinochlore
B13	Quarzo, Calcite, Dolomite, Albite, Muscovite, Illite, Clinochlore
B19	Quarzo, Calcite, Dolomite, Albite, Muscovite, Biotite, Illite, Clinoc.
B26	Quarzo, Calcite, Dolomite, Albite, Muscovite, Illite, Clinochlore

L' esame all' infrarosso (FT-IR) sia del campione totale sia della frazione più fine, ha mostrato la presenza di CaCO₃, silicati, nitrati e gesso. La presenza dei nitrati in tutti i campioni potrebbe essere attribuita alla decomposizione delle sostanze organiche, ad escrementi animali oppure alle interazioni dei componenti carbonatici con l'ambiente. Il gesso invece è presente in quantità significative solo nei campioni R3, 7, 8, M2 e M10 mentre negli altri campioni è presente in quantità ridotte. La sua presenza è legata a processi di alterazione della componente carbonatica, mentre sembra più improbabile la sua appartenenza ai componenti dell'impasto originale.

In tabella 2 sono riportati i risultati delle analisi termogravimetriche effettuate sul campione totale e sulla frazione più fine (<0.063 µm). Gli intervalli di temperatura e le relative perdite in peso presi in considerazione sono rappresentativi e ritenuti affidabili per la caratterizzazione di questi materiali [2, 5]. In particolare, gli intervalli di temperatura presi in considerazione per la quantificazione dei vari componenti presenti, sono relativi alla perdita dell'acqua igroscopica (<120 °C), alla perdita dell'acqua dei sali idrati (120-200 °C), alla perdita dell'acqua legata chimicamente ed eventuali sostanze organiche presenti (200-600 °C) e alla perdita della CO₂ (>600 °C) [1, 2, 5, 6].

In alcuni casi la decomposizione dei carbonati inizia prima dei 600 °C e determinazioni della CO₂ tramite calcimetria hanno confermato questo fatto. La decomposizione precoce dei carbonati potrebbe essere attribuita alla

presenza di sali solubili, spesso presenti in questi materiali, che favoriscono l'abbassamento di temperatura di decomposizione [8].

Dai dati termogravimetrici sul campione totale, le quantità di CO₂ oscillano mediamente attorno il 15%. Questo dato indica, prendendo in considerazione che una parte della CO₂ fa parte del legante, l'impiego di aggregati prevalentemente di natura silicatica.

La perdita di peso nell'intervallo 120-200 °C, legata alla perdita dei sali idrati ed in questo caso alla perdita dell'acqua di cristallizzazione del gesso, identificato sia con FT-IR che con XRD, mostra dei valori sotto l'1% a parte qualche caso. I valori superiori all'1% sarebbero da attribuire alla presenza del gesso legato ai diversi processi di degrado. Piuttosto improbabile sembra la sua presenza come legante, data la concentrazione relativamente bassa per questo tipo di applicazione. Comunque i valori più alti vengono riscontrati nei campioni del periodo romano che sono i materiali più a lungo in opera.

La perdita di peso nell'intervallo 200-600 °C presenta dei valori che variano tra il 2.60 ed il 5.57%, oscillando mediamente attorno al 3%. La perdita in questo intervallo è attribuita all'acqua di costituzione dei composti idraulici e all'acqua di costituzione di certi minerali che non fanno parte della parte legante (biotite, clinocllore, illite, ecc.), oppure ad eventuali composti organici [5].

In tabella 2 è riportato anche il rapporto CO₂/H₂O che indica la perdita superiore ai 600 °C al numeratore, riportata come CO₂, e la perdita nell'intervallo 200-600 °C al denominatore riportata come H₂O e intesa come acqua di costituzione. Questo rapporto, nonostante sia molto più significativo nella frazione più fine per comprendere la natura dei leganti impiegati, perché esprime inversamente il carattere idraulico di un legante, potrebbe già dare delle indicazioni di carattere generale sulla natura degli impasti. I suoi valori, nei campioni totali, oscilla mediamente attorno a 5, indicando degli impasti con un certo carattere idraulico.

Dalle analisi termiche riferite alla frazione fine, si può vedere che le percentuali della CO₂ oscillano tra il 20 e il 30%, con eccezione dei campioni di epoca romana, che riportano valori inferiori al 20%. I valori invece dell'acqua idraulica (200-600 °C) variano tra il 4 e l'8%. I valori indicano chiaramente che gli impasti in esame non sono sicuramente aerei, ma probabilmente di natura idraulica. Infatti il rapporto CO₂/H₂O riporta dei valori oscillanti tra il 2 e 5 indicando appunto l'impiego di leganti di natura idraulica. In figura 4 sono riportati i valori dell'acqua idraulica % rispetto al rapporto CO₂/H₂O. In base alla distribuzione dei punti in questa figura si possono distinguere due gruppi di campioni: il primo con valori del rapporto minori di 3.5 e acqua idraulica maggiore del 6%, e il secondo con valori di rapporto compresi tra il 3.5 e 5.5 e acqua idraulica tra il 4 ed il 6%. Il primo gruppo indica dei leganti mediamente idraulici, mentre il secondo indica dei leganti debolmente idraulici. Le materie prime di natura marnosa per la produzione dei leganti provengono molto probabilmente dai Colli Euganei [7].

In tabella 2 sono riportati anche i termini CO₂% effettiva e H₂O% effettiva che danno il peso percentuale della CO₂ e H₂O della frazione più fine nel campione totale. Questi termini vengono calcolati moltiplicando le percentuali dei termini determinati nella frazione fine (<0.063 mm) per il peso di questa frazione rispetto al totale. Dalla CO₂% totale e dalla CO₂% effettiva per differenza si può risalire con buona approssimazione alla frazione carbonatica contenuta nell'aggregato. In base a questi calcoli la frazione di CO₂ contenuta

nell'aggregato oscilla mediamente attorno il 10%, indicando una certa analogia tra gli aggregati utilizzati che corrispondono alla composizione delle sabbie del fiume Brenta. Dall' esame invece dell' H₂O% effettiva e H₂O% totale si può vedere che esiste una buona parte di acqua di costituzione contenuta nei minerali che costituiscono la parte non legante delle malte.

Dalla CO₂%, H₂O% effettiva e dalla percentuale della frazione più fine e tenendo conto che una piccola frazione dell' inerte attorno al 4-5% passa in questa frazione, come è stato osservato al microscopio, il rapporto legante/aggregato varia da 1/4 a 1/2 in volume, oscillando mediamente attorno a 1/3. Da questa osservazione si può constatare che non esiste una correlazione tra tecnologie di fabbricazione ad epoche diverse, che risultano differenziate entro gli stessi periodi storici.

In tabella 3 sono riportati i valori porosimetrici dei campioni mediati su tre misure. Dai dati si può vedere una certa omogeneità e materiali in buono stato di conservazione, nonostante si tratti di sistemi perturbati. In particolare i volumi cumulativi variano tra 0.144 e 0.230 cm³/g, indicando dei materiali piuttosto compatti, come pure le densità apparenti che oscillano mediamente tra 1.8 e 1.9 g/cm³. Comunque al campione con percentuale di acqua idraulica più alta corrisponde il valore più basso di volume cumulativo, nonostante agli impasti più idraulici non corrispondono i valori più bassi in assoluto.

Tabella 3: Dati porosimetrici

Campione	Volume Cumul..	Densità Apparente	Porosità Totale	Raggio Medio	Area spec. superfic.
	(cm ³ /g)	(g/cm ³)	(%)	(µm)	(m ² /g)
R3	0.230	1.74	40.0	0.01	20.9
R8	0.166	1.75	29.1	0.04	15.4
M1	0.183	1.80	32.9	0.83	3.1
M2	0.183	1.75	32.0	0.83	2.3
M5	0.171	1.85	31.6	0.72	2.1
M9	0.170	1.86	31.6	0.87	3.1
M10	0.162	1.89	30.6	0.31	1.7
M12	0.163	1.98	32.3	1.41	2.1
M14	0.173	1.85	32.0	1.54	3.9
M18	0.170	1.82	30.9	1.41	1.8
B7	0.200	1.93	38.6	4.06	1.6
B8	0.170	1.82	30.9	0.66	2.2
B11	0.231	1.76	40.7	0.56	2.9
B19	0.227	1.69	38.4	3.24	2.2
B26	0.144	1.92	27.6	0.42	1.5

Le distribuzioni si presentano abbastanza regolari, con una distribuzione del volume cumulativo attorno il raggio medio, che mediamente è al di sotto del micron. I campioni di epoca romana invece, presentano delle distribuzioni

spostate verso raggi molto bassi che probabilmente sarebbero da attribuirsi alla presenza dei frammenti di cotto abbastanza frequenti in questi campioni. Le aree specifiche superficiali presentano dei valori bassi, ad eccezione sempre dei campioni di epoca romana che presentano i valori più alti, da attribuirsi ancora alla presenza dei frammenti di cotto.

CONCLUSIONI

L'indagine effettuata ha confermato che la metodologia proposta consente di ottenere delle risposte che possono essere ritenute significative e che ben individuano alcune caratteristiche tecnologiche delle malte storiche.

I leganti impiegati per il confezionamento degli impasti sono di natura idraulica con materie prime di natura marnosa, probabilmente provenienti dai Colli Euganei.

Gli aggregati presentano delle distribuzioni granulometriche simili, di provenienza locale e di composizione analoga che si accostano alle sabbie del fiume Brenta. Eccezione fanno gli impasti di epoca romana che si discostano per la presenza di aggregati di maggior dimensioni.

In generale gli impasti venivano preparati con delle formulazioni strettamente tradizionali, con rapporto legante/aggregato di circa 1/3, mentre non si sono riscontrate differenti tecnologie negli impasti impiegati negli interventi successivi ad eccezione le malte originali di epoca romana.

Il comportamento relativo degli impasti delle tre epoche di messa in opera è da ritenersi buono e presentano ancora un buon stato di conservazione nonostante il sito odierno sia situato in un centro urbano, con tutti gli effetti negativi che ne conseguono. Comunque è da ritenersi che le malte di epoca romana presentino superiori caratteristiche di durabilità.

Riferimenti

- [1] P.R. David, S. Gizzi, "Restauro cemento e reversibilità", in *Scienza e Beni Culturali IX*, Atti del Convegno Calcestruzzi antichi e moderni: storia cultura e tecnologia, Bressanone, 1993, pp. 305-314.
- [2] G. Chiari, M.L. Santarelli, G. Torraca, "Caratterizzazione delle malte antiche mediante l'analisi di campioni non frazionati", *Materiali e Strutture*, 3 (1992) 111-137.
- [3] A. Bakolas, G. Biscontin, A. Moropoulou, E. Zendri, "Physico-chemical characteristics of traditional mortars in Venice", in *Structural studies of historical buildings IV*, ed. by C.A. Brebbia and B. Leftheris, Computational mechanics publications, Southampton, Vol. 1, 1995, pp. 187-194.
- [4] P. Jobstraibizer e P. Malesani, "I sedimenti dei fiumi veneti", *Mem. Soc. Geol. It.*, XII (1973) 411-452.
- [5] A. Bakolas, G. Biscontin, V. Contardi, E. Franceschi, A. Moropoulou, D. Palazzi, E. Zendri, "Thermoanalytical research on traditional mortars in Venice", *Thermochimica Acta* 269/270 (1995) 817-828.
- [6] R.C. Mackenzie, "Differenzial thermal analysis I, Academic Press, London, 1970.
- [7] A. Palladio, "I quattro libri dell'architettura", libro I, Venezia, 1570.
- [8] G. Biscontin, A. Bakolas, A. Moropoulou, E. Zendri, "The influence of soluble salts in thermal decomposition of carbonates in traditional mortars", in *Giornate Mediterranee di Calorimetria ed Analisi Termica*, XVII Conference AICAT-GICAT, VI Meeting GECAT, Chia Laguna (CA), 1995, pp. 45.

Tabella 2: Analisi termogravimetriche (TG-DTG)

Cam.	Perdita in peso per intervallo di temperatura (C°) del campione totale			CO2/H2O Totale	Perdita in peso per intervallo di temperatura (C°) della frazione fine (<0.063 mm)			CO2/H2O Fraz. Fine	CO2 effett. (%)	H2O effett. (%)	Perc. in peso fr. fine <0.063 mm (%)		
	< 120	120-200	200-600 > 600		< 120	120-200	200-600 > 600						
Malte del I° secolo d.c. (periodo romano)													
R3	2.10	1.90	4.35	14.54	3.34	1.37	1.96	7.98	16.39	2.05	4.38	2.13	26.7
R7	3.59	1.30	2.96	13.05	4.41	1.55	0.69	4.33	17.69	4.09	10.68	2.62	60.4
R8	2.10	1.04	5.57	18.32	3.29	1.36	0.92	6.57	19.22	2.93	3.75	1.28	19.5
Malte del XIII° secolo													
M1	0.92	0.35	2.60	17.68	6.80	1.02	0.46	4.31	30.10	6.98	9.96	1.43	33.1
M2	1.36	0.96	3.56	16.10	4.52	0.71	1.43	5.28	28.42	5.38	6.42	1.19	22.6
M5	1.72	0.61	3.18	14.26	4.48	1.48	0.40	5.76	23.20	4.03	8.03	1.99	34.6
M9	1.96	0.71	3.25	17.70	5.45	1.36	0.85	4.73	25.13	5.31	9.80	1.84	39.0
M10	1.84	1.00	4.04	15.53	3.84	1.30	0.81	6.73	22.51	3.34	7.63	2.28	33.9
M12	1.27	0.51	3.13	15.69	5.01	1.21	0.40	5.37	24.06	4.48	9.60	2.14	39.9
M14	2.29	0.82	5.39	15.73	2.92	0.96	0.43	5.35	26.03	4.87	9.81	2.02	37.7
M16	0.83	0.33	2.93	19.16	6.54	1.08	0.35	6.12	28.09	4.60	9.30	2.03	33.1
M18	0.60	0.36	2.98	14.48	4.86	1.35	0.48	7.83	26.82	3.43	5.23	1.53	19.5
Malte del XVI-XVII secolo													
B7	1.84	0.61	3.59	15.58	4.34	0.63	0.35	5.53	20.36	3.68	7.11	1.93	34.9
B8	1.31	0.58	3.45	15.38	4.46	1.00	0.36	4.07	21.92	5.39	4.12	0.77	18.8
B11	0.95	0.31	3.17	20.24	6.38	1.08	0.49	6.12	30.22	4.94	12.48	2.53	41.3
B13	0.93	0.31	3.63	19.90	5.48	1.01	0.50	5.89	30.43	5.17	12.63	2.44	41.5
B19	0.26	0.26	3.15	16.65	5.29	0.62	0.33	5.36	25.91	4.83	5.62	1.16	21.7
B26	0.80	0.53	2.67	15.17	5.68	1.05	0.48	8.43	27.26	3.23	6.05	1.87	22.2

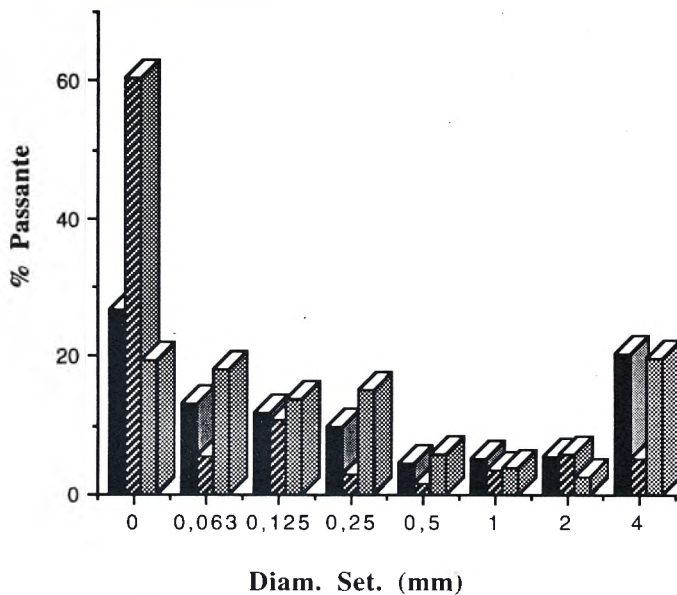


Figura 1: Distribuzione granulometrica delle malte del I° secolo d.c.

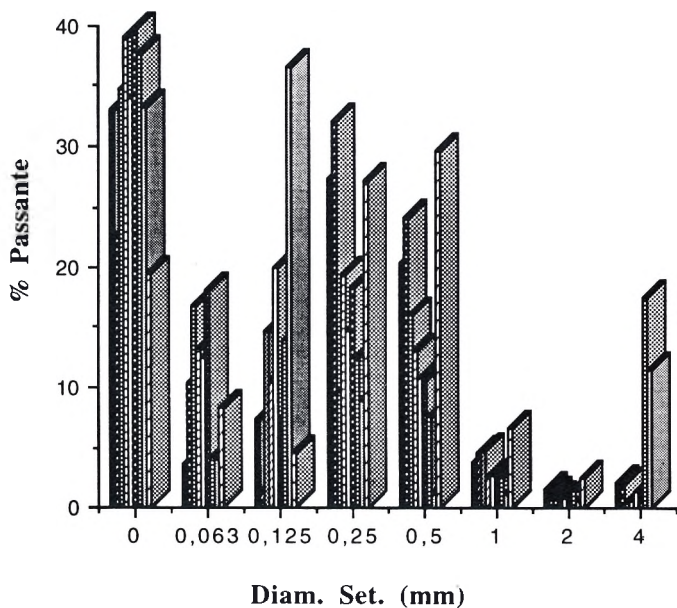


Figura 2: Distribuzione granulometrica delle malte del XIII° secolo.

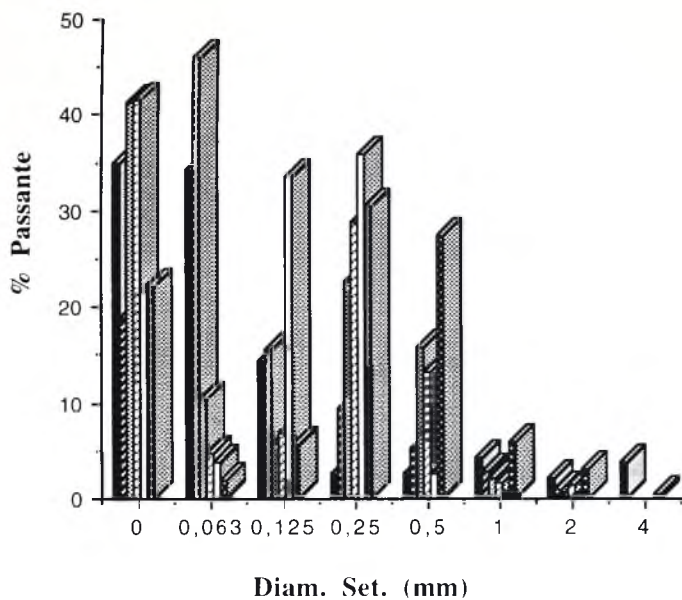


Figura 3: Distribuzione granulometrica delle malte del XVI°-XVII° secolo.

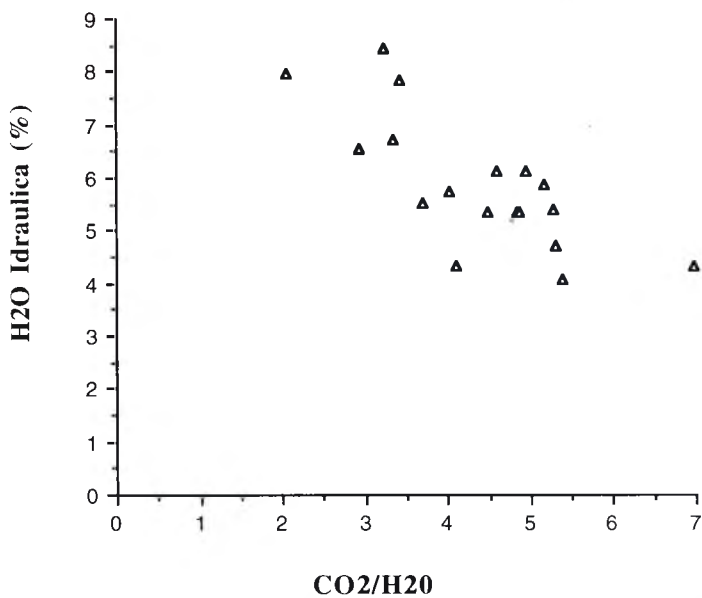


Figura 4: H₂O idraulica rispetto al rapporto CO₂/H₂O riferiti alla frazione più fine (<0.063 mm).