

Caratterizzazione mineralogica e strutturale di malte e intonaci del sito archeologico di Barsinia, Giordania settentrionale

Mustafa Mohammad AL-Naddaf

Department of Conservation and Management of Cultural Resources
Faculty of Archaeology and Anthropology
Yarmouk University, Jordan

Lamia Salem EL-Khouri

Department of Archaeology
Faculty of Archaeology and Anthropology
Yarmouk University, Jordan

Parole chiave: Giordania, malta, aggregato, proprietà fisiche, conservazione.

1. Introduzione

Barsinia si trova nel paesaggio rurale nord-occidentale della Giordania (Fig. 1) a circa 15 km ad ovest della moderna città di Irbid. Il sito è attualmente circondato da campi agricoli dove sono coltivati cereali e olivi. Le stagioni di scavi nel 2006 e 2007 hanno portato alla luce numerosi resti architettonici e manufatti, tra cui ceramiche, vasi di vetro, strumenti di pietra per la macinazione, oggetti metallici, che riflettono un insediamento florido, in particolare durante i periodi ellenistico, romano, bizantino e omayyade (II secolo a.C. - VIII secolo d.C. ca.) [1- 4].

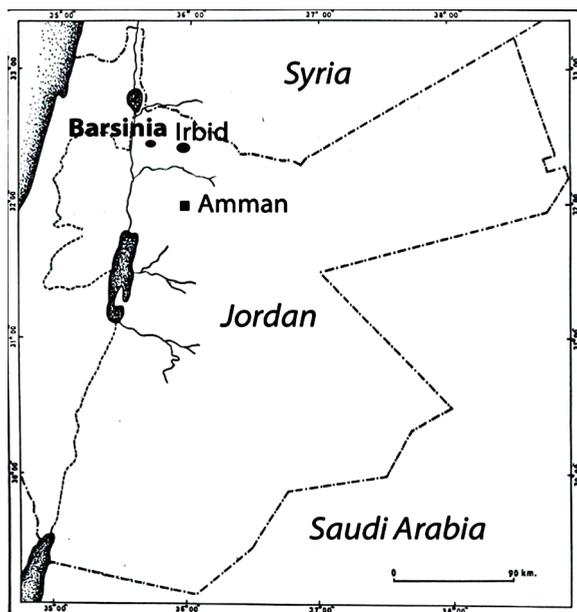


Figura 1. Mappa della Giordania raffigurante l'ubicazione di Barsinia

Il sito comprende tre parti principali: le strutture domestiche, il cimitero e i campi agricoli. Tutti gli edifici sono stati costruiti prevalentemente in pietra calcarea locale, alcuni dei quali sono stati intercalati con sottili strati di selce. Il marmo è stato trovato in piccole quantità nel sito, essendo nei pezzi più significativi come un piccolo pilastro cilindrico e frammenti di una lastra di marmo decorato con intagli geometrici e floreali, probabilmente parte di una lastra del coro di una chiesa bizantina.

I muri scoperti sono stati costruiti utilizzando diversi tipi e forme di pietre. Nella costruzione della stessa parete sono state utilizzate sia le pietre ben tagliate che le macerie delle pietre, indicando diverse fasi di costruzione. La maggior parte dei muri erano coperti da intonaco la cui traccia era ancora visibile in alcuni punti (Fig. 2 - intonaco, Area A, Quadrato B10).

Durante le due stagioni di scavi presso il sito, nel 2006 e nel 2007, sono stati prelevati dodici campioni di intonaci e malte, undici campioni sono stati rilevati nel 2006 ed un solo campione (Br.07.B.A3.5) nel 2007. La scarsità dei campioni raccolti è dovuta al continuo insediamento e alla confusione e riutilizzo delle strutture residenziali attraverso un periodo approssimativo di mille anni, dal periodo tardo ellenistico a quelli pre-islamici. La maggior parte dei campioni sono stati prelevati nelle strutture residenziali, eccetto per il campione Br.06.Necl.Tomb1.1 che è stato rinvenuto in una tomba romano-bizantina e i campioni (Br.06.Necl.Tomb1.1, Br.06.A.A9.7a e Br.06.A.A9.7b), che erano originariamente parti di intonaco che ricopriva le pareti di una cisterna del periodo tardo ellenistico-inizio romano (Fig. 3).

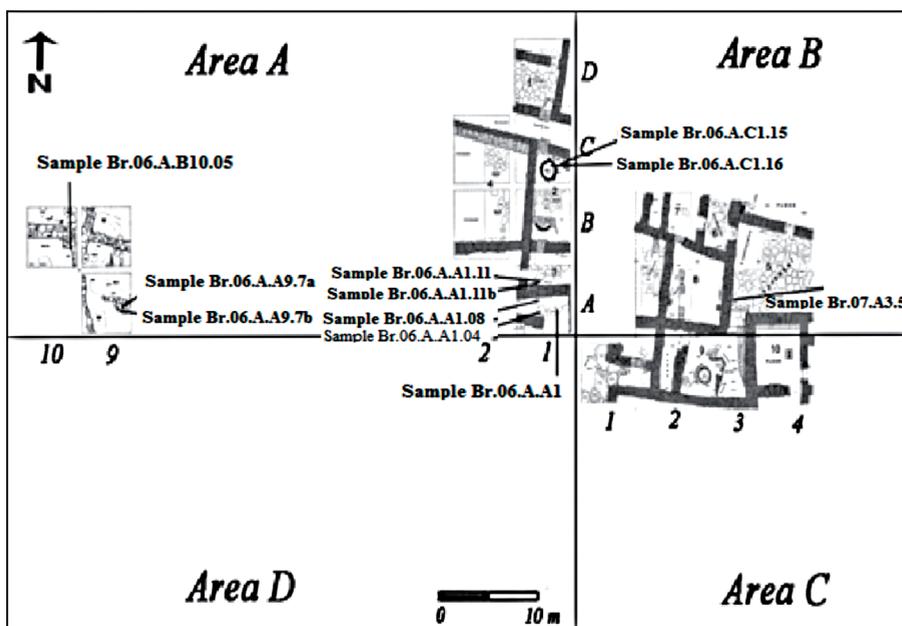


Figura 2. L'area residenziale a Barsinia, e i siti del campionamento

In Giordania, gli studi relativi alla malta di calce storica e all'intonaco sono stati piuttosto limitati. Al-Saad e Abdel-Haim (2001), hanno valutato 3 tipi di malte da utilizzare come malta di restauro per i monumenti Qasr Al-Bint a Petra. I criteri di selezione sono stati valutati in base alle proprietà meccaniche e fisiche delle malte testate rispetto a quelle della pietra da costruzione [5]. Dunn e Rapp (2004), hanno studiato malte romane e bizantine e materiali pozzolanici dal sito archeologico di Umm al-Jimal, ed i campioni studiati sono stati caratterizzati petrograficamente e

mineralogicamente [6]. Abde Hadi e Abdel Hadi (2012), hanno studiato la malta di calce e l'intonaco nel castello storico di Al-Shawbak nel sud della Giordania. Sono state determinate le proprietà fisiche, meccaniche e chimiche dei campioni prelevati e, di conseguenza, sono state appositamente preparati le malte e l'intonaco costituiti da calcare bituminoso per il restauro castello [7]. Bani Yaseen et al. (2013), hanno analizzato la malta romana dal sito archeologico di Jerash utilizzando tecniche petrografiche, mineralogiche e chimiche. In base a questo studio, sono state differenziate due tipi di malte romane, una tipologia contenente pozzolana e l'altra no [8].

In primo luogo, questo studio mira ad analizzare gli intonaci e le malte utilizzate nel sito archeologico di Barsinia risalenti ad epoche diverse, per comprendere lo sviluppo delle tecniche di costruzione utilizzate cronologicamente. In secondo luogo, caratterizzando le caratteristiche compositive e strutturali di malte ed intonaci, sostanzialmente si forniscono informazioni su potenziali tipologie di malte che possono essere impiegate per scopi di conservazione del sito.

La malta è un materiale da costruzione diacronico, utilizzato per l'assemblaggio di pezzi solidi di pietra o mattoni per rivestimenti protettivi o decorativi in pavimenti e substrati. La malta è ottenuta miscelando un legante con aggregati di sabbia o un additivo inorganico. Si possono distinguere diversi tipi di leganti, che includono fango, gesso, calce, pozzolana, calce idraulica, cemento o una miscela di essi [9-10].

Tuttavia, la calce utilizzata come legante rappresenta il materiale tradizionale utilizzato più di frequente in edilizia per più di 3000 anni. Le prime civiltà come gli Incas, i Maya, i cinesi, gli egiziani, gli antichi greci e romani adoperarono la calce come legante nelle strutture di mattoni o di pietra, sia all'interno della muratura che per la resa delle superfici murarie [11].

In Giordania, le malte di calce e gli intonaci erano adoperati persino in epoche precedenti: infatti, tali materiali sono stati trovati nel sito archeologico ad Ain Ghazal, datato al periodo neolitico (circa 7000 a.C.). Gli abitanti di Ain Ghazal utilizzavano malta di calce e intonaco come materiale da costruzione e decorazione. Le famose statue di Ain Ghazal sono state realizzate utilizzando questo tipo di materiale [12- 13].



Figura. 3. Pezzo di intonaco nell'Area A, Zona B10 (campione Br.06.A.B.10.05)

2. Materiali e Metodi

2.1. Campionamento

Lo studio ha coinvolto il campionamento di 12 frammenti di intonaco e malta risalenti ai primi anni del periodo ellenistico fino al periodo omayyade e provenienti da 12 diverse strutture a Barsinia. I campioni studiati rappresentano gli unici esempi che sono stati raccolti dal sito durante le due stagioni di scavo: il primo scavo è stato condotto nel 2006, quando sono stati prelevati 11 campioni su quelli totali, mentre durante l'ultima stagione di scavo nel 2007, è stato prelevato soltanto il campione numero Br.07.B.A3. Il volume dei campioni prelevati varia da circa 15 cm³ (5 cm x 3 cm x 1 cm circa) a circa 1300 cm³ (20 cm x 13 cm x 5 cm). I campioni sono stati datati in base agli oggetti archeologici associati e alla sequenza cronologica al sito (Tabella 1).

2.2. Indagini petrografiche

Per lo svolgimento dell'esame petrografico, considerando la fragilità di alcuni dei campioni studiati, è stato eseguito un pre-consolidamento per la preparazione delle sezioni sottili e, pertanto, i campioni sono stati impregnati con resina epossidica sotto vuoto. Sono state preparate sezioni sottili come suggerito da Lewis e McConchie (1994) [14], ma invece di usare acqua come lubrificante, è stato usato olio per evitare di danneggiare i minerali idrosolubili [15]. Per distinguere i minerali di carbonato nei campioni, le sezioni sottili sono state colorate con una soluzione contenente rosso-S alizarina al 2% di acido cloridrico HCl [14, 16]. Questa soluzione è normalmente utilizzata dai sedimentologi per differenziare la calcite e la dolomite. In questo studio, la soluzione è stata utilizzata per distinguere il legante calce dalla calcite aggregata, considerando che il legante calce che presenta cristalli a grana fine ha una grande superficie e - di conseguenza - incide più rapidamente e mostra un colore più intenso rispetto ai cristalli grossolani (aggregati di calcite). Di conseguenza, il contrasto tra il legante e l'aggregato può essere migliorato [17] e questo fattore rende la determinazione del rapporto legante/aggregato più accurata.

Per esaminare petrograficamente le sezioni sottili precedentemente preparate, è stato utilizzato un microscopio polarizzatore Leica. Una delle proprietà più importanti che determinano la durabilità e le caratteristiche di una malta di calce è la proporzione in peso di aggregato/legante; pertanto, l'analisi della malta di calce per scopi di conservazione comporta comunemente la quantificazione del rapporto legante/aggregato in peso. La proporzione della miscela della malta studiata è stata calcolata utilizzando un Prior J0415G Point Counter; per ciascun campione sono stati effettuati almeno 300 conteggi secondo la procedura descritta da the International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM) TC-COM C2. Riferendosi a questa procedura, la proporzione in peso di aggregato/legante (F) è stata calcolata usando l'equazione:

$$F = \alpha \frac{\text{volume of aggregate}}{\text{volume of paste}}$$

dove

$$\alpha = \frac{\text{density of aggregate} \times \text{mole weight CaCO}_3}{\text{density of paste} \times \text{mole weight Ca(OH)}_2}$$

La densità dell'aggregato è di circa 2,67 g/cm³, la densità della miscela di calce è di circa 1,2 g/cm³, il peso molecolare di CaCO₃ è 100 e il peso molecolare di Ca(OH)₂ è 74.

$$\alpha = \frac{2.67 \times 100}{1.2 \times 74} = 3$$

La porzione più ruvida di 63 µm, che rappresenta l'aggregato, è stata estratta attraverso una delicata frantumazione e setacciatura a umido dopo un trattamento con acido cloridrico diluito (HCl) per eliminare eventuali resti di legante di carbonato di calcio.

2.3. Diffrazione ai raggi X

La caratterizzazione mineralogica della malta è stata ottenuta tramite analisi XRD utilizzando un diffrattometro Shimadzu Lab X, XRD 6000. Il risultato della diffrazione è stato ottenuto applicando le seguenti condizioni: radiazione di CuK α (1,5418 Å) con 30 kV, energia 30 mA e monocromatore di grafite. La caratterizzazione di malte storiche da XRD è stata eseguita su tutto il campione, e sulla frazione più fine (<63 µm).

2.4. Contenuto di carbonato

Il contenuto di carbonato nei campioni studiati è stato determinato utilizzando il calcimetro "metodo volumetrico Dietrich-Fruhling gas" che soddisfa gli standard DIN 19684. Il metodo si basa sulla misura del volume di CO₂ sviluppato dalla reazione di HCl con la roccia polverizzata. Il carbonato totale viene ottenuto utilizzando una formula che tiene conto della pressione, della temperatura, della quantità di campione precedentemente pesato e del volume di CO₂ sviluppato dal campione. In questo studio, sono stati sciolti 300 mg di campione in polvere con 1 N HCl, e la quantità di CO₂ rilasciata dal campione è stata misurata utilizzando un calcimetro Dietrich-Fruhling™. La quantità di CO₂ rilasciata dai campioni è stata confrontata con quella liberata dalla stessa massa di campione di carbonato di calcio in standard puro.

Tabella 1. descrizione dei campioni di malta e di intonaco studiati

N. di registrazione	Fonte del campione	Datazione	Descrizione del campione
Br.06.A.A1.11	Intonaco	Periodo tardo bizantino, V sec. d.C.	Morbido, giallastro, costituito da un solo strato, non verniciato, a grana fine, < 7 millimetri di spessore, contiene resti organici.
Br.06.A.A1.08	Malta di allettamento	Periodo tardo romano, III – IV sec. d.C.	Duro, giallastro, costituito da due strati, quello esterno è marrone chiaro con selce e resti organici, a grana media, con uno spessore di circa 8-11 mm. La parte interna contiene selce e resti organici, più morbida rispetto alla zona esterna, a grana grossa, con uno spessore maggiore di 15 mm.

Br.06.A.B10.05	Intonaco	Periodo tardo bizantino- omayyade (VI – VIII secolo)	Morbido, fatto di 2 strati, lo strato più esterno è verniciato con colore marrone chiaro ed ha uno spessore compreso tra 1 e 3 mm. La zona interna è di colore chiaro. È stato rilevato del carbone in entrambi gli strati: il campione ha uno spessore totale di circa 3 cm.
Br.06.Necl. Tomb1.1	Malta di allettamento	Periodo tardo romano-bizantino (III – V sec. d.C.)	Morbido, composto da 2 strati: la zona esterna è a grana fine di colore marrone chiaro, contiene resti organici ed ha uno spessore di circa 5 mm. La zona interna è di colore bianco e a grana grossa, con uno spessore di circa 8 mm.
Br.06.A.C1.16	Malta pavimentale	Periodo ellenistico (II sec. a.C)	Un pavimento compatto, duro, dal bianco tendente al giallo, di spessore superiore a 5 cm, composto da un unico strato. Grana molto grossa, alcuni grani sono di circa 1 cm.
Br.06.A.A9.7a	Intonaco	Periodo tardo ellenistico –inizio romano (I sec. a.C. - I sec. d.C.)	Intonaco su un muro di cisterna, da assai tenace a incoerente, composto da 2 parti; lo strato esterno ha uno spessore di circa 7 mm, dal colore marrone scuro tendente al nero e contenente aggregati grossi, la parte interna è il terreno sottostante, che ha colore nero e contiene carbone. Il campione contiene grani di selce.
Br.06.A.A1.04	Intonaco	Periodo tardo bizantino- omayyade (VI – VIII secolo d.C.)	Morbido, grigio, costituito da uno strato contenente residui organici, presenta uno spessore > 9 mm.
Br.07.B.A3.5	Intonaco	Periodo tardo bizantino- omayyade (VI – VIII secolo)	Morbido, giallastro, costituito da uno strato, di grana media, contiene resti organici.
Br.06.A.A1.11b	Intonaco	Periodo bizantino (V sec. d.C.)	Morbido, giallastro, costituita da uno strato, non verniciato, a grana fine, <7 millimetri di spessore, contiene resti organici.
Br.06.A.A1	Intonaco	Periodo tardo bizantino- omayyade (VI – VIII secolo)	Da morbido a medio, costituito da 2 strati, la zona esterna è bianco-giallo e ha uno spessore < 1 mm, la parte interna è più scura e spessa, con uno spessore > 8 mm. Il campione contiene resti organici.
Br.06.A.C1.15	Malta di allettamento	Periodo romano III –IV sec. d.C.	Malta di mosaico, morbida, di colore bianco, a grana molto fine, di spessore > 6 mm.
Br.06.A.A9.7b	Intonaco	Periodo tardo ellenistico –inizio romano (I sec. a.C. - I sec. d.C.)	Intonaco su un muro di cisterna, da assai tenace a incoerente e composto da 2 strati. Quello esterno è spesso, di colore marrone chiaro con macchie scure, contiene selce ed ha uno spessore di 5-6 mm. La zona interna è nera e contiene selce e resti organici.

Il contenuto di carbonato è stato quindi calcolato applicando la seguente equazione:

$$\text{Contenuto di carbonato \%} = X \cdot 100\%$$

Per ogni campione sono state eseguite tre misure e successivamente è stata calcolata la media.

2.5. Proprietà fisiche

La porosità e la densità dei campioni dello studio sono state misurate in base alle procedure raccomandate da RILEM (1980), Test No. 1.1 e 1.2. come segue.

In seguito all'essiccamento ad una massa costante, i campioni sono stati messi in un recipiente di evacuazione ed è stata gradualmente abbassata la pressione. La bassa pressione è stata mantenuta costante per 24 ore. Nel recipiente è stata lentamente introdotta acqua distillata finché i campioni sono stati completamente immersi. I campioni sono stati lasciati per 24 ore immersi a pressione atmosferica. Successivamente, sono stati pesati separatamente in acqua (peso idrostatico). In seguito, i campioni sono stati rapidamente puliti con un panno umido e pesati in aria. Le seguenti formule sono state applicate per calcolare la densità e la porosità:

$$\sigma_{\text{abs}} = \frac{M1}{M1 - M2} \times 1000$$

$$\sigma_{\text{app}} = \frac{M1}{M3 - M2} \times 1000$$

$$\rho = \frac{M3 - M1}{M3 - M2} \times 100$$

σ_{abs} : densità assoluta in g/cm³

σ_{app} : densità apparente in g/cm³

ρ : porosità

M1: massa secca

M2: massa in immersione (peso idrostatico)

M3: massa umida in aria [18].

3. Risultati e discussione

Secondo i risultati della calcimetria (Tabella 2), il contenuto di carbonato era alto in tutti i campioni, tranne per il campione Br.06.A.C1.16, ed era presente in quantità compresa tra il 4% e l'89%. Il contenuto medio di carbonato era del 65,6%. Le porzioni più sottili di 63 Mm contenevano più carbonato rispetto all'intero campione. Il contenuto di carbonato in questa porzione variava tra 9.0-91.1% in media del 74,7%.

Tabella 2. Composizione dei campioni studiati

Numero di registrazione	Contenuto di CaCO ₃ (%)		Risultati XRD					
	Nel campione completo	Nella porzione < 63 µm	Campione completo			Dimensione dei grani < 0.063 mm		
			Calcite	Quarzo	Apatite	Calcite	Quarzo	Apatite
Br.06.A.A1.11	70.1	80.6	***	**	*	***	**	-
Br.06.A.A1.08	63.3	77.0	***	**	*	***	**	-
Br.06.A.B10.05	70.9	73.5	***	**	-	***	**	-
Br.06.Necl. Tomb1.1	68.3	69.7	***	**	*	***	**	-
Br.06.A.C1.16	4.1	9.0	*	***	-	*	***	-
Br.06.A.A9.7a	61.1	79.1	***	**	-	***	**	-
Br.06.A.A1.04	70.1	86.0	***	**	*	***	**	-
Br.07.B.A3.5	81.9	83.9	***	**	*	***	**	-
Br.06.A.A1.11b	75.4	85.6	***	**	*	***	**	-
Br.06.A.A1.c	66.6	81.3	***	**	*	***	**	-
Br.06.A.C1.15	89.0	91.1	***	**	*	***	**	-
Br.06.A.A9.7b	62.2	78.7	***	**	-	***	**	-

***: maggiore, **: minori, *: tracce e - assente

I risultati qualitativi delle analisi XRD sono presentati nella Tabella 2 e nella Figura 4. Escludendo il campione Br.06.A.C1.16, la calcite non ha mostrato differenze quantitative significative nel contenuto nelle malte esaminate.

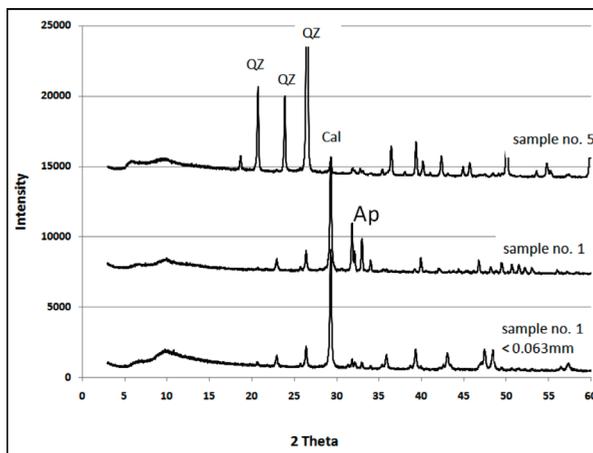


Figura 4. Spettro di diffrazione ai raggi x della polvere di 3 campioni caratteristici di malta. Qz. è quarzo, Ca. è la calcite e Ap. è l'apatite

Tutti i campioni, tranne il Br.06.A.C1.16, erano costituiti da calcite (CaCO_3) come componente principale e quarzo (SiO_2) in proporzione minore. Il campione Br.06.A.C1.16 è costituito principalmente da quarzo e contiene piccole quantità di calcite. Nella maggior parte dei campioni sono state rilevate tracce di apatite minerale, la cui presenza può essere attribuita all'aggiunta di ossa animali nelle malte e negli intonaci di Barsinia. L'aggiunta di ceneri ossee all'intonaco facilita il processo di intonacatura aumentando la plasticità della malta. Inoltre, la presenza di ossa in una malta e in un intonaco diminuisce la possibilità di formazione di crepe superficiali e, di conseguenza, aumenta la loro durabilità [19].

Per la granulometria più fine di $63\mu\text{m}$, che indica principalmente un materiale legante, i risultati dell'analisi in XRD hanno mostrato che l'abbondanza relativa di calcite e quarzo in questa porzione è la stessa presente in tutto il campione. L'unica differenza tra le composizioni mineralogiche di questa porzione con quella dell'intero campione è l'assenza di apatite nella parte più fine di $63\mu\text{m}$ dei campioni. L'assenza del minerale calcio silicato può essere constatata in ognuna delle malte studiate; un risultato che indica una malta non idraulica o che può essere attribuito al fatto che le strutture di silicato di calcio prodotte da reazioni pozzolaniche sono alquanto difficili da analizzare, perché i silicati di calcio sono molto fini e non sono facilmente distinguibili tramite XRD o microscopio [6].

Oltre ai minerali rilevati da XRD, sono stati identificati altri componenti utilizzando microscopi stereoscopici e polarizzatori. La tabella 3 mostra i risultati dell'analisi modale ottenuti utilizzando uno stereomicroscopio per granulometria grossolana rispetto a $63\mu\text{m}$, che risulta costituito soltanto da aggregato e non contiene materiale legante. I risultati hanno mostrato che la composizione di questa porzione varia notevolmente nelle malte studiate; in molti dei campioni studiati, calcite e/o quarzo risultano i componenti principali. L'aggregato in alcuni campioni è costituito principalmente da frammenti di ceramica. Quattro dei campioni hanno rivelato una notevole quantità di selce, mentre gli altri 3 presentavano cenere vulcanica. In due campioni sono stati occasionalmente identificati frammenti di carbone; la loro presenza sporadica è da ritenere accidentale, probabilmente a causa della contaminazione dal combustibile del forno. La maggior parte dei campioni contenevano resti di materiali organici (Fig. 5, Tabella 3). Anche se i campioni studiati sono datati a diversi periodi storici, l'indagine petrografica ha evidenziato che essi presentano leganti omogenei e coesivi che mostrano un forte legame legante-aggregato, e in tutti i leganti di calce che sono a grana fine raramente si verificano sottili cretture da ritiro (Fig. 5).

Alcuni dei campioni studiati contenevano particelle di calce spenta (Fig. 5a). In diverse malte sono state riscontrate reazioni di aggregato-legante agenti come nella pozzolana ed è stata registrata in alcuni campioni la presenza di frammenti di ceramica, selce, cenere vulcanica e/o carburante (Fig. 5b, c).

Secondo Pavia (2005), l'assenza di cretture nel legante indica un basso ritiro dei materiali che costituiscono il legante della malta. L'elevata superficie specifica della calce ed il basso ritiro suggeriscono che il calcare grezzo è stato cotto gradualmente [15].

Tabella 3. Risultati delle analisi modali dell'aggregato come mostrato dallo stereomicroscopio.

Numero di registrazione	Quarzo	Calcite	Frammento di ceramica	Selce	Cenere vulcanica	Resti di materiale organico
Br.06.A.A1.11	60	25	10	5	0	2
Br.06.A.A1.08	7	15	0	60	10	8*
Br.06.A.B10.05	35	5	25	35	0	0
Br.06.Necl. Tomb1.1	15	30	50	0	0	5*
Br.06.A.C1.16	6	4	0	90	0	0
Br.06.A.A9.7a	15	6	5	74	0	0
Br.06.A.A1.04	20	10	60	5	5	1
Br.07.B.A3.5	15	30	55	0	0	2
Br.06.A.A1.11b	55	40	5	0	0	1
Br.06.A.A1.c	54	40	5	0	<1	1
Br.06.A.C1.15	35	65	0	0	0	2
Br.06.A.A9.7b	20	5	10	65	0	0

*: Prevalentemente carbone

Boynton (1966) e Cowper (2000) hanno riportato che basse temperature di combustione e/o una durata breve di combustione producono la calce viva (ossido di calcio) desiderabile, che è altamente reattiva e di bassa suscettibilità al ritiro e presenta un'alta porosità e densità, mentre una temperatura di combustione elevata e lunghi periodi di calcinazione determinano una calce viva piuttosto dura che presenta alta suscettibilità alla formazione di fessurazioni, alta densità, bassa porosità e bassa reattività chimica [20 - 21]. La maggiore reattività del legante in alcune delle malte studiate è segnalata dal verificarsi della reazione intorno ai bordi dei grani aventi effetti pozzolanici, come la selce (Fig. 5b).

Escludendo il campione Br.06.A.C1.15, che è parte di una malta di mosaico, tutte le malte studiate sono più o meno idrauliche; contenevano una o più tipologie di materiali pozzolanici come frammenti di ceramica, selce, ceneri e/o cenere vulcanica. Tuttavia, secondo l'analisi petrografica, la maggior parte delle malte sono state realizzate con calce non idraulica e la loro idraulicità è dovuta all'aggiunta di materiali che agiscono come pozzolane. Ciò concorda con i risultati di Vicat (1997), il quale ha riferito che la prima produzione di calce idraulica calcificata risale intorno alla seconda metà del XVIII secolo e quindi è troppo posteriore rispetto alla malta studiata [22].

Nella tabella 4 viene rappresentata la proporzione in peso di aggregato/legante (F) nelle malte archeologiche di Barsinia. Solo 4 campioni avevano un (F) superiore a 1 e cioè Br.06.A.C1.16, Br.06.A.A1.08, Br.06.A.A9.7a e Br.06.A.A9.7b. Tre di questi campioni sono stati datati al periodo ellenistico, poiché contengono un elevato contenuto di materiali pozzolanici. Gli altri campioni avevano un valore inferiore a 1, indicando che la maggior parte delle malte di Barsinia contengono una proporzione di legante relativamente più elevata.

Molti studi di malte storiche hanno prodotto risultati che suggeriscono composizioni attraverso una (F) di 1, ad esempio 1 parte di calce legante in rapporto a 1 parte di aggregato, in contrasto con il rapporto 1:3 (F= 3) comunemente indicato negli attuali lavori di costruzione [23]. Il campione Br.06.A.C1.16 ha alta (F), è un piano compatto e possiede un alto contenuto di aggregati grezzi. Altri tre campioni hanno un (F) vicino a 3 ed assomigliano alla percentuale della miscela

nella malta attuale. L'elevato contenuto di legante in altri campioni con un basso (F), potrebbe essere attribuito alla presenza di legante non miscelato, frammenti di grumi di calce che non sono stati completamente miscelati con l'aggregato e di conseguenza hanno proprietà fisiche e chimiche diverse dalla pasta matrice. Non giocano il ruolo di un legante durante il processo di indurimento e, di conseguenza, le malte studiate (anche quelle con elevato contenuto di legante) non mostrano alcun processo di formazione di cretture notevole, nonostante il fatto che un elevato contenuto di legante nelle malte tenda a provocare la formazione di fessurazioni.

Il rapporto aggregato/legante per peso nelle malte di pavimentazione è molto superiore rispetto a quello delle malte di rivestimento e degli intonaci. Gli intonaci prelevati da cisterne (campioni Br.06.A.A9.7a e Br.06.A.A9.7b) contenevano un elevato quantitativo di aggregato in cui potrebbe essere rilevata una notevole concentrazione di componenti pozzolanici. La presenza di tali componenti nell'intonaco conferisce idraulicità sia alla malta che all'intonaco, minore solubilità in acqua e una maggiore stabilità. Il contenuto relativamente elevato di materiali pozzolanici in questi campioni è in linea con il fatto storico che i componenti pozzolanici sono stati preferiti dall'epoca ellenistica a quella del primo periodo bizantino in malte relative alle costruzioni acquifere come cisterne [24-25]. La porosità di questo tipo di intonaco è relativamente inferiore a quella di altri intonaci e malte.

Nella tabella 5 sono riportate le proprietà fisiche dei campioni studiati. La relativamente bassa differenza tra l'assorbimento di acqua a pressione atmosferica e l'assorbimento di acqua sotto vuoto in tutte le malte studiate è stata attribuita alla piccola quantità dei micropori; infatti, la maggior parte delle malte studiate hanno un grado di saturazione sopra 0.85. I risultati dei test di porosità hanno mostrato che le porosità dei campioni sono superiori a quelli della tipica gamma di malte di calce storiche [15]. La porosità dei campioni varia tra 32,78 e 68,35%; in base a questi risultati i campioni possono essere classificati in 2 gruppi: il primo gruppo, comprendente campioni con porosità inferiore al 45% (campioni Br.06.A.C1.16, Br. 06.A.A1.08, Br.06.A.A9.7a e Br.06.A.A9.7b), sono i campioni con la più alta densità apparente (1,46 e 1,78 g/cm³). Il secondo gruppo rappresenta i campioni con porosità superiore al 50% e bassa densità (0,81-1,30 g/cm³); questi campioni hanno un rapporto in peso tra aggregato/legante (F) basso, cioè compreso tra 0,22-0,68. La porosità svolge due ruoli diversi riguardo alla durabilità di malte e intonaci.

Da un lato, una buona porosità consente un interscambio superficiale assimilando anidride carbonica, che permette di migliorare il processo di carbonatazione della calce spenta per produrre carbonato di calcio [26]. D'altra parte, malte e pietre con elevata porosità sono più suscettibili al deterioramento sotto l'effetto del gelo, dalla cristallizzazione dei sali e dai fattori di deterioramento chimico. Secondo Sa'nchez-Moral et al. (2005) l'alta porosità di malte e intonaci può essere attribuita alla fessurazione in seguito all'essiccazione collegata all'alto contenuto di legante [26]. Tuttavia, la maggior parte dei campioni non ha mostrato tali fessurazioni. Invece, la maggior parte dei campioni contiene resti di materiali organici, come paglia e ossa, e la decomposizione di questi materiali lascia cavità che aumentano la porosità di malte e intonaci.

Tabella 4. Rapporto in peso tra aggregato/legante per le malte studiate

Numero di registrazione	Punti		Rapporto in peso tra aggregato/legante (F)
	Impasto	Aggregato	
Br.06.A.A1.11	314	72	0.68
Br.06.A.A1.08	146	181	3.54
Br.06.A.B10.05	247	63	0.31
Br.06.Necl.Tomb1.1	345	28	0.24
Br.06.A.C1.16	8	312	150.7
Br.06.A.A9.7a	189	173	2.73
Br.06.A.A1.04	242	61	0.28
Br.07.B.A3.5	321	47	0.43
Br.06.A.A1.11b	356	43	0.31
Br.06.A.A1.c	367	58	0.45
Br.06.A.C1.15	517	46	0.22
Br.06.A.A9.7b	183	175	2.86

Tabella 5. Proprietà fisiche dei campioni studiati

Campione N.	Assorbimento di acqua a pressione atmosferica	Assorbimento di acqua sotto vuoto	Porosità	Grado di saturazione	Densità assoluta	Densità apparente
	Massa %	Massa %	Vol. %	/	g/cm ³	g/cm ³
Br.06.A.A1.11	41.38	46.27	55.27	0.89	2.67	1.19
Br.06.A.A1.08	18.81	22.20	37.25	0.86	2.67	1.68
Br.06.A.B10.05	59.04	64.14	62.15	0.92	2.56	0.97
Br.06.Necl.Tomb1.1	76.57	84.06	68.35	0.91	2.57	0.81
Br.06.A.C1.16	16.03	18.40	32.78	0.87	2.65	1.78
Br.06.A.A9.7a	18.83	20.43	34.61	0.92	2.59	1.69
Br.06.A.A1.04	46.96	50.72	56.79	0.93	2.59	1.12
Br.07.B.A3.5	40.03	47.24	55.95	0.85	2.69	1.18
Br.06.A.A1.11b	40.11	45.32	54.86	0.88	2.68	1.21
Br.06.A.A1.c	43.08	47.36	55.27	0.91	2.61	1.17
Br.06.A.C1.15	28.00	30.02	43.91	0.93	2.61	1.46
Br.06.A.A9.7b	34.30	39.49	51.40	0.87	2.68	1.30

4. Conclusioni

Nonostante il numero limitato di campioni disponibili per questo studio, la caratterizzazione chimico-fisica dei campioni del sito archeologico di Barsinia ha rivelato differenze compositive e tessiturali significative. Di conseguenza, nessuna malta di restauro generale o gesso possono essere adottate per l'intero sito per sostituire l'originale deteriorato.

L'alta porosità delle malte e degli intonaci sembra essere il più importante fattore di deterioramento intrinseco provocando il loro stesso deterioramento. Il grado di saturazione dei campioni studiati è maggiore di 0,85 e le pietre e le malte aventi tale valore sono altamente sensibili al gelo [27- 28]. Pertanto, per proteggerli, malte e intonaci, in particolare, dovrebbero essere consolidati subito dopo lo scavo con un consolidante adeguato.

Le differenze composizionali e tessiturali tra i campioni sembrano legati alla funzione delle malte piuttosto che al loro periodo di produzione, ad esempio nessuna evoluzione delle tecniche di esecuzione può essere tracciata. I risultati XRD hanno mostrato che tra la malta studiata e l'intonaco non sono state rilevate importanti differenze nella composizione mineralogica, tranne nel campione Br.06.A.C1.16; tutti i campioni sono costituiti principalmente di calcite e quarzo, minerali che sono localmente disponibili nelle rocce calcaree e nei sedimenti del sito. Tuttavia, le indagini petrografiche hanno rivelato notevoli differenze di composizione tra i campioni in termini di componente aggiunto intenzionalmente come cenere d'ossa, materiali pozzolanici, eccetera.

L'alta porosità, la forte coesione del legante e il legame ottimale aggregato-legante della maggior parte delle malte analizzate insieme alla presenza di reazione aggregato-legante denotano un'elevata reattività per la calce che concorda con una cottura graduale e che produce la migliore malta di calce. Pertanto, il popolo di Barsinia aveva le conoscenze necessarie e l'esperienza per la produzione di malte e intonaci di buona qualità.

Grazie alla caratterizzazione chimico-fisica condotta in questo studio, è possibile preparare una miscela per il restauro avente caratteristiche compatibili con le malte originali e la pietra costituenti le murature, per il restauro di strutture in Barsinia e in altri siti archeologici simili.

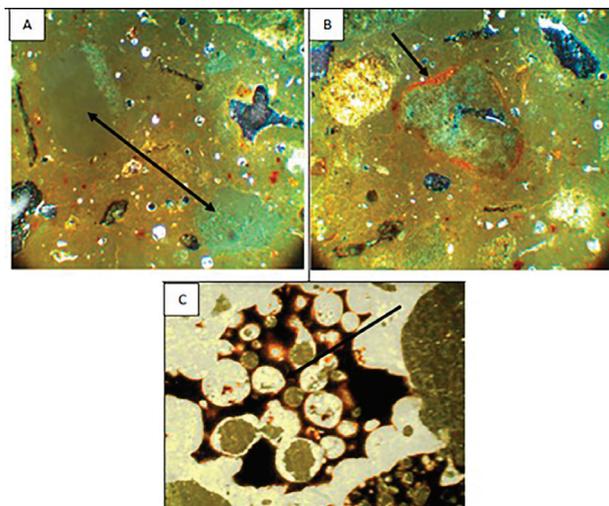


Fig. 5. Microfotografia (X100) a. XPL che mostra calce spenta, b. XPL che mostra la reazione intorno al bordo del grano della selce e c. PPL carbone

Note biografiche

Mustafa Al-Naddaf è professore associato presso il Dipartimento di Conservazione e gestione delle risorse culturali e vicepresidente della Facoltà di Archeologia e Antropologia dell'Università di Yarmouk, in Giordania. Possiede un B.Sc., M.Sc. in geologia e un Ph.D. in conservazione dei materiali lapidei conseguiti alla Free University of Berlin e Rathgen-Forschungs Labor, in Germania. Il suo interesse di ricerca si concentra in generale sulle aree della conservazione e dell'analisi scientifica dei materiali archeologici.

Lamia El-Khouri è professore associato presso il Dipartimento di Archeologia dell'Università di Yarmouk, in Giordania. Possiede un BA, MA, in Archeologia e un Ph.D. in Archeologia Classica, Manheim University, Germania. Il suo interesse di ricerca si concentra su diversi argomenti relativi all'Archeologia Classica in Oriente.