



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Sede Amministrativa: Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Geoscienze

SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLA TERRA

INDIRIZZO: UNICO

CICLO XXI

**STUDIO ARCHEOMETRICO DELL'EVOLUZIONE TECNOLOGICA
DELLA PRODUZIONE CERAMICA DEL SITO DI TAYMA (ARABIA SAUDITA)
IN QUASI 2000 ANNI DI STORIA**

Direttore della Scuola : Ch.mo Prof. Gilberto Artioli

Supervisore :Ch.mo Prof. Claudio Mazzoli

Dottorando : Mirko Giannetta

RIASSUNTO

Questo studio si focalizza sulla caratterizzazione archeometrica di ceramiche datate dall'età del Ferro all'epoca Islamica del sito archeologico di Tayma (nord-ovest dell'Arabia Saudita), allo scopo di definirne la provenienza, le tecnologie di produzione e relativa evoluzione nel tempo. Questa ricerca è parte di un progetto congiunto coordinato dall'Istituto Archeologico Tedesco di Berlino che coinvolge il Dipartimento di Antichità Saudite e il Dipartimento di Epigrafia e Archeologia dell'Università King Saud di Rijad. Questo progetto ha come scopo lo studio della cultura materiale e dei più classici aspetti archeologici di Tayma, un sito collocato nella provincia di Tabuk (latitudine 27° 37' N, longitudine 38° 28' E) nel nord ovest dell'Arabia Saudita.

L'importanza del sito archeologico di Tayma è da collegarsi alla sua continua occupazione attraverso molti millenni. La presenza di un'importante falda acquifera e lo sviluppo di un vasto palmeto ha determinato lo sviluppo del sito, che si colloca in una posizione strategica lungo le principali vie commerciali nella parte occidentale della penisola arabica. Numerose testimonianze indicano come Tayma fosse coinvolta in scambi commerciali e culturali con le popolazioni del Mediterraneo, della Mesopotamia, dell'Egitto e del meridione della penisola Arabica (Avanzini, 1997, Eichmann *et al.*, 2006, Hausleiter, 2006). In questo contesto, il materiale ceramico gioca un ruolo fondamentale, dato che le sequenze stratigrafiche sia a livello locale che regionale si basano sulla continuità o discontinuità nel tempo delle sue tipologie. Pertanto l'analisi archeometrica della ceramica di Tayma può fornire importanti informazioni sia sulla tecnologia di produzione, che sulla provenienza, permettendo di identificare i casi di importazione e/o imitazione locale. Per questa ragione 238 frammenti di ceramica, di cui 100 provenienti da ricognizione superficiale e 138 da contesti stratigrafici datati tra l'età del Ferro Antico ed il Periodo Islamico, sono stati studiati e confrontati con una serie di materiali argillosi e sabbiosi campionati nei dintorni di Tayma.

Tutti i campioni sono stati studiati al microscopio ottico, con lo scopo di definire gruppi petrografici omogenei per microstruttura della pasta di fondo, caratteristiche tessiturali, e composizione degli inclusi. La composizione chimica e mineralogica dei campioni ceramici provenienti da contesti stratigrafici e quella delle argille campionate sono state determinate tramite diffrazione dei raggi X e fluorescenza dei raggi X al fine di definire le temperature di cottura e la possibile provenienza dei materiali archeologici. È stato inoltre adottato un approccio statistico multivariato per elaborare i dati analitici con lo scopo principale di distinguere tra oggetti di produzione locale e manufatti importati e definire le ricette di

produzione adottate attraverso i secoli. Specifiche microstrutture formatesi durante la cottura in determinati campioni sono state inoltre analizzate al microscopio elettronico a scansione. Per questo motivo, le ceramiche provenienti da contesti stratigrafici e quelli relativi alle argille sono stati analizzati da un punto di vista petrografico, mineralogico, microstrutturale e chimico, ed i dati sono stati trattati utilizzando strumenti statistici multivariati.

La maggior parte della ceramica di Tayma è stata prodotta localmente secondo diverse ricette, che mostrano una diretta correlazione con le varie epoche storiche. Ciò mostra un cambiamento sistematico nella tecnologia di produzione in un periodo di circa due millenni. Solo poche classi ceramiche, per lo più invetrate, risultano importate.

Sulla base della composizione minero-petrografica degli inclusi e delle caratteristiche tessiturali degli impasti ceramici, sono stati individuati nove gruppi petrografici principali. Il gruppo 1 è caratterizzato da inclusi a grana fine costituiti prevalentemente da quarzo e, a volte, da frammenti litici di siltiti ed areniti. Lo stesso tipo di inclusi è stato identificato nel gruppo petrografico 5 che tuttavia è caratterizzato da inclusi a grana più grossolana. Il gruppo 2 mostra una matrice povera in quarzo, ha una grana fine e presenta rari inclusi prevalentemente di rocce argillose (ARF). Il gruppo 3 mostra inclusi di ARF, quarzo e rocce silicoclastiche come siltiti e areniti ricche in quarzo, di granulometria da fine a grossolana. Includi simili caratterizzano il gruppo 4 che però manca della frazione fine. Il gruppo 6 differisce dagli altri per la presenza di inclusi di quarzo e feldspati, mentre il gruppo 8 si caratterizza per la presenza di inclusi di rocce vulcaniche. Nonostante i campioni appartenenti al gruppo 7 mostrino al microscopio ottico la tessitura e il tipo di inclusi simili a quelli del gruppo 1, i spettri di diffrazione mostrano la presenza di fasi come la gehlenite, che suggerisce la presenza di carbonati nell'originale materiale argilloso. Infine nel gruppo 9 la pasta di fondo è assente e le inclusioni sono costituite da grani angolari di quarzo.

La composizione minero-petrografica degli inclusi della maggior parte dei gruppi (1, 2, 3, 4, 5) è compatibile con la geologia dell'area circostante Tayma, che consiste in sequenze sedimentarie paleozoiche, per lo più rappresentate da argilliti, siltiti e areniti ed occasionalmente da rocce carbonatiche contenenti selce (Le Nindre *et al.*, 2003; Hussain, 2007), associate a depositi quaternari di sabbie che spesso formano ampi sistemi di dune, e secondariamente ad argilliti ed evaporiti. I campioni che appartengono al gruppo 8 sono caratterizzati dalla presenza di inclusi di basalti e di vulcaniti acide, che affiorano solamente a una distanza di almeno cento chilometri da Tayma, così come un campione del gruppo 6, i cui inclusi derivano da rocce plutoniche alcaline. Pertanto, sulla base della corrispondenza mineralogica e litologica, la maggior parte degli impasti ceramici sono stati probabilmente

prodotti localmente utilizzando varie ricette secondo le quali al materiale argilloso sono stati aggiunti smagranti disponibili localmente, prevalentemente della granulometria delle sabbie. Comparando la composizione chimica dei frammenti ceramici con quella delle argille provenienti dai dintorni di Tayma, si vede chiaramente come parte dei materiali ceramici siano stati importati. L'analisi statistica multivariata condotta secondo il metodo dell'Analisi delle Componenti Principali (PCA) ha rivelato che i campioni appartenenti ai gruppi 1, 2, 3, 4 e 5 formano un gruppo unico e omogeneo insieme alle argille campionate nella zona, mentre tutti gli altri gruppi (6, 7, 8, 9) sono chimicamente incompatibili con i materiali dell'area circostante Tayma, il che suggerisce che siano di importazione. Le ceramiche appartenenti al gruppo 9 corrispondono petrograficamente e composizionalmente a delle *Islamic Stonepaste* e le *Egyptian Faïence* (Mason & Tite, 1994; Tite *et al.* 1983, 1988).

Il trattamento statistico multivariato dei dati chimici mostra anche che le ricette per la produzione ceramica cambiò nel tempo, sia in termini di abbondanza e tipologia dello smagrante, che di composizione del materiale argilloso di partenza. La composizione chimica delle argille è risultata giacere lungo linee di mescolamento tra i probabili materiali argillosi di partenza e diversi tipi di smagranti, fornend un importante strumento per una migliore descrizione del processo di tempera.

Per quanto riguarda la tecnologia di cottura, la composizione mineralogica mostra che tutti i campioni prodotti localmente contengono mullite, spinello e quarzo. Tale associazione mineralogica indica l'utilizzo di un'argilla caolinica e temperature di cottura di circa 1000 °C (Aras, 2004). Tale risultato è in accordo con la composizione mineralogica dell'argilla campionata nei dintorni di Tayma, composta da caolinite e, in secondo luogo, smectite, quarzo e goethite. Alcuni campioni dei gruppi 1, 3, 4 e 5 contengono ARF vetrificati, caratterizzati da una struttura vescicolare prodottasi per degassamento durante la fusione. L'associazione mineralogica di tali campioni è caratterizzata dalla presenza di ercinite e dall'assenza di ematite, il che suggerisce temperature di cottura superiori ai 1000°C (Letsch & Noll, 1983). Alcuni campioni ceramici archeologici contenenti ARF sono stati sottoposti a ricottura a 1100°C e 1200°C. La struttura vescicolare degli ARF e l'associazione contenente ercinite e priva di ematite è stata riprodotta a 1200°C, suggerendo che i campioni contenenti ARF vetrificati siano stati cotti a temperature comprese tra 1100°C e 1200°C. L'associazione mineralogica delle ceramiche di importazione è molto diversa da quella delle ceramiche prodotte localmente, ed è caratterizzata da fasi come gehlenite e diopside, che indicano l'utilizzo di un'argilla calcarea e temperature di cottura superiori agli 850°C (Riccardi *et al.*, 1999).

Considerando l'evoluzione nel tempo delle ricette di produzione, si evidenziano alcuni punti importanti. Le ceramiche dell'età del Ferro Antico appartengono ai gruppi petrografici 1 e 3, mentre nel Ferro Tardo compaiono nuove ricette riconducibili ai gruppi 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. Tale varietà di materiale suggerisce sia una evoluzione della produzione locale a Tayma, sia il fiorire di commerci e scambi con altre popolazioni che hanno permesso l'arrivo a Tayma di nuovi oggetti.

ABSTRACT

This study focuses on the archaeometric characterization of Iron Age to Islamic Period pottery from the archaeological site of Tayma (north-western Saudi Arabia), with the main aim of defining the provenance, the production technology and its evolution over time. This research is part of a joined-project coordinated by the German Archaeological Institute of Berlin and involving the Saudi Arabian Department of Antiquity and the Department of Archaeology and Epigraphy of King Saud University (Riyadh). This project aims to study the material culture as well as the more classical archaeological aspects of Tayma, a site located in the Tabuk province (latitude 27° 37' N, longitude 38° 28' E) north-western Saudi Arabia. The importance of the archaeological site of Tayma is related to its almost continuous occupation throughout several *millennia*. The age of the material here considered is from the Early Iron Age to the Islamic Period. The presence of an important aquifer and a palm grove determined the site to develop and to become a reference point in the trades within the Arabian Peninsula desert steppe area. Numerous attestations indicate that Tayma was involved into commercial and cultural exchanges with the Mediterranean, Mesopotamian, Egyptian and Southern Arabian Peninsula people (Avanzini, 1997, Eichmann *et al.*, 2006, Hausleiter, 2006). In this frame, the ceramic materials play an important role, since the local and regional stratigraphic sequences are based on the continuity versus discontinuity of their typology over time. Therefore, the archaeometrical analysis of the pottery at Tayma can supply important information both on the ceramic production technology as well as on the provenance, allowing the identification of cases of importation and/or local imitation. For this reason, 238 potsherds, 100 from a superficial survey and 138 from stratigraphic contexts dated between Early Iron Age and Islamic Period were studied and compared with a set of clayey and sandy materials collected from the surroundings of Tayma.

All the samples were studied in optical microscopy, in order to define homogeneous petrographic groups in terms of groundmass microstructure, textural features and composition of inclusions. The mineralogical and chemical composition of both potsherds from stratigraphic contexts and geological clay samples were determined by X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence (XRF), in order to provide constraints to the definition of the firing temperature and possible provenance of the archaeological materials. A multivariate statistical approach was also adopted to process the analytical data with the main aim of distinguishing locally-made and imported objects, and defining the production recipes adopted over time. Detailed analysis of specific microstructures formed during the firing

process were also analysed on selected samples in scanning electron microscopy. For this reason, both stratigraphically dated potsherds and clayey materials collected in the surroundings area of the archaeological site were analysed under petrographic, mineralogical, microstructural and chemical viewpoints and the analytical data were processed using multivariate statistical tools.

Most of the pottery at Tayma was locally produced according to different recipes, which show a straight correlation with the age. This indicates a systematic change in the pottery production technology over the period of about two millennia here considered. The majority of the pottery is locally produced, and only few ceramic classes, mainly glazed ware, resulted to be imported.

On the basis of the mineral-petrographic composition of inclusions and the textural features of the ceramic pastes, 9 main petrographic groups were defined. Group 1 is characterised by fine grained inclusions mostly made of quartz and sometimes sandstone and siltstone rock fragments. The same kind of inclusions was also identified in petrographic group 5, which is however characterized by coarser grained inclusions. Group 2 displays a fine-grained and quartz-poor matrix and bears rare inclusions mostly of argillaceous rock fragments (ARF). Group 3 shows fine to coarse grained inclusions made of ARF, quartz grains and quartz-rich siltstone and sandstone rock fragments. Similar types of inclusions characterise also petrographic group 4, although it is lacking in fine fraction. Group 6 differs from the others for the presence of extremely coarse grained inclusions of quartz and feldspar, while group 8 contains volcanic rock inclusions. Although samples belonging to group 7 display under the optical microscope texture and type of inclusions similar to those of group 1, diffraction patterns show the presence in the matrix of gehlenite, suggesting the presence of carbonate in the original clayey material. Lastly, in potsherds of group 9 the groundmass is almost absent and the inclusions are made of angular grains of quartz.

The mineral-petrographic composition of inclusions in the majority of the groups (1, 2, 3, 4, 5) is consistent with the geology of the area surrounding Tayma, which consists of Palaeozoic sedimentary sequences, mainly represented by mudstones, sandstones, siltstones and occasionally limestones containing rare cherts (Le Nindre *et al.*, 2003; Hussain, 2007), associated to Quaternary deposits of sand, often forming large dune systems, and subordinated clays and evaporites. Samples belonging to group 8 are characterised by basalt and acid volcanic rock inclusions which are only outcropping at least one hundred kilometres far from Tayma, as well as those belonging to group 6, the inclusions of which derive from an alkaline granitoid rocks. Therefore on the basis of the mineralogical and lithological match,

most of the ceramic pastes were probably locally produced according to different recipes, for which locally available tempers, mainly represented by sand, were added to a clay material. When potsherds are compared with the clay materials from the surrounding of Tayma in terms of chemical composition, it is clear that part of the pottery was imported. Statistical multivariate analysis carried out by the Principal Component Analysis (PCA), revealed that potsherds of groups 1, 2, 3, 4 and 5 form a unique and homogeneous group similar to the clay materials collected in the area, whereas all other groups (6, 7, 8, 9) are chemically not comparable with the clay materials of the area of Tayma, indicating that they were probably imported. Potsherds belonging to group 9 petrographically and compositionally correspond to an *islamic stonepaste* and an *egyptian faience*, respectively.

Multivariate statistical treatment of chemical data also shows that recipes for the pottery production changed over time, both in terms of abundance and type of temper, and of composition of the starting clayey materials. The chemical compositions of the pottery resulted to lie on mixing trends between possible starting clayey materials and different types of temper, supplying an important tool to better describe tempering processes.

As for the firing technology, the mineralogical composition shows that all the potsherds locally produced contain mullite, spinel and quartz. This mineralogical assemblage indicates that the base-clay was kaolinitic in composition and firing temperatures around 1000°C (Aras, 2004). This result is in agreement with the mineralogical composition of the clay materials collected from the surroundings of Tayma, composed of kaolinite and subordinate illite, smectite, quartz and goethite. Some samples of groups 1, 3, 4 and 5 bears vitrified ARFs showing a vesicular texture caused by degassing during melting. The mineralogical assemblage of those samples is characterised by the presence of hercynite and the absence of hematite suggesting firing temperatures exceeding 1000°C (Letsch & Noll, 1983). A few archaeological samples bearing ARFs were fired at 1100°C and 1200°C. The vesicular texture and hercynite-bearing and hematite-free assemblage were reproduced at 1200°C, suggesting that samples containing vitrified ARFs were fired between 1100°C and 1200°C. The mineralogical assemblage of the imported potsherds is very different, since they contain gehlenite and diopside, indicating that a calcareous base-clay was used for their production and that firing was run at temperature above 850°C (Riccardi *et al.*, 1999). When considering the evolution of the production recipes over time, some interesting points arise. In the Early Iron Age potsherds belong to petrographic groups 1 and 3, while during the Late Iron Age new recipes appeared with the presence of the pottery belonging to petrographic groups 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 and 8.

This variety of materials suggests both a marked evolution in the pottery production at Tayma and the flourishing of trades and exchanges with other peoples which brought new ceramic objects from abroad.

INDICE

INTRODUZIONEPag 13
1 TAYMA: INQUADRAMENTO GEOARCHEOLOGICO, MATERIE PRIME E MATERIALI CERAMICI	Pag.15
1.1 Inquadramento geografico.....	Pag 15
1.2 Inquadramento storico-archeologico.....	Pag.16
1.3 Inquadramento geologico.....	Pag.19
1.4 Materiali geologici e archeologici: strategie e metodi di campionamento.....	Pag.26
2 MATERIALI CERAMICI E ARGILLOSI: CARATTERIZZAZIONE ARCHEOMETRICA	Pag 35
2.1 Analisi petrografica.....	Pag 36
2.2 Microscopia elettronica a scansione (SEM).....	Pag 46
2.3 Analisi diffrattometrica ai raggi X (XRD).....	Pag.55
2.4 Analisi chimica in fluorescenza raggi X ed elaborazione statistica dei dati...Pag	61
2.5 Caratterizzazione dei materiali argillosi.....	Pag. 69
3 PROVENIENZA E TECNOLOGIA PRODUTTIVAPag.77
4 CONCLUSIONI	Pag.97
BIBLIOGRAFIA	Pag.101

ALLEGATO A

ALLEGATO B

ALLEGATO C

ALLEGATO D

INTRODUZIONE

Oggetto della presente tesi di dottorato è lo studio archeometrico delle ceramiche provenienti dal sito archeologico di Tayma in Arabia Saudita, di età compresa tra l'età del Ferro ai periodi islamici, al fine di ottenere informazioni sulla provenienza e sulle tecnologie di produzione dei manufatti ceramici. Lo studio nasce in collaborazione con il Deutsches Archaeologisches Institut di Berlino nell'ambito di un progetto volto allo studio archeologico del sito di Tayma, con la partecipazione del Dipartimento delle Antichità dell'Arabia Saudita e del Dipartimento di Archeologia ed Epigrafia della King Saud University di Riyadh.

Il sito deve la sua importanza a diversi fattori storici, geografici e geomorfologici. La presenza di un'oasi in una zona a clima decisamente arido, hanno reso il sito luogo ideale per l'approvvigionamento di acqua per le popolazioni nomadi fin dal Neolitico (Eichmann *et al.*, 2006). Nel corso dei secoli gli insediamenti divennero stanziali e le popolazioni si dedicarono alla coltivazione del palmeto che contraddistingue ancora oggi l'oasi (Hausleiter, 2006). Lo sviluppo economico della città divenne importante soprattutto grazie alla sua posizione strategica lungo le linee commerciali che attraversavano la Penisola Araba. Di qui, infatti, passava un'importante via di scambi commerciali che collegava il bacino del Mediterraneo a nord, con le aree meridionali della Penisola Araba (Avanzini, 2003). L'importanza della città di Tayma è dovuta anche al fatto che nel VI secolo a.C. divenne dimora per circa 10 anni dell'ultimo re babilonese Nabodinus (Schaudig, 2001) di cui è stata rinvenuta un'importante stele (Eichmann *et al.*, 2006). Indagini archeologiche sulle strutture abitative rinvenute, suffragate da datazioni al radiocarbonio, registrano fasi di occupazione più o meno continue fino al II-III secolo d.C. (Eichmann *et al.*, 2006). Gli insediamenti pre-islamici risultano solo in parte coperti da quelli dei primi periodi islamici. La parte centrale del sito venne, infatti, lasciata in rovina e occupata da una fattoria (Hausleiter, 2006).

In definitiva il sito archeologico di Tayma è di estremo interesse perché registra un'occupazione pressoché continua nei millenni e documenta una storia fatta di scambi commerciali e culturali con le popolazioni del bacino del Mediterraneo, della Mesopotamia, dell'Egitto e del sud della Penisola Araba. In un tale contesto indagare sulla provenienza e sulla tecnologia produttiva della ceramica rinvenuta a Tayma permette non solo di definire l'evoluzione della produzione ceramica del sito in un intervallo temporale di circa 2000 anni, ma anche di aggiungere elementi importanti per la ricostruzione della storia del Medio Oriente e dei suoi scambi con il resto del mondo antico.

1 TAYMA: INQUADRAMENTO GEOARCHEOLOGICO, MATERIE PRIME E MATERIALI CERAMICI

1.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

La moderna città di Tayma si trova a nord-ovest della Penisola Araba, occupata per la maggior parte dall'Arabia Saudita, e più precisamente a $27^{\circ} 37'$ N di latitudine e $38^{\circ} 32'$ E di longitudine, ad un'altitudine di circa 800 m s.l.m. (fig. 1.1a). La città è situata nella parte sud-est della provincia di Tabuk, città dalla quale dista circa 260 Km, ed è collocata a circa 400 Km a nord di Medina. Il sito archeologico di Tayma è adiacente alla città attuale e la sua struttura principale si trova nel cuore dei moderni insediamenti, in una zona chiamata Qraya, rilevata topograficamente ed ubicata appena a sud del palmeto che individua fin dai tempi antichi l'oasi (fig 1.1b).

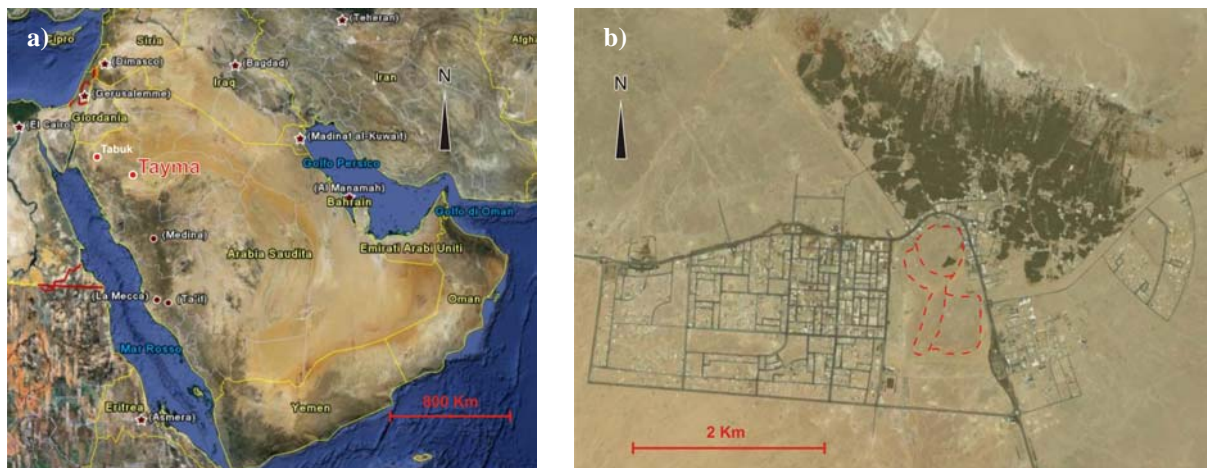


Figura 1.1: a) Collocazione geografica della città di Tayma nella Penisola Araba; b) Immagine satellitare dell'area di Tayma, a nord il palmeto, al centro, contraddistinto da tratteggio rosso, la struttura principale del sito (immagini satellitari da *Google Earth 2009*; modificate).

1.2 INQUADRAMENTO STORICO-ARCHEOLOGICO

La possibilità di approvvigionamento di acqua in un ambiente desertico, ha reso Tayma il sito ideale per lo stanziamento di popolazioni in tutte le epoche storiche. Petroglifi riferibili al Neolitico (Khan, 1993) ritrovati a sud-ovest di Tayma (fig. 1.2), documentano come la zona fosse interessata fino al III millennio a.C. da passaggi di nomadi dediti all'allevamento del bestiame (Eichmann *et al.*, 2006a). Non è chiaro in quale periodo le popolazioni divennero stanziali nella zona e quando gli insediamenti si siano sviluppati fino a costituire il primo tessuto urbano di Tayma (Hausleiter, 2006).



Figura 1.2: Petroglifi con rappresentazioni di uomini e animali (*Jubba-style*; Neolitico).

Le indagini archeologiche condotte a Tayma da Bawden *et al.* (1980), hanno permesso di identificare fin dall'inizio imponenti sistemi murari. La cinta muraria esterna è costituita da mattoni di fango e blocchi di arenaria, e presenta una forma alquanto articolata. Inoltre, dalle mura perimetrali della città si snodano due diramazioni che si estendono verso nord-ovest e nord-est e si richiudono poi a nord circondando le aree coltivate (fig. 1.3). Questa struttura aveva probabilmente la funzione di proteggere l'esteso palmeto, elemento fondamentale per la sopravvivenza della popolazione di Tayma (Hausleiter, 2006).

A partire dal 2004 sono state condotte indagini nell'ambito del progetto di cooperazione tra il *Deutsches Archaeologisches Institut* di Berlino, il Dipartimento delle Antichità dell'Arabia Saudita e il Dipartimento di Archeologia ed Epigrafia della *King Saud University* di Riyadh. Gli scavi si sono concentrati nella zona topograficamente rilevata denominata Qraya sulle strutture già identificate da Bawden. Si sono distinte, per la cinta muraria esterna della città, diverse fasi di costruzione.

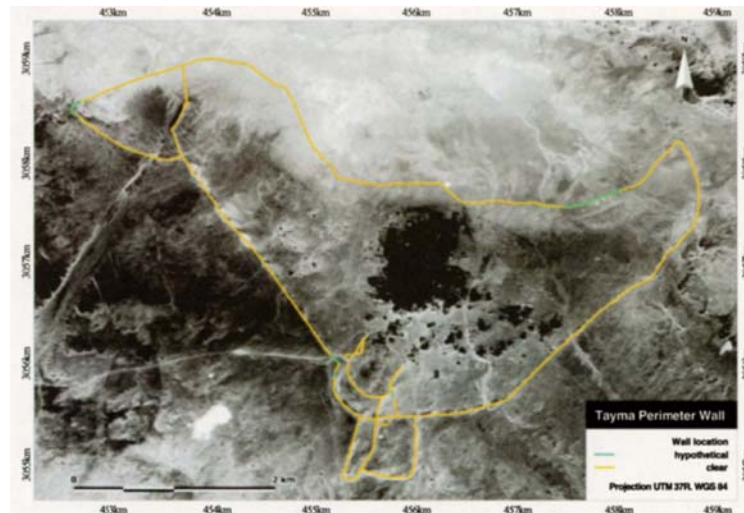


Figura 1.3: Ricostruzione delle mura perimetrali della città di Tayma e dintorni su fotografia aerea degli anni '50 (Hausleiter, 2006).

Le datazioni ^{14}C di resti di carbone presenti nei mattoni di fango dei livelli stratigrafici più antichi, hanno permesso di definire che la fase più antica della costruzione risale al XIX-XVIII secolo a.C. (Eichmann *et al.*, 2006b) (fig. 1.4). L'ultima fase risale invece al IX-VIII secolo a.C. come attestato dalle datazioni ^{14}C sui resti rinvenuti all'interno della struttura abitativa trovata a ridosso delle mura e che stratigraficamente chiude la fase costruttiva della muratura esterna (Eichmann *et al.*, 2006b).

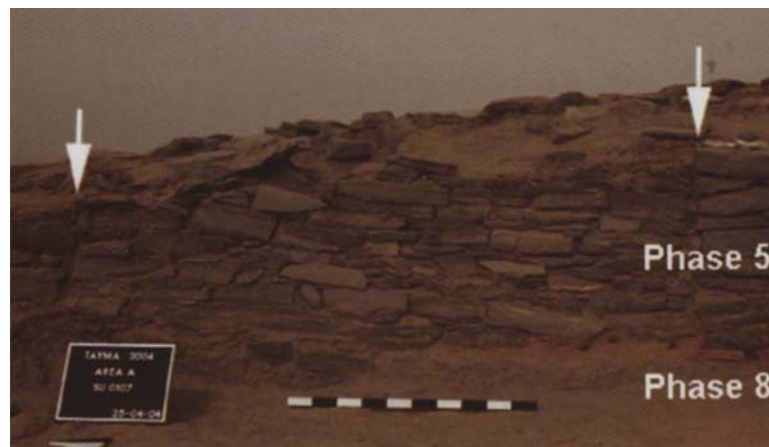


Figura 1.4: Riconoscimento delle diverse fasi costruttive della muratura esterna. La parte sottostante costruita in mattoni di fango (fase 8), mentre quella superiore da conci in arenaria (fase 5) (Eichmann *et al.*, 2006b).

Per quanto riguarda la parte centrale e più elevata della Qraya, Bawden *et al.* (1980) individuarono altre strutture. Gli scavi condotti dalla missione tedesco-saudita hanno messo in luce la presenza di diverse strutture abitative, la più antica delle quali è databile, in base al ritrovamento sulla muratura di un'iscrizione, al V-IV secolo a.C. (Eichmann *et al.*, 2006b),

mentre la fine dell'attività costruttiva risale al II-III secolo d.C., come attestato da datazioni ^{14}C di resti di carbone (Eichmann *et al.*, 2006b).

Di rilevante importanza nel sito è inoltre la presenza di un pozzo con un diametro di 18 metri, definito Hadaj, tuttora ben visibile (fig 1.5), scavato per la prima volta nell'VI a.C. e più volte ricostruito. Questo ha permesso lo sfruttamento delle risorse idriche di Tayma fin dal I millennio a.C. (Eichmann *et al.*, 2006a). La prima iscrizione che riguarda la città risale al VII secolo a.C. e parla del commercio tra Tayma e la città di Saba (Cavigneaux & Khalil, 1990). Lo sviluppo della città fu molto legato a tali scambi. Tayma si poneva, infatti, lungo la via commerciale che da nord raggiungeva il sud della Penisola Araba dove si producevano le spezie ma soprattutto l'incenso molto richiesto in tutti i templi religiosi del Mediterraneo e del Medio Oriente (Avanzini, 1997).



Figura 1.5: Pozzo Hadaj.

Tayma è conosciuta inoltre per essere stata la dimora per circa 10 anni dell'ultimo re babilonese Nabonidus che nel VI secolo a.C. la conquistò allo scopo di controllare le città carovaniere della regione (Schaudig, 2001). Proprio a Nabonidus è attribuita la stele rinvenuta durante gli scavi del 2004 (fig. 1.6) (Eichmann *et al.*, 2006a). Il ritrovamento di sculture, rilievi e teste raffiguranti tori riferibili al dio Šalm, venerato nella zona intorno alla metà del I millennio a.C., fanno pensare a contatti con la cultura egiziana che riporta iconografie religiose molto simili nello stesso periodo (Dalley, 1986; Hausleiter, 2006). Durante il periodo dell'Impero Nabateo, di cui la città faceva parte, intercorrevano relazioni tra la grande città di Mada'in Salih e Tayma come testimonia il ritrovamento a Tayma di un caratteristico capitello nabateo e di un bruciatore di incenso con iscrizioni nabatee (Hausleiter, 2006).



Figura 1.6. Stele di Tayma del re Nabonidus (Eichmann *et al.*, 2006).

Gli studi riguardanti i reperti dei primi periodi islamici documentano come gli insediamenti pre-islamici furono solo in parte ricoperti. In particolare la parte centrale del sito venne lasciata in rovina e occupata da fattorie (Hausleiter, 2006).

1.3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

1.3.1 Geologia della Penisola Araba

La penisola Araba è caratterizzata nella parte centro occidentale dalla presenza di rocce precambriane che vanno a costituire lo Scudo Arabico (*Arabian Shield*) (fig. 1.7). Esso è l'unità strutturale più antica della penisola formatasi insieme allo Scudo Nubiano (*Nubian Shield*) attualmente affiorante nel settore nord-orientale del continente africano (fig. 1.8).

La formazione dello Scudo Arabo-Nubiano (*Arabian-Nubian Shield*) può essere descritta schematicamente in 4 fasi distinte (Stern *et al.*, 2006), come rappresentato in figura 1.9. Alla prima fase divergente di rottura del supercontinente Rodinia (900-850 Ma), è seguita l'apertura dell'Oceano Mozambicano (870-690 Ma), e successivamente la chiusura di questo Oceano e conseguente collisione continentale (630-600 Ma). Un'ultima fase di compressione e deformazione (600-540 Ma) ha determinato la formazione dell'Orogeno Africano Orientale, rappresentato a nord dallo Scudo Arabo-Nubiano.

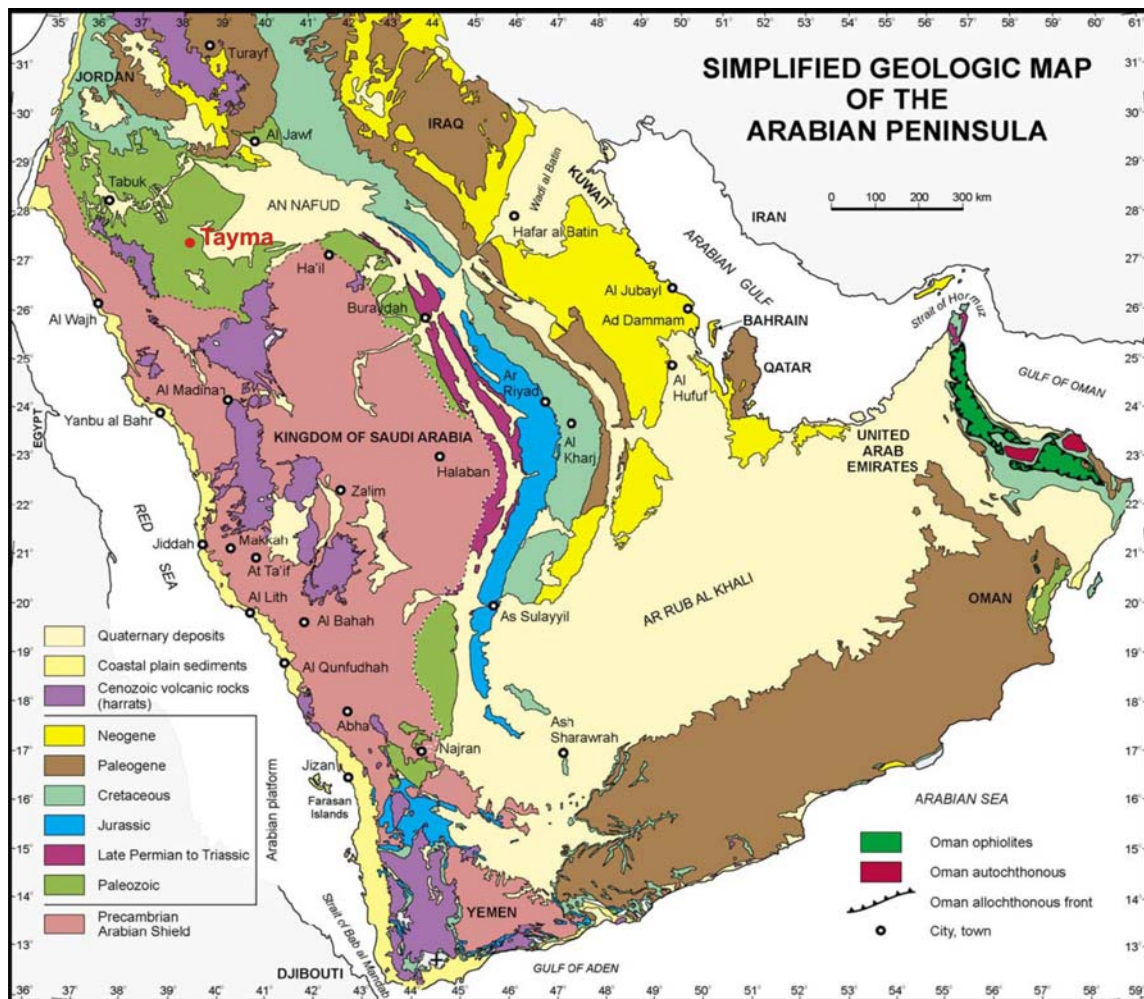


Figura 1.7: Carta geologica semplificata della Penisola Araba (Le Nindre *et al.*, 2003; modificato).

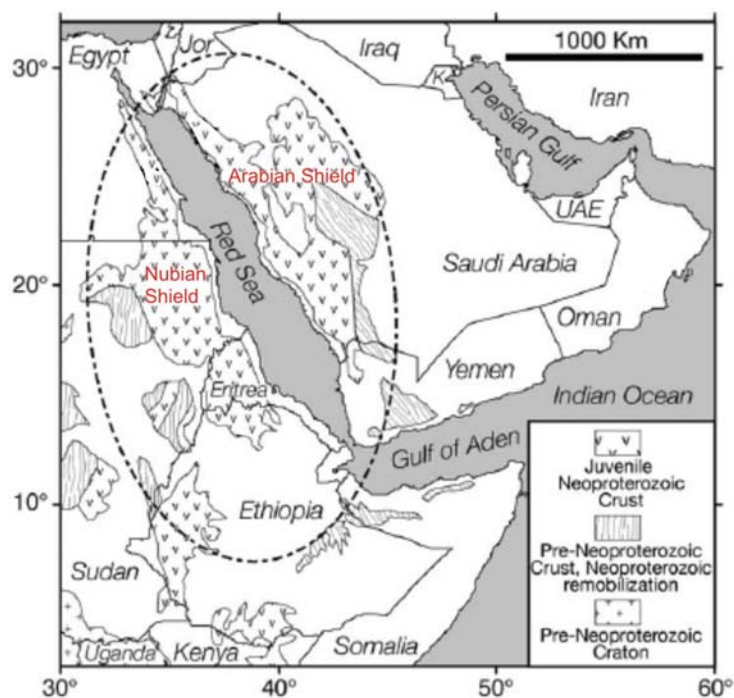


Figura 1.8: Attuale collocazione degli Scudi Arabico e Nubiano (Stern *et al.*, 2006; modificato).

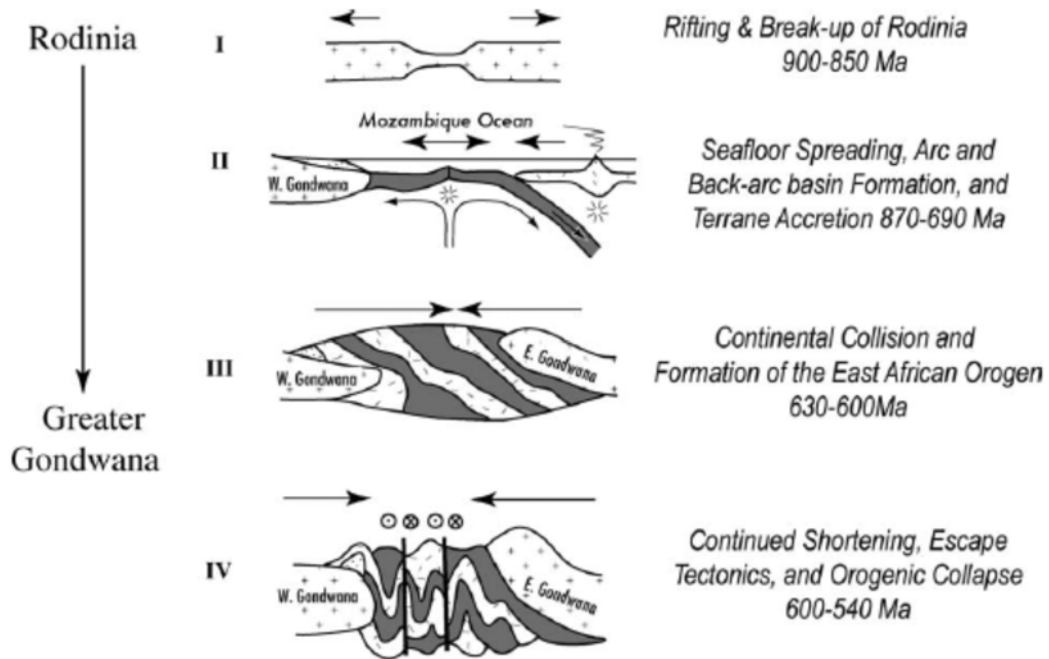


Figura 1.9: Fasi dell'evoluzione tettonica dello Scudo Arabo-Nubiano e dell'Orogeno Africano Orientale (Stern *et al.*, 2006).

Le litologie che costituiscono lo Scudo Arabico comprendono gneiss fortemente foliati, metasedimenti, vulcaniti calc-alcaline, depositi piroclastici, ofioliti ed intrusioni granitoidi sin- e post-cinematiche (Greenwood *et al.*, 1976; Hadley & Smidt, 1980; Stern, 1981; Greenberg, 1981; Stacey & Hedge, 1984). Queste litologie compongono il basamento cristallino posto alla base delle successioni sedimentarie fanerozoiche affioranti nel resto della penisola, che costituiscono la Piattaforma Arabica (*Arabian Platform*).

Le successioni più antiche della Piattaforma, affiorano ai margini dello Scudo Arabico e diventano progressivamente più recenti procedendo verso est. Ciò evidenzia come la Piattaforma Arabica rappresenti un bacino di sedimentazione digradante da ovest verso est. Le successioni fanerozoiche documentano diversi ambienti di sedimentazione che cambiano nel corso dei periodi geologici a causa delle variazioni eustatiche e della tettonica delle placche litosferiche. Si va da aree continentali fino ad ambienti di sedimentazione marina profonda (fig. 1.10) come testimoniano le successioni affioranti costituite da arenarie, siltiti, argilliti dolomie e calcari (Le Nindre *et al.*, 2003).

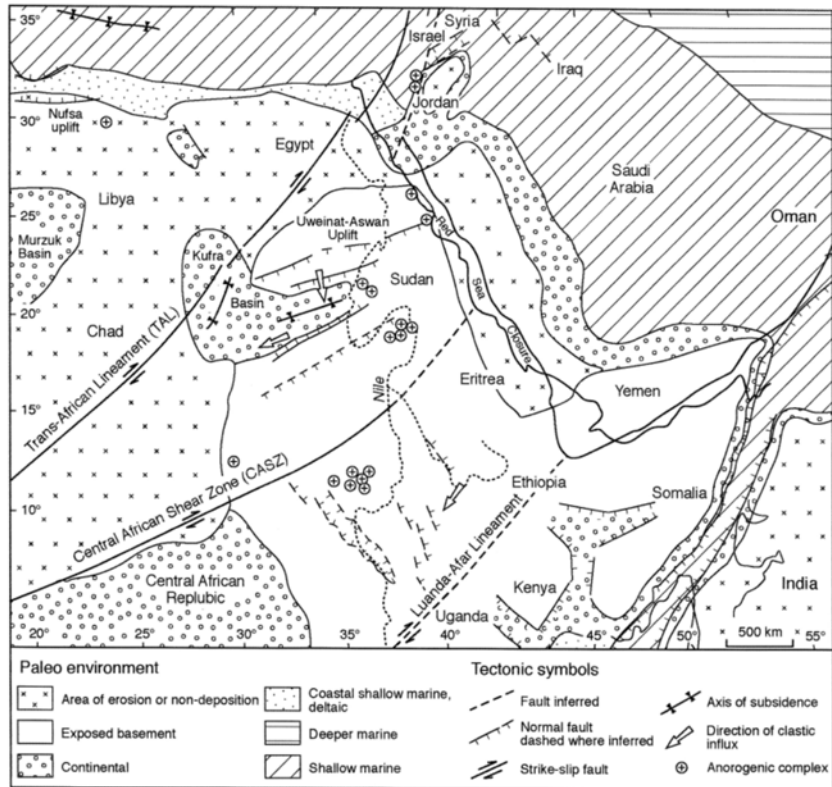


Figura 1.10: Rappresentazione paleogeografica e paleotettonica dell’Africa nord-orientale e dell’Arabia con i relativi ambienti di sedimentazione durante il Permiano (Ghebreab, 1998).

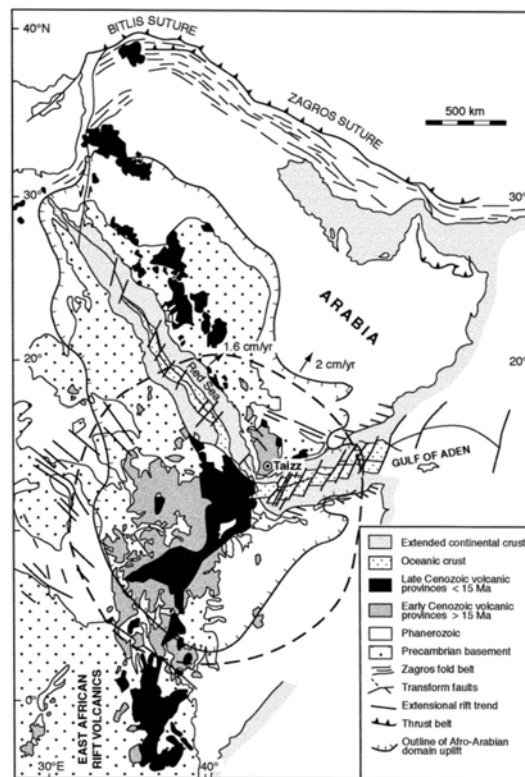


Figura 1.11: Distribuzione del vulcanismo risalente al Cenozoico nella parte nord-orientale dell’Africa e nella Penisola Araba. Il cerchio tratteggiato rappresenta l’estensione del punto caldo dell’Afar in corrispondenza con il giunto triplo afro-arabico (Ghebreab, 1998).

Durante il Cenozoico si assiste all'impostazione del margine divergente tra la Placca Africana e quella Arabica e al successivo distacco tra le due unità litosferiche con la conseguente apertura del Mar Rosso. La risalita e l'impostazione di magmi basaltici sullo Scudo Arabico e sull'Africa nord-orientale è da imputarsi al punto caldo dell'Afar in corrispondenza del punto di giunzione tra le placche Arabica ed Africana (Hart *et al.*, 1989; White & McKenzie, 1989) (fig. 1.11).

1.3.2 Geologia dell'area di Tayma

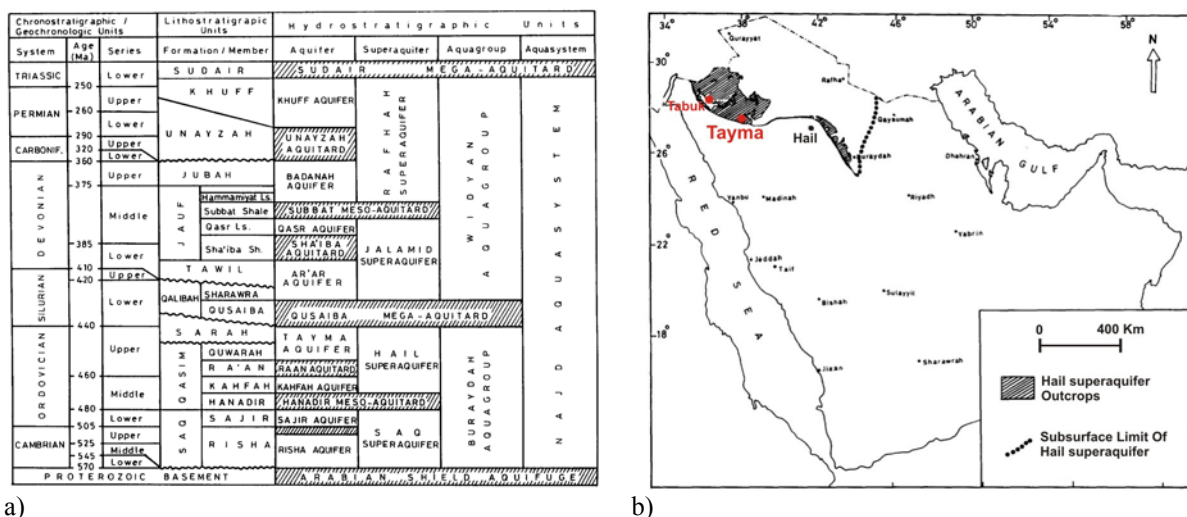
La città di Tayma si sviluppa sulle successioni paleozoiche della Piattaforma Arabica, a nord dello Scudo Arabico (fig. 1.7).

EPOCH/AGE	PERIOD	FORMATION	MEMBER	GENERALIZED LITHOLOGY	LITHOLOGIC DESCRIPTION			
Wenlock	SILURIAN	QALIBAH	Sharawra		Alternating silty micaceous shale and fine grained sandstone.			
Llandovery			Qusaiba		Organic-rich laminated shale with some interbedded rippled siltstone.			
Ashgill	ORDOVICIAN	QASIM	SARAH		Conglomeratic sandstones diamictites, minor shale.			
			ZARQA		Interbedded siltstone or clayey siltstone, dropstone, tillites.			
			Quwarah		Sandstone and micaceous silty clay; incised valley conglomerates.			
			Raan		Finely laminated fissile shale; graptolite-bearing micaceous siltstone layers.			
		Caradoc	Llandefilo		Kahfah	Fine to medium-grained, moderate -to well-sorted, slightly shaley and Tigillites-bearing sandstone.		
		Hanadir			Graptolite-bearing reddish to greenish shale and siltstone.			
		Arenig - Tremadoc	CAMBRIAN		SAQ	Sajir	Fine to medium-grained Cruziana and Skolithos bearing sandstone and siltstone.	
		??				Risha	Coarse to medium-grained cross-bedded sandstone.	
								BASEMENT

Figura 1.12: Parte della stratigrafia paleozoica del nord-ovest dell'Arabia Saudita (Hussain, 2007, modificato; basato su dati di Vaslet *et al.*, 1986; Stump & Van der Eem, 1995; Owens *et al.*, 1995; Al-Najr & Owens, 2000).

La cartografia di riferimento per l'area di Tayma è la carta geologica Tayma GM-134 1:250.000 del *Saudi Geological Survey*.

La stratigrafia degli affioramenti (fig. 1.12) mostra come le formazioni paleozoiche, preponderanti nell'area, datate dal Cambriano al Siluriano, siano costituite da rocce sedimentarie di natura silicoclastica, rappresentate per lo più da arenarie e siltiti che possono presentare intercalazioni a matrice argillosa, frequentemente caratterizzate dalla presenza di bioturbazioni e *ripple marks*.



a) Classificazione proposta da Al-Aswad e Al-Bassam per gli acquiferi dell'Arabia Saudita (1997); b) Estensione dell'unità idrostratigrafica di Hail (Al-Aswad & Al-Bassam; 1997, modificato).

Queste rocce a bassa permeabilità sono sede di un vasto acquifero che è limitato inferiormente dal basamento cristallino impermeabile. L'acquifero prende il nome della città di Tayma e, collegato con l'acquifero di Kahfah, forma l'unità idrostratigrafica di Hail (Al-Aswad & Al-Bassam, 1997) (fig. 1.13a,b). Nella zona di Tayma le rocce sedimentarie fanerozoiche facenti parte della Piattaforma Arabica, immergono dolcemente verso nord-nord-est di appena 1°. Queste successioni, tagliate da sistemi di faglie in direzione nord-ovest – sud-est parallelamente al margine della Placca Arabica, formano diversi *graben* che interessano anche la zona di Tayma. In prossimità della città, una di queste depressioni tettoniche prende il nome di *graben* di Tayma ed ha una larghezza di circa 2 Km e un'altezza di 50 m (Vaslet *et al.*, 1994). Si presume che i sistemi di faglie siano responsabili della risalita di acqua e del conseguente affioramento. Il sistema idrogeologico (fig. 1.14) prevede il caricamento della falda nella zona a sud di Tayma per mezzo di acqua piovana che scende attraverso le arenarie e le siltiti permeabili, per poi scorrere sul basamento cristallino impermeabile e debolmente inclinato, ed infine risalire in corrispondenza del *graben* di Tayma (Wellbrock *et al.*, lavoro in preparazione). Questo sistema ha reso disponibile l'acqua a Tayma alle popolazioni antiche determinando la principale importanza del sito in quest'area caratterizzata da un clima arido.

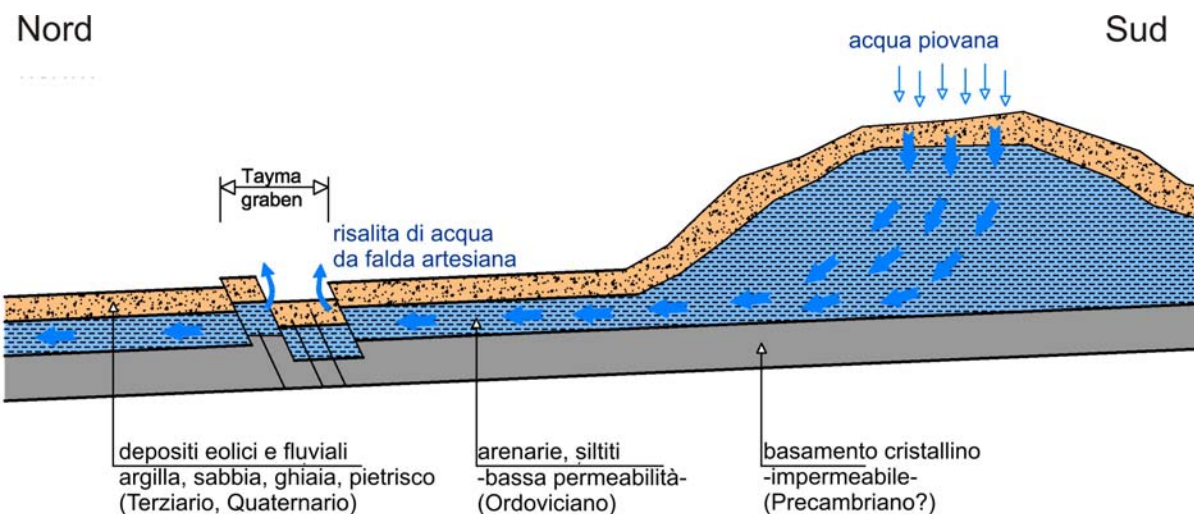


Figura 1.14: Sistema idrogeologico della zona di Tayma: caricamento della falda per mezzo di acqua piovana nella zona montuosa a sud della città; scorrimento in pressione lungo debole pendenza sul basamento cristallino impermeabile; risalita in corrispondenza del *graben* di Tayma (Wellbrock *et al.*, lavoro in preparazione; modificato).

Nella zona di Tayma sono presenti inoltre formazioni terziarie costituite da sporadici affioramenti di rocce carbonatiche, con intercalazioni nodulari di selce e depositi alluvionali dati da conglomerati carbonatici. A circa 100 Km a ovest di Tayma, vi sono infine affioramenti di basalti terziari e quaternari, disposti in direzione parallela ai sistemi di fratture dell'area e al margine della Placca Arabica.

Il territorio intorno a Tayma è stato soggetto ad importanti processi di modellamento legati all'ambiente arido. Le rare ma copiose precipitazioni, infatti, possono causare la formazione su letti solitamente asciutti di torrenti definiti *wadi*, che solcano il terreno e, terminata la loro corsa, provocano il ristagno di acqua e sono responsabili di accumuli alluvionali. A nord di Tayma, subito oltre il palmeto, è presente una vasta depressione che era occupata da un lago delle dimensioni di circa 10 Km² fino al 4500 a.C., come dimostra la datazione ¹⁴C di numerosi frammenti di gasteropodi (Leibniz Labor, 2005; Eichmann *et al.*, 2006a). Il lago ha lasciato il posto ad un deposito denominato *sabhkha*, costituito da evaporiti intercalate ad argille e limo. Attualmente, l'attività degli *wadi* fa confluire saltuariamente e ristagnare acqua nella depressione. Nell'area sono presenti inoltre alcuni depositi di argille e limi definiti con il nome di *khabra*.

Il vento è sicuramente il principale fattore di erosione e deposito dell'area, soprattutto in relazione alla formazione di sistemi di dune. A circa 20 Km a est di Tayma si trovano, infatti,

le propaggini occidentali del vasto deserto del Nafud che ha un'estensione di più di 50000 Km².

1.4 MATERIALI GEOLOGICI E ARCHEOLOGICI: STRATEGIE E METODI DI CAMPIONAMENTO

1.4.1 Le materie prime

Nell'ambito di questo progetto di ricerca, oltre ai materiali ceramici antichi sono stati campionati anche una serie di materiali geologici nelle aree limitrofe al sito archeologico di Tayma, al fine di definire se le ceramiche fossero localmente prodotte e di individuare le eventuali aree di approvvigionamento delle materie prime. Pertanto, dopo uno studio preliminare della geologia dell'area, si sono eseguite due campagne di campionamento, rispettivamente nella primavera del 2006 e del 2007, sia di sedimenti argillosi e sabbiosi che di rocce affioranti nei dintorni di Tayma. Sebbene si sia osservato che nell'85% dei casi le aree di approvvigionamento delle materie prime in epoche antiche fosse circoscritta entro un raggio di circa 7 km dal sito di produzione delle ceramiche, distanze ben maggiori, anche fino a 50 km, sono state registrate da Arnold (1980) nella sua analisi basata su ben 110 casi studio. Nella valutazione di queste aree bisogna tuttavia considerare ogni singolo caso, in cui diversi fattori possono influenzare la distanza necessaria a rifornirsi della materia prima (Rice, 1987).

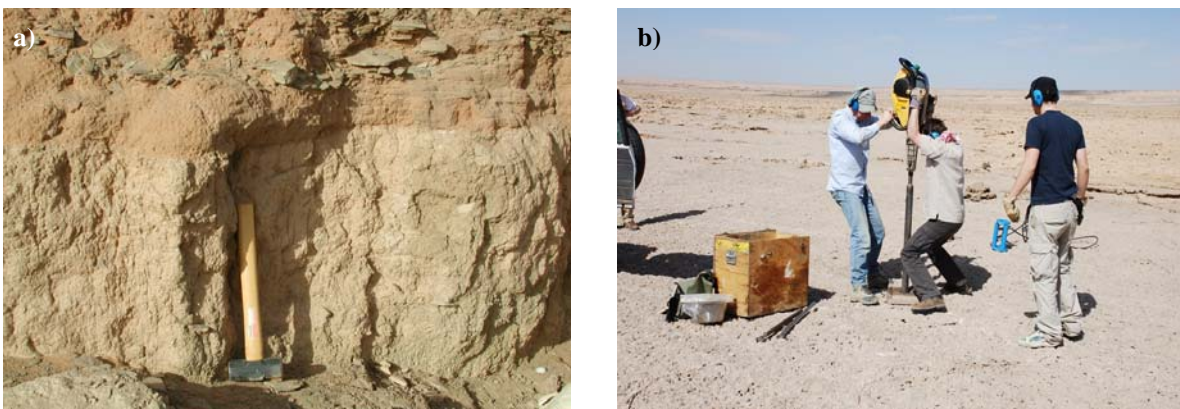


Figura 1.15: Campionamento di argille da affioramenti (a) e da carotaggi (b).

Porzione della carta geologica
Tayma GM-134, foglio 27C, 1:250.000
Saudi Geological Survey

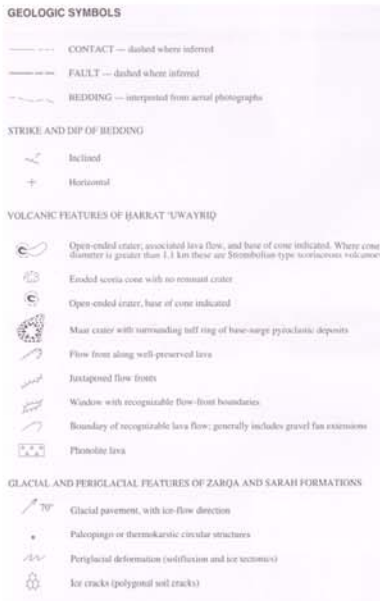
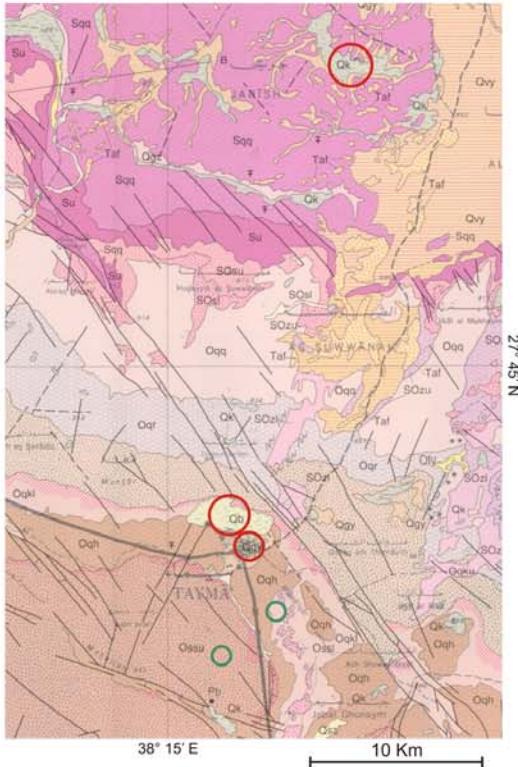
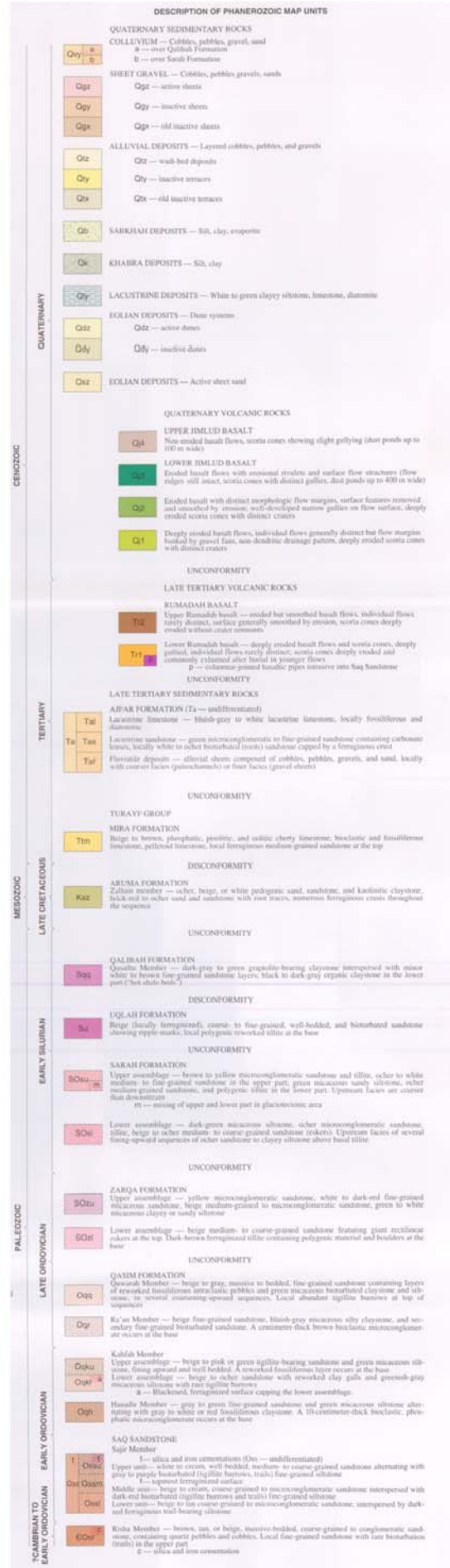


Fig. 1.16: Carta geologica dell'area di Tayma: in rosso le aree di campionamento delle argille, in verde i siti di campionamento delle sabbie.



Pertanto, l'area di ricerca dei materiali argillosi attualmente affioranti in superficie a Tayma è stata abbastanza ampia, e si è spinta fino a circa 30 km a nord-ovest del sito, dove è presente una vasta area pianeggiante occupata da depositi limosi e argillosi di *khabra* (fig. 1.16, 1.17). Inoltre, sebbene dall'analisi della carta geologica fossero stati individuati diversi depositi di materiale argilloso, non sempre questi presentavano in superficie affioramenti di argille. Per questo motivo il campionamento delle argille è stato condotto non solo in affioramento, ma anche tramite carotaggi (fig. 1.15, 1.17, 1.18, 1.19) effettuati nell'ambito di uno studio paleoambientale dell'area di Tayma (Brueckner *et al.*, lavoro in preparazione).

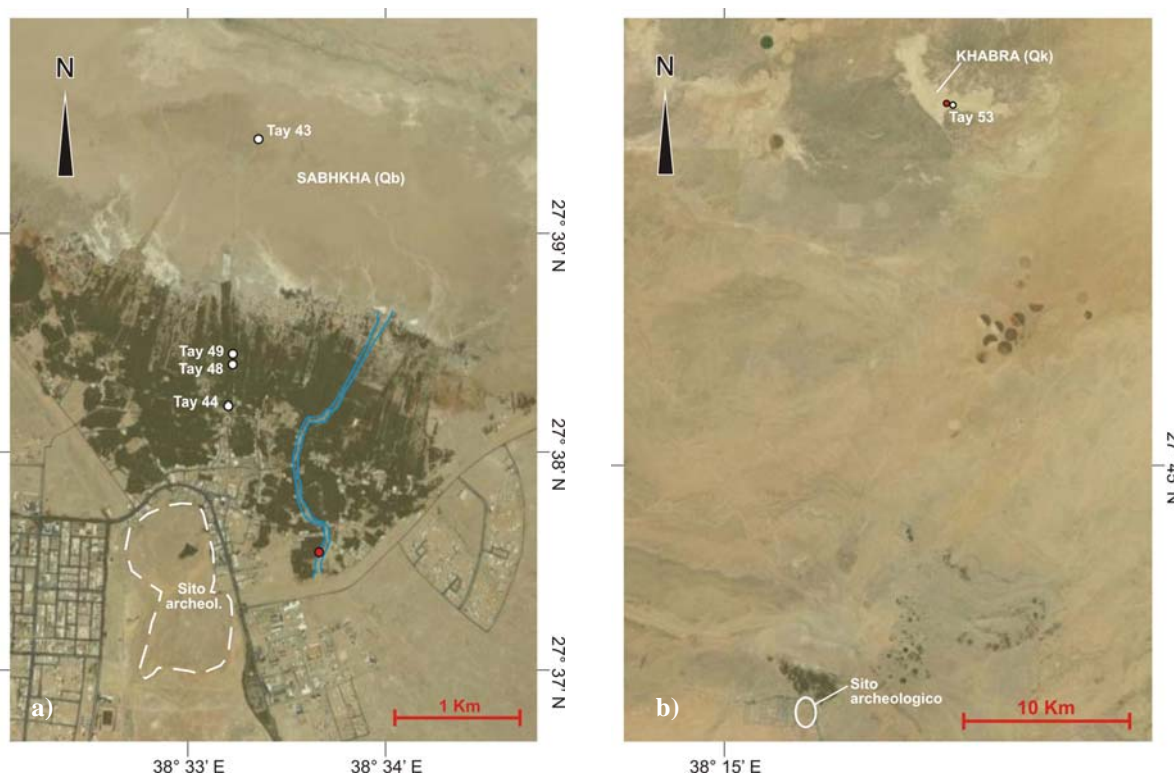


Figura 1.17: Collocazione dei siti di campionamento delle argille nei dintorni di Tayma: in rosso sono riportati i siti di campionamento in affioramento, mentre in bianco quelli di carotaggio (sigle Tay). a) Area prossima al sito archeologico con indicazione in azzurro del tracciato del *wadi* oggetto di indagini e da cui sono stati prelevati alcuni campioni di argilla; b) Ubicazione delle aree di campionamento a circa 30 km dal sito archeologico. Foto satellitari della zona di Tayma (Google Earth, 2009; modificate).

Più in dettaglio, alcuni campioni di argilla e limo provengono da carotaggi (Tay44, Tay48, Tay49) effettuati nell'area del palmeto a nord del sito (fig. 1.17a, fig. 1.19, tab. 1.1), altri campioni sono stati invece raccolti in corrispondenza del *wadi*, che scorre immediatamente a nord-ovest di Tayma, nell'area del palmeto (Qgy, fig. 1.16; 1.17a, 1.18). I lavori di scavo per il rafforzamento di alcuni argini hanno permesso l'individuazione ed il campionamento di diversi banchi di argilla caolinifica (fig. 1.18) in suoli lateritici. Inoltre, alcune argille sono state prelevate attraverso un carotaggio (Tay43, fig. 1.17a) eseguito nella *sabhkha* di Tayma

(Qb, fig. 1.16, 1.17a), la zona depressa situata a nord del sito, dove i torrenti stagionali terminano il loro percorso e depositano i materiali trasportati nei periodi di piena, e attualmente caratterizzata dalla presenza in superficie di crostoni evaporitici.

Oltre che in queste aree prossime al sito archeologico, materiali argillosi e limosi, sono stati anche campionati sia in affioramento che tramite carotaggio (Tay53, fig. 1.17b) in una vasta area di depositi di *khabra*, localizzata circa 30 km a nord di Tayma (Qk, fig. 1.16, 1.17b).

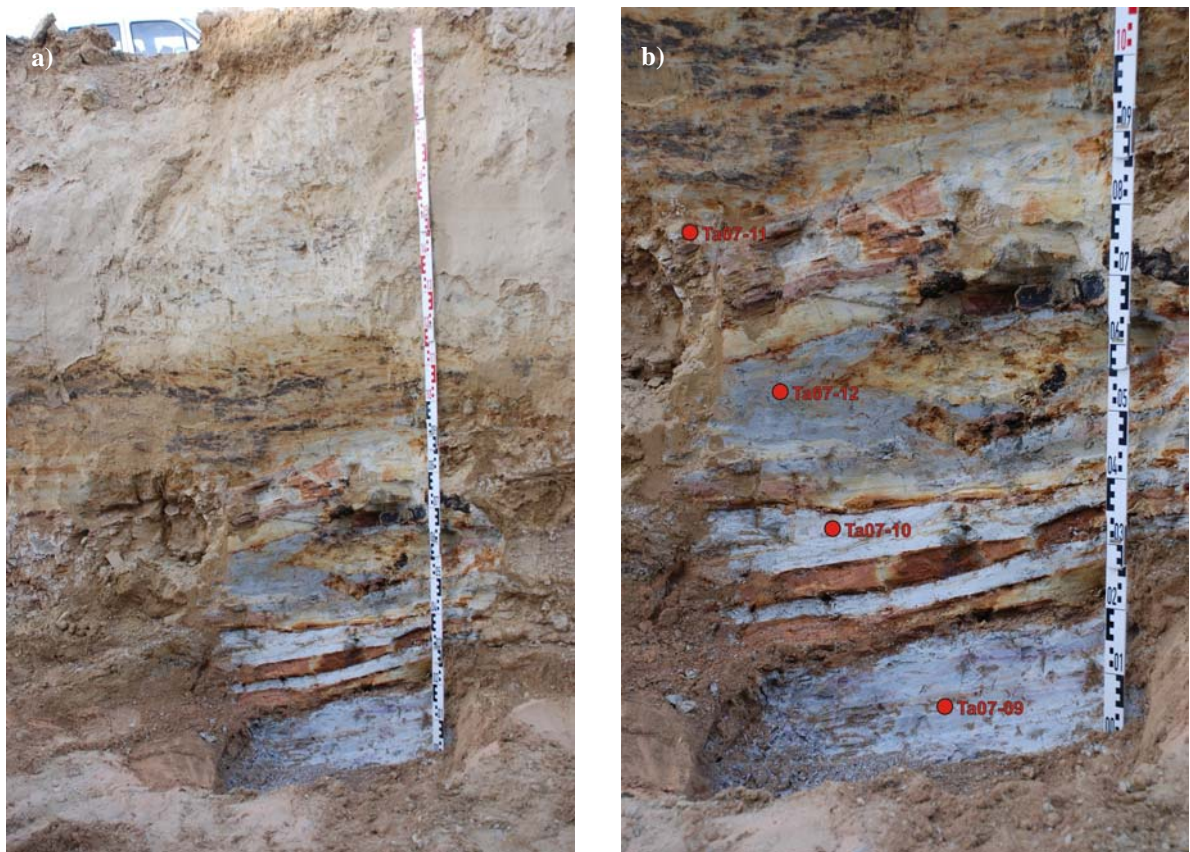


Figura 1.18: a) Affioramento di terreni caolinitici raccolti negli scassi operati in corrispondenza di alcuni *wadi* e che tagliano suoli lateritici; b) dettaglio dell'affioramento con la collocazione dei punti di campionamento.



Figura 1.19: Campioni di limo e argilla (C-06, C-07, C-08, C-09) prelevati dalla carota Tay44.

Per quel che riguarda invece i possibili degrassanti, l'analisi di Arnold (1980) indica che le possibili aree di approvvigionamento possono essere ubicate anche a varie decine di chilometri dal centro di produzione. Nell'ambito del presente progetto di ricerca si è ritenuto opportuno campionare alcune sabbie da depositi eolici circostanti il sito (fig. 1.16, fig. 1.20, tab. 1.1).

Tabella 1.1: Tabella delle materie prime campionate

Campione	Zona di campionamento	Materiale	Profondità (cm)
TA-07-09	<i>Wadi</i> (Qgy)	Argilla	Affioramento
TA-07-10	<i>Wadi</i> (Qgy)	Argilla	Affioramento
TA-07-11	<i>Wadi</i> (Qgy)	Limo	Affioramento
TA-07-12	<i>Wadi</i> (Qgy)	Argilla	Affioramento
C-06 (Tay44)	Qgy	Limo	183-188
C-07 (Tay44)	Qgy	Limo	273-281
C-08 (Tay44)	Qgy	Limo	416-426
C-09 (Tay44)	Qgy	Argilla	505-510
C-10 (Tay48)	Qgy	Limo	290-300
C-11 (Tay49)	Qgy	Limo	455-465
C-12 (Tay49)	Qgy	Limo	350-360
C-01 (Tay43)	<i>Sabhkha</i> (Qb)	Limo	4-40
C-02 (Tay43)	<i>Sabhkha</i> (Qb)	Limo	50-60
C-03 (Tay43)	<i>Sabhkha</i> (Qb)	Limo	60-70
TA-07-16	<i>Khabra</i> (Qk)	Argilla	Affioramento
TA-07-17	<i>Khabra</i> (Qk)	Argilla	Affioramento
K (Tay53)	<i>Khabra</i> (Qk)	Limo	150-160
S1	Deposito effimero	Sabbia	Affioramento
S2	Deposito effimero	Sabbia	Affioramento



Figura 1.20: Depositi eolici effimeri sede di campionamento delle sabbie.

1.4.2 I materiali ceramici

Le ceramiche studiate in questo progetto possono essere distinte in due gruppi principali. Un primo gruppo, formato da 100 frammenti, è stato selezionato dagli archeologici del *Deutsches Archaeologisches Institut* a partire dal 2005, come rappresentativo della varietà dei materiali ceramici del sito, sulla base delle loro caratteristiche macroscopiche. Questi materiali sono stati raccolti nell'ambito di ricognizioni superficiali dell'area di Tayma, e pertanto non sono databili con precisione e frequentemente non sono attribuibili a specifiche tipologie o forme ceramiche per la frammentarietà e scarsa significatività del reperto. Questi campioni sono stati utilizzati solo nella fase preliminare del presente studio per definire i principali tipi di impasto e per fornire una prima caratterizzazione dei materiali ceramici anche in prospettiva dei successivi campionamenti e indagini archeometriche. Il secondo gruppo di campioni è invece stato selezionato nel corso della campagna del 2007. Si tratta di 138 frammenti, rinvenuti in diverse aree di scavo da precisi contesti stratigrafici (tab. 1.2, 1.3, fig. 1.21, 1.22), anche se in alcuni casi persistono problemi di attribuzione cronologica dovuti alla complessità dei rapporti stratigrafici ed alla scarsità di reperti databili in modo assoluto.

Tra questi campioni sono presenti frammenti di vasellame da tavola e da cucina, rappresentati sia da forme chiuse quali brocche e vasi, che aperte quali coppe, ciotole, piatti, pentole e vassoi. Essi sono principalmente dell'età del Ferro Antico (27 campioni) e Recente (96 campioni), ma alcuni provengono da depositi archeologici più recenti (6 campioni) o di età non incerta (9 campioni).

Tabella 1.2: Numero di campioni per tipologia e periodo storico; EIA (*Early Iron Age*) = età del Ferro Antico, LIA (*Late Iron Age*) = età del Ferro Recente, LIA-Later (*Late Iron Age or Later*) = Ferro Recente o successivo.

Tipologia	EIA	LIA	LIA-Later	Indeterminato	Totale
Coppe/ciotole	21	43	4	0	68
Brocche/vasi	3	35	1	0	39
Pentole	0	6	0	0	6
Piatti	0	2	0	0	2
Vassoi	0	1	0	0	1
Ceramica invetriata	0	5	1	4	10
Indeterminate	3	4	0	5	12
Totale	27	96	6	9	138



a) 5627/3, coppa-ciotola



b) 3275/18, brocca-vaso



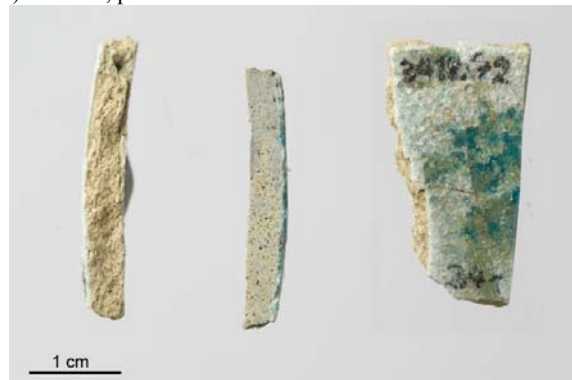
c) 3418/11, pentola



d) 2792/11, piatto



e) 3418/24, vassoio



f) 3418/72, ceramica invetriata

Figura 1.21: Campioni di ceramica con relativa tipologia.

Tabella 1.3: Numero di campioni con area di scavo di provenienza (vedasi figura 1.22 per la collocazione delle aree) e periodo storico; EIA (*Early Iron Age*) = età del Ferro Antico, LIA (*Late Iron Age*) = età del Ferro Recente, LIA-Later (*Late Iron Age or Later*) = Ferro Recente o successivo.

Area di scavo	EIA	LIA	LIA-Later	Indeter.	Totale
A	3	0	0	0	3
C4	0	0	1	0	1
D1	0	20	0	0	20
E1	0	0	0	1	1
E16	0	26	0	0	26
E19	0	8	0	0	8
F2	0	0	0	1	1
F3	0	15	5	0	20
F4	0	27	0	0	27
O	7	0	0	0	7
O1	17	0	0	2	19
Z1	0	0	0	5	5
Totale	27	96	6	9	138

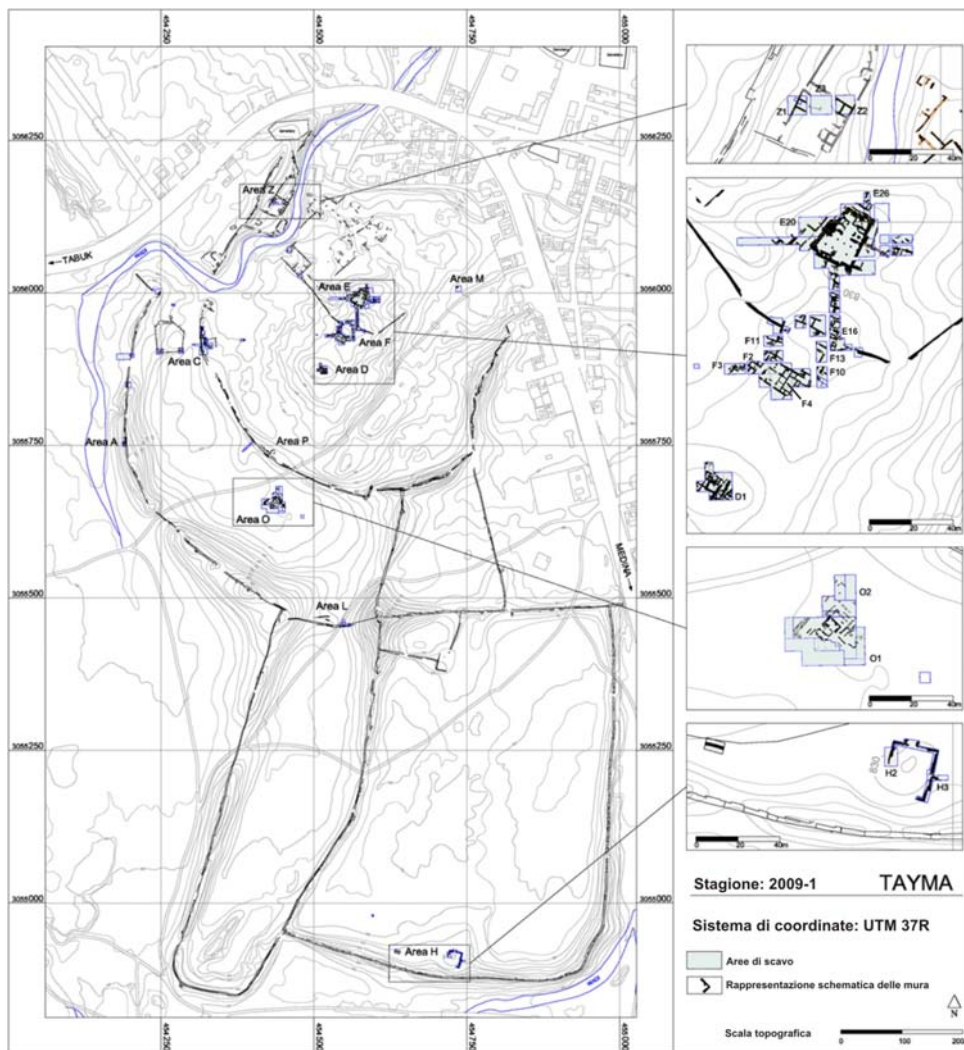


Figura 1.22: Carta topografica del sito archeologico con le rispettive aree di scavo (Hausleiter *et al.*, lavoro in preparazione, modificata).

2. I MATERIALI CERAMICI E ARGILLOSI: CARATTERIZZAZIONE ARCHEOMETRICA

Ogni reperto materiale ceramico può celare numerose informazioni riguardanti la sua storia; dal suo studio possono essere ricavate utili notizie inerenti alla materia prima utilizzata, alle fasi di lavorazione e produzione, al suo utilizzo ed infine relative al periodo di seppellimento (fig. 2.1). Le metodologie d'indagine utilizzate in questo tipo di ricerche archeometriche sono generalmente numerose e corrispondono per lo più a quelle adottate dalle scienze della Terra nello studio delle rocce (Maggetti, 1991; Rice, 1987; Cuomo di Caprio, 1985).

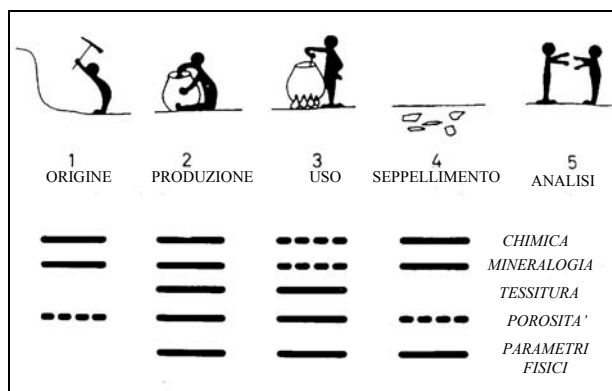


Figura 2.1: Principali fasi della vita di un oggetto ceramico antico e metodi d'indagine applicabili per ottenere informazioni utili per la caratterizzazione di tali tappe (Maggetti, 1982, modificata).

Per questo motivo, nell'ambito del presente lavoro, i materiali ceramici considerati sono stati studiati sotto diversi punti di vista, attraverso l'utilizzo di varie metodologie, che vanno dalla microscopia ottica (MO) ed elettronica a scansione (SEM), allo studio in diffrazione dei raggi X delle polveri (XRD), alle analisi chimiche totali (XRF) e puntuali (SEM-EDAX), i cui risultati sono riportati nelle sezioni a seguire.

2.1 ANALISI PETROGRAFICA

La petrologia ceramica viene comunemente adottata per studi di provenienza di ceramiche ad impasto grossolano e medio, e si basa principalmente sulla caratterizzazione petrografica dei reperti antichi e sul confronto con i dati di cartografia geologica disponibili per un dato territorio. In molti casi però i dati forniti dalle carte geologiche non sono sufficienti, soprattutto per quel che riguarda i caratteri dei depositi argillosi, e pertanto è necessario condurre campagne di campionamento di argille nelle possibili aree di provenienza delle produzioni ceramiche. Il confronto con questi materiali permette, infatti, di definire, oltre alla provenienza delle ceramiche, anche aspetti legati alla tecnologia produttiva, quali il tipo di impasto utilizzato, i processi di aggiunta o rimozione degli inclusi, di mescolamento di argille ed i metodi di modellazione. Studi etnografici hanno, infatti, messo in evidenza che assai raramente le ceramiche vengono prodotte utilizzando argille tali e quali (Gosselain & Livingstone Smith, 2005), ma mescolando argille, depurandole o temperandole con sabbia, frammenti di roccia, chamotte (frammenti di ceramica riciclata), conchiglie o elementi vegetali in dipendenza del tipo di oggetto ceramico da produrre.

L'analisi in microscopia ottica a luce polarizzata è stata eseguita in questo progetto di ricerca su un gruppo molto ampio di reperti ceramici, costituito da 238 frammenti, dei quali 100 selezionati tra i materiali raccolti da una ricognizione superficiale dell'area di Tayma eseguita nel 2004, e 138 selezionati tra quelli rinvenuti durante le operazioni di scavo, e pertanto provenienti da precisi contesti stratigrafici datati dal punto di vista archeologico (per maggiori dettagli, si rimanda al capitolo 1). Tale indagine ha permesso pertanto di avere una visione più completa degli impasti ceramici a Tayma e di definire in modo preciso e completo i diversi gruppi petrografici, con una buona rappresentatività statistica. I campioni della ricognizione superficiale sono pertanto serviti per individuare dei raggruppamenti sulla base dei caratteri petrografici dei materiali, che sono stati successivamente raffinati con l'analisi dei reperti provenienti da contesti stratigrafici dello scavo archeologico. Tutte le considerazioni statistiche a seguito riportare sono pertanto riferite ai soli 138 campioni provenienti da contesti stratigrafici e riferibili a precisi momenti della storia del sito di Tayma.

L'analisi petrografica dei campioni è stata eseguita seguendo il protocollo descrittivo e la terminologia proposte da Whitbread (1989, 1995) e basata sul sistema di analisi dei suoli e dei sedimenti (Gerrard, 1991). La natura degli inclusi argillosi è stata determinata in base al criterio di discriminazione suggerito da Whitbread (1986) e dai risultati del lavoro sperimentale di Cuomo Di Caprio e Vaughan (1993).

In base alle caratteristiche tessiturali della pasta di fondo ed alla quantità, distribuzione granulometrica e natura minero-petrografica degli inclusi, i campioni possono essere suddivisi in 9 gruppi petrografici principali, in molti casi suddivisibili a loro volta in diversi sottogruppi, qui di seguito descritti.

Gruppo 1: ceramiche ricche in quarzo

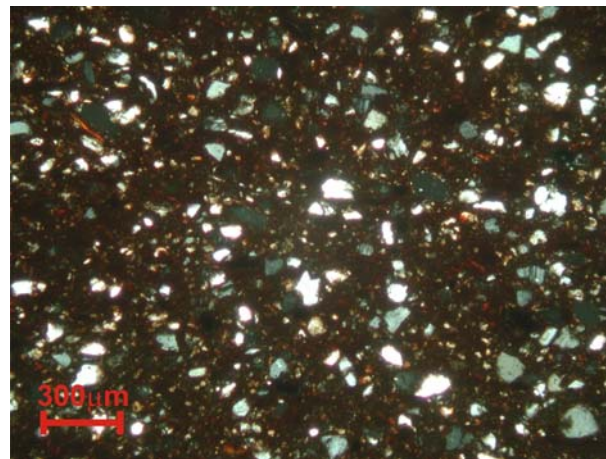
Le ceramiche di questo gruppo presentano una pasta di fondo omogenea e di colore rosso-bruno, poco o per nulla otticamente attiva e caratterizzata da un orientamento preferenziale. Sono caratterizzate da porosità variabile tra 1% e il 5%, data da vuoti di forma irregolare (*vughs*), vescicole (*vesicles*) e canali (*channels*). Esse contengono abbondanti inclusi, con rapporto tra la frazione fine (pasta di fondo) e quella grossolana (inclusi), o *c:f ratio*, che varia tra 15:85 e 30:70, con distribuzione granulometrica seriatata e granulometria massima fino a 700-800 μm , ad eccezione di alcuni casi in cui sono presenti frammenti di dimensioni nettamente maggiori (fino ai 2500-3000 μm). Gli inclusi sono per lo più costituiti da grani di quarzo di forma arrotondata di dimensioni che vanno dal silt alla sabbia. Ad esso sono associati scarsi frammenti di roccia argillosa (*argillaceous rock fragments* ARF), e di siltiti, lamelle di mica chiara, biotite, plagioclasti, minerali opachi e rari *clay pellets*. In base alla granulometria massima degli inclusi è stato possibile distinguere tre sottogruppi:

- gruppo 1a: caratterizzato da una granulometria degli inclusi piuttosto fine, con massima frequenza intorno ai 100 μm e dimensione massima di circa 700 μm (fig. 2.2a);
- gruppo 1b: caratterizzato da inclusi di dimensione prevalente intorno ai 300 μm e massima intorno ai 700 μm (fig. 2.2b);
- gruppo 1c: caratterizzato da inclusi di dimensione prevalente intorno ai 500 μm e massima di circa 800 μm (fig. 2.2c).

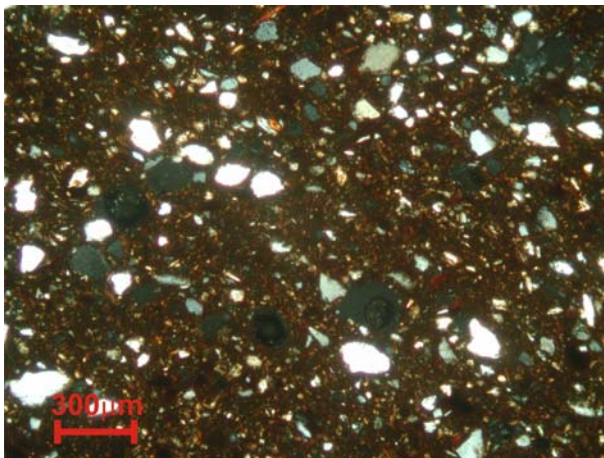
Gruppo 2: ceramiche povere di inclusi

I campioni di questo gruppo sono caratterizzati da ceramiche povere in inclusi, con un *c:f ratio* che varia tra 1:99 e 5:95. Esse presentano pasta di fondo omogenea, otticamente attiva, *b-fabric* (*birefringent fabric*) tipo *speckled* e leggermente orientata. La porosità è generalmente inferiore al 3% e costituita da *vesicles*, *vughs* e *channels* di dimensioni massime tra 400 μm e 1700 μm . Gli inclusi, di forma da subangolare a subarrotondata, sono costituiti da cristalli di quarzo, mica chiara, minerali opachi, ARF e areniti. In base all'abbondanza e alla distribuzione granulometrica, è stato possibile distinguere due sottogruppi:

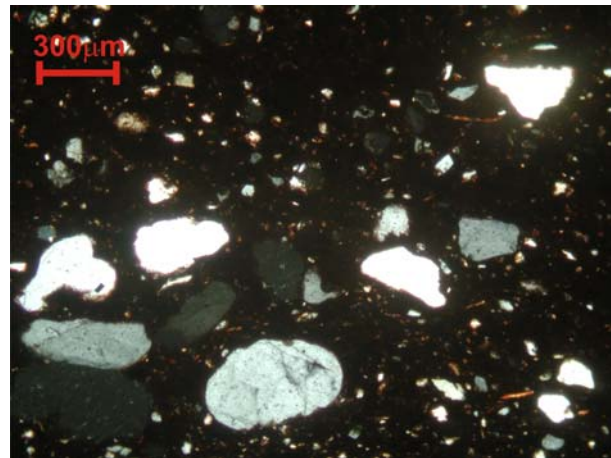
- gruppo 2a: caratterizzato da scarsissimi inclusi ($c:f = 1:99$) costituiti da quarzo e minerali opachi che non superano i 100 μm di diametro (fig. 2.3a);
- gruppo 2b: caratterizzato da inclusi con distribuzione granulometrica degli inclusi iatale, in cui rari frammenti di dimensioni fino a 3 mm si isolano da resto degli inclusi molto più fini, generalmente inferiori ai 100 μm di diametro, e sono costituiti da rari *ARF*, siltiti e arenarie (fig. 2.3b).



a)



b)



c)

Figura 2.2: Immagini in microscopia ottica a luce polarizzata e nicol incrociati di alcuni campioni rappresentativi del gruppo petrografico 1 nei quali si osserva la diversa quantità e granulometria dei cristalli di quarzo, che permette di suddividere il gruppo in tre sottogruppi: a) gruppo 1a con inclusi di dimensioni massime fino a 100 μm (campione (campione 156/3)); b) gruppo 1b con inclusi di dimensioni massime fino a 300 μm (campione 3553/5); c) gruppo 1c con inclusi di dimensioni inclusi massime fino a 500 μm (campione 3418/45b).

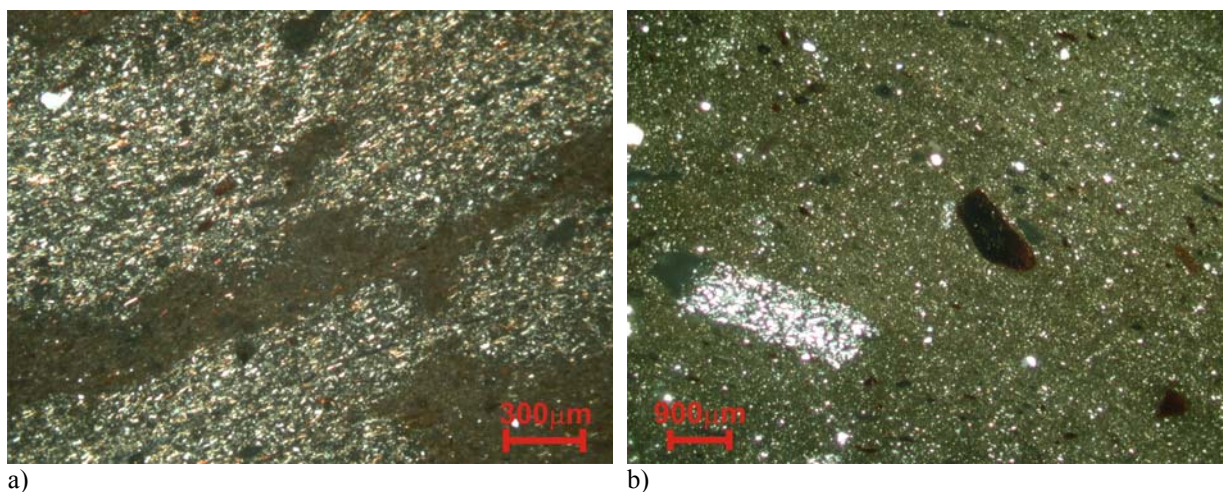


Figura 2.3: Immagini in microscopia ottica a luce polarizzata e nicol incrociati di alcuni campioni rappresentativi del gruppo petrografico 2 caratterizzati dalla scarsa presenza di inclusi; a) gruppo 2a caratterizzato dalla presenza di rarissimi inclusi (campione 2792/11); b) gruppo 2b contenente rari inclusi costituiti da ARF, quarzo, arenarie e siltiti silicoclastiche (campione 3553/15).

Gruppo 3: ceramiche ricche in ARF, arenarie e quarzo

Le ceramiche di questo gruppo sono caratterizzate da pasta di fondo omogenea, in molti casi otticamente attiva, con *b-fabric* di tipo *speckled*. La porosità varia di campione in campione tra il 3% e il 10%, ed è data da *vughs*, *channels* e rare *vesicles* di dimensioni massime fino a qualche millimetro. Gli inclusi sono presenti in abbondante quantità, con *c:f ratio* dal 20:80 al 40:60, distribuzione granulometrica seriatata, in molti casi con carattere bimodale, con massimi di frequenza nella frazione siltitica e sabbiosa più fine, e poi in quella sabbiosa grossolana, con dimensioni massime che raggiungono i 3 mm. Essi sono costituiti da abbondanti cristalli subangolari di quarzo di dimensioni per lo più siltitiche e della sabbia fine, abbondanti frammenti di forma arrotondata di ARF, silti e arenarie. In alcuni casi il quarzo si presenta anche in cristalli di forma arrotondata e dimensioni che raggiungono qualche centinaia di micron. Sono inoltre presenti cristalli di dimensioni siltitiche di mica chiara, raramente biotite e minerali opachi. In base all'abbondanza relativa tra i vari inclusi della frazione più grossolana (sabbia grossolana), si sono distinti quattro sottogruppi:

- gruppo 3a: caratterizzato da frammenti arrotondati di ARF e siltiti (fig. 2.4a);
- gruppo 3b: caratterizzato da abbondanti inclusi arrotondati di quarzo, ARF, e da scarsi frammenti di siltiti e arenarie (fig. 2.4b);
- gruppo 3c: caratterizzato dalla presenza di frammenti arrotondati di dimensioni grossolane (da 300 a 2000 μm) di arenarie (fig. 2.4c);
- gruppo 3d: caratterizzato dalla presenza di frammenti arrotondati di ARF (fig. 2.4d).

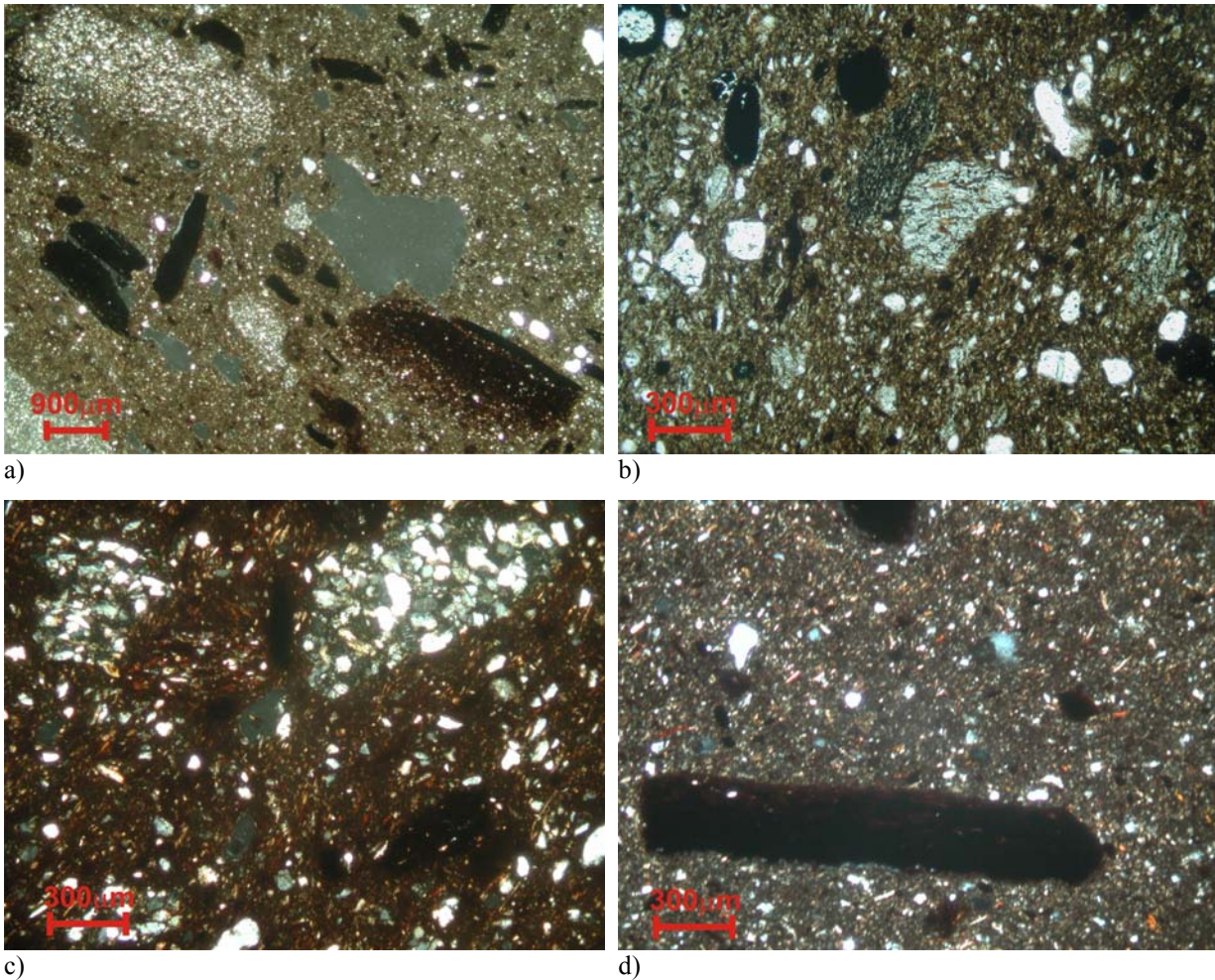


Figura 2.4: Immagini in microscopia ottica a luce polarizzata e nicol incrociati di alcuni campioni rappresentativi del gruppo petrografico 3 nei quali si osserva la diversa tessitura e abbondanza relativa dei vari tipi di inclusi; a) gruppo 3a caratterizzato da abbondanti ARF e siltiti di dimensioni massime fino al mm (campione 2792/18); b) gruppo 3b ricco in ARF e quarzo (campione 3553/26); c) gruppo 3c caratterizzato dalla presenza di cristalli di dimensioni siltitiche di quarzo e da frammenti di arenarie di dimensioni massime fino al mm (campione 3553/7); d) gruppo 3d contenente cristalli di dimensioni siltitiche di quarzo e rari ARF di dimensioni fino a millimetriche (campione 3418/17).

Gruppo 4: ceramiche ricche in ARF

Le ceramiche di questo gruppo si presentano con pasta di fondo omogenea, otticamente attiva con *b-fabric* di tipo *speckled*, e porosità fino al 5% data da *vughs* e *channel* di dimensioni massime fino al millimetro. Gli inclusi sono presenti in quantità comprese tra il 5% e il 20%, con distribuzione granulometrica iatale, in cui la frazione fine ($< 100 \mu\text{m}$) data da cristalli di quarzo, lamelle di mica chiara e minerali opachi si isola da quella più grassona sabbiosa, che raggiunge anche qualche millimetro di dimensioni ed è costituita prevalentemente da frammenti arrotondati di ARF, talora quarzo, e subordinate siltiti e arenarie. In base alla quantità relativa degli inclusi di dimensioni maggiori, si sono distinti due sottogruppi:

- gruppo 4a: con abbondanti frammenti arrotondati di dimensioni della sabbia grossolana sia di ARF che di quarzo (fig. 2.5a);
- gruppo 4b: caratterizzato dalla presenza di prevalenti frammenti arrotondati di ARF tra gli inclusi di dimensioni più grossolane (fig. 2.5b).

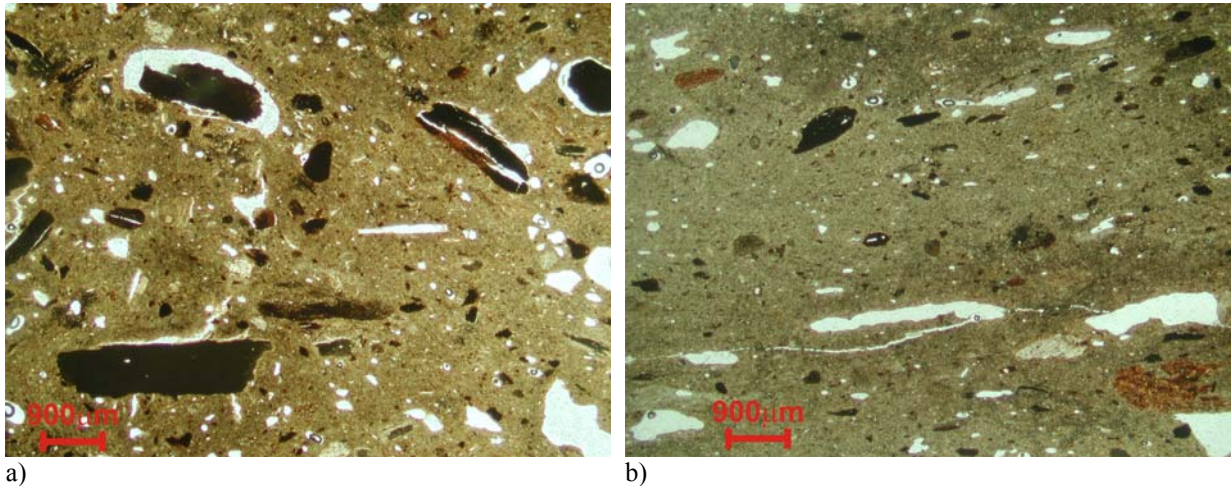


Figura 2.5: Immagini in microscopia ottica a luce polarizzata e nicol paralleli di alcuni campioni rappresentativi del gruppo petrografico 4 nei quali si osserva la presenza di diversa abbondanza relativa dei vari tipi di inclusi; a) gruppo 3a caratterizzato da abbondanti ARF e subordinati cristalli di quarzo (campione 3275/15); b) gruppo 4b contenente prevalenti ARF di dimensioni massime fino a 1mm (campione 3135/13).

Gruppo 5: ceramiche ricche in sabbia grossolana quarzosa

Le ceramiche di questo gruppo si presentano con pasta di fondo omogenea, orientata e otticamente attiva, con *b-fabric* di tipo *speckled*. Hanno porosità molto variabile, compresa tra l'1% e il 10%, con forme tipo *vughs*, *vesicles* e *channels* di dimensioni massime di 1000 µm. Gli inclusi sono presenti in quantità variabili, con *c:f ratio* da 20:80 a 30:70, distribuzione granulometrica iatale, in cui grossi cristalli di forma arrotondata e delle dimensioni di alcune centinaia di micron fino a un paio di millimetri si isolano dalla frazione siltosa. Quest'ultima è costituita prevalentemente da piccoli cristalli di quarzo da subordinate lamelle di mica chiara, biotite, plagioclasio, minerali opachi, *clay pellets*, *ARF*, siltiti e arenarie (fig. 2.6).

Gruppo 6: ceramiche ricche in feldspati

Questo gruppo è costituito da un solo campione. Esso è caratterizzato da una pasta di fondo omogenea, otticamente attiva con *b-fabric* di tipo *speckled*, e porosità molto scarsa (circa 3%) data da *vughs* e *channels*. Gli inclusi sono molto abbondanti, con *c:f ratio* di circa 40:60, distribuzione granulometrica seriatata e massime dimensioni di 600 µm. Sono costituiti da abbondanti frammenti di forma angolare di feldspato, per lo più in forma di microclino micropertitico, plagioclasio e quarzo (fig. 2.7).

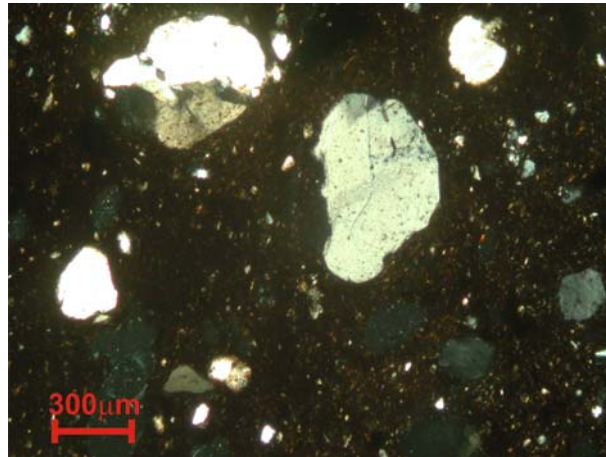


Figura 2.6: Immagine in microscopia ottica a luce polarizzata e nicol incrociati di un campione del gruppo petrografico 5, caratterizzato dalla presenza di cristalli arrotondati di quarzo con dimensioni della sabbia, e dall'assenza di una frazione fine (campione 3418/74).

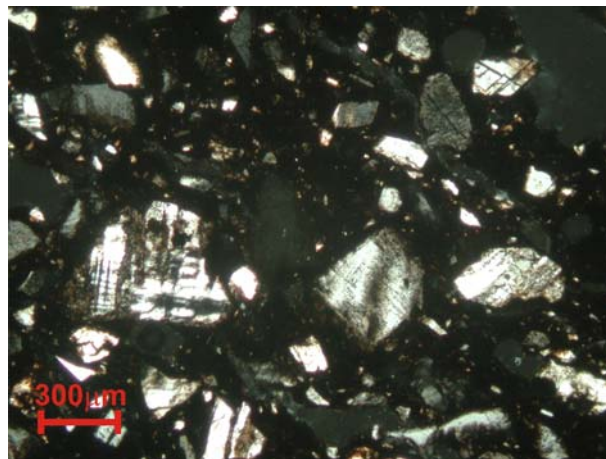


Figura 2.7: Immagine in microscopia ottica a luce polarizzata e nicol incrociati di un campione rappresentativo del gruppo petrografico 6 nei quali si osserva la presenza di abbondanti cristalli di microclino talora micropertitico, e subordinati cristalli di quarzo (campione 3470/1).

Gruppo 7: ceramiche calcaree

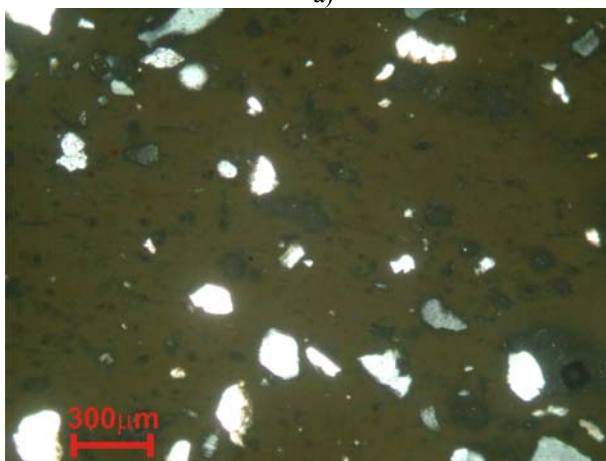
Questo gruppo di ceramiche si presenta con una pasta di fondo omogenea, otticamente inattiva, che presenta una caratteristica colorazione e una “pseudo-birifrangenza” tipica dei materiali argillosi ricchi in carbonati cotti ad elevate temperature (Maritan, commento personale). La porosità varia dall'1% al 5% ed è data da *vughs* e *channels* di dimensioni fino al millimetro. Gli inclusi sono presenti in quantità variabile, con *c:f ratio* da valori molto bassi (1:99) a medi (30:70), distribuzione granulometrica seriata e dimensioni massime che variano da qualche centinaio di micron a quasi 2 mm. Essi sono costituiti da predominante quarzo e subordinati frammenti di *ARF* e di rocce carbonatiche decompostesi durante la cottura,

rarissimo plagioclasio, lamelle di mica chiara e minerali opachi. In base alla quantità e alle dimensioni degli inclusi, gli impasti sono stati divisi in tre sottogruppi:

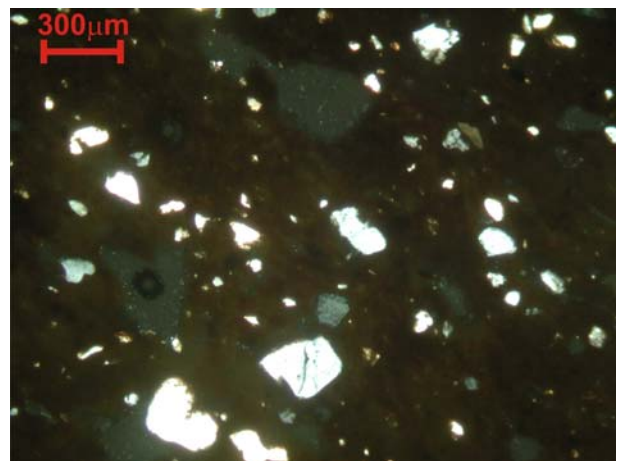
- gruppo 7a: caratterizzato da scarsi inclusi (circa 1%) di dimensioni inferiori a 300 μm costituiti da soli granuli di quarzo e rarissimi minerali opachi (fig. 2.8a);
- gruppo 7b: caratterizzato da una maggiore percentuale di inclusi (circa 10-15%) di dimensioni fino a 700 μm (fig. 2.8b);
- gruppo 7c: caratterizzato da una quantità ancora maggiore di inclusi (20-30%) di dimensioni fino a millimetriche (fig. 2.8c).



a)



b)



c)

Figura 2.8: Immagini in microscopia ottica a luce polarizzata e nicol incrociati di alcuni campioni rappresentativi del gruppo petrografico 7 nei quali si osserva la diversa abbondanza degli inclusi nella matrice di natura carbonatica; a) gruppo 7a con scarsissimi (<1%) cristalli di quarzo (campione 7106/gl2); b) gruppo 7b con scarsi (5-10%) cristalli di quarzo (campione 3435); c) gruppo 7c contenente abbondanti (10-20%) cristalli di dimensioni sabbiose di quarzo (campione 3418/73).

Gruppo 8: ceramiche con inclusi vulcanici

Le ceramiche del gruppo 8 sono caratterizzate da una massa di fondo omogenea, talora otticamente attiva con *b-fabric* di tipo *speckled*. La porosità varia dall'1% al 5%, ed è data da

pori di forma per lo più irregolare (*vughs*) e da *channels*, di dimensione massima non superiore a 600 μm . Gli inclusi sono presenti con *c:f ratio* intorno a 20:80, distribuzione granulometrica seriatata e dimensioni massime fino al mm, ma per lo più intorno a qualche centinaio di micron. In base alla natura petrografica degli inclusi di vulcaniti, è stato possibile distinguere due diversi gruppi:

- gruppo 8a: caratterizzato dalla presenza di abbondanti frammenti arrotondati di rocce vulcaniche acide, con struttura olocristallina porfirica pilotassitica, in cui sono presenti fenocristalli di plagioclasio a composizione albitica (fig. 2.9a); sono inoltre presenti cristalli di quarzo, plagioclasio e minerali opachi;
- gruppo 8b: contraddistinto per la presenza di frammenti arrotondati di qualche centinaio di micron di rocce vulcaniche basiche, a struttura ipocristallina con massa di fondo microlitica intersertale, nella quale si osservano cristalli di plagioclasio associati a pirosseno (fig. 2.9b); si tratta probabilmente di frammenti di rocce basaltiche; nell'impasto sono inoltre presenti cristalli di plagioclasio, pirosseno, quarzo e talora di frammenti di quarzo microcristallino (*selce*).

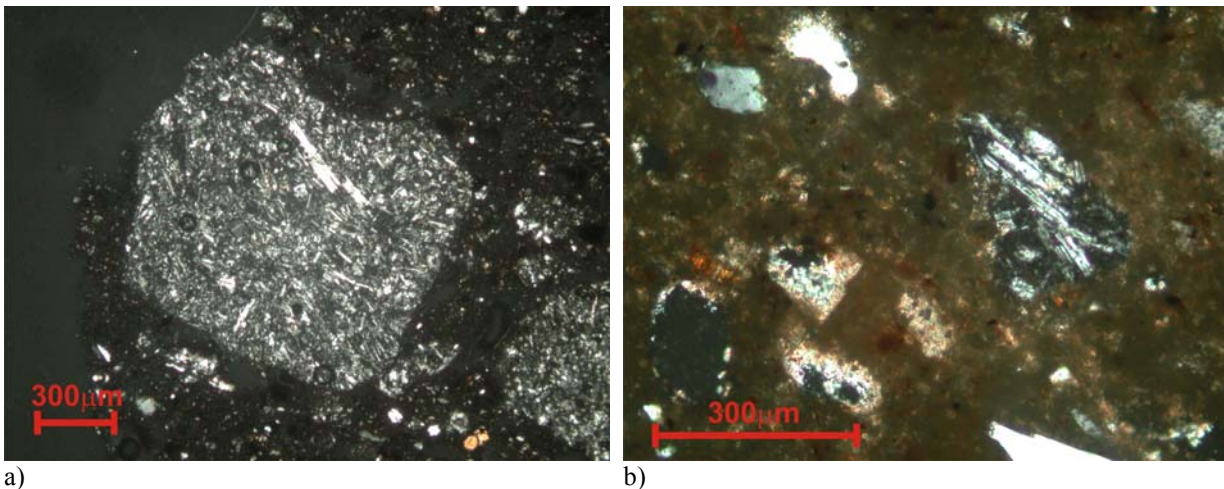


Figura 2.9: Immagini in microscopia ottica a luce polarizzata e nicol incrociati di alcuni campioni rappresentativi del gruppo petrografico 8 nei quali si osserva la presenza dei diversi tipi di frammenti vulcanici; a) gruppo 8a contenente vulcaniti acide (campione 3470/9); b) gruppo 8b contenente vulcaniti basiche (campione 3910).

Gruppo 9: ceramiche “quarzo-sostenute”

Questo gruppo è costituito da solo due campioni, caratterizzati da una struttura molto particolare. Essi sono infatti costituiti da abundantissimi inclusi, con *c:f ratio* pari a circa 70:30. La pasta di fondo, infatti, è molto scarsa e costituita da fase vetrosa. La porosità inoltre è praticamente assente, o comunque data da pori di dimensioni non identificabili dall'analisi microscopica. Gli inclusi sono dati da cristalli angolari di quarzo, di dimensioni variabili, ma

generalmente superiori a 100 μm , e che raggiungono i 900 μm . Essi sono a stretto contatto tra di loro, con un grado di impacchettamento molto elevato (*closed-spaced related distribution*), tanto da poter definire la struttura come quarzo sostenuta (fig. 2.10). Interessante è notare che i due campioni in questione sono dei frammenti di ceramica invetriata, che dal punto di vista tipologico, sono del tutto paragonabili, per i caratteri petrografici, alle cosiddette *stonepaste* anche conosciute come *quartz-frit-clay paste*, *quartz frit*, *fritware*, *faience*, *artificial paste* e *kashi* (Mason & Tite, 1994).

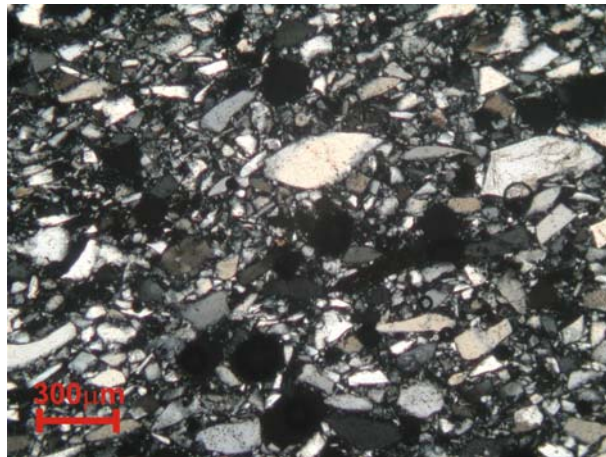


Figura 2.10: Immagine in microscopia ottica a luce polarizzata nicol incrociati di uno dei due campioni del gruppo petrografico 9, caratterizzati dalla presenza di abbondantissimi (circa 70%) cristalli angolari di quarzo (campione 4318).

2.2 MICOSCOPIA ELETTRONICA A SCANSIONE (SEM)

Indagini in microscopia elettronica a scansione utilizzando un microscopio Camscan MX 2500 dotato di rilevatore EDS ed installato presso il Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova, sono state eseguite nel presente lavoro per caratterizzare in modo più approfondito alcuni inclusi che presentavano strutture peculiari, ed in particolare alcuni frammenti con struttura vacuolare, al fine di determinarne sia la natura che le condizioni alle quali si sono formati. Si sono inoltre indagate le composizioni della componente vetrosa e del rivestimento dei due campioni del gruppo petrografico 9, per poterli classificare dal punto di vista sia tipologico che della tecnologia di produzione.

Questa tecnica d'indagine, molto utilizzata in studi petrografici, petrologici e microstrutturali di materiali sia naturali che sintetici, è stata utilizzata fin dagli anni settanta per lo studio delle ceramiche antiche (Tite & Maniatis, 1975; Tite *et al.*, 1982).

Inclusi a struttura vacuolare

In alcuni dei campioni appartenenti ai gruppi petrografici 3, 4, e 5, si è osservata la presenza di inclusi di forma arrotondata e dimensioni di qualche centinaio di micron, caratterizzati da una struttura fortemente vacuolare e da una matrice vetrosa e apparentemente priva di fasi cristalline, per lo meno ad un'osservazione al microscopio ottico (fig. 2.11). I vacuoli sono sempre interamente contenuti negli inclusi, suggerendo che si siano sviluppati durante il processo di cottura all'interno del materiale ceramico. Stabilire vincoli sulle condizioni di formazione di queste strutture, fornisce quindi vincoli anche sulle condizioni di cottura delle ceramiche.

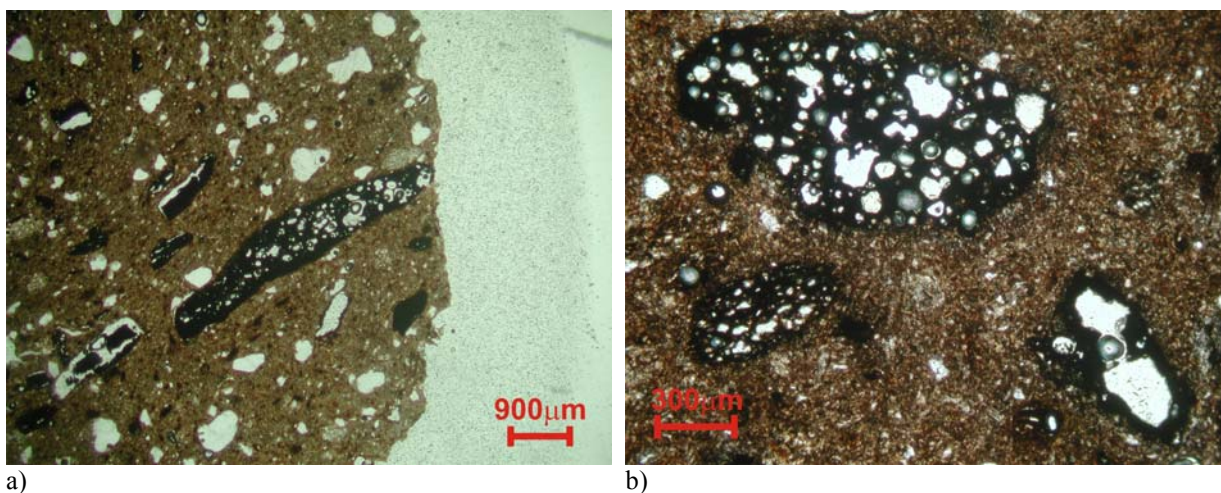


Figura 2.11: Immagini in microscopia ottica in luce polarizzata e nicol paralleli di ARF caratterizzati da struttura vacuolare; a) campione 3418/63, b) campione 3553/18.

Lo studio in microscopia elettronica, attraverso l'analisi chimica semiquantitativa areale EDS, ha permesso di stabilire che tali inclusi presentano composizione molto simile a quella di rocce argillose ricche in ferro (fig. 2.12, tab. 2.1), e pertanto paragonabile a quella degli ARF più ricchi in ferro presenti in molti dei campioni ceramici.

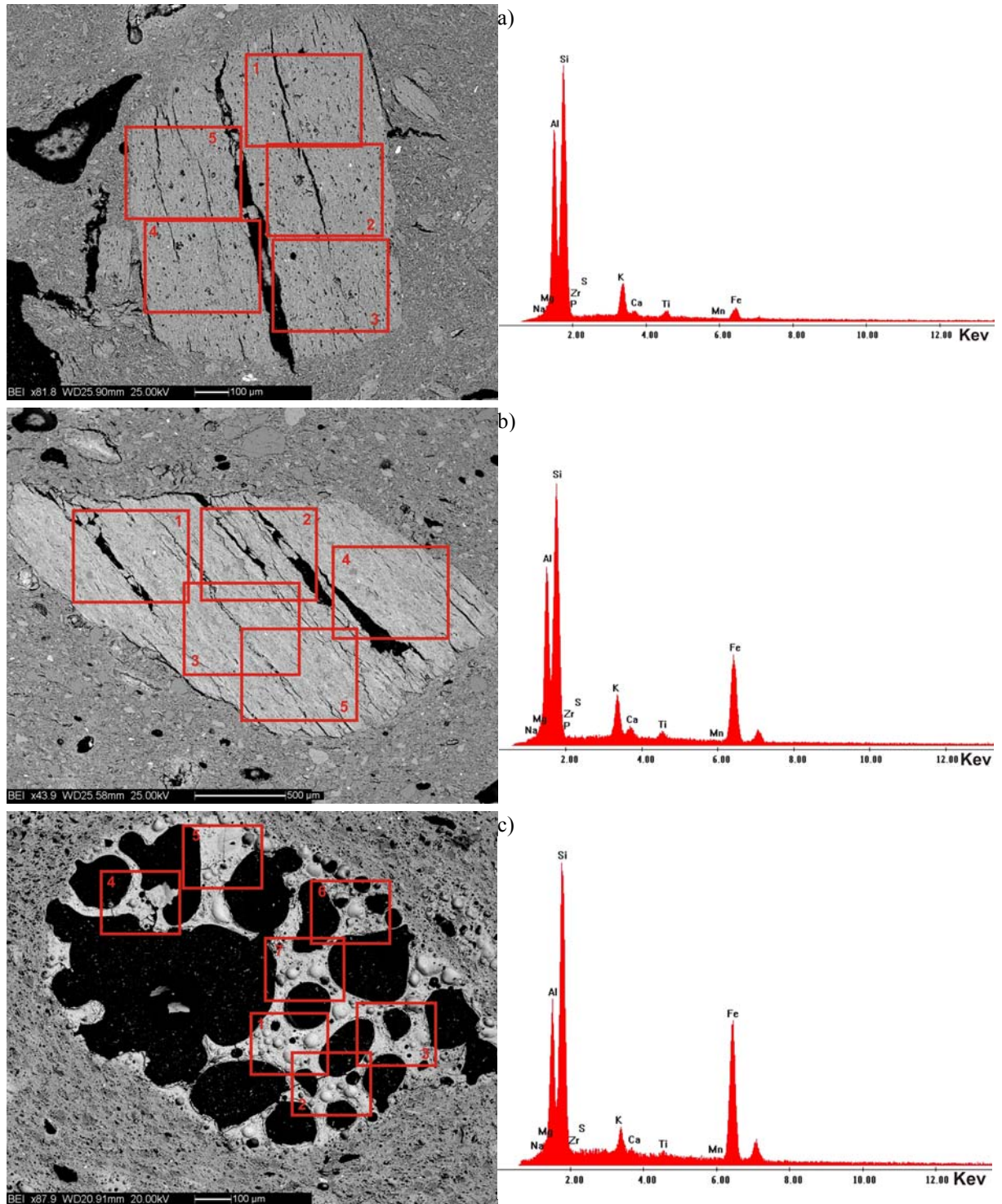


Figura 2.12: Immagini SEM-BSE degli ARF inclusi nelle ceramiche e relativi spettri EDS; a) ARF contenente poco Fe (campione 3135/1); b) ARF ricco in Fe (campione 5627/7); c) incluso a tessitura vacuolare ricco in Fe (campione 2763/10).

Tabella 2.1: Composizioni chimiche semiquantitative medie degli ARF, espresse in peso percentuale degli ossidi, ottenute con l'analisi SEM-EDS sulle aree indicate in figura 3.11.

Incluso		SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5
ARF poveri in ferro	ARF - 3135/11_02	58.88	0.86	30.94	1.26	0.08	2.02	0.48	0.89	2.93	1.27
	ARF - 3116/01_02	56.59	1.01	30.20	1.55	0.14	2.21	0.54	1.04	2.82	3.48
	ARF - 3116/01_03	52.43	0.97	29.62	5.51	0.16	2.51	0.58	1.28	2.77	3.45
	ARF - 3135/11_01	57.89	0.96	30.20	2.18	0.10	2.58	0.54	1.06	3.08	1.05
	ARF - 2763/08_03	54.68	0.90	30.21	2.59	0.15	2.84	0.43	1.32	3.33	3.03
ARF ricchi in ferro	ARF - 5627/07_01	50.91	0.94	25.67	13.87	0.12	2.51	0.77	0.93	3.07	1.00
	ARF - 3116/01_04	46.08	0.76	25.81	18.78	0.18	2.13	0.43	0.96	1.92	2.59
	ARF - 3116/01_01	39.38	0.65	22.83	29.27	0.17	2.19	0.52	0.82	1.80	1.96
	ARF - 2763/08_01	49.63	0.84	25.14	13.93	0.12	2.59	0.40	1.17	2.57	3.09
Inclusi a tessitura vacuolare ricchi in ferro	BI - 2763/10_01	43.22	1.55	22.61	22.55	0.27	2.98	0.40	1.29	2.30	2.33
	BI - 2763/10_02	44.08	0.69	19.61	25.25	0.22	3.02	0.49	1.32	1.64	2.59
	BI - 2763/10_03	45.48	0.73	21.62	22.34	0.26	2.86	0.38	1.16	1.82	2.73
	BI - 3553/18_01	50.93	0.73	20.70	15.35	0.21	3.57	0.87	2.01	1.46	3.44
	BI - 3553/18_02	53.72	0.85	22.37	11.27	0.17	3.13	0.54	1.38	2.79	3.18
	BI - 3553/18_04	30.50	0.72	17.61	42.28	0.37	2.74	0.73	1.24	0.67	2.04

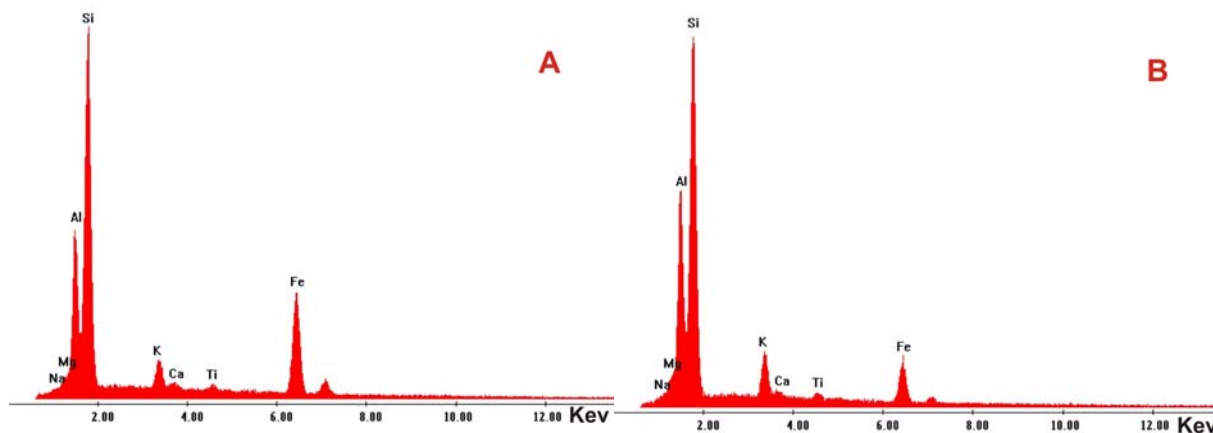
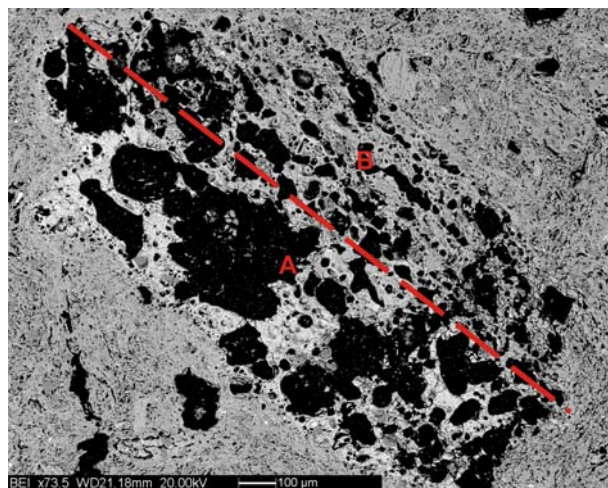


Figura 2.13: Immagine SEM-BSE di un incluso a tessitura vacuolare stratificata e relativa composizione semiquantitativa EDS dello strato più ricco in bolle (A), e dello strato più povero in bolle (B). Come si può chiaramente osservare, la porzione più ricca in ferro è quella che presenta la maggiore porosità, soprattutto in termini di dimensioni dei vacuoli (campione 3553/18).

Inoltre, è molto interessante notare come, all'interno dello stesso frammento, il grado di porosità, ed in particolare la dimensione e la percentuale dei vacuoli, sia maggiore nelle porzioni più ricche in ferro (fig. 2.13). Sembra pertanto che il grado di porosità sia direttamente correlato alla quantità di ferro.

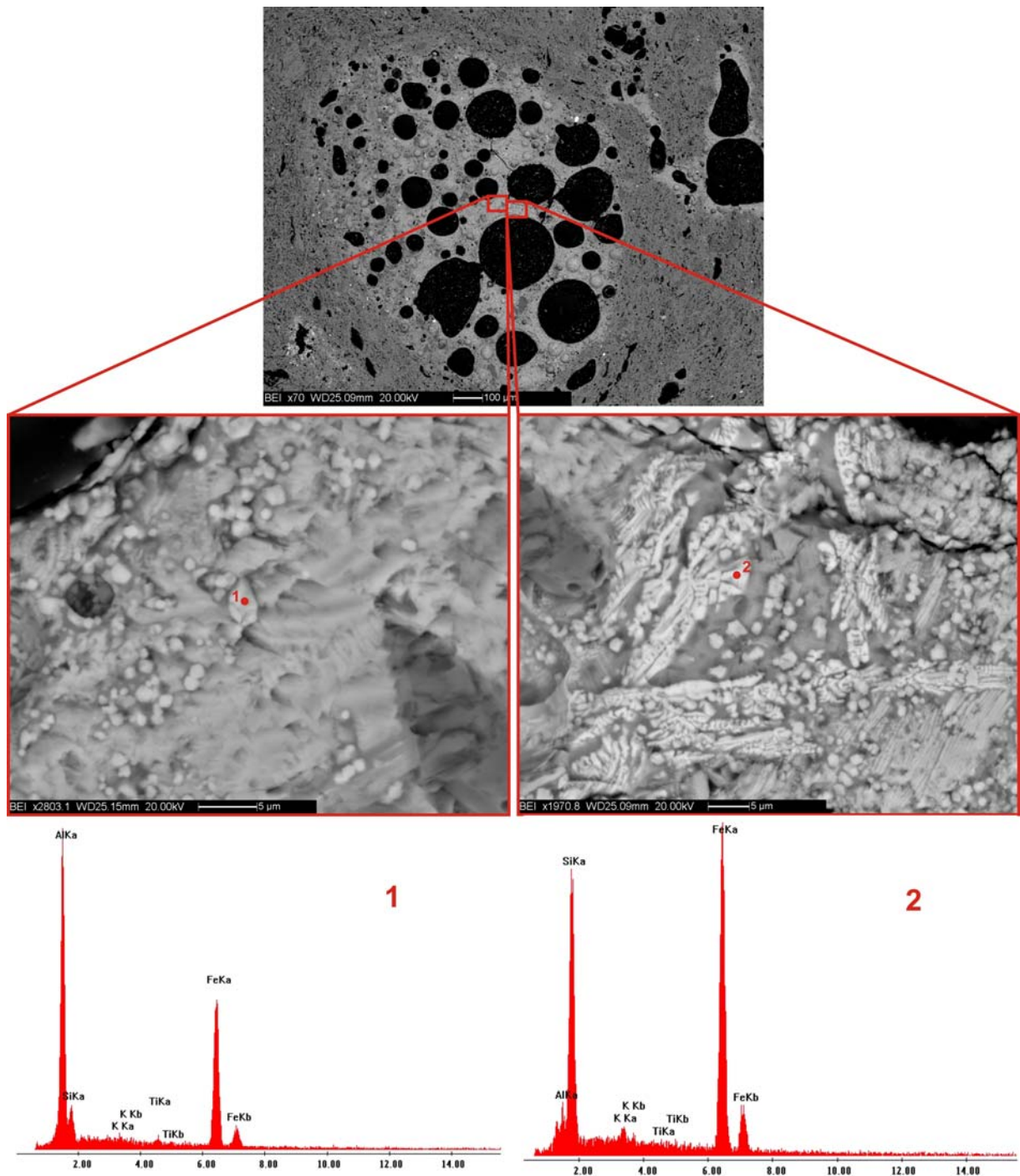


Figura 2.14: Immagini SEM-BSE di un inlcuso a struttura vacuolare e di due aree al suo interno, nelle quali si osserva la presenza rispettivamente di cristalli di ercinite (1) e fayalite (2). La presenza negli spettri EDS di elementi chimici estranei ai minerali (Si per l'ercinite e K e Al per la fayalite) è dovuta probabilmente al contributo della matrice vetrosa circostante che, a causa del notevole ingrandimento, viene in parte investita dal fascio elettronico durante l'analisi della specifica fase cristallina (campione 2763/10).

Solo in alcuni di questi frammenti a struttura vacuolare si è osservata anche la presenza nella matrice vetrosa di ercinite (FeAl_2O_4) e fayalite (Fe_2SiO_4 , rispettivamente in piccoli cristalli sferoidali e in cristalli ad abito prismatico allungato e in forma dendritica (fig. 2.14). La presenza di queste fasi è stata osservata anche attraverso l'analisi in diffrazione raggi X delle polveri di un frammento a struttura vacuolare estratto dal corpo ceramico (fig. 2.15). Queste fasi mineralogiche, assieme al fatto che questo tipo di inclusi si presentano con struttura molto porosa e una matrice vetrosa, indica che l'originaria roccia argillosa è andata incontro a un processo di fusione e cristallizzazione. Questa evidenza può pertanto trovare importanti risvolti nella definizione delle temperature di cottura dei manufatti ceramici che li contengono (vedasi capitolo 3).

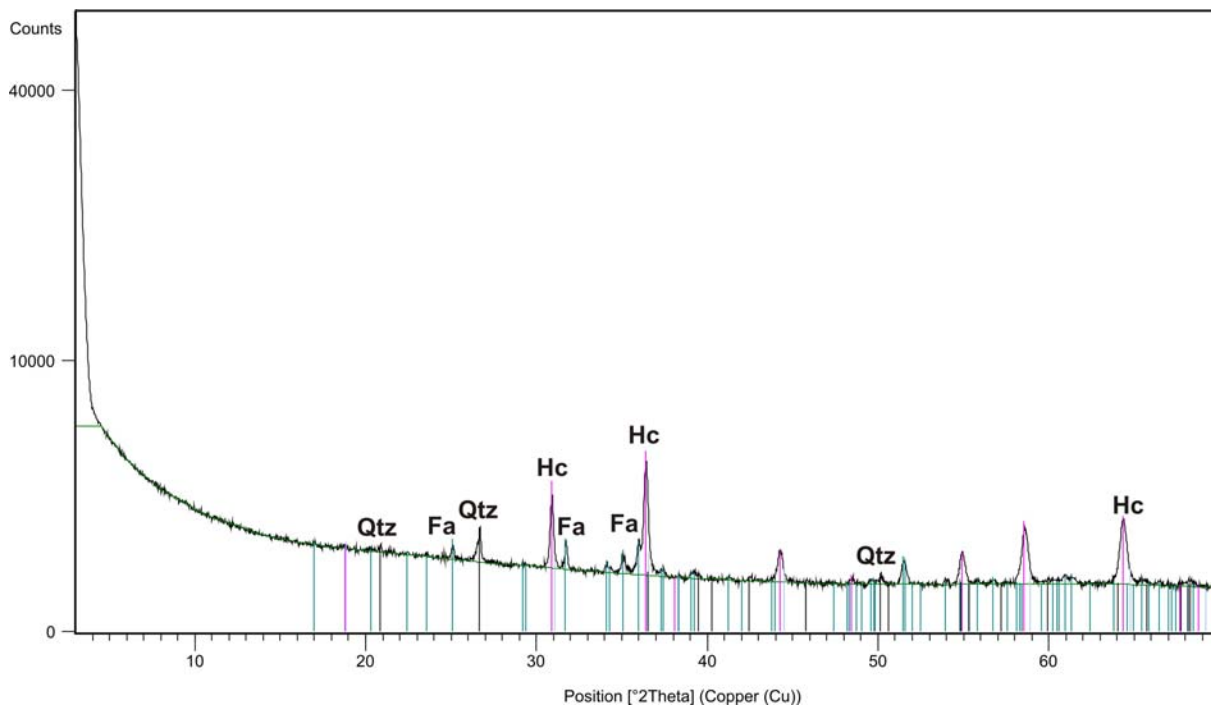


Figura 2.15: Diffratogramma di uno degli inclusi a struttura vacuolare, nel quale si osserva la presenza di ercinite (Hc), fayalite (Fa) e quarzo (Qtz), quest'ultimo imputabile al contributo dell'impasto ceramico probabilmente non completamente distaccato dall'incluso stesso.

Campioni del gruppo 9: stonepaste o faience?

I due campioni di ceramica definiti come *stonepaste* o *faience*, sono stati entrambi collocati, dal punto di vista petrografico, nel gruppo 9, nonostante macroscopicamente presentino caratteristiche diverse, come si può vedere in figura 2.16 (a) e (b). Il campione 4036 presenta, infatti, una colorazione bianco-gialla opaca in superficie mentre il reperto 4318 ha una colorazione verde anche nel corpo ceramico.

Visto che in antichità si producevano diverse tipologie ceramiche costituite da quarzo e da opportuni fondenti che determinavano lo sviluppo di una fase vetrosa, che quindi formava la matrice e fungeva da legante (pasta di fondo), la definizione precisa della tipologia ceramica permetterebbe di inquadrare questi materiali in un contesto tecnologico locale o di scambi commerciali più definito. Pertanto, questi due reperti sono stati indagati in microscopia elettronica, con riguardo particolare al rivestimento esterno, che spesso rappresenta l'elemento diagnostico discriminante delle diverse tipologie.

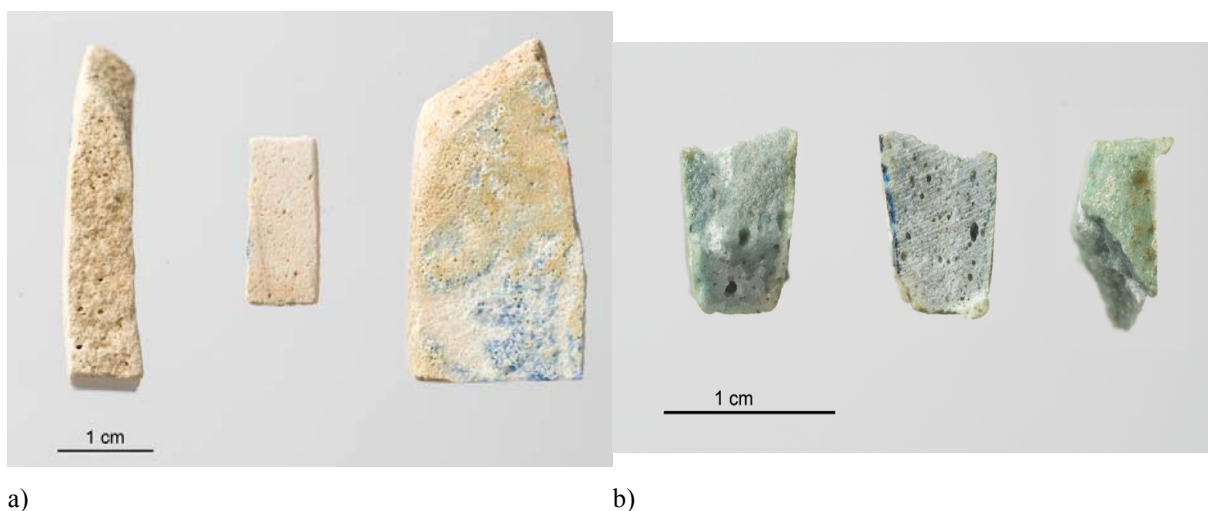


Figura 2.1: *Stonepaste*; a) reperto 4036, b) reperto 4318.

La sezione del campione 4036 innanzitutto mostra una netta separazione e differenziazione tessiturale tra corpo ceramico e rivestimento (fig. 2.17). L'analisi EDS ha permesso di stabilire la natura chimica del rivestimento che risulta caratterizzato da elevati tenori di SiO_2 (anche maggiori del 75%) con presenza di PbO , che tende a diminuire dalla superficie del rivestimento verso il corpo ceramico (fig. 3.16). In esso sono inoltre probabilmente presenti antimoniati di piombo e calcio (fig. 2.18).

La presenza di tali composti, frequentemente utilizzati per ottenere una colorazione giallo-opaca nei vetri (Mass *et al.*, 2002), spiega le caratteristiche macroscopiche del rivestimento di questo reperto. Il piombo veniva inoltre frequentemente utilizzato per l'invetriatura dei manufatti ceramici di epoca islamica per conferire una maggiore brillantezza (Tite *et al.*, 1998). L'evidente differenza chimica e tessiturale tra rivestimento e corpo ceramico permette di ipotizzare che il rivestimento sia stato prodotto applicando alla superficie del manufatto una miscela di materiale vetrificabile contenente prevalentemente silice, piombo e opacizzanti (Mason & Tite, 1994). Questa tipologia di manufatto, in virtù del corpo ceramico silicatico e

del rivestimento piombico è ascrivibile alla classe delle *islamic stonepaste* prodotte a partire dal IX secolo (Mason & Tite, 1994).

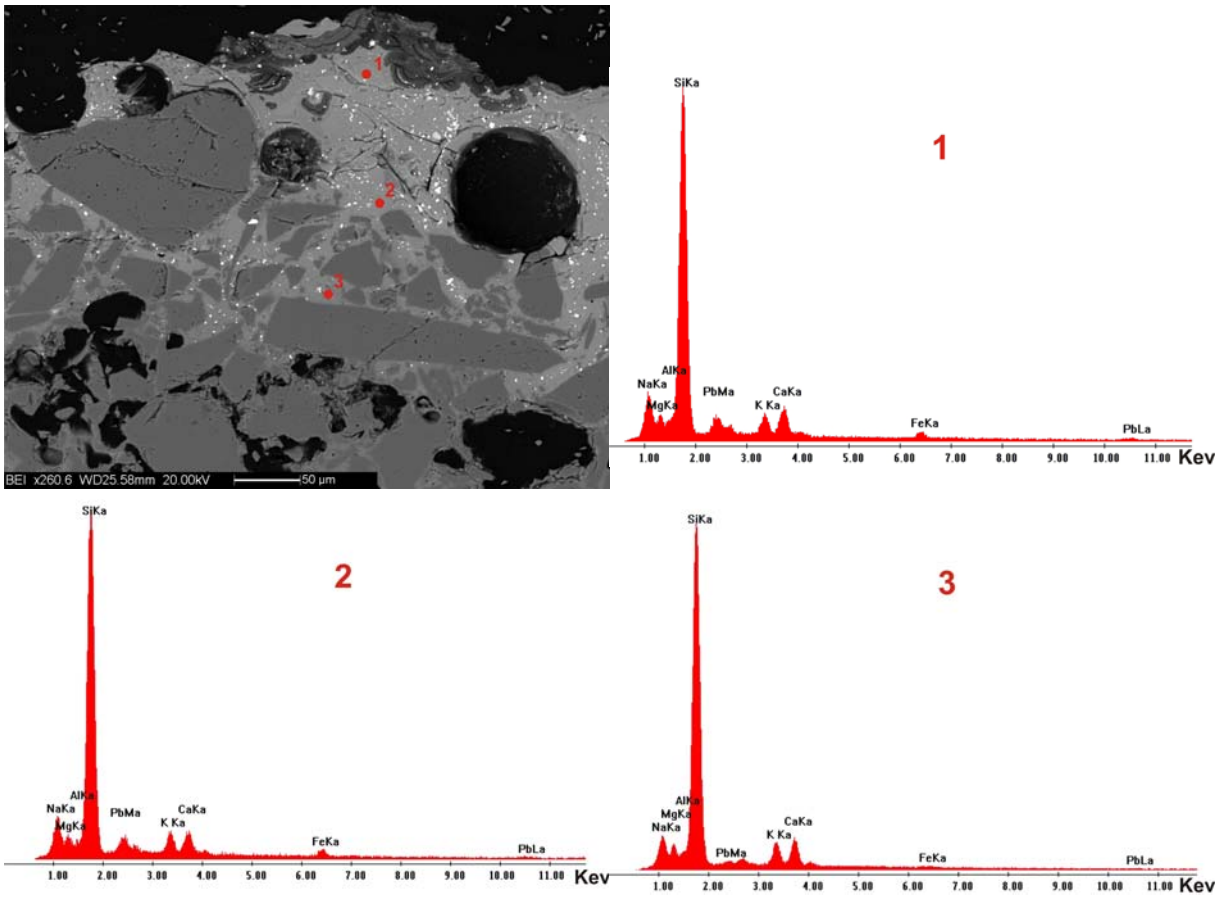


Figura 2.2: Immagine SEM-BSE dell'area di interfaccia tra corpo ceramico (parte inferiore) e rivestimento (parte superiore) del campione 4036. Sono inoltre riportati gli spettri EDS dei punti analizzati in quest'area.

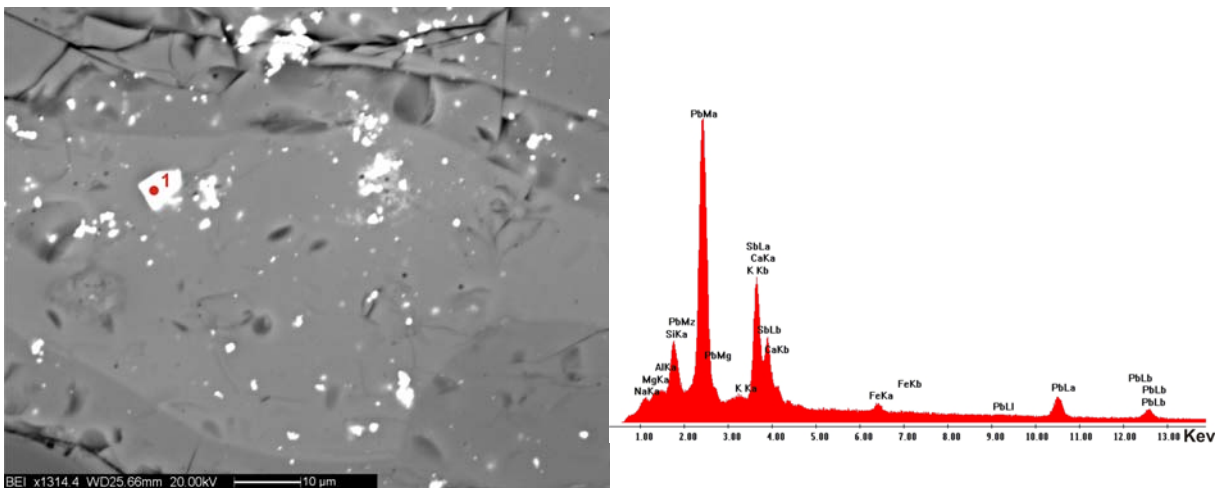


Figura 2.3: Immagine SEM-BSE di parte del rivestimento vetroso del campione 4036, nel quale si osservano piccoli cristalli di antimoniato di piombo.

Il campione 4318 invece presenta un'intensa colorazione turchese sia nel corpo ceramico sia nel rivestimento. L'immagine SEM-BSE mostra come il rivestimento, sebbene distinguibile dal corpo ceramico, presenti la medesima tessitura (fig. 2.19). I due strati, pur presentando la stessa tipologia e frequenza di inclusi, sono distinguibili per una migliore conservazione della matrice vetrosa del rivestimento rispetto a quella del corpo ceramico che risulta fortemente abrasa dalla lucidatura della sezione; ciò è comunque probabilmente riferibile a una differente composizione chimica tra le due matrici che si può tradurre in una differente durezza.

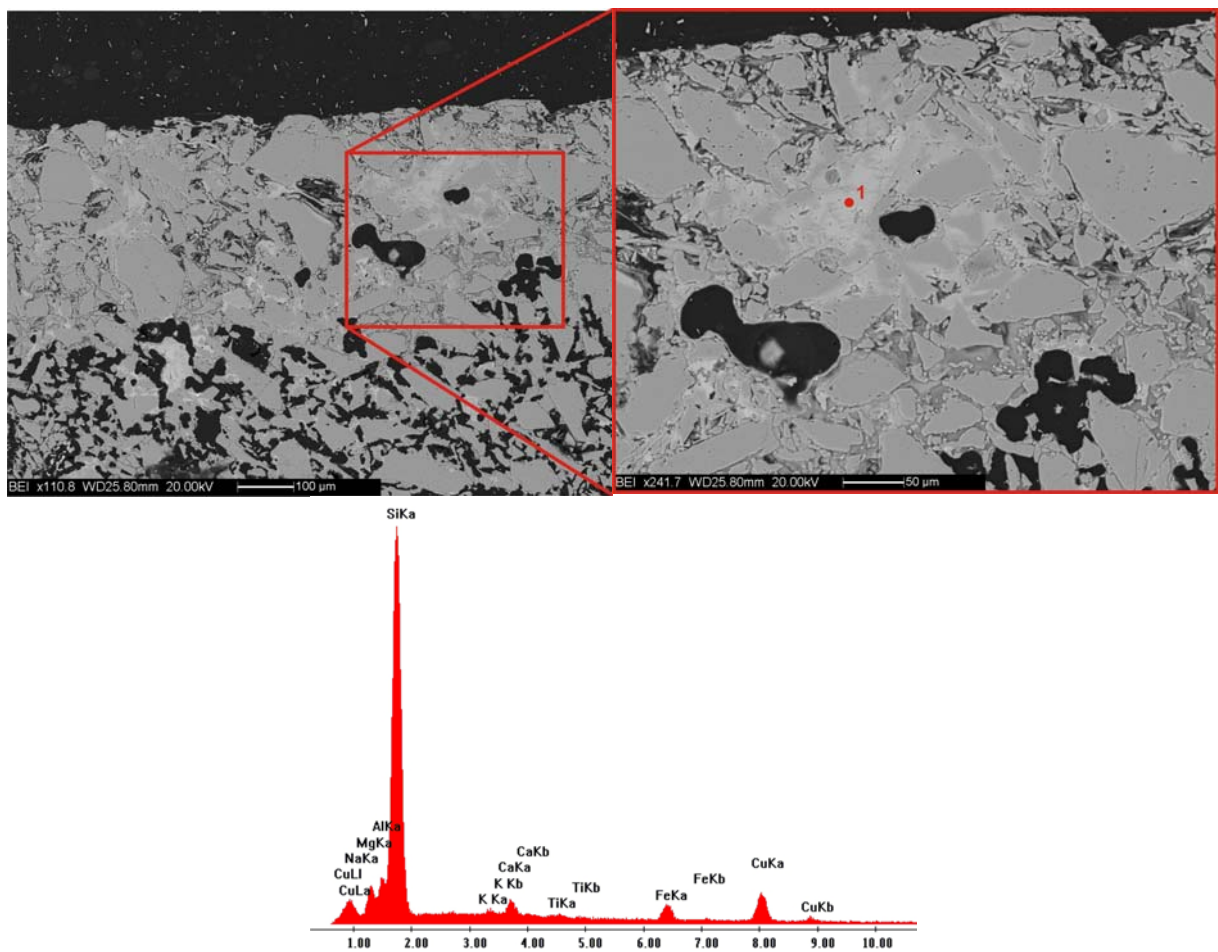


Figura 2.4: Immagini SEM-BSE dell'area di interfaccia tra corpo ceramico (parte inferiore) e rivestimento (parte superiore) del campione 4318, e spettro EDS della composizione della fase vetrosa del rivestimento.

Dalle analisi chimiche semiquantitative si evince come la matrice vetrosa sia ricca di CuO e alcali, ed in particolare in Na (fig. 2.19), responsabili della colorazione turchese (Tite *et al.*, 1998). L'assenza di differenze tessiturali tra vetrina e corpo ceramico è compatibile con le tecniche di invetriatura dette “efflorescenza” e “cementazione”. La prima di queste tecniche prevede l'aggiunta all'impasto ceramico di sali di alcali e composti di rame che, durante

l'essiccazione del manufatto crudo, migrano verso la superficie del manufatto trasportati dall'acqua; l'evaporazione dell'acqua di impasto genera l'efflorescenza di questi sali i quali, durante la cottura, danno origine ad una matrice vetrosa chimicamente differente dal corpo ceramico. Nella tecnica detta cementazione invece il manufatto crudo viene cotto all'interno di un contenitore refrattario riempito di composti di rame e sali di alcali che durante la cottura si legano alla superficie del manufatto generando il rivestimento vetroso. Queste tecniche sono attestate per la produzione delle cosiddette *Egyptian faience* a partire dal IV millennio a.C. fino ad oggi (Tite *et al.*, 1983). Le evidenze macroscopiche, chimiche e tessiturali permettono di ascrivere questo reperto alla classe delle cosiddette *Egyptian faience*.

La dimensione ridotta ed il cattivo stato di conservazione dei due campioni, non permette di effettuare ulteriori analisi né di procedere ad una datazione accurata.

2.3 ANALISI DIFFRATTOMETRICA AI RAGGI X (XRD)

L'associazione mineralogica di una ceramica consiste nell'insieme delle fasi mineralogiche presenti sia nella massa di fondo che negli inclusi. Essa differisce dalla composizione mineralogica della materia prima per il fatto che questa può essersi modificata durante il processo di cottura, attraverso una serie di reazioni che possono avere, almeno in parte, decomposto o trasformato alcune fasi, e prodotto nuove fasi cristalline (fasi di neoformazione) e/o una fase amorfa o vetrosa. In questo senso, l'associazione mineralogica di una ceramica è strettamente relazionata sia alla composizione mineralogica delle materie prime utilizzate, nella fattispecie l'argilla e gli eventuali degrassanti, sia alle condizioni di cottura, quali la massima temperatura raggiunta, la durata del processo di cottura, ed in particolare la velocità di riscaldamento, la durata del periodo di mantenimento alla massima temperatura, la velocità di raffreddamento, e le condizioni ossido riduttive dell'ambiente di cottura. Essa pertanto può fornire importanti informazioni su questi aspetti della produzione ceramica. Inoltre, in taluni casi, alcune delle fasi mineralogiche presenti in un reperto possono derivare da processi di alterazione avvenuti durante il seppellimento. Le associazioni di fasi secondarie, i relativi rapporti microstrutturali e le caratteristiche del sito di deposizione, possono fornire importanti informazioni circa le condizioni chimico-fisiche dell'ambiente di seppellimento e la loro evoluzione nel tempo (Heimann & Maggetti, 1981; Schwedt *et al.*, 2006; Secco *et al.*, in prep.; Schleincher *et al.* 2008).

La presenza o l'assenza di una particolare fase mineralogica all'interno della ceramica permette di definire la massima temperatura raggiunta durante la cottura del materiale (Bimson, 1969; Philpotts & Wilson, 1994). Altre tecniche disponibili a questo scopo sono l'analisi tessiturale (Tite e Maniatis, 1975; Tite *et al.*, 1982), e lo studio dell'espansione termica (Heimann, 1982; Heimann, 1989). Queste, tuttavia, risultano meno affidabili dal punto di vista termodinamico e si basano principalmente sul confronto con situazioni sperimentali non sempre applicabili alla molteplicità delle tipologie di materiali ceramici. Inoltre richiedono quantitativi di materiale che non sempre sono disponibili per le analisi.

Il numero delle fasi mineralogiche che possono essere riconosciute in una ceramica è spesso molto elevato rispetto a quello previsto dalla regola delle fasi di Gibb. Questo dato sta ad indicare che all'interno della ceramica si raggiungono in cottura condizioni di equilibrio solo a livello di microdomini, suggerendo che i processi di diffusione sono molto lenti rispetto alla durata del processo di cottura (Riccardi *et al.*, 1999; Cultrone *et al.*; 2001, Nodari *et al.*, 2007). Pertanto, la determinazione della temperatura di cottura di una ceramica su base

mineralogica, richiede che essa venga confrontata con i risultati di prove sperimentali di materiali argillosi di paragonabile composizione.

Nel presente lavoro di ricerca le associazioni mineralogiche dei corpi ceramici di tutti i reperti studiati sono state determinate in diffrazione dei raggi X, utilizzando un diffrattometro PANalytical *X'Pert PRO*, presso il Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova, ed operando secondo le condizioni analitiche riportate in allegato A. Le diverse associazioni mineralogiche osservate nei reperti studiati (Allegato C) possono essere in linea generale schematizzate come segue:

- quarzo, feldspato potassico, illite ± ematite (9 campioni);
- quarzo, feldspato potassico, illite, mullite, ematite, spinello (4 campioni);
- quarzo, feldspato potassico, ematite, mullite, spinello (101 campioni);
- quarzo, feldspato potassico, ercinite, mullite (6 campioni);
- quarzo, feldspato potassico, plagioclasio (1 campione);
- diopside, quarzo, anortite, gehlenite (14 campioni);
- quarzo, plagioclasio, ematite (1 campione);
- quarzo, calcite (1 campione).

In base a queste associazioni è possibile ipotizzare che per la maggior parte dei campioni sia stata utilizzata un'argilla caolinitica o illitico-caolinitica, contenete quarzo, feldspato potassico e piccole quantità di ossidi o idrossidi di ferro. Queste ceramiche corrispondono agli impasti dei gruppi petrografici 1, 2, 3, 4 e 5 (fig. 2.20, 2.21, 2.22, 2.23). Confrontando queste associazioni con i risultati di prove sperimentali di cottura (Letsch & Noll, 1983; Riccardi *et al.*, 1999; Aras, 2004; Maritan *et al.*, 2005; 2006), è possibile definire per ciascuna di esse i possibili intervalli di cottura. La presenza di ematite e illite permette di definire un intervallo di temperatura di cottura di 750-950°C, visto che l'ematite cristallizza intorno a 750°C, mentre illite è stabile fino a circa 950°C. La presenza invece di mullite, illite e spinello indica che la temperatura di cottura era sufficiente a determinare la cristallizzazione della mullite a partire dalla caolinite (900°C), ma non eccedeva quella di decomposizione dell'illite, risultando pertanto compresa tra 900-950°C. Nella maggior parte dei campioni, l'assenza di illite permette di estendere la temperatura di cottura al di sopra dei 950°C. La presenza di ercinite, anche se in un numero limitato di campioni (6 ceramiche) contribuisce a definire che la cottura sia avvenuta in condizioni riducenti e per temperature di almeno 1100°C. È interessante notare come in tutti i campioni di ceramica contenenti ercinite siano presenti gli inclusi a tessitura vacuolare di cui si è discusso in precedenza.

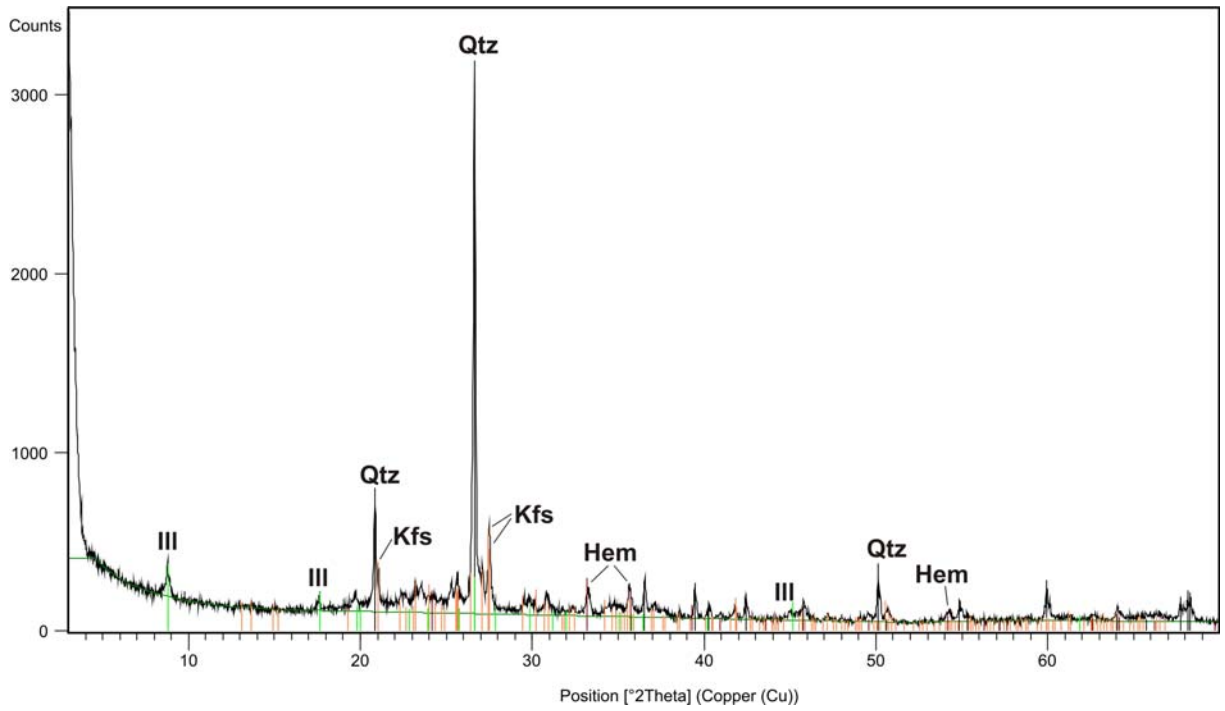


Figura 2.5: Diffratogramma di uno dei campioni (3553/16) che presentano l'associazione mineralogica data da quarzo, K-feldspato, illite ed ematite.

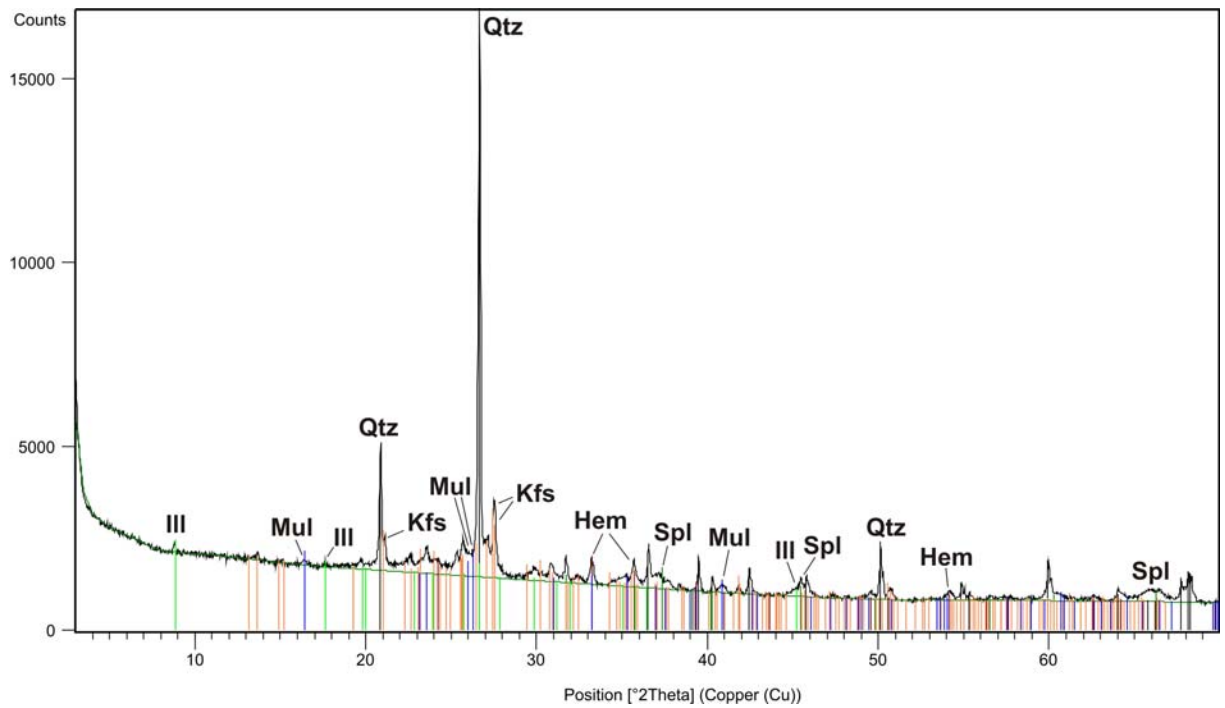


Figura 2.21: Diffratogramma di uno dei campioni (3275/7) che presentano l'associazione mineralogica data da quarzo, K-feldspato, illite, mullite, spinello ed ematite.

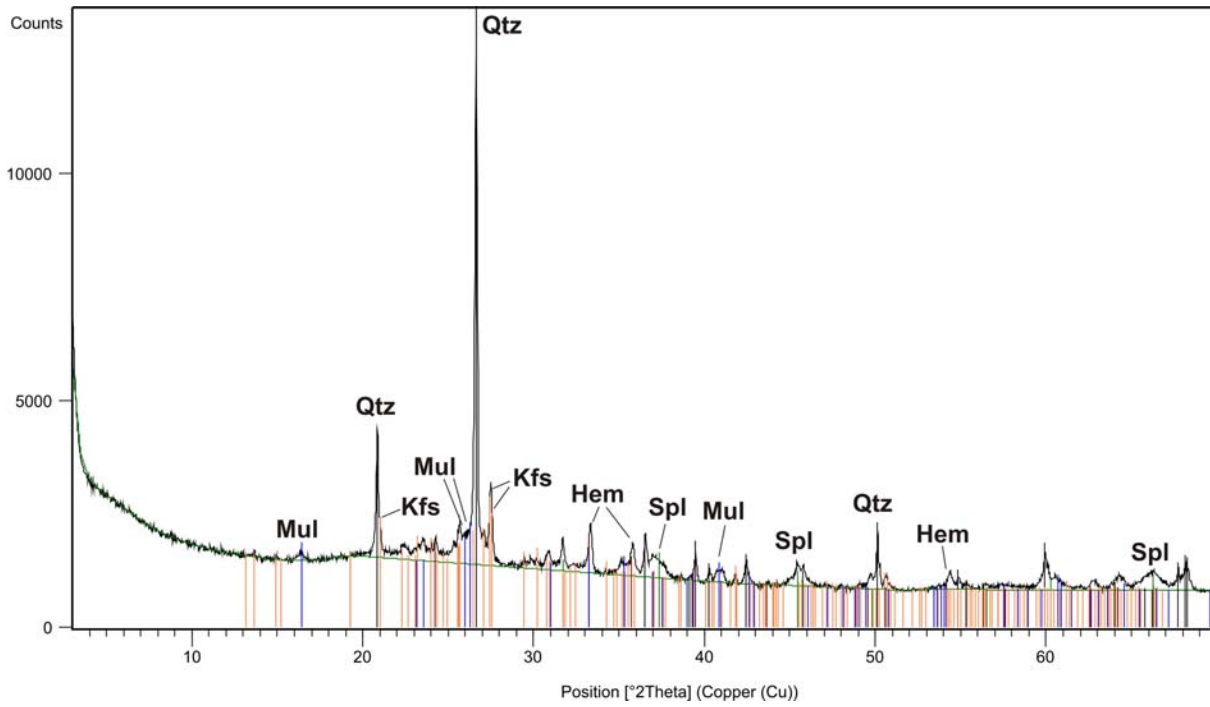


Figura 3.22: Diffratogramma di uno dei campioni (2763/3) che presentano l'associazione mineralogica data da quarzo, K-feldspato, mullite, spinello ed ematite.

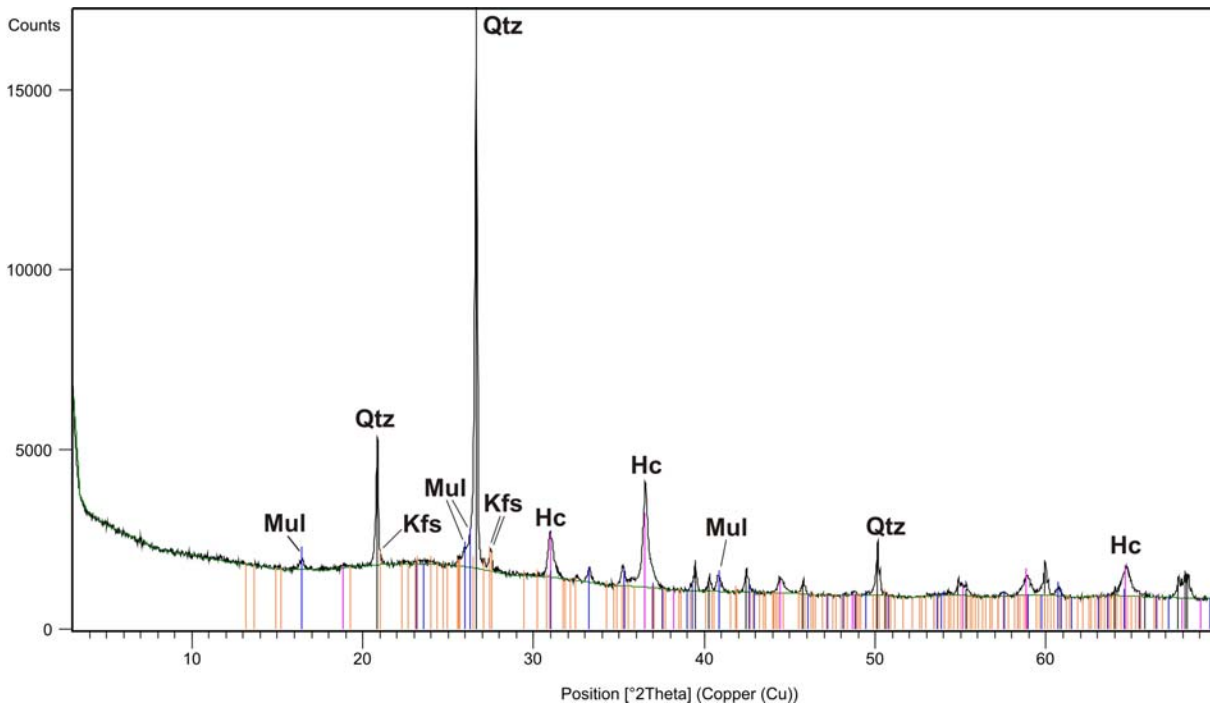


Figura 2.23: Diffratogramma di uno dei campioni (3107/4) che presentano l'associazione mineralogica data da quarzo, K-feldspato, mullite ed ercinite.

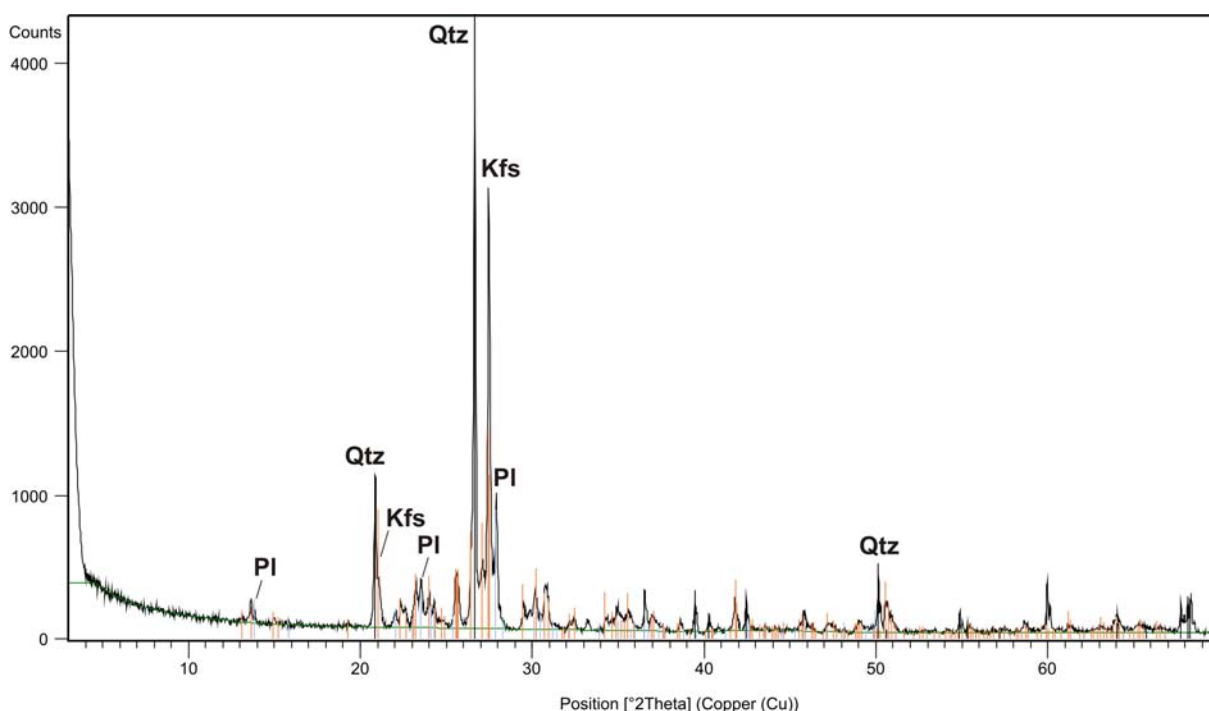


Figura 2.24: Diffratogramma del campione (3470/1) che presenta l'associazione mineralogica data da quarzo, K-feldspato e plagioclasio.

La ceramica del gruppo 6 è invece costituita da solo quarzo, feldspato potassico e plagioclasio (fig. 2.24), in accordo con le osservazioni microscopiche. La componente della pasta di fondo non risulta dare picchi di diffrazione e pertanto può essere considerata sostanzialmente amorfa.

I campioni del gruppo 7 sono invece caratterizzati dalla presenza di abbondante quarzo, diopside, anortite e gehlenite (fig. 2.25), ad indicare la natura decisamente calcarea dell'argilla utilizzata, ad eccezione di un caso in cui la melilite ed il pirosseno non sono stati osservati (3746). Il confronto con i dati di letteratura (Riccardi *et al.*, 1999; Maritan *et al.*, 2005; 2006) permette di definire che questi impasti sono stati cotti ad una temperatura maggiore di 950°C.

Infine, il campione di *stonepaste* sul quale è stata condotta l'analisi in diffrazione, è costituito da quarzo e in misura molto minore anche da calcite (fig. 2.26), la cui presenza può essere relazionata a deposizione secondaria. Infatti, le elevate temperature di cottura necessarie per produrre questa tipologia di ceramica (>1000 °C) e la presenza di fase amorfa non permettono la conservazione della calcite che scompare a circa 850 °C.

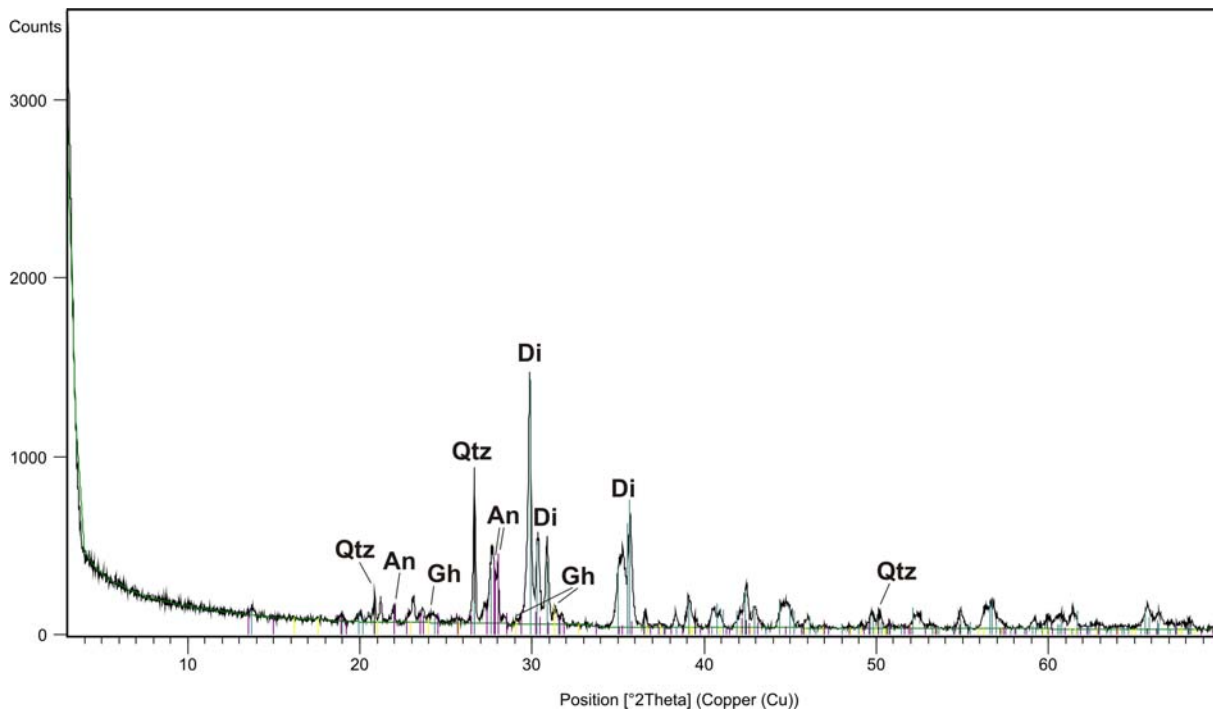


Figura 2.25: Diffrattogramma del campione (3418/72) che presenta l'associazione mineralogica data da diopside, quarzo, anortite e gehlenite.

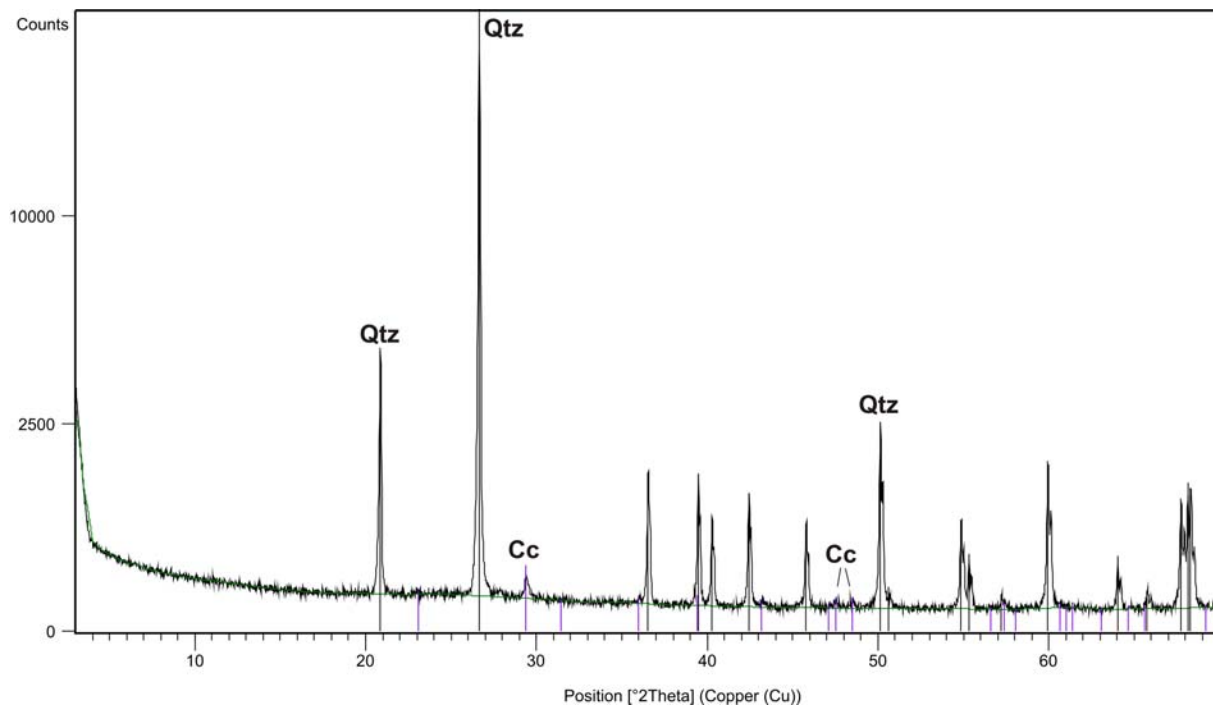


Figura 2.26: Diffrattogramma del campione (4036) di stonepaste che presenta l'associazione mineralogica data da quarzo e calcite.

2.4 ANALISI CHIMICA IN FLUORESCENZA RAGGI X ED ELABORAZIONE STATITICA DEI DATI

La composizione chimica totale delle ceramiche può fornire importanti informazioni sulla provenienza delle materie prime utilizzate, soprattutto nei casi in cui sono siano presenti negli impasti inclusi la cui natura minero-petrografica sia in grado di definire in modo univoco l'area di approvvigionamento. L'analisi chimica è stata applicata allo studio delle ceramiche fin dall'inizio del XIX secolo (Brongniart, 1844), per rispondere all'esigenza di trovare materie prime idonee per la produzione industriale di ceramiche "moderne" (Le Châtelier, 1907; Verneuil, 1911). Questo approccio è stato pertanto utilizzato molto prima che le ceramiche venissero studiate dal punto di vista petrografico e mineralogico. Solo dal 1930 l'analisi chimica è stata applicata anche per studi di provenienza (Levi, 1931), ma il massimo utilizzo di questo tipo di analisi è avvenuto con l'avvento delle tecniche spettroscopiche, che hanno permesso un'acquisizione dei dati molto più veloce.

Bisogna dire che l'analisi chimica delle ceramiche antiche può fornire dati corretti solo se i campioni che vengono analizzati sono rappresentativi dell'intero reperto. Pertanto la quantità di materiale che necessita di essere analizzato varia in dipendenza della granulometria degli inclusi in esso presenti. Inoltre, la composizione chimica di un reperto ceramico non sempre corrisponde alla composizione dell'argilla approvvigionata, visto che in molti casi esse venivano mescolate, addizionate di smagranti o depurate (Neff *et al.*, 1988; Kilikoglou *et al.*, 1988, Grifa *et al.*, 2009). Per questo motivo il confronto chimico con le materie prime può essere fuorviante in assenza di un riscontro petrografico. Inoltre, la composizione chimica di un reperto può subire modificazioni anche a causa di processi di alterazione post-deposizionali, che possono determinare la lisciviazione di alcuni elementi, la trasformazione sia delle fasi cristalline che dell'amorfo presenti nell'impasto o la precipitazione di fasi secondarie (Freestone *et al.*, 1985; Walter & Besnus, 1989; Picon, 1991, Freestone *et al.*, 1994; Collomb & Maggetti, 1996; Buxeda i Garrigós *et al.*, 2001; Freestone, 2001; Maggetti, 1982; Maritan & Mazzoli 2004; Maritan *et al.*, 2009; Schwedt *et al.*, 2004).

Per definire pertanto la provenienza delle ceramiche sarebbe pertanto necessario il confronto chimico tra reperti e scarti di cottura, cioè prodotti ceramici di sicura origine locale, della stessa tipologia ceramica. Ma in molti casi, l'assenza di scarti di cottura impedisce di seguire questa strada e la determinazione sulla provenienza si deve basare solo sul confronto petrografico e chimico con le materie prime, attraverso un approccio statistico multivariato.

Numerosi metodi di analisi chimica sono stati adottati per lo studio archeometrico delle ceramiche antiche, dall'analisi in attivazione neutronica (INAA), all'analisi in assorbimento atomico (AAS), alla spettrometria di massa a emissione (ICP-AES) e a plasma accoppiato induttivamente (ICP-MS), all'analisi dell'emissione di raggi X indotta da protoni (PIXE), alla fluorescenza dei raggi X (XRF). Gli elementi chimici che generalmente vengono analizzati dipendono molto dalla tecnica d'indagine adottata, sebbene Kuleff e Djingova (1990, 1996), dopo un'ampia revisione della letteratura, suggeriscano l'analisi dei seguenti 23: Na, Mg, Al, Si, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Rb, Sr, Zr, Cs, La, Ce, Sm, Hf, Th. Considerando che il numero delle analisi che generalmente vengono fatte in indagini di tipo archeometrico è elevato, e visti i costi ed i tempi di acquisizione delle varie tecniche sopra elencate, i metodi XRF, ICP-AES e AAS sono quelli che si rendono più idonei a questo tipo di analisi.

Ciò premesso, nel presente lavoro, i campioni ceramici provenienti da contesto stratigrafico sono stati analizzati chimicamente in fluorescenza dei raggi X, presso il dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Ferrara, utilizzando uno spettrometro Thermo ARL Advant XP. Per ciascuno di essi è stata misurata la quantità degli elementi maggiori e minori (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5), e di quelli in traccia (Ba, Ce, Co, Cr, La, Nb, Ni, Pb, Rb, Sr, Th, V, Y, Zn, Zr, Cu, Ga, Nd, Sc) per ottenere informazioni sulla provenienza e sulla tecnologia produttiva delle ceramiche. Visto che i materiali ceramici derivano dalla cottura a temperature elevate di materiali argillosi che possono o no essere temperati con smagranti di diversa natura minero-petrografica e/o biologica (paglia, sterco, carbone, etc.), il contenuto delle fasi volatili in essi presenti risente sia della scelta delle materie prime che delle temperature di cottura. Pertanto, tutti campioni sono stati sottoposti a preventiva calcinazione a 980°C , al fine di eliminare tutto il contenuto residuo di fasi volatili e di poter pertanto confrontare statisticamente tutti i campioni.

I dati chimici sono stati processati secondo due diversi metodi di statistica multivariata comunemente utilizzati nell'analisi archeometrica, ed in particolare l'analisi di raggruppamento (*cluster analysis*, CA) (Baxter, 1994; 1999), e l'analisi delle componenti principali (*principal component analysis*, PCA) (Baxter & Buck, 2000). Entrambi questi metodi appartengono a quelle che vengono definite come tecniche di “*unsupervised learning*”, cioè secondo le quali nessun raggruppamento è stabilito a priori (Baxter, 2006).

L'analisi di raggruppamento gerarchico (*hierarchical cluster analysis*) è un metodo statistico che permette di rivelare, in un insieme di dati, la presenza di gruppi coerenti (o *cluster*) che altrimenti sarebbero difficilmente riconoscibili. Questo metodo è in grado inoltre di individuare unità statistiche che presentano una composizione chimica molto diversa da

quella dei vari gruppi e che pertanto si isolano da essi. Queste unità vengono definite *outlier* (Baxter, 1999). Il metodo si basa sulla misura della differenza o della similarità tra i dati trattati, e sulla successiva applicazione di algoritmi che definiscono le regole di classificazione dei dati. Con esso è pertanto possibile considerare un numero k di variabili e n unità statistiche, che nel nostro caso sono rappresentate rispettivamente dagli elementi chimici e dai campioni, e definire le differenze tra campioni in termini di distanza euclidea quadratica, espressa come:

$$Dist. = \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2$$

Un certo elemento statistico potrà essere pertanto attribuito o no ad un determinato gruppo sulla base di questa distanza multivariata. Il metodo sul quale si basano molte delle tecniche di raggruppamento, anche di quelle qui considerate, è il metodo agglomerativo, attraverso il quale tutti gli individui vengono inizialmente considerato come singoli *cluster* e per passi successivi accorpati tra loro, in modo tale che all'interno di ciascun *cluster* ci siano individui simili tra loro ma significativamente diversi da quelli appartenenti ad altri *cluster* del medesimo rango, fino ad ottenere un unico gruppo complessivo per un rango sufficientemente elevato (Baxter, 2006).

Le differenze tra campioni vengono graficamente espresse attraverso la costruzione di un dendrogramma, nel quale ciascun campione è posizionato alla base dei diversi rami, e il livello di congiunzione tra i vari campioni è proporzionale al grado di dissomiglianza. L'interpretazione, e quindi la scelta del numero finale dei gruppi ottenuti, è soggettiva e dipende dal livello di correlazione scelto per la discriminazione dei *cluster*.

La costruzione dei dendrogrammi può avvenire utilizzando diversi metodi (algoritmi) aggregativi, quali *Average-Linkage Cluster Analysis*; *Single Linkage (Nearest Neighbour)*; *Complete Linkage (Furthest Neighbour)*; *Centroid Method*; *Median Method*; *Ward's Method*. In questo caso è stata utilizzata una tecnica aggregativa di tipo gerarchico, ed in particolare il metodo di Ward. Esso prevede che l'algoritmo proceda calcolando le devianze associate a tutti i raggruppamenti possibili, e valuta le distanze tra i *cluster* attraverso la loro varianza. I gruppi saranno definiti da quell'insieme di campioni aventi devianza minima, mentre la distanza tra 2 gruppi sarà data dalla differenza tra la devianza complessiva e la somma delle devianze interne ai 2 gruppi. Inoltre, il metodo di Ward risulta essere particolarmente efficiente nel descrivere la distribuzione dei campioni senza operare un'eccessiva frammentazione in un elevato numero di gruppi (Mommsen et al., 1988).

L'analisi delle componenti principali (PCA) è un metodo statistico multivariato basato sulla varianza delle variabili, attraverso la quale è possibile ridurre il numero delle variabili e di considerare solo quelle che permettono di massimizzare le differenze tra i campioni considerati (Johnson, 1998). Questo metodo permette inoltre di individuare campioni anomali rispetto a quelli studiati, cioè *outlier* (Baxter, 1999), e di definire quali siano le variabili, nello specifico quali elementi chimici, dai quali tali anomalie dipendono.

La PCA prende in considerazione una matrice di dati relativa alle \mathbf{k} variabili osservate, per esempio gli elementi chimici, per \mathbf{n} unità statistiche, rappresentate dai campioni:

$$\vec{X} = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1K} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2K} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nK} \end{pmatrix}$$

Lo scopo di questo tipo di analisi multivariata è quello di ridurre il numero \mathbf{k} di variabili in un numero minore di nuove *variabili correlate*, cioè di ridurre la dimensionalità nell'interpretazione dei dati. Dalla matrice delle variabili osservate si otterrà quindi una matrice di variabili correlate:

$$\vec{Y} = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1K} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2K} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nK} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1K} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2K} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ l_{n1} & l_{n2} & \dots & l_{nK} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1K} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2K} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nK} \end{pmatrix}$$

La i -esima componente di \vec{Y} sarà data da: $Y_i = l_i^T \vec{X}$

Le nuove variabili sono rappresentate in numero progressivo e vengono definite come *componenti principali*. Ciascuna di esse permette di descrivere una certa percentuale della varianza del sistema. Generalmente, le prime *componenti principali* sono quelle che spiegano la maggior parte della variabilità. Spesso è sufficiente prendere in considerazione solo le prime due o tre *componenti principali* per coprire buona parte della percentuale di varianza del sistema.

Pertanto, le variabili iniziali vengono trasformate in altrettanti nuovi valori, le componenti principali, che sono tra loro indipendenti, e che rappresentano combinazioni lineari delle variabili di partenza. Se tra le variabili iniziali c'è una stretta correlazione, basteranno i primi componenti per riassumere queste associazioni in modo soddisfacente (Baxter, 1999).

I risultati possono essere rappresentati attraverso diversi grafici a dispersione, bidimensionali o tridimensionali, a seconda del numero delle componenti utilizzate rappresentate dalla PC1 (componente principale 1), dalla PC2 (componente principale 2) e dalla PC3 (componente principale 3). Con il diagramma dei punteggi (*score plot*) si visualizzano gli oggetti, cioè la distribuzione delle unità statistiche nel nuovo sistema considerato, mentre con il diagramma dei pesi dei fattori (*loading plot*) si rappresentano le correlazioni tra le variabili, e in particolare il peso che ciascuna delle variabili del vecchio sistema (composizioni chimiche) ha sulle nuove variabili (PC1, PC2, PC3, etc.). Nel diagramma dei punteggi, i campioni si distribuiranno secondo una nuvola di punti e gli eventuali *outlier* si troveranno isolati agli estremi, come conseguenza della massimizzazione della varianza lungo i nuovi assi cartesiani. Infatti, la distanza tra i campioni è inversamente proporzionale alla similitudine tra essi. Bisogna ricordare che gli *outlier* possono avere grande influenza sui risultati, e pertanto è consuetudine rimuoverli e ripetere le analisi sul nuovo insieme di dati (Baxter, 1999; Papageorgiou *et al.*, 2001).

Per quel che riguarda il presente lavoro, bisogna dire che la composizione chimica dei campioni ceramici risulta alquanto variabile (Allegato D).

Dall'analisi dei *cluster*, ed in particolare dal dendrogramma di figura 2.27, si osserva che i campioni possono essere suddivisi in 6 raggruppamenti principali (*cluster*). Molto interessante è notare come vi sia una certa relazione tra i gruppi petrografici ed i *cluster*, salvo alcune eccezioni legate alla presenza di inclusi con la medesima natura minero-petrografica e pertanto di chimismo simile tra i diversi gruppi petrografici. In particolare, il *cluster* 1 è essenzialmente costituito dalle ceramiche dei gruppi petrografici 3 e 4, entrambi caratterizzati dalla presenza di ARF e quarzo. Il *cluster* 2 è invece costituito prevalentemente dalle ceramiche del gruppo petrografico 2, mentre il *cluster* 3 da ceramiche soprattutto del gruppo 5, e i *cluster* 4 e 5 da campioni del gruppo 1. Alcuni *cluster* risultano avere un grado di dissimilarità inferiore rispetto ad altri e questo dipende, non solo dalla tipologia di inclusi in essi presenti, ma anche dalla composizione della frazione più fine, rappresentata dalla pasta di fondo. I *cluster* 1 e 2 risultano, infatti, vicini tra loro, nonostante le ceramiche del gruppo 1 abbiano generalmente molti inclusi, mentre le ceramiche del gruppo 2 siano caratterizzate da scarsità di inclusi. Il *cluster* 6 infine riunisce tutte le ceramiche dei gruppi petrografici 7, 8 e 9, che hanno una composizione petrografica molto diversa rispetto alla maggior parte della produzione ceramica rinvenuta a Tayma. Eccezioni sono date dai campioni 3746, 3470/5, che appartengono al gruppo petrografico 1, ma che sono caratterizzati dalla presenza di una certa componente carbonatica, come evidenziato dall'analisi in diffrazione (XRD). Questi campioni

sono quindi vicini alla composizione chimica delle ceramiche del gruppo 7, che è caratterizzato proprio dalla presenza di matrice carbonatica. Lo stesso discorso vale inoltre per l'unico campione 3470/1 appartenente al gruppo petrografico 6 che però non fa parte del *cluster* 6 ma risulta isolato nel *cluster* 3. Nel grafico ottenuto con l'analisi statistica delle componenti principali (PCA) (fig. 2.28) si vede, infatti, come questo campione sia più vicino all'area nella quale si proiettano i dati delle ceramiche appartenenti ai gruppi 1, 2, 3, 4 e 5 che fanno parte anche dei primi 5 *cluster* rispetto ai pochi campioni delle altre ceramiche che appartengono al *cluster* 6 e che nel grafico delle PCA risultano disperse senza un'apparente collegamento tra di loro.

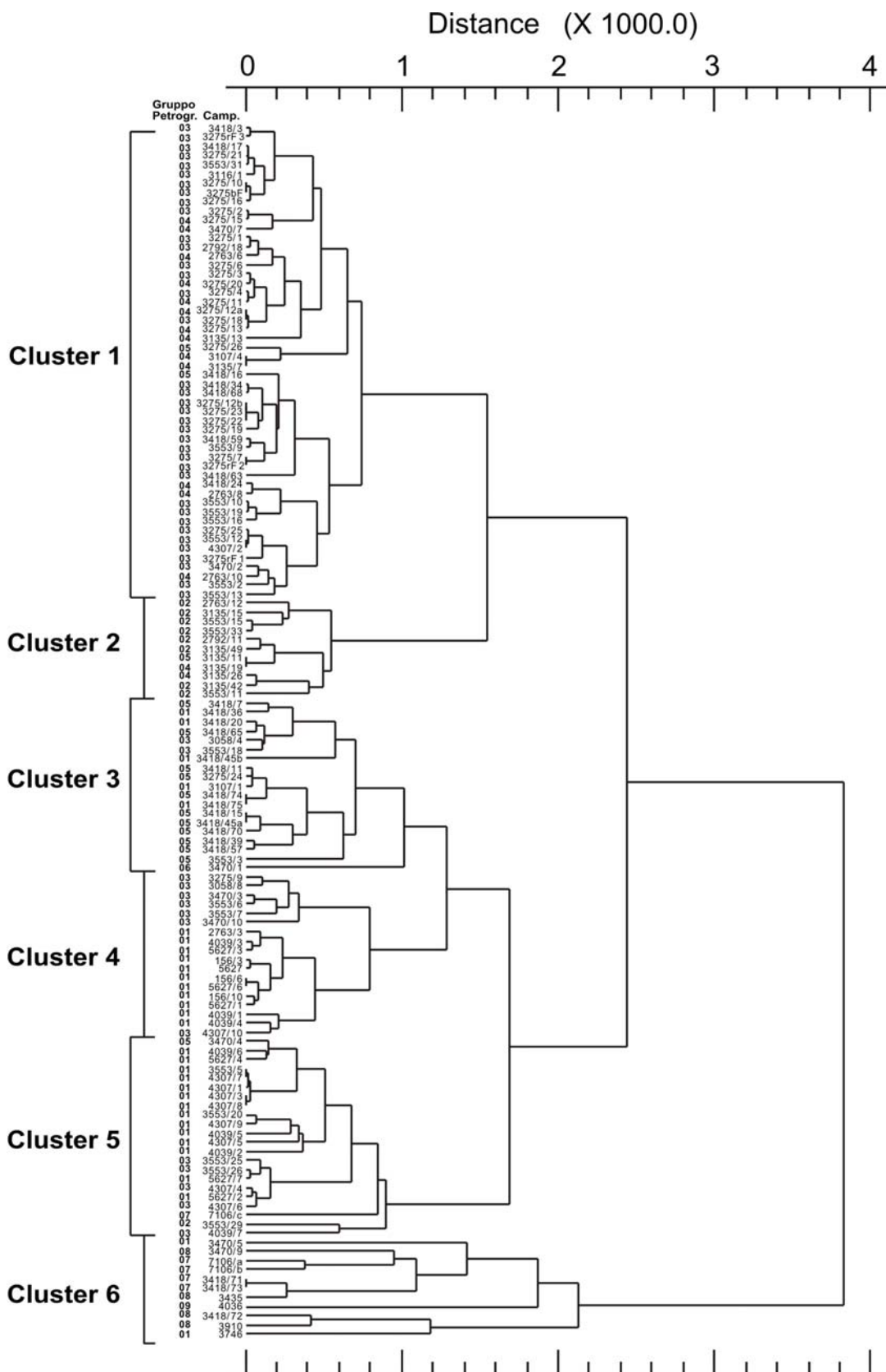


Figura 2.27: Dendrogramma dell'analisi dei cluster delle composizioni chimiche dei reperti ceramici di Tayma.

Tuttavia considerando il peso delle variabili chimiche nelle ceramiche dei gruppi 7 ed 8, che presentano rispettivamente una matrice carbonatica ed inclusi di natura vulcanica, si può osservare come queste risultino allineate lungo la direttrice del peso del CaO, MgO, Na₂O ed MnO mentre in quelle del gruppo 9 si dispongano in direzione della SiO₂, che risulta quindi essere il componente più importante in queste ceramiche ricche in quarzo.

La nuvola dove si concentrano la maggior parte delle ceramiche dei gruppi 1, 2, 3, 4 e 5 si concentra nella parte del grafico a bassi valori di PC1 e PC2 dove pesa in particolar modo l'Al₂O₃, compatibilmente con una composizione caolinica delle argille di partenza.

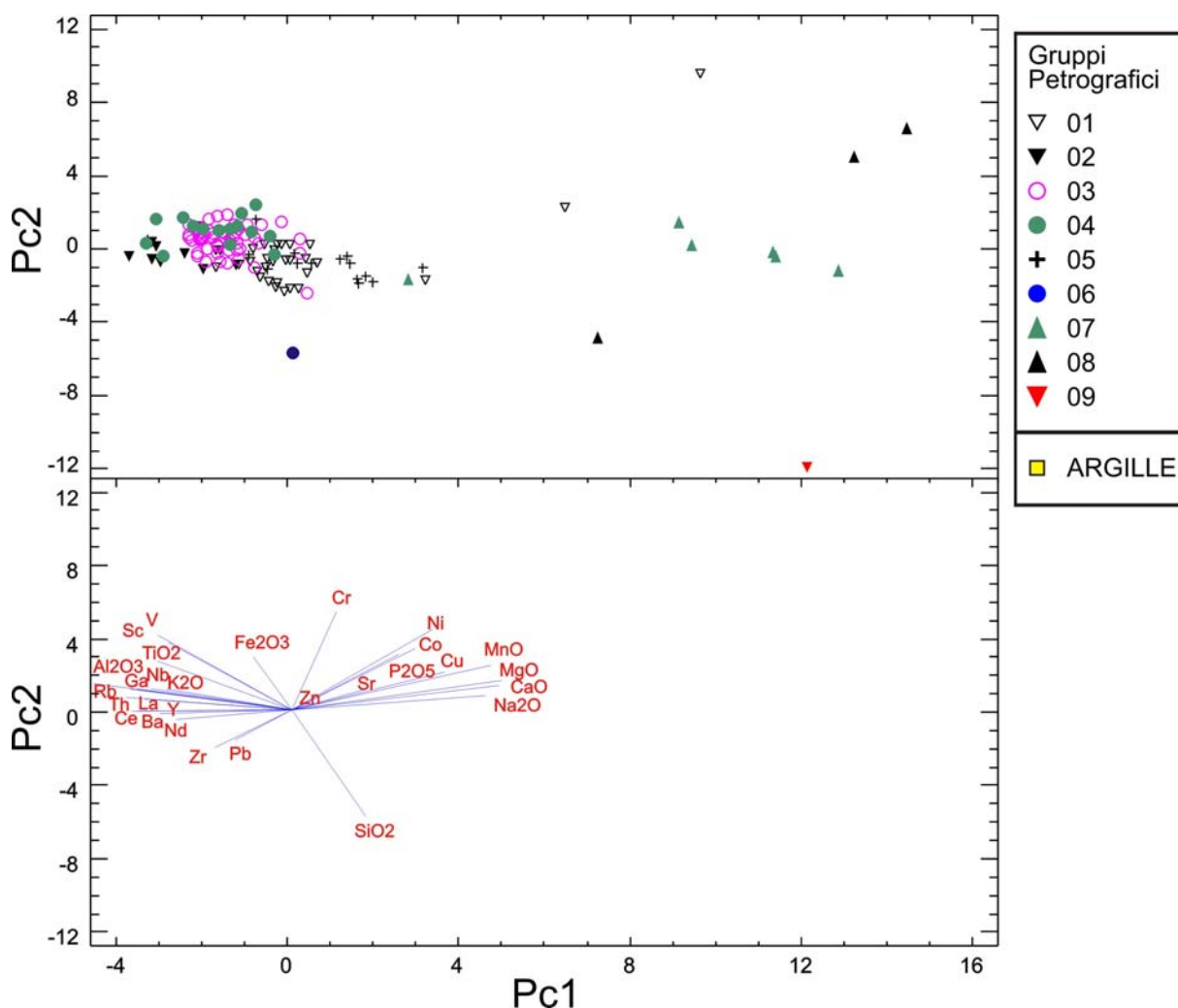


Figura 2.28: Diagramma dei punteggi (sopra) e diagramma dei carichi dei fattori (sotto) dove la PC1 e la PC2 rappresentano rispettivamente il 43% ed il 13% della varianza.

2.5 CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI ARGILLOSI

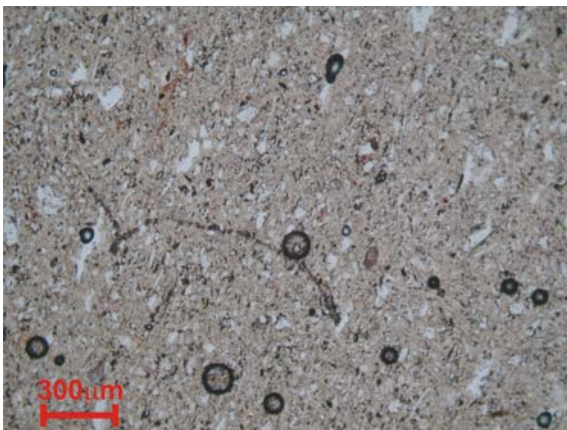
I materiali argillosi e limoso-argillosi campionati nell'area di Tayma, sono stati sottoposti ad analisi petrografica, diffrattometrica (XRD) e chimica (XRF) per definirne la compatibilità o meno con i materiali ceramici.

Per ottenere un materiale idoneo allo studio in sezione sottile, le argille ed i limi argillosi sono stati impastati con acqua, modellati in forma di pastiglie, che sono state dapprima essiccate a temperatura ambiente per 2 giorni, al fine di eliminare l'acqua di impasto, e successivamente cotte in forno a 400°C. Dai materiali ceramici così ottenuti sono state ricavate le sezioni sottili osservate al microscopio. Durante la lavorazione si è appurato come i limi-argillosi avessero una scarsa propensione ad essere impastati, a causa della loro minor plasticità rispetto ai materiali argillosi. Questa caratteristica è dovuta alla presenza di una frazione limoso-sabbiosa (2 μm – 2 mm) nettamente più abbondante rispetto alla frazione argillosa (< 2 μm). L'analisi delle caratteristiche tessiturali e composizionali della frazione limosa (2-20 μm) e sabbiosa (20 μm – 2 mm) di questi materiali, comunque presenti in tutti i sedimenti campionati, è stata utilizzata come strumento principale per poter discriminare le diverse argille e per poter poi fare dei confronti con la frazione più fine e con le caratteristiche delle paste di fondo degli impasti ceramici studiati.

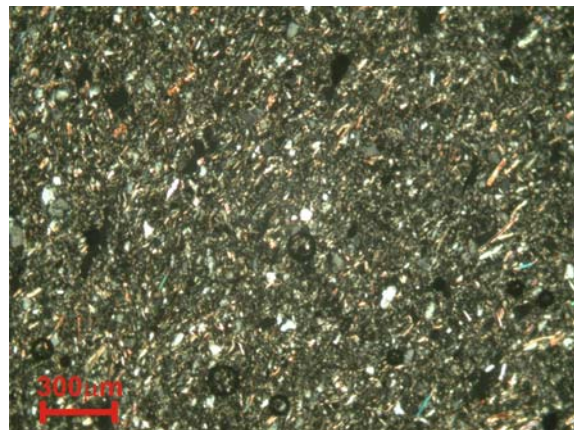
Le argille TA-07-09 e TA-07-10 (fig. 2.29) sono molto simili dal punto di vista microscopico. Esse sono caratterizzate dalla presenza di circa il 10-15% di scheletro di dimensioni medie intorno ai 50 μm e massime prossime ai 100 μm , e sono costituite da cristalli di quarzo, lamelle di mica chiara, minerali opachi ed in misura minore da biotite. La pasta di fondo presenta una colorazione grigia chiara. Dal punto di petrografico queste argille sono risultate molto simili, in termini di tessitura, natura mineralogica dello scheletro e colore della pasta di fondo, alla frazione più fine delle ceramiche dei gruppi petrografici 2, 3 e 4. Un caso a parte è rappresentato dalle ceramiche del gruppo 4b che presentano una quantità di inclusi della frazione minore ai 100 μm leggermente inferiore rispetto a quella delle due argille.

L'argilla TA-07-12, di colore bruno, presenta invece una frazione limoso-sabbiosa più abbondante che si attesta sul 10-20%, ed è costituita principalmente da quarzo monocristallino, lamelle di biotite e mica chiara, minerali opachi ed in misura minore arenarie (fig. 2.30). Lo scheletro presenta dimensioni medie intorno ai 100 μm e massime che raggiungono i 300 μm . Microscopicamente questa argilla è molto simile alla frazione più fine delle ceramiche del gruppo petrografico 1.

Il campione C-09 (fig. 2.31), caratterizzato da una colorazione bruno-rossastra, presenta anche'esso una quantità abbastanza elevata della frazione limoso-sabbiosa, intorno al 15-20%, data da predominanti cristalli di quarzo, e subordinatamente da lamelle di biotite e mica chiara, minerali opachi e ARF. Gli inclusi si presentano con dimensioni medie intorno ai 50 μm e massime che arrivano a circa 300 μm . questa argilla mostra delle forti somiglianze, in termini di tessitura e composizione dello scheletro, con la frazione più fine e la pasta di fondo delle ceramiche del gruppo petrografico 5.



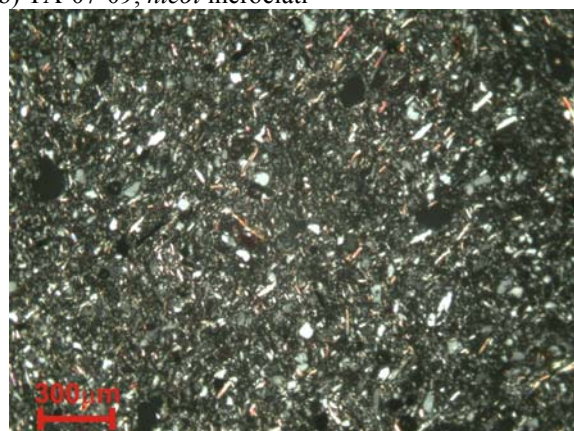
a) TA-07-09; *nicol* paralleli



b) TA-07-09; *nicol* incrociati

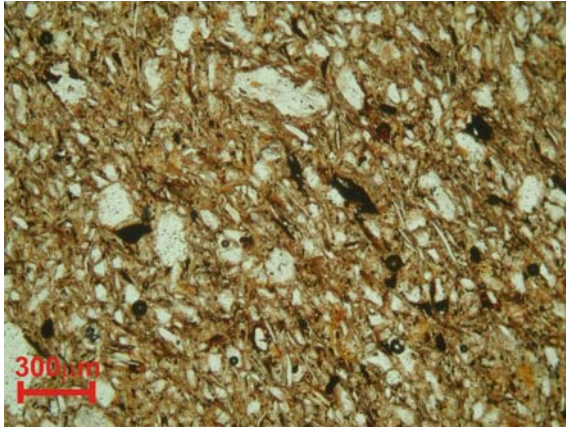


c) TA-07-10; *nicol* paralleli



b) TA-07-10; *nicol* incrociati

Figura 2.29: Campioni di argille TA-07-09, TA-07-10. Frazione limoso-sabbiosa che occupa il 10% della superficie, è inferiore a 100 μm e costituita da quarzo monocristallino, minerali opachi, mica chiara ed in misura minore biotite. Colore grigio della pasta di fondo.

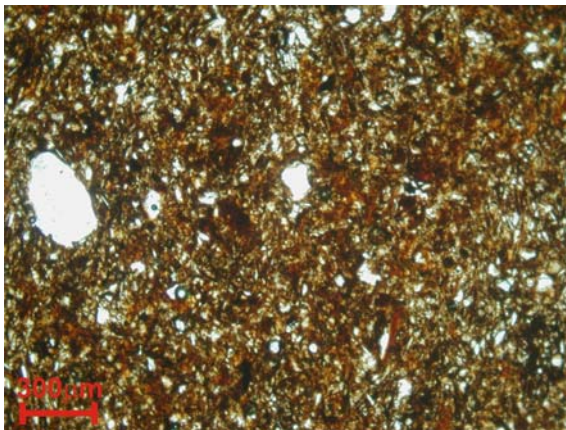


a) TA-07-12; *nicol* paralleli

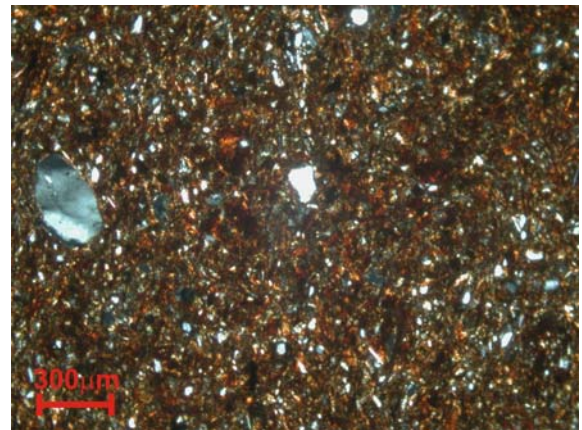


a) TA-07-12; *nicol* incrociati

Figura 2.30: Argilla TA-07-12: Colore bruno della pasta di fondo. Frazione limoso-sabbiosa 10-20%, costituita da quarzo monocristallino, biotite, minerali opachi mica chiara con una dimensione media di circa 100 μm e massima di 300 μm .



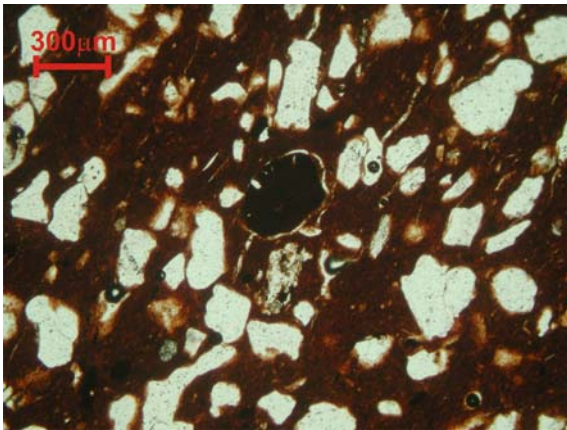
a) C-09; *nicol* paralleli



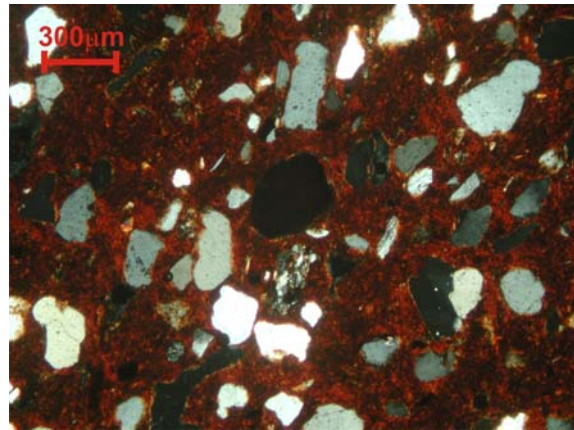
b) C-09; *nicol* incrociati

Figura 2.31: Argilla C-09; colore bruno rossastro della matrice argillosa; frazione granulometrica del limo e della sabbia di circa 50 μm con una dimensione massima di 300 μm e grani costituiti da quarzo monocristallino ed in misura minore biotite, mica chiara, minerali opachi ed ARF.

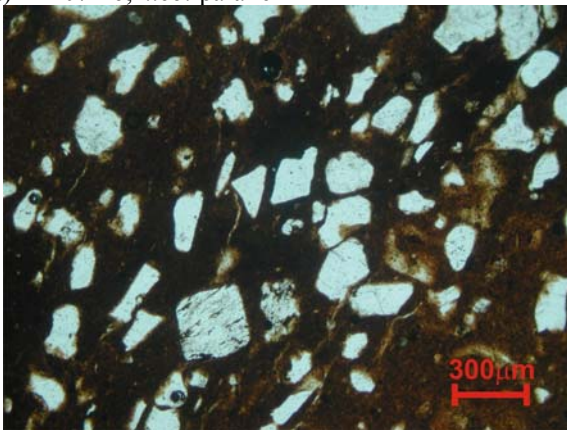
I campioni di argilla TA-07-16 e TA-07-17 (fig. 2.32) di colore bruno-rossastro, hanno una frazione limoso-sabbiosa abbondante (circa 30%) dove la granulometria della sabbia è decisamente maggiore rispetto a quella del limo, con grani ben arrotondati di quarzo che vanno da circa 100 a 500 μm . Essi contengono, inoltre, frammenti di arenarie, cristalli di plagioclasio, *clay pellet* e minerali opachi. Sia la composizione che la tessitura della frazione più grossolana sono compatibili con quelle osservate nei campioni di ceramica del gruppo petrografico 5, il quale tuttavia risulta più ricco in mica chiara e biotite nella frazione al di sotto dei 20 μm rispetto alle argille TA-07-16 e TA-07-17. Queste argille non risultano quindi compatibili con nessun gruppo petrografico di ceramiche.



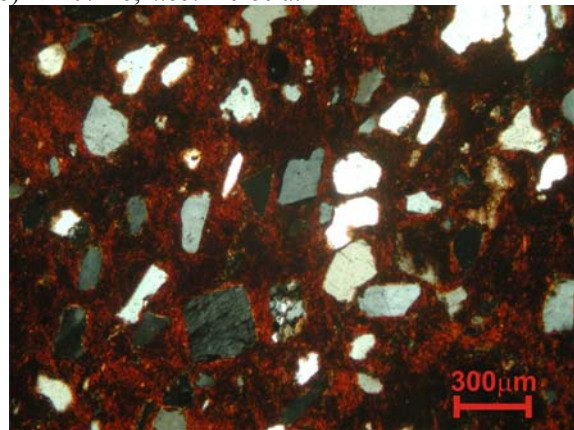
a) TA-07-16; *nicol* paralleli



b) TA-07-16; *nicol* incrociati



c) TA-07-17; *nicol* paralleli



d) TA-07-17; *nicol* incrociati

Figura 2.12: Argille TA-07-16 e TA-07-17; colore bruno rossastro della pasta di fondo; frazione granulometrica prevalente compresa tra 100 e 500 μm grani costituiti principalmente da quarzo, minerali opachi ed in misura molto minore arenarie e rari *clay pellet*.

Le analisi in diffrazione raggi X ha messo in evidenza come tutte le argille siano composte principalmente da caolinite e quarzo. In esse sono inoltre presenti illite, muscovite, scarso feldspato potassico e in taluni casi goethite (TA-07-12, C-09) e smectite (C-09) (fig. 2.33, 2.34, 2.35, 2.37). Visto che i riflessi di quest'ultima fase sono difficilmente distinguibili da quelli della vermiculite, il campione è stato trattato attraverso solvatazione con glicole etilenico. Il preparato glicolato, infatti, induce il cambiamento della struttura della smectite che porta la dimensione basale da 14 a 17 Å (fig. 2.36). In seguito a riscaldamento a 350 °C inoltre si è appurato come la dimensione basale collassi a circa 10 Å (fig. 2.36) con l'innalzamento del picco dell'illite. Tale caratteristica è riscontrabile nelle smectiti (Mirabella, 2004). Questo processo porta alla modificazione della struttura della smectite con il conseguente spostamento del picco principale mentre la vermiculite, con la glicolazione, mantiene costante la distanza interplanare e con il riscaldamento collassa anch'essa a 10 Å (Mirabella, 2004).

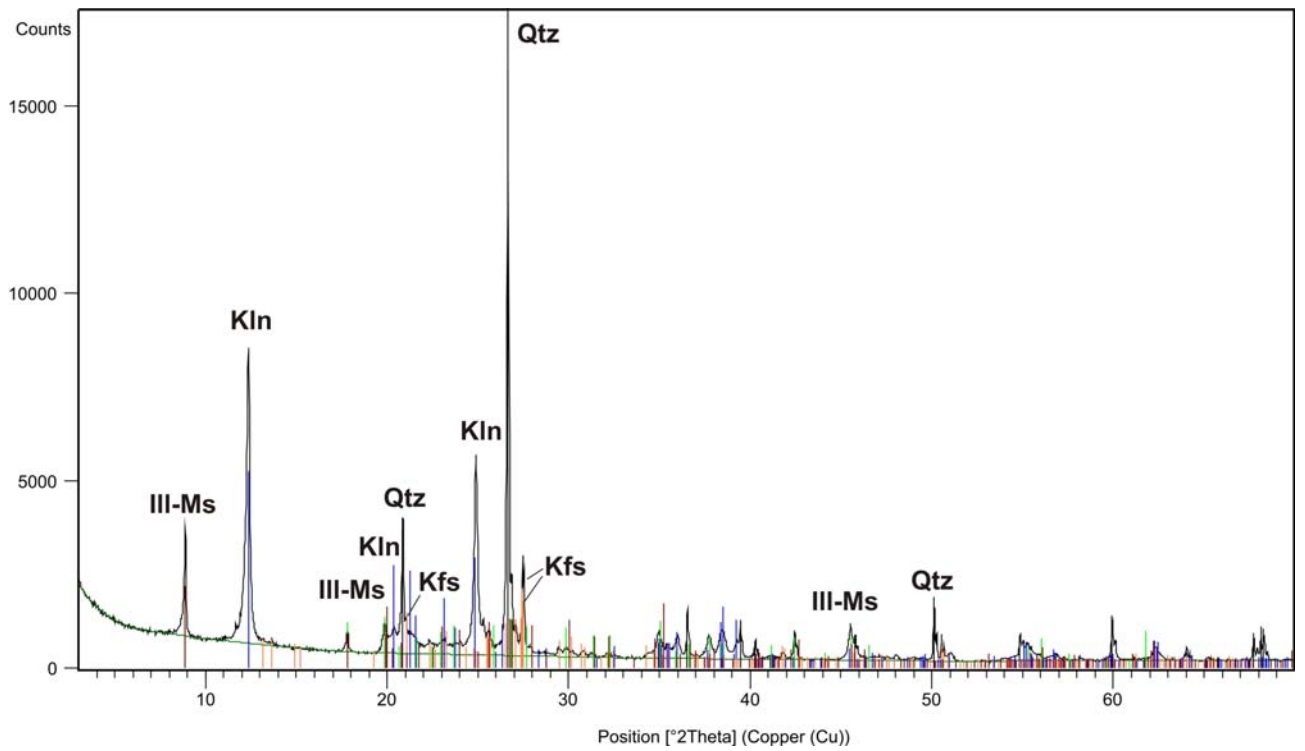


Figura 2.33: Diffratogramma dei campioni TA-07-09 TA-07-10. Associazione mineralogica: quarzo (Qtz), caolinite (Kln), illite-muscovite (III-Ms), K-feldspato (Kfs).

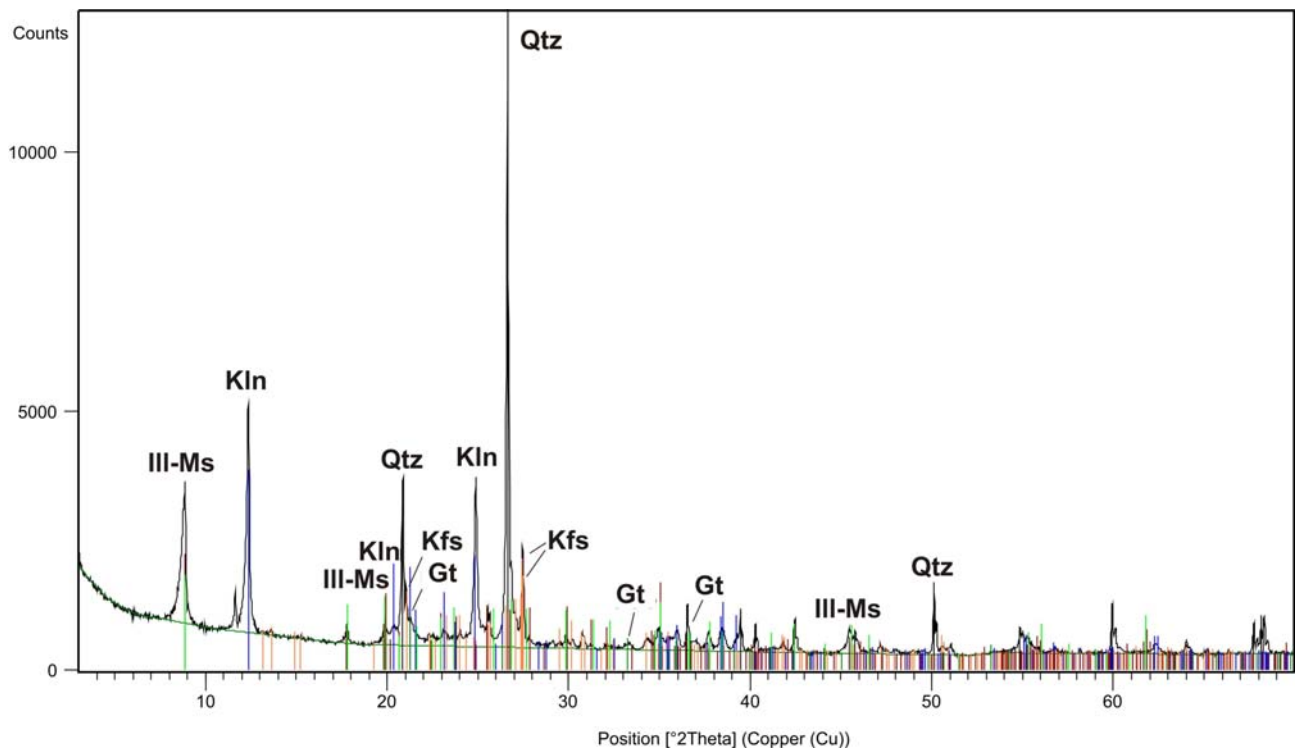


Figura 1.34: Diffratogramma del campione TA-07-12. Associazione mineralogica: quarzo (Qtz), caolinite (Kln), illite-muscovite (III-Ms), K-feldspato (Kfs), goethite (Gt).

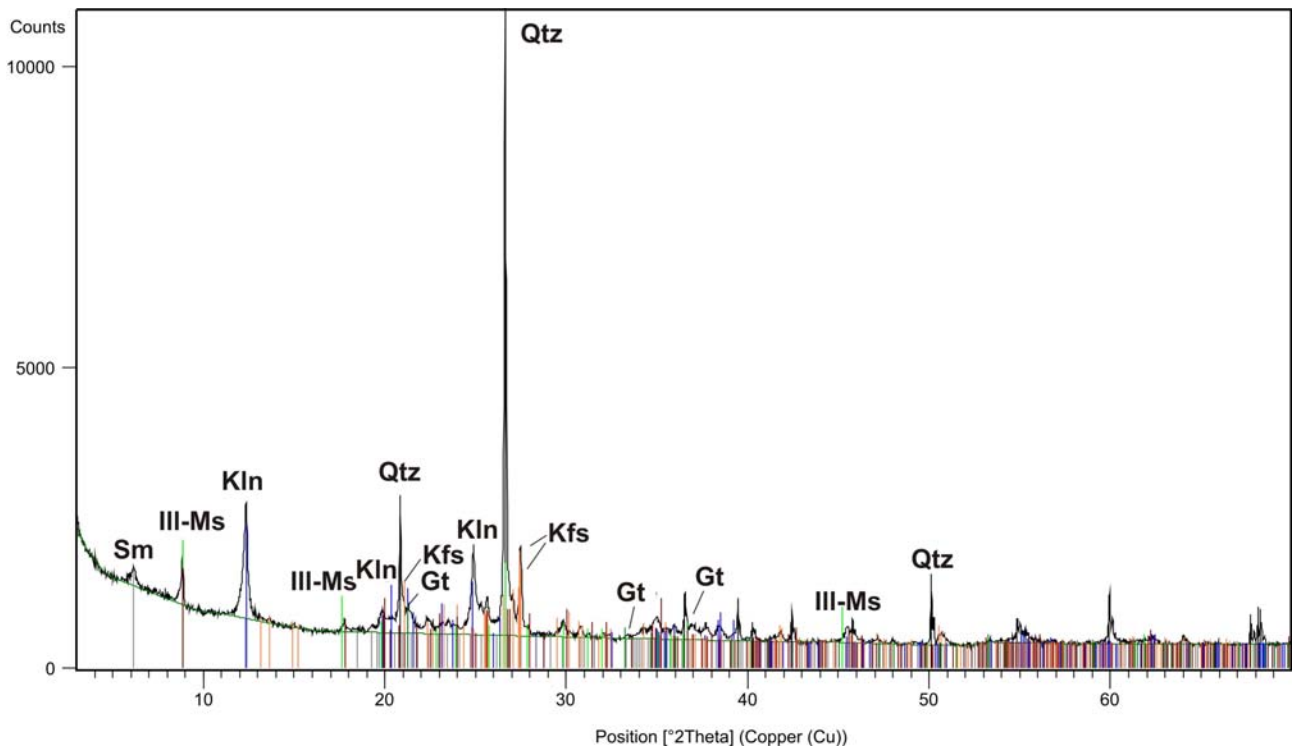


Figura 2.35: Diffrattogramma del campione C-09. Associazione mineralogica: quarzo (Qtz), caolinite (Kln), illite-muscovite (Ill-Ms), K-feldspato (Kfs), goethite (Gt), smectite (Sm).

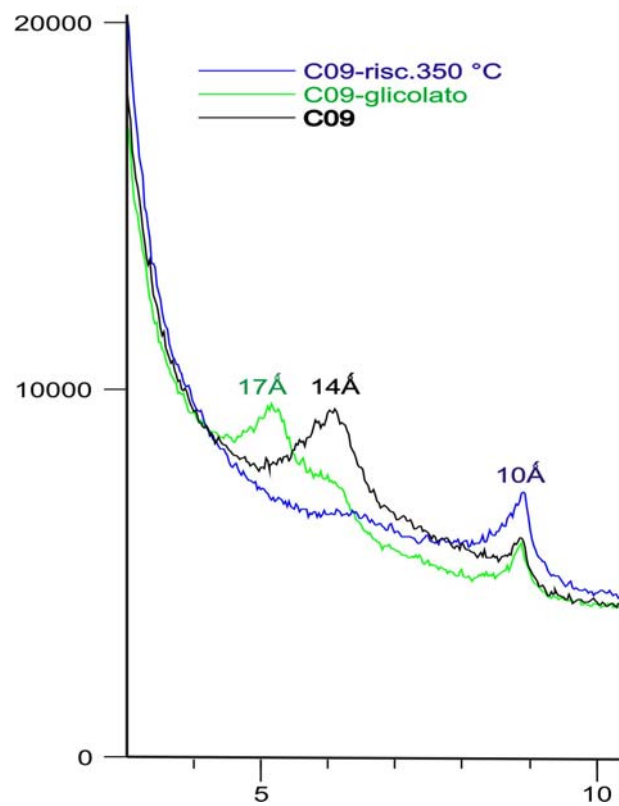


Figura 2.36: Cambiamento della struttura della smectite in seguito a glicolazione (tratto verde) e riscaldamento a 350 °C (tratto blu).

Interessante è osservare come le argille TA-07-16 e TA-07-17 risultino costituite in maniera predominante da quarzo e solo in maniera subordinata da caolinite, illite, K-feldspato e goethite (fig. 2.37). Questo risultato è in accordo anche con quanto osservato attraverso l'analisi petrografica che mostra come queste argille abbiano una frazione sabbiosa quarzosa relativamente abbondante.

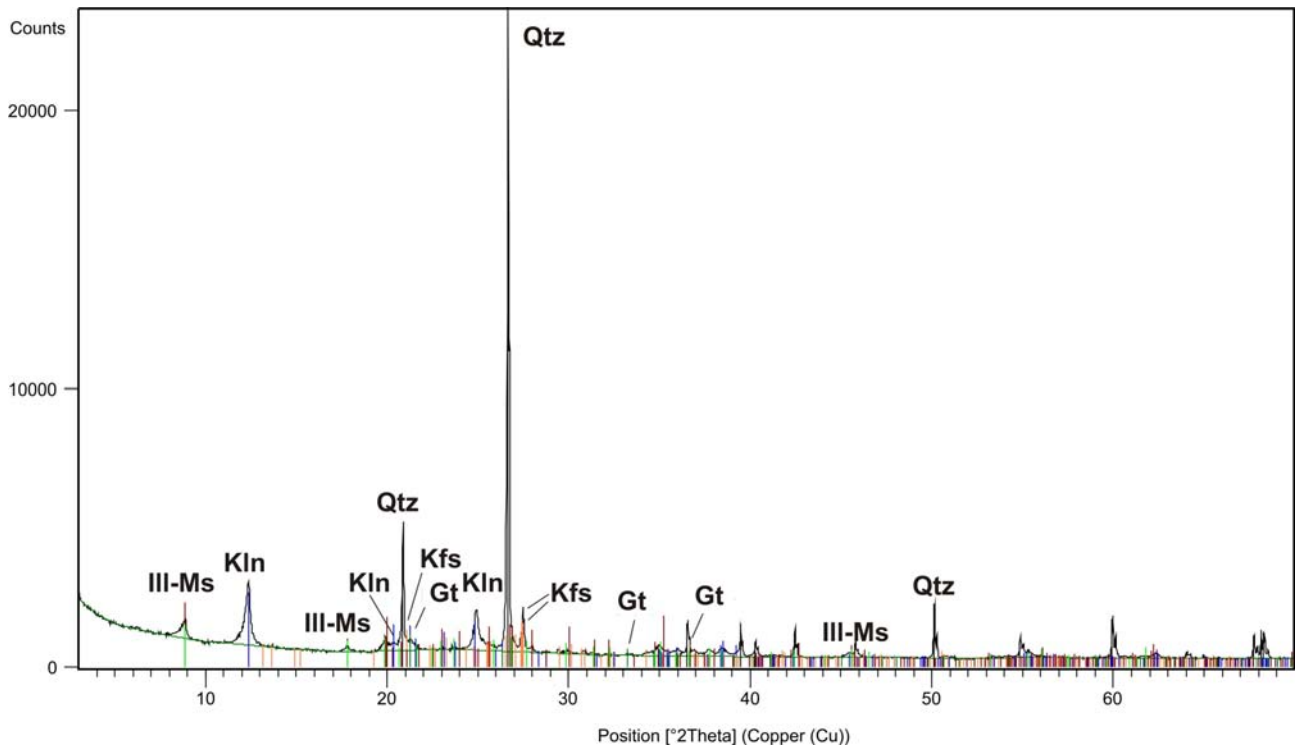


Figura 2.37: T16-17 Diffattogramma dei campioni TA-07-16 e TA-07-17. Associazione mineralogica: quarzo (Qtz), caolinite (Kln), illite-muscovite (III-Ms), K-feldspato (Kfs), goethite (Gt).

L'analisi chimica in fluorescenza dei raggi X (XRF) delle argille mostra differenze soprattutto per quanto riguarda i contenuti in Al_2O_3 e Fe_2O_3 . I campioni TA-07-09 e TA-07-10 presentano il più alto contenuto in Al_2O_3 , che può essere direttamente relazionato alla maggior quantità di caolinite in questo campione, come confermato anche dall'analisi in diffrazione dei raggi X. Il maggiore contenuto in Fe_2O_3 nelle argille C-09, TA-07-12, TA-07-16 e TA-07-17 è legato alla presenza di goethite. I bassi tenori in CaO per tutti i campioni confermano l'assenza di carbonati nelle argille.

Tabella 2.2: Composizione chimica delle argille analizzate in XRF, espresse in percentuale degli ossidi per gli elementi maggiori e minori, e in ppm per gli elementi in traccia.

	C-09	TA-07-09	TA-07-10	TA-07-12	TA-07-16	TA-07-17
SiO₂	51.09	57.86	57.96	52.61	60.21	57.91
TiO₂	1.37	1.51	1.75	1.47	1.03	1.11
Al₂O₃	26.59	33.73	33.56	30.29	25.22	26.70
Fe₂O₃	11.39	1.33	1.53	7.77	6.98	7.62
MnO	0.06	0.01	0.01	0.03	0.05	0.06
MgO	2.55	0.28	0.26	1.10	1.67	1.66
CaO	0.45	0.34	0.15	0.63	0.94	0.94
Na₂O	0.20	0.21	0.20	0.20	0.30	0.28
K₂O	6.05	4.68	4.52	5.85	3.40	3.54
P₂O₅	0.26	0.06	0.07	0.06	0.20	0.20
Ba	829	579	572	658	389	372
Ce	114	141	126	142	95	103
Co	29	4	4	27	17	22
Cr	137	142	168	155	115	124
La	78	71	73	69	48	54
Nb	24	38	46	28	19	21
Ni	49	15	17	43	34	38
Pb	38	23	26	32	27	26
Rb	170	110	111	380	114	127
Sr	136	104	110	95	103	102
Th	22	36	48	19	14	15
V	185	193	319	174	118	133
Y	53	50	70	46	27	28
Zn	119	38	36	259	86	97
Zr	296	365	440	294	188	161
Cu	35	16	30	50	35	36
Ga	32	46	50	41	26	27
Nd	50	42	44	45	32	34
Sc	26	22	26	26	24	25

3. PROVENIENZA E TECNOLOGIA PRODUTTIVA

Lo studio petrografico delle ceramiche svolta nel capitolo 2 ha messo in evidenza come la maggior parte delle ceramiche abbia degli inclusi costituiti da quarzo, ARF, arenarie e siltiti distribuiti in varie percentuali e granulometrie nei gruppi petrografici 1, 2, 3, 4 e 5 di cui fanno parte 125 dei reperti. La natura di questi inclusi è ampiamente compatibile con la geologia dell'area di Tayma, caratterizzata dalla presenza di depositi eolici costituiti da sabbie quarzose, con grani di forma arrotondata, e affioramenti di arenarie e siltiti che possono presentare intercalazioni a matrice argillosa (fig. 1.16). I gruppi petrografici 6, 7, 8 e 9, a cui appartengono solo 13 reperti, hanno uno scheletro costituito da inclusi la cui natura minero-petrografica non è compatibile con le litologie affioranti nell'area di Tayma. In particolare il gruppo 6 è caratterizzato da inclusi costituiti da K-feldspato frequentemente peritico certamente derivante dallo smantellamento di rocce granitoidi. Questo tipo di rocce costituiscono ampie porzioni dello Scudo Arabico, le cui propaggini più orientali si trovano a circa 100 km ad ovest di Tayma (fig. 1.7). Le ceramiche del gruppo 7 sono state realizzate utilizzando un'argilla contenente una certa frazione carbonatica micritica, e talora mostrano inclusi carbonatici. Poiché le rocce calcaree sono estremamente rare nell'area di Tayma (si riscontrano solo sporadici affioramenti di calcari a circa 10 km dal sito archeologico), e sono assenti le argille marnose, si evidenzia una chiara incompatibilità tra i materiali utilizzati per la realizzazione di queste ceramiche e le materie prime disponibili nel territorio. Le ceramiche del gruppo 8 sono caratterizzate dalla presenza di inclusi costituiti da frammenti di vulcaniti, sia di composizione acida che basica, anche queste affioranti in aree dello Scudo Arabico lontane da Tayma. Infine i due campioni del gruppo 9, ascrivibili alla classe delle *stonepaste* o delle *faience*, sono prevalentemente costituiti da quarzo, che ovviamente è ampiamente disponibile localmente anche a Tayma, ma che non fornisce indicazioni di provenienza delle materie prime. Si può solo affermare che esse sono state prodotte con tecniche decisamente differenti rispetto a tutte le ceramiche dei gruppi 1, 2, 3, 4 e 5 di probabile produzione locale, come si è potuto appurare anche dalla caratterizzazione al SEM.

Per avere maggiori indicazioni sull'origine delle ceramiche e sulla tecnologia di produzione, risulta pertanto necessario eseguire confronti statistici multivariati tra le composizioni dei reperti e quelle delle argille campionate localmente, attraverso l'analisi dei *cluster* (*cluster analysis*) e delle componenti principali (PCA). Il dendrogramma di figura 3.1 ottenuto dall'analisi statistica dei *cluster*, mostra naturalmente una notevole somiglianza con

quello descritto nel precedente capitolo ed ottenuto dal trattamento dei dati chimici delle sole ceramiche (fig. 2.27). L'aggiunta dei dati chimici relativi alle argille ha permesso di effettuare interessanti considerazioni sulla compatibilità compositiva tra argille e gruppi petrografici, permettendo di identificare possibili materie prime della produzione ceramica locale a Tayma.

In particolare, nel *cluster* 3, costituito prevalentemente dalle ceramiche del gruppo petrografico 2, ricadono anche le due argille TA-07-09 e TA-07-10. L'analisi petrografica evidenzia che la massa di fondo delle ceramiche appartenenti ai gruppi petrografici 2, 3 e 4, e contenuti nei *cluster* 1, 2 e 3, è molto simile e perfettamente paragonabile alle argille TA-07-09 e TA-07-10. Bisogna tuttavia notare che sulla base delle considerazioni microstrutturali discusse nel capitolo 2, la maggior parte dei campioni ceramici appartenenti ai gruppi petrografici 3 e 4 presenta una certa quantità di,degrassante deliberatamente aggiunto dal ceramista, e questo può aver provocato una significativa variazione della composizione chimica della ceramica rispetto a quella dell'argilla di partenza. Nelle ceramiche del gruppo petrografico 2, tuttavia, si è osservato come gli inclusi siano estremamente scarsi suggerendo che per la loro preparazione sia stata utilizzata un'argilla tale e quale. La similitudine tra campioni del gruppo petrografico 2 e le argille TA-07-09 e TA-07-10 evidenziata dall'analisi dei *cluster*, suggerisce pertanto che la preparazione di questi oggetti ceramici sia stata effettivamente realizzata utilizzando argille molto simili a quelle sopra citate.

I campioni di argilla C-09 e TA-07-12 cadono, invece, nel cluster 2, al quale appartengono anche i campioni dei gruppi petrografici 3 e 4. Tuttavia, dal punto di vista petrografico queste argille sono molto simili alla matrice dei campioni appartenenti ai gruppi petrografici 1 e 5, che ricadono nei cluster 4 e 5, rispettivamente. Questa apparente incongruenza tra dati chimici e petrografici può essere spiegata considerando che le ceramiche dei gruppi 1 e 5 sono temperate con una notevole quantità di smagante, che ha quindi modificato la composizione totale della ceramica rispetto a quella dell'argilla di partenza.

Il campione C-11 ricade nel cluster 4, che comprende prevalentemente campioni del gruppo petrografico 1, mentre i campioni C-10, K, TA-07-16 e TA-07-17 ricadono nel cluster 5, che contiene principalmente ceramiche appartenenti al gruppo petrografico 5. Bisogna tuttavia rilevare che dal punto di vista granulometrico solo i campioni TA-07-16 e TA-07-17 hanno una frazione argillosa sufficientemente elevata da rendere questi materiali lavorabili. Gli altri campioni sono prevalentemente costituiti da limi grossolani, e pertanto non possono essere stati utilizzati come materia prima nella produzione ceramica. Tuttavia l'analisi petrografica ha messo in evidenza come le argille dei campioni TA-07-16 e TA-07-17, siano

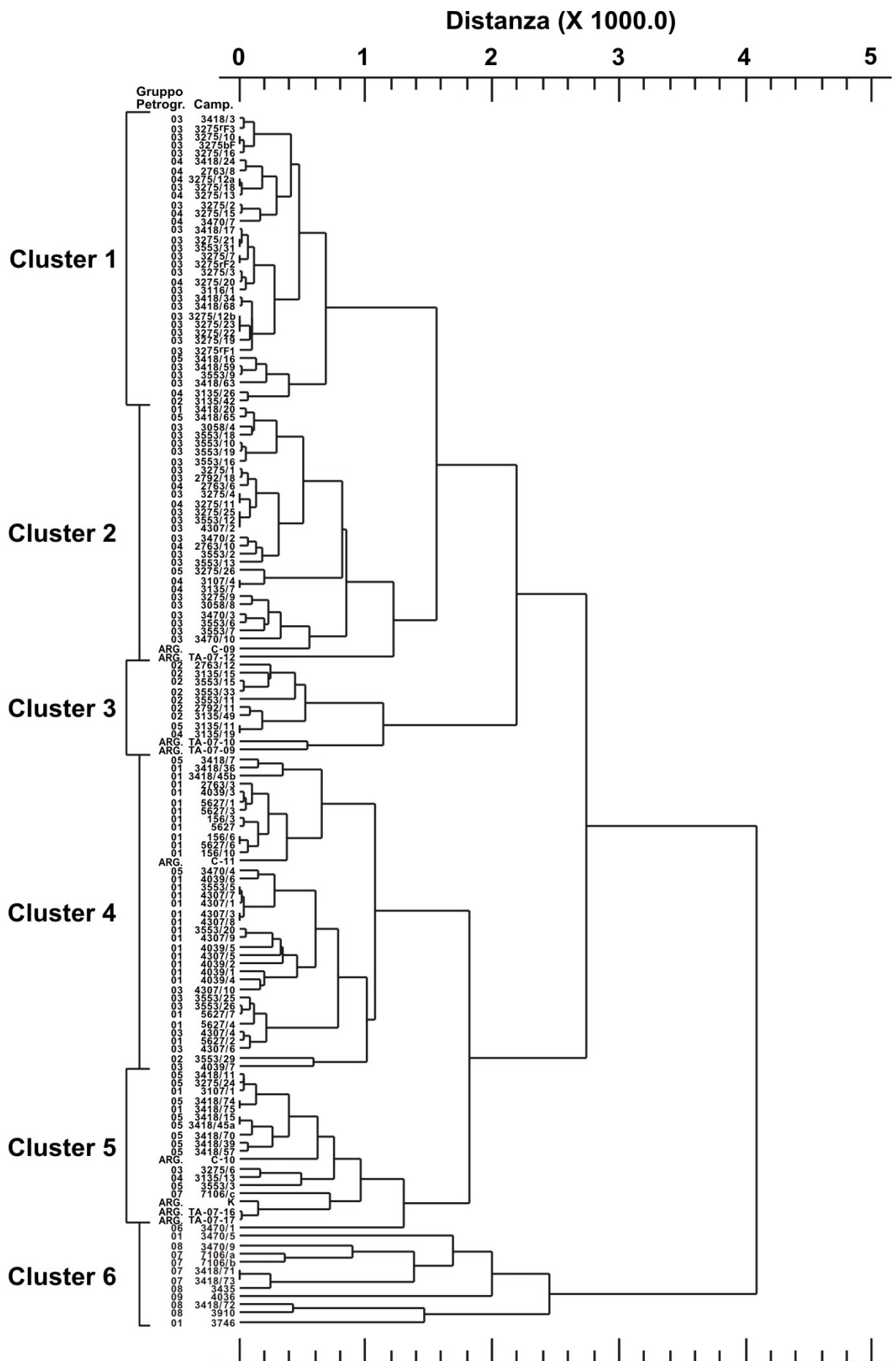


Figura 3.1: Dendrogramma dell'analisi dei cluster (*cluster analysis*) dei campioni di ceramica e argilla.

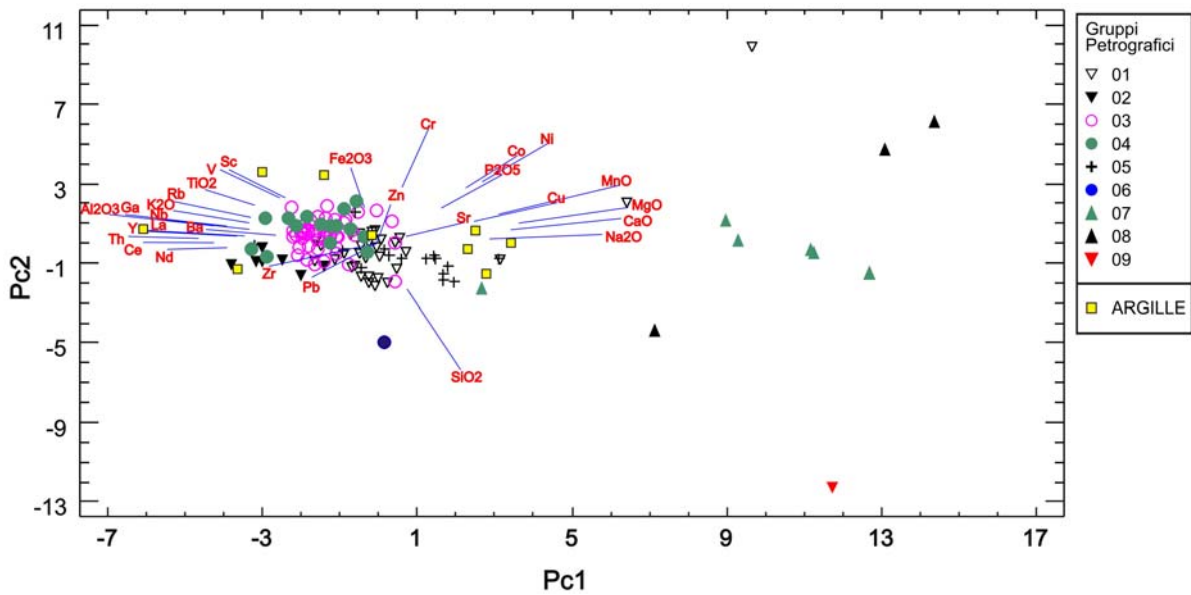


Figura 3.2: Diagramma dei punteggi (*score plot*) e dei pesi dei fattori (*loading plot*) per i campioni ceramici, i cui diversi gruppi petrografici di appartenenza sono riportati in legenda, e per le argille considerate. PC1 e PC2 rappresentano rispettivamente il 41.19% e 12.46% della varianza totale.

incompatibili con la matrice dei campioni del gruppo petrografico 5, e quindi la semplice appartenenza allo stesso cluster non è sufficiente per stabilire una relazione tra questi materiali.

I risultati dell'analisi delle componenti principali sono graficamente rappresentati nel diagramma dei punteggi (*score plot*) di figura 3.2. In questo diagramma, i campioni ceramici mostrano ovviamente la medesima distribuzione osservata in figura 2.28, ottenuta dall'elaborazione dei dati chimici delle sole ceramiche. È interessante notare come le argille si distribuiscano in prossimità della nuvola di punti relativi alle ceramiche dei gruppi 1, 2, 3, 4 e 5, nell'area a bassi valori di PC1 e PC2.

Le differenze composizionali delle argille si riflettono nella posizione che queste assumono nel grafico della PCA. Le argille caratterizzate da un maggior contenuto in Fe₂O₃, legato alla presenza di goethite, si pongono in un'area del grafico a più alti valori di PC2. Le argille con un elevato contenuto in goethite e quarzo, e una quantità di caolinite relativamente inferiore, hanno valori più elevati di PC1. Quelle caratterizzate da un maggiore contenuto in caolinite si collocano in una parte del diagramma con valori molto bassi di PC1, nella direzione in cui è maggiore il peso di Al₂O₃.

Al fine di descrivere meglio il sistema esaminando una maggior percentuale di varianza, si sono considerate 3 componenti principali ed i relativi valori proiettati nel grafico tridimensionale di figura 3.3. Le proiezioni sui piani di alcuni campioni mostrano, infatti, la profondità nella terza dimensione e migliorano la lettura del diagramma. L'ellisse proiettato

sul piano PC2 - PC3, individua l'insieme di ceramiche con una composizione chimica compatibile con quella delle argille. Anche considerando la terza componente risulta chiaro che le argille formano un insieme omogeneo con la maggior parte della produzione ceramica rinvenuta a Tayma e attribuibile ai gruppi petrografici 1, 2, 3, 4 e 5 ad eccezione di pochi campioni del gruppo 1. Le ceramiche dei rimanenti gruppi petrografici 6, 7, 8 e 9 risultano invece chimicamente incompatibili con le argille campionate nell'area di Tayma, rivelando quindi la loro probabile importazione.

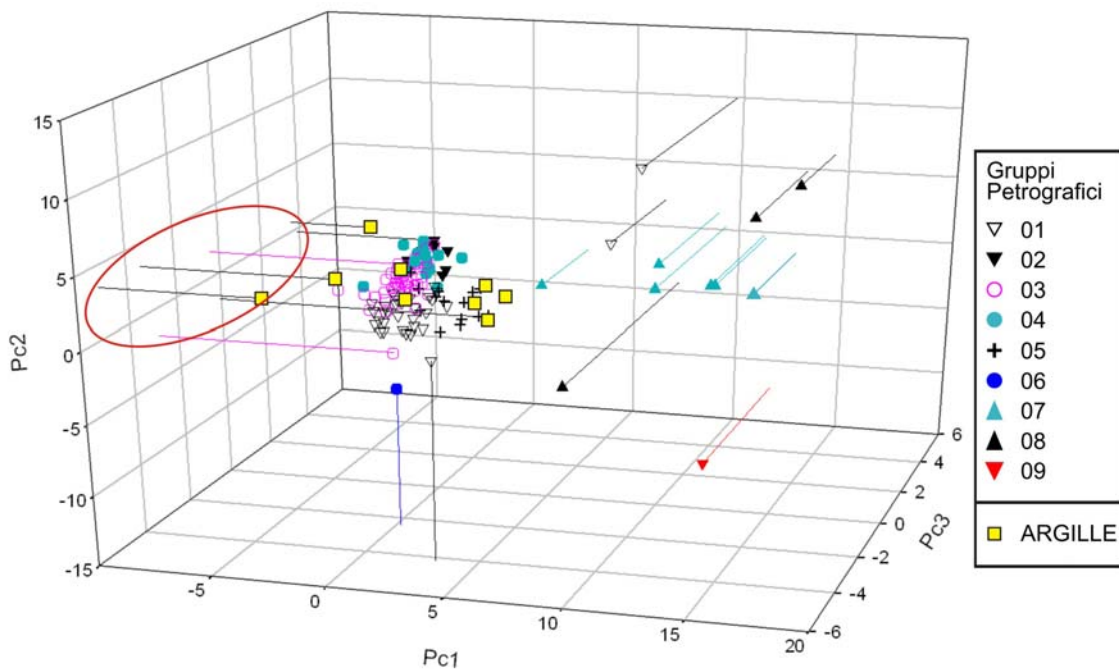


Figura 3.3: Diagramma tridimensionale dei punteggi considerando le prime tre componenti principali PC1, PC2 e PC3. PC1, PC2 e PC3 rappresentano rispettivamente il 41.19% e 12.46% e 10.18% della varianza totale.

In definitiva le ceramiche con una composizione chimica compatibile con quella delle argille e appartenenti ai gruppi petrografici 1, 2, 3, 4 e 5, sono verosimilmente di produzione locale. Tale ipotesi è congruente con la natura minero-petrografica degli inclusi e con i litotipi affioranti nell'area di Tayma, come evidenziato nel capitolo 2.

I dati chimici dei campioni attribuibili alla produzione locale di Tayma, sono stati rielaborati senza considerare le ceramiche di probabile importazione, che possono in questo senso essere considerate come dei veri e propri *outlier*, per focalizzare lo studio sulla produzione locale e individuare l'evoluzione nell'uso degli impasti durante i periodi storici considerati.

Nel diagramma dei punteggi (fig. 3.4) ottenuto considerando, oltre che ai gruppi petrografici di appartenenza anche l'età dei campioni ceramici, si osserva che i campioni

dell'età del Ferro Antico appartengono per lo più al gruppo petrografico 1, caratterizzato da una composizione chimica sulla quale pesa in particolar modo il contenuto di SiO_2 . Questo dato risulta in pieno accordo con l'abbondante presenza in questi campioni di inclusi costituiti da granuli di quarzo, come evidenziato dall'analisi petrografica. Alcuni campioni della medesima età ma appartenenti al gruppo petrografico 3 per la presenza tra gli inclusi di frammenti di argilliti, hanno comunque un elevato contenuto in quarzo, e risultano chimicamente simili ai campioni del gruppo 1.

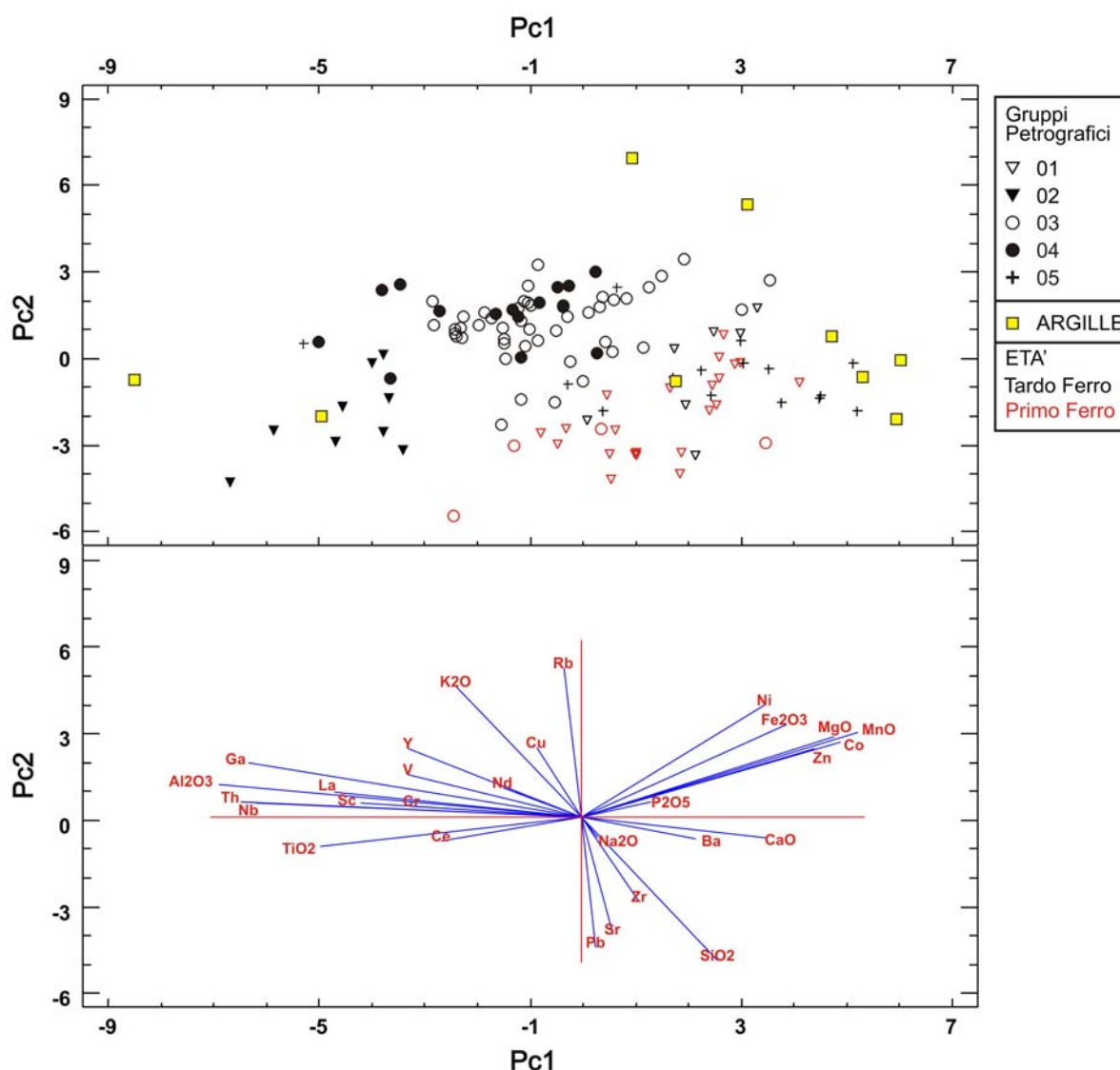


Figura 3.4: Diagramma dei punteggi (sopra) e dei pesi dei fattori (sotto) in cui, oltre ai gruppi petrografici di appartenenza delle ceramiche, sono state riportate anche le loro età (indicate in legenda). PC1, PC2 e PC3 rappresentano rispettivamente il 27 %, 15% e 10% della varianza totale.

I campioni appartenenti all'età del Ferro Recente costituiscono, invece, un numero maggiore di gruppi petrografici (1, 2, 3, 4, 5), ad indicare la nascita e la differenziazione di nuove ricette di produzione.

Particolarmente interessante è notare come le argille tendano a distribuirsi per lo più all'esterno della nuvola in cui si raggruppano le ceramiche a causa dei contenuti più elevati in specifici elementi chimici, come evidenziato in precedenza, con l'eccezione dei campioni di argilla TA-07-09 e TA-07-10. Questa evidenza può essere interpretata come conseguenza della diluizione dovuta all'aggiunta di degrassante di diversa natura minero-petrografica alle argille di partenza. Pertanto, per vedere il ruolo di tale operazione tecnologica sul chimismo, sono stati eseguiti dei trattamenti statistici considerando anche la composizione chimica dei degrassanti riconosciuti in microscopia ottica. In particolare, la concentrazione degli elementi maggiori di ARF e frammenti di siltiti presenti nei campioni ceramici è stata stimata in EDS al SEM e quella delle sabbie quarzose, raccolte nei dintorni di Tayma, in fluorescenza dei raggi X. I trattamenti statistici di seguito illustrati sono stati pertanto eseguiti considerando la composizione chimica relativa ai soli elementi maggiori.

L'aggiunta di degrassante può essere interpretata pertanto in termini di mescolamento chimico di termini estremi, rispettivamente rappresentati dalla composizione delle argille di partenza e da quella dei degrassanti aggiunti. Il recente lavoro di Grifa *et al.* (2009), infatti, ha dimostrato, attraverso la realizzazione di repliche di antiche ceramiche campane, che il mescolamento tra argille e degrassante può essere interpretato attraverso l'analisi e la proiezione in opportuni diagrammi del contenuto in determinati elementi chimici aventi concentrazioni molto diverse nei differenti materiali che costituiscono la miscela. Tali elementi, infatti, contribuiscono in modo rilevante alla varianza del sistema. In questi termini, l'analisi delle componenti principali risulta un metodo multivariato in grado di definire possibili processi di mescolamento, come anche dimostrato dal lavoro di Sterba *et al.* (2009). Infatti, la capacità, attraverso la definizione di nuove variabili (le componenti principali) lungo la direzione di massima varianza, permette l'individuazione da un lato dei termini estremi e dall'altro quella dei prodotti ottenuti dal loro mescolamento. Tuttavia, tale metodo risulta di effettiva ed efficace applicazione per composizioni chimiche significativamente diverse dei termini estremi e in sistemi che derivano dal mescolamento di due soli termini. In questi casi, infatti, il mescolamento può facilmente essere individuato da linee che congiungono i termini estremi, e lungo le quali si vengono a collocare i sistemi di mescolamento, come negli esempi illustrati da Sterba *et al.* (2009), e riportati a titolo di esempio in figura 3.5.

Nel caso delle ceramiche di Tayma, l'eterogeneità compositiva del degrassante utilizzato da un lato, e la contemporanea presenza in alcuni gruppi di ceramiche di degrassanti di diversa composizione, quali ad esempio ARF e sabbie quarzose, dall'altro, rende la

modellizzazione del processo di mescolamento più complessa. Inoltre, sebbene le argille campionate possano avere una composizione molto prossima a quella delle argille utilizzate per la produzione ceramica, in generale non sono perfettamente identiche. Nel presente caso, trattandosi di uno studio archeometrico su materiali archeologici e non di repliche ottenute a partire da materie prime di composizione nota, come nello studio di Sterba *et al.* (2009), i termini certi sono rappresentati dalla composizione delle ceramiche e da quelle dei diversi tipi di degrassante, e pertanto le linee di congiunzione tra composizione del degrassante e quella delle ceramiche dovrebbe indicare la direzione lungo la quale dovrebbe ricadere la composizione dell'argilla di partenza e pertanto, per confronto, fornire uno strumento per la loro individuazione.

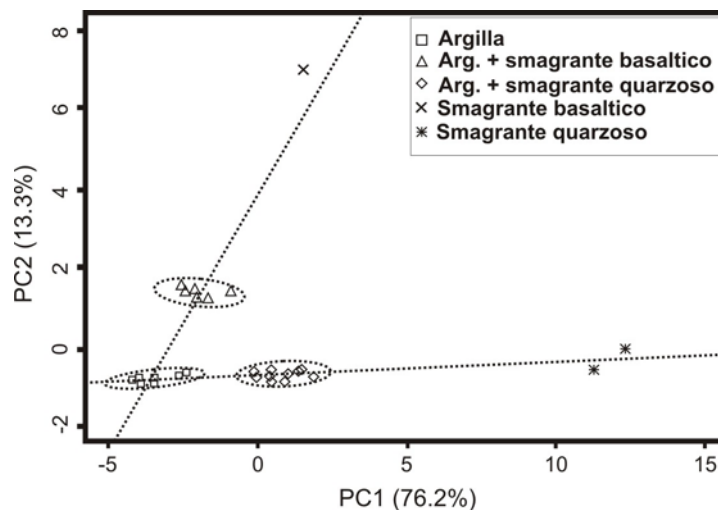


Figura 3.5: Diagramma dei punteggi ottenuto dall'analisi delle componenti principali della composizione chimica di argille (quadrati) e di due tipi di smagrante (basalto e quarzo) utilizzati per la preparazione di repliche (triangoli e rombi) ottenute miscelando argilla con l'uno o l'altro degli smagranti. Le ceramiche temperate giacciono lungo le linee tratteggiate di mixing che congiungono la composizione delle argille con quella dei rispettivi degrassanti (modificato da Sterba *et al.*, 2009).

L'analisi delle componenti principali eseguita considerando le composizioni delle ceramiche, delle argille e dei diversi degrassanti (sabbie quarzose, arenarie, ARF), mette in evidenza come i reperti archeologici si collochino tra le argille e i degrassanti (fig. 3.6), anche se i processi di mixing non sono qui facilmente riconoscibili per l'eterogeneità delle materie prime. Si è pertanto proceduto all'analisi considerando singolarmente i diversi gruppi petrografici, le composizioni delle argille petrograficamente affini e dei degrassanti rispettivamente presenti in ciascuno di essi.

Per quanto riguarda il gruppo petrografico 1, caratterizzato dalla presenza di predomanti inclusi quarzosi e subordinati frammenti di arenarie, si sono pertanto considerati nel trattamento statistico le sabbie quarzose, le arenarie e le argille TA-07-12 e C-09, tessituralmente e mineralogicamente affini. L'analisi delle componenti principali mette in

evidenza come le ceramiche di questo gruppo solo in parte giacciono sulla linea di mescolamento tra le argille e le sabbie quarzose, mentre in parte si protendono verso la composizione delle arenarie, che costituiscono una porzione minore dello smagrante di questo gruppo rispetto alle sabbie quarzose (fig. 3.7). Un andamento del tutto analogo si osserva anche nelle ceramiche del gruppo 5, che contengono però una quantità relativa maggiore di arenarie tra i granuli di degrassante (fig. 3.8).

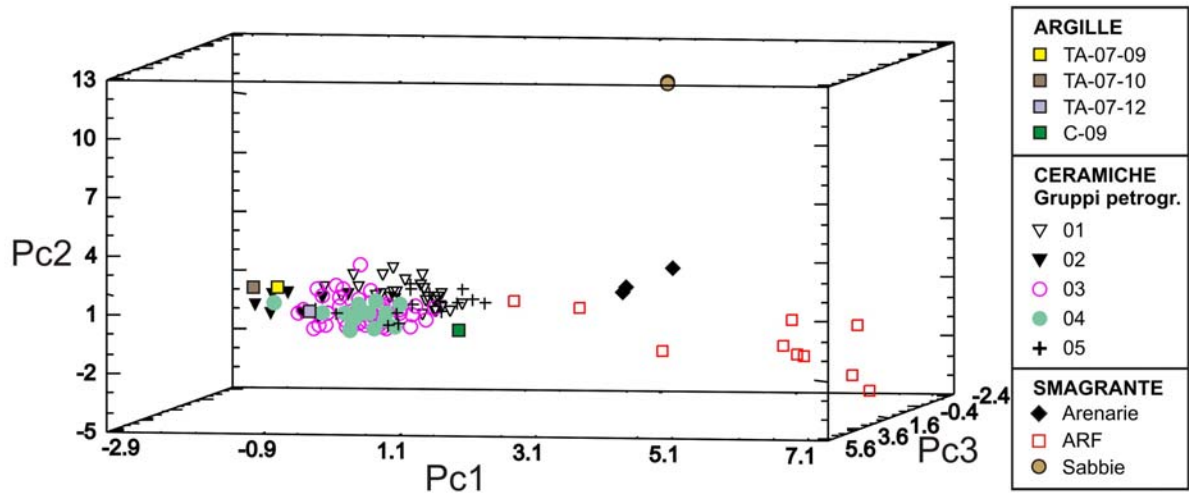


Figura 3.6: Diagramma dei punteggi ottenuto dall'analisi delle componenti principali delle ceramiche, dello smagrante (ARF, arenarie, sabbie quarzose) e delle argille affini in termini di composizione mineralogica e tessiturale alla frazione grana fine dei reperti ceramici (vedasi capitolo 2 per maggiori dettagli). PC1, PC2 e PC3 rappresentano rispettivamente il 32%, 27% e 13% della varianza totale.

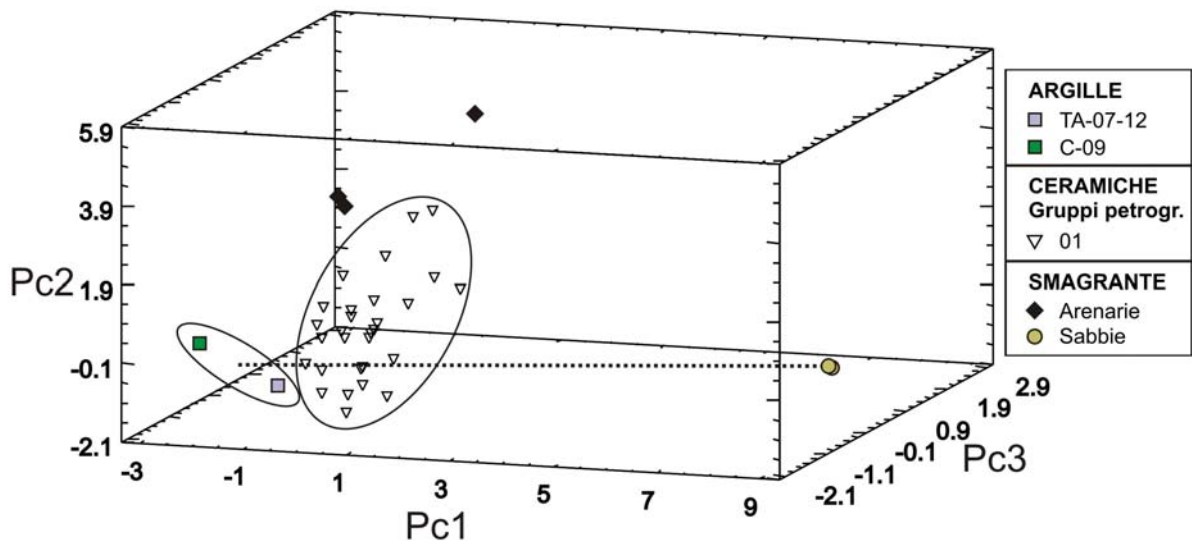


Figura 3.7: Diagramma dei punteggi ottenuto dall'analisi delle componenti principali delle ceramiche del gruppo petrografico 1, delle argille TA-07-12 e C-09, delle sabbie quarzose e delle arenarie. PC1, PC2 e PC3 rappresentano rispettivamente il 47%, 24% e 12% della varianza totale.

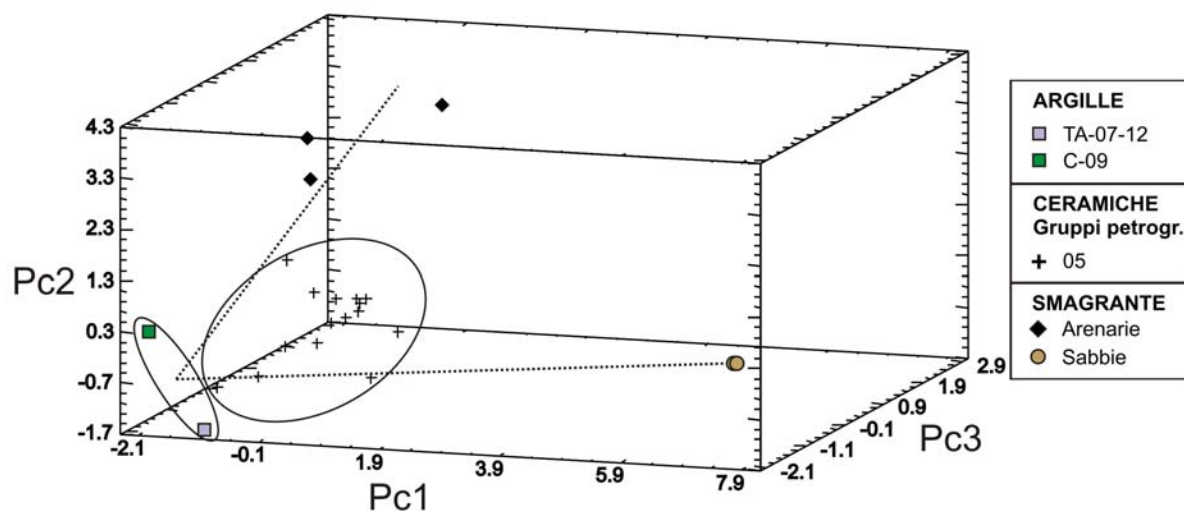


Figura 3.8: Diagramma dei punteggi ottenuto dall'analisi delle componenti principali delle ceramiche del gruppo petrografico 5, delle argille TA-07-12 e C-09, delle sabbie quarzose e delle arenarie. PC1, PC2 e PC3 rappresentano rispettivamente il 48%, 21% e 13% della varianza totale.

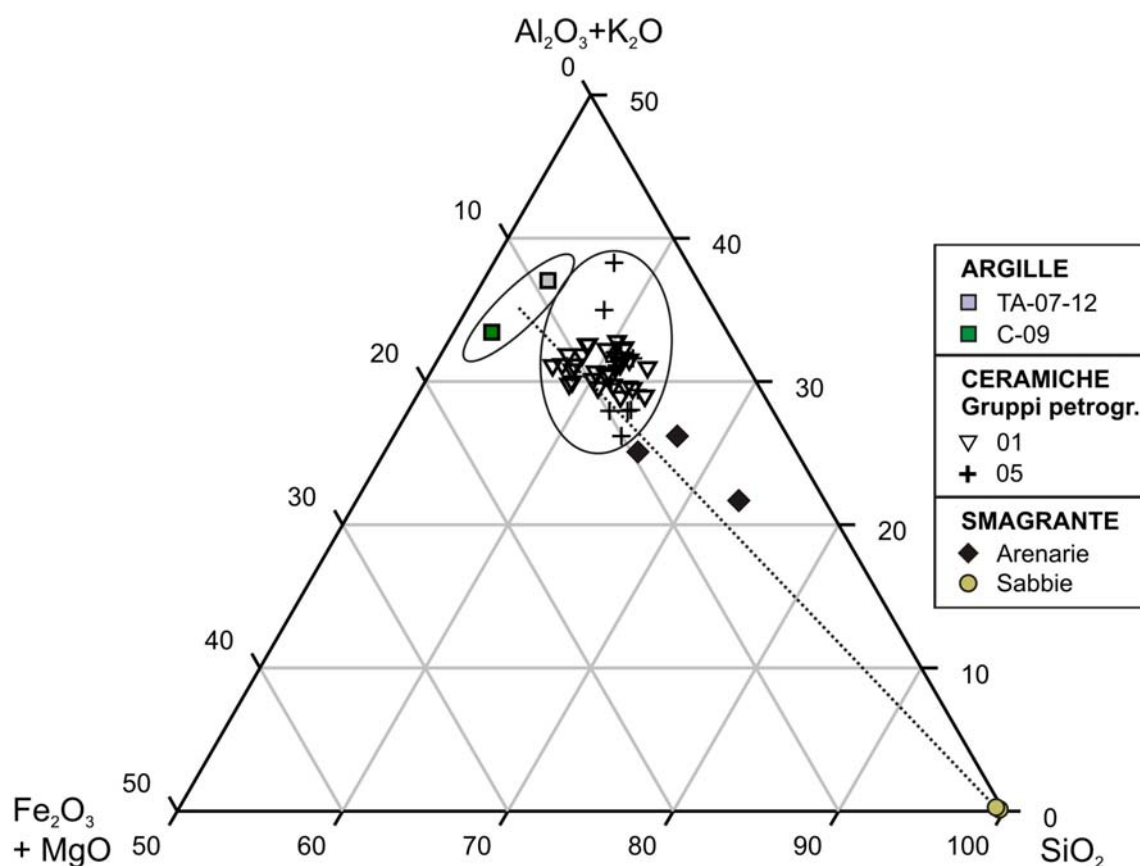


Figura 3.8: Diagramma ternario $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O}$ – SiO_2 – $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ con la proiezione delle composizioni delle ceramiche dei gruppi 1 e 5, delle argille TA-07-12 e C-09, delle sabbie quarzose e delle arenarie. La linea tratteggiata unisce la composizione media delle argille con quella della sabbia quarzosa, lungo la quale si colloca anche quella delle arenarie. La composizione delle ceramiche si colloca lungo tale linea, indicando che le ceramiche hanno una composizione compatibile con un processo di mescolamento di questi materiali.

Questi due gruppi petrografici, presentano infatti composizioni molto simili, come già osservato dal dendrogramma dell'analisi degli insiemi (fig. 3.1) e dall'analisi delle

componenti principali (fig. 3.4). Dal punto di vista chimico possono essere interpretati come due sistemi di mescolamento molto simili. Essi, infatti, derivano dal mescolamento di argille caolinitiche, contenenti una scarsa quantità di ossidi di ferro e magnesio, con degrassante di tipo quarzoso, in forma di sabbie ed arenarie. In questo senso, il sistema di mescolamento può essere studiato prendendo in considerazione solo quegli ossidi che contribuiscono in modo determinate alla definizione dei termini estremi. Si è pertanto scelto di proiettare i dati in un diagramma triangolare $Al_2O_3+K_2O - SiO_2 - Fe_2O_3+MgO$ (fig. 3.9), ai cui vertici, considerando solo la porzione fino al 50% di $Al_2O_3+K_2O$ e di Fe_2O_3+MgO , si avvicinano molto rispettivamente alla composizione caolinitico-illitica delle argille, a quella del quarzo e a quella della componente femica del sistema. Nel diagramma riportato in figura 3.9 si osserva come i campioni ceramici siano interposti tra la composizione delle argille e quella dei degrassanti, proprio lungo la linea di mescolamento.

Analogamente, anche gli altri gruppi di ceramiche possono essere interpretati in termini di mescolamento tra le argille e le composizioni dei degrassanti in essi osservati. Nel caso del gruppo 2, il mescolamento tra le argille e gli ARF risulta chiaro sia dal diagramma dei punteggi (fig. 3.10) che da quello ternario (fig. 3.11), nei quali la linea di mescolamento interessa solo alcune delle composizioni di ARF analizzate. In realtà, la composizione di questo tipo di inclusi è risultata variabile da incluso ad incluso anche all'interno dello stesso frammento ceramico.

I gruppi 3 e 4, che dal punto di vista petrografico sono risultati più eterogenei in termini di abbondanza assoluta e relativa dei diversi tipi di inclusi, rappresentano dei sistemi di mescolamento più difficili da interpretare. In particolare, come si osserva dal diagramma dei punteggi dell'analisi delle componenti principali (fig. 3.12) la composizione dei materiali ceramici del gruppo 3 ricade sulla linea di congiunzione tra argille e l'area interposta tra le composizioni delle arenarie e quelle degli ARF.

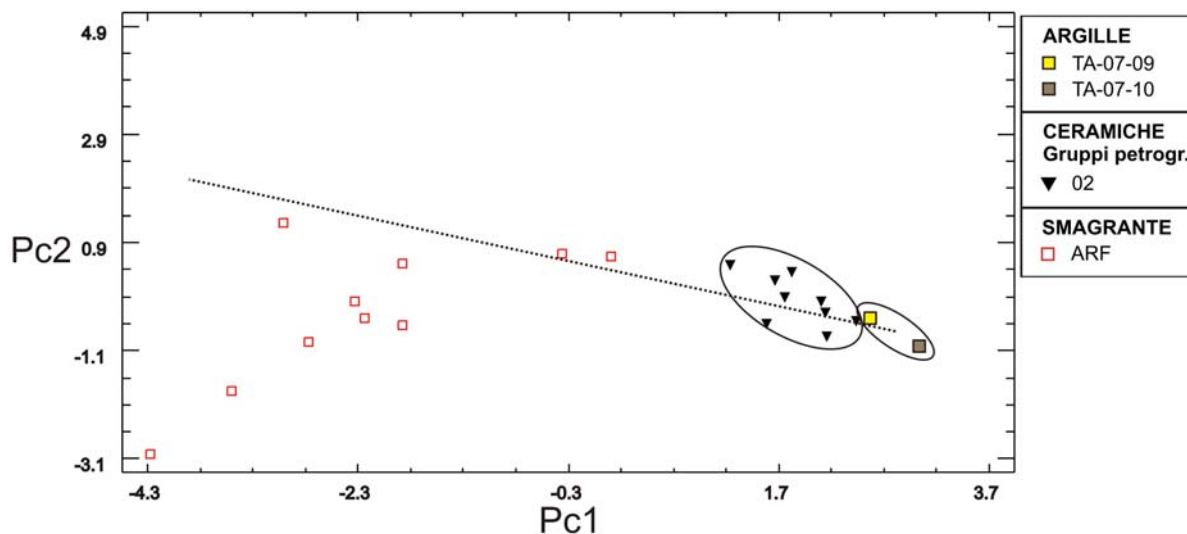


Figura 3.9: Diagramma dei punteggi ottenuto dall'analisi delle componenti principali delle ceramiche appartenenti al gruppo petrografico 2, delle argille TA-07-09 e TA-07-10, e degli ARF. PC1 e PC2 rappresentano rispettivamente il 61% e 13% della varianza totale.

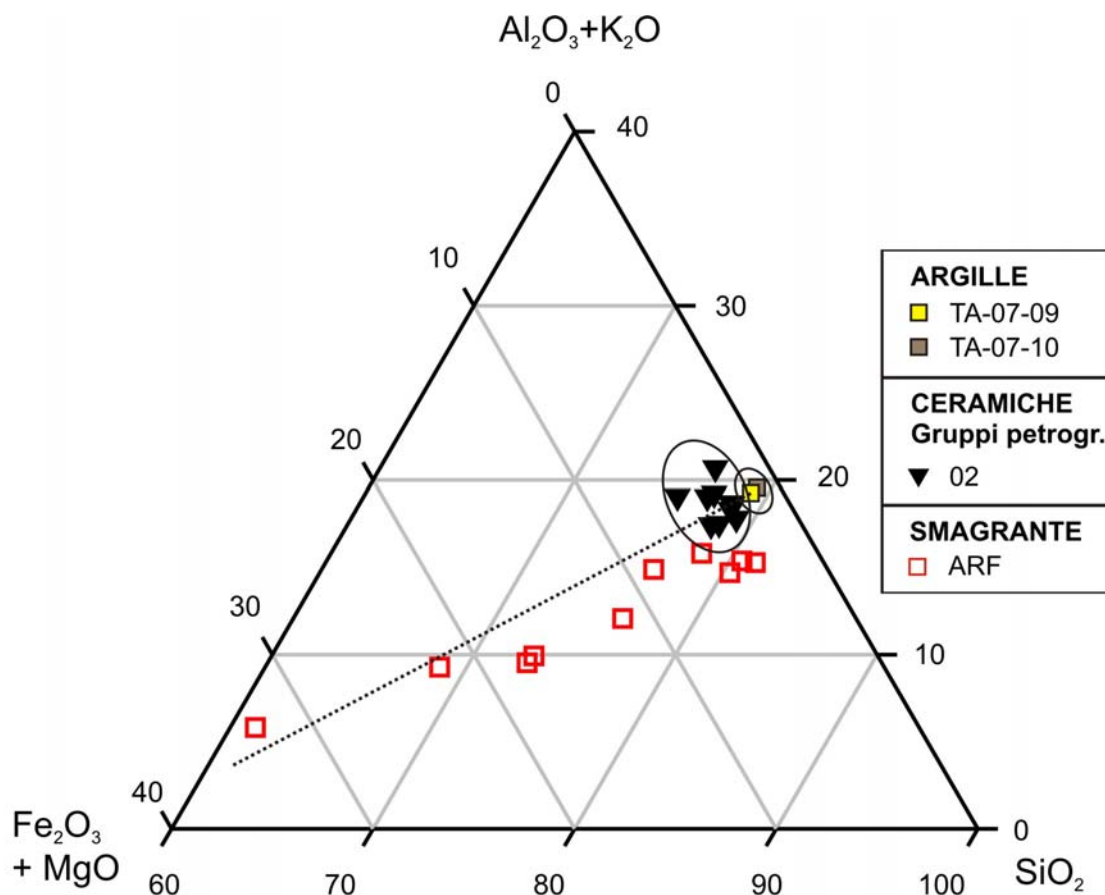


Figura 3.10: Diagramma ternario $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}$ – SiO_2 – $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ nel quale sono state proiettate le composizioni delle ceramiche del gruppo 2, delle argille TA-07-09 e TA-07-10, e degli ARF. La linea tratteggiata unisce la composizione media delle argille con quella dei termini più ricchi in ossidi di ferro e magnesio degli ARF. La composizione delle ceramiche giace lungo questa linea, indicando che possono effettivamente essere ottenute dal mescolamento di queste materie prime.

Interessante è notare come invece nel diagramma ternario $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ (fig. 3.13) alcuni degli ARF ricadano nella nuvola di distribuzione delle ceramiche, e come sulla distribuzione delle composizioni delle ceramiche pesi non solo la composizione degli ARF, ma anche quella delle arenarie, che ne determinano l'allungamento verso il vertice della silice. Nel caso del gruppo 4 la distribuzione delle composizioni delle ceramiche risulta invece maggiormente influenzata da quella degli ARF che ne determinano l'allungamento verso tali termini nel diagramma dei punteggi (fig. 3.14) e verso il vertice dei componenti femici nel diagramma ternario (fig. 3.15).

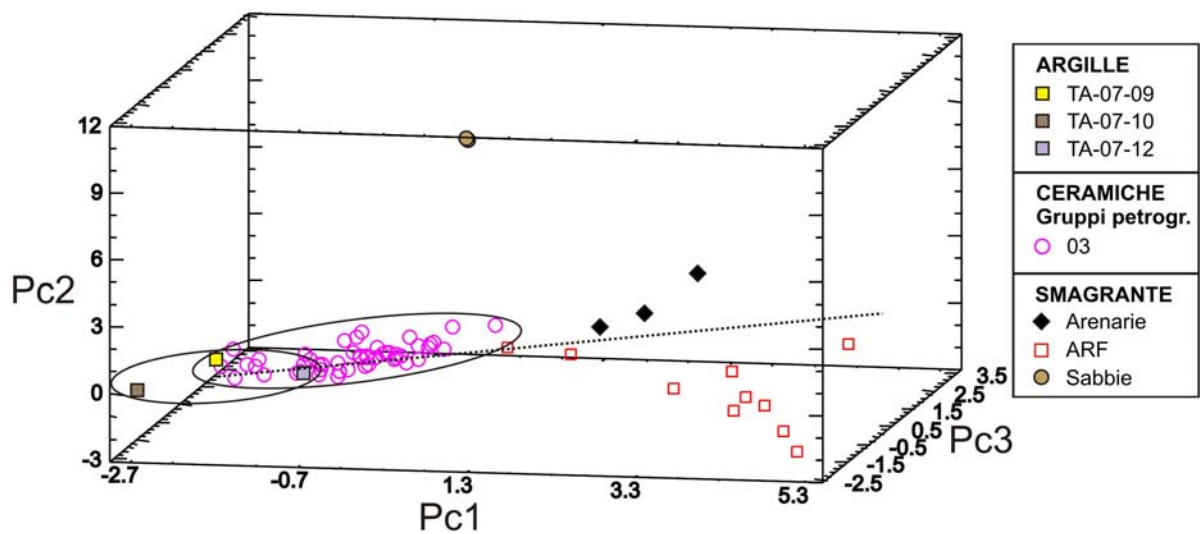


Figura 3.11: Diagramma dei punteggi ottenuto dall'analisi delle componenti principali delle ceramiche appartenenti al gruppo petrografico 3, delle argille TA-07-09, TA-07-10 e TA-07-12, delle sabbie quarzose, delle arenarie e degli ARF. PC1, PC2 e PC3 rappresentano rispettivamente il 34%, 32% e 12% della varianza totale.

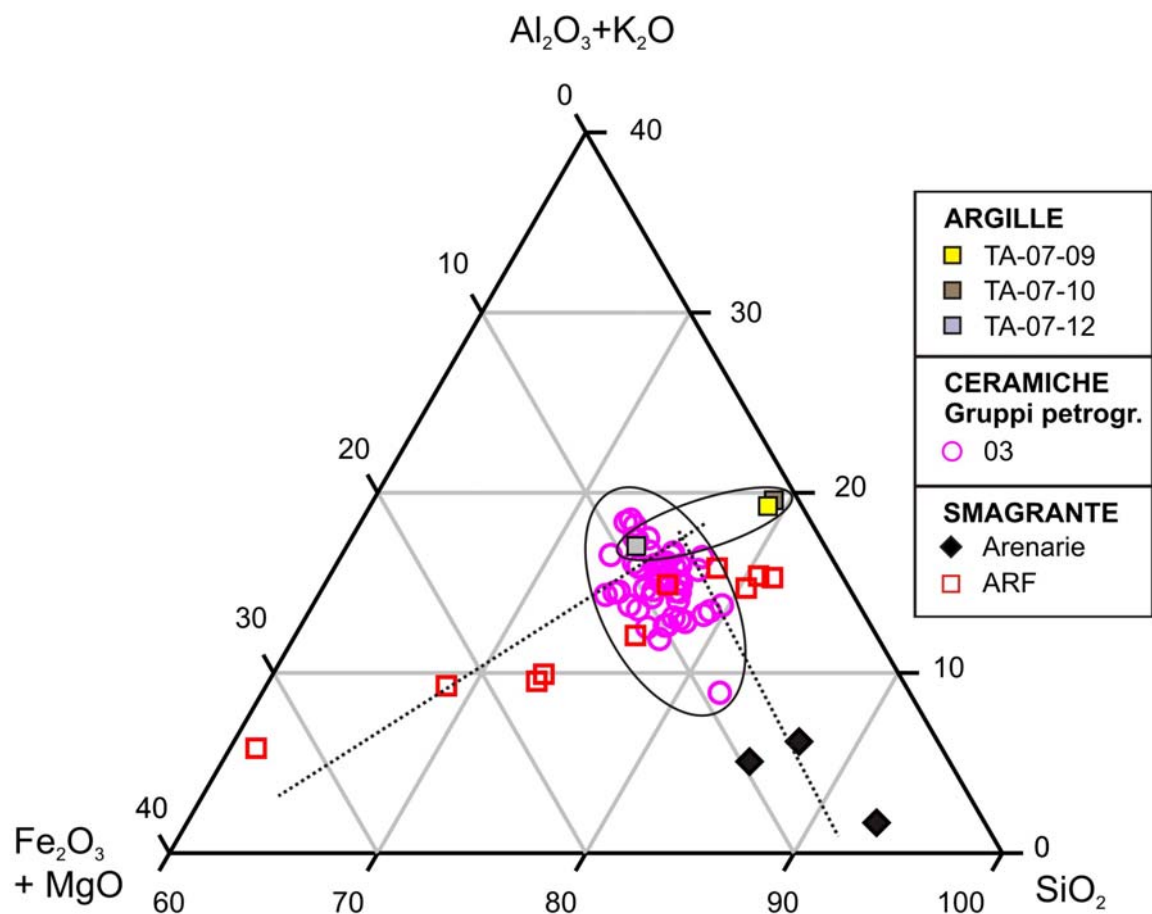


Figura 3.12: Diagramma ternario $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}$ – SiO_2 – $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ nel quale sono state proiettate le composizioni delle ceramiche del gruppo 3, delle argille TA-07-09, TA-07-10 e TA-07-12, delle arenarie e degli ARF. Le linee tratteggiate uniscono la composizione media delle argille rispettivamente con quella dei termini più ricchi in ossidi di ferro e magnesio degli ARF, e delle arenarie. La maggior parte delle composizioni delle ceramiche si collocano nel quadrante opposto rispetto a quello delle argille, indicando che sono compatibili con il mescolamento di queste argille con i degrassanti qui considerati.

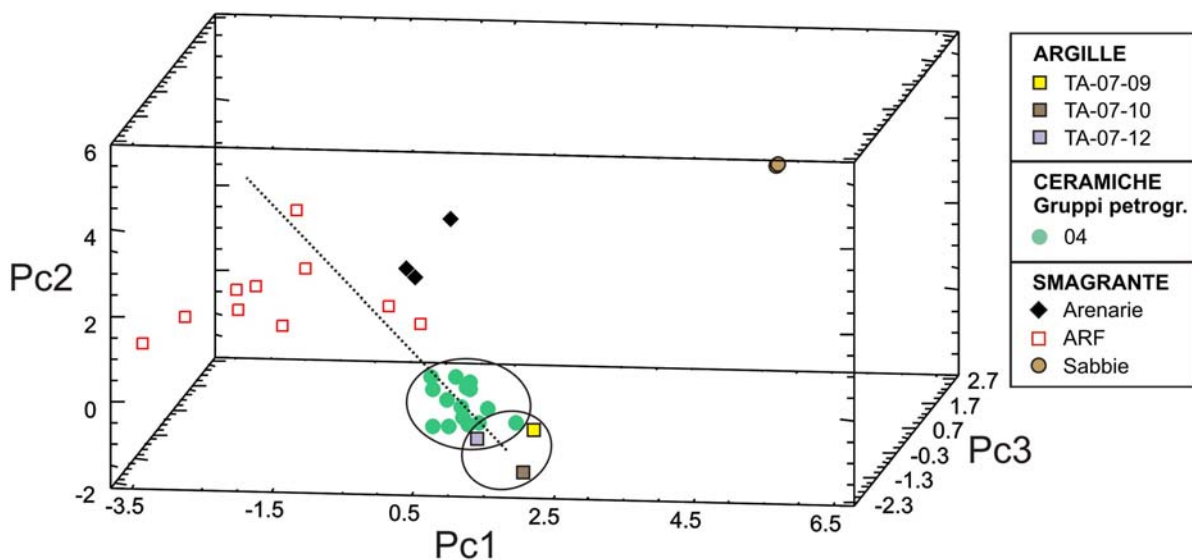


Figura 3.14: Diagramma dei punteggi ottenuto dall'analisi delle componenti principali delle ceramiche appartenenti al gruppo petrografico 4, delle argille TA-07-09, TA-07-10 e TA-07-12, delle sabbie quarzose, delle arenarie e degli ARF. PC1, PC2 e PC3 rappresentano rispettivamente il 37%, 33% e 11% della varianza totale.

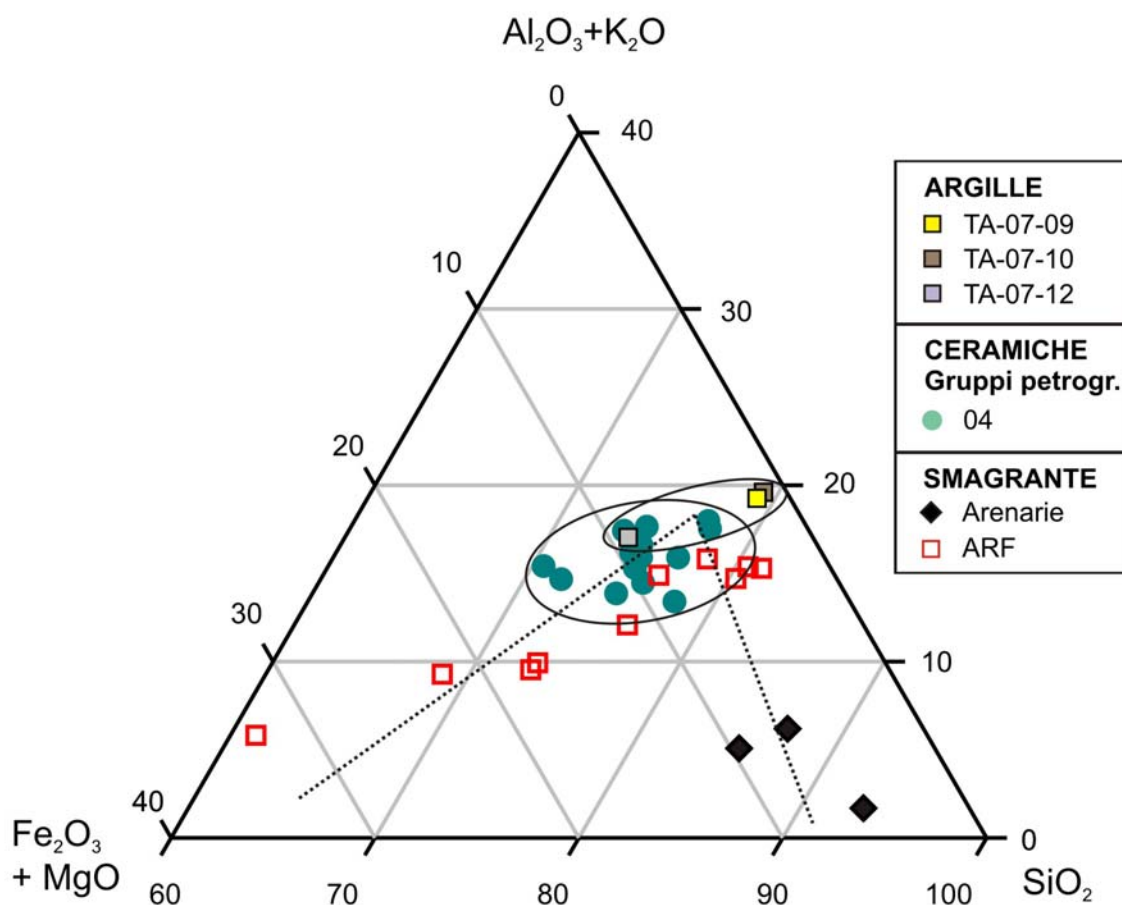


Figura 3.13: Diagramma ternario $Al_2O_3+K_2O - SiO_2 - Fe_2O_3+MgO$ nel quale sono proiettate le composizioni delle ceramiche del gruppo 4, delle argille TA-07-09, TA-07-10 e TA-07-12, delle arenarie e degli ARF. Le linee tratteggiate uniscono la composizione media delle argille rispettivamente con quella dei termini più ricchi in ossidi di ferro e magnesio degli ARF, e con quella delle arenarie. Anche in questo caso la composizione delle ceramiche ricade in prossimità delle due linee di congiunzione, suggerendo che siano state preparate con miscele opportune di questi componenti.

E' possibile pertanto concludere che la produzione ceramica di Tayma può essere interpretata dal punto di vista chimico come un sistema di mescolamento tra argille e degrassanti di diversa composizione. Ritengo opportuno però sottolineare che trattandosi di sistemi complessi, nei quali oltre a singole fasi cristalline anche frammenti di roccia a composizione variabile sono presenti, e in cui si osserva una forte eterogeneità petrografica, tali sistemi non sono facili da modellizzare. Infatti, l'analisi delle componenti principali considerando tutti i gruppi di ceramiche, le argille e i vari tipi di degrassante (fig. 3.6), non permette di individuare precisi sistemi di mescolamento, a causa delle importanti differenze composizionali tra i diversi tipi di degrassante. Alla stessa considerazione si giunge anche dall'analisi del diagramma ternario $Al_2O_3+K_2O - SiO_2 - Fe_2O_3+MgO$ di figura 4.16. Risulta pertanto opportuno elaborare i dati chimici gruppo per gruppo, tenendo conto sia delle affinità petrografiche e tessiturali tra argille e gruppi ceramici, sia della natura dei degrassanti presenti in ciascuno di essi.

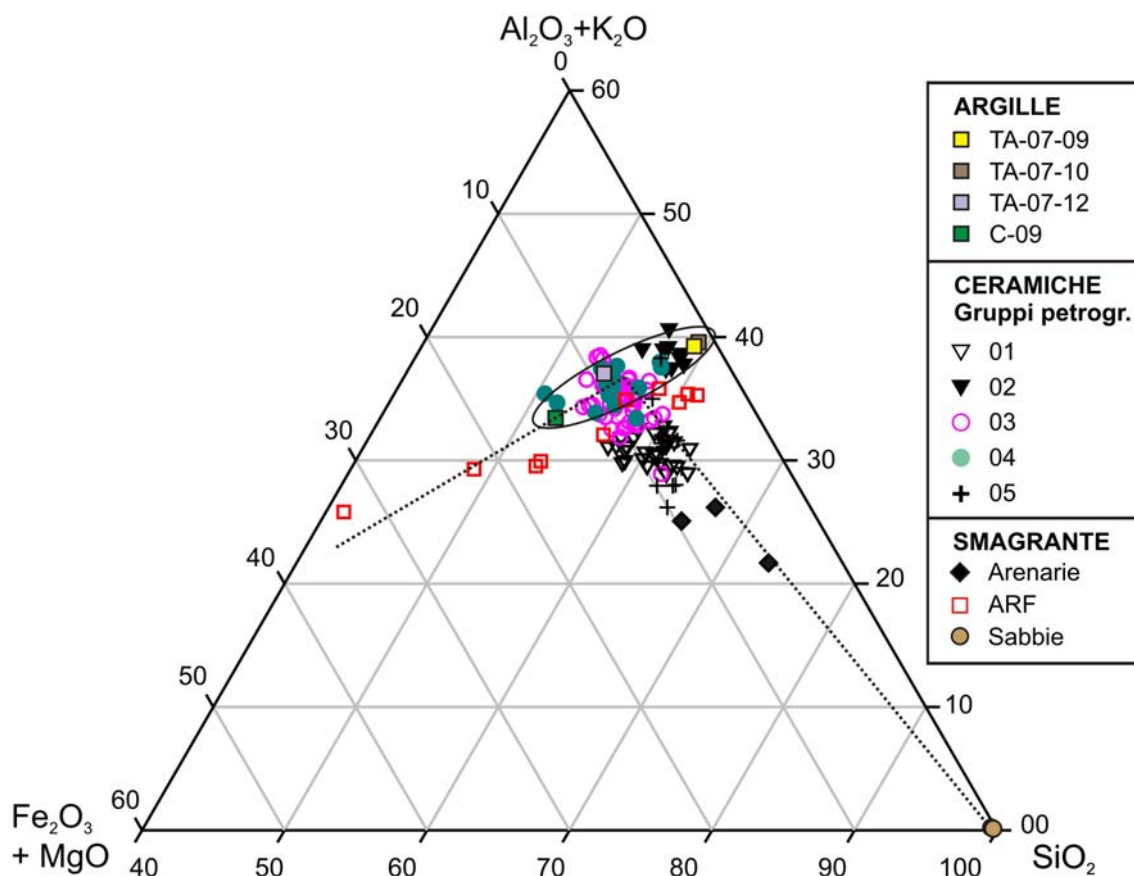


Figura 3.14: Diagramma ternario $Al_2O_3+K_2O - SiO_2 - Fe_2O_3+MgO$ delle ceramiche dei gruppi 1, 2, 3, 4 e 5, prodotti a Tayma, delle argille TA-07-09, TA-07-10, TA-07-12 e C-09, delle arenarie, degli ARF e delle sabbie quarzose. Le linee tratteggiate uniscono la composizione media delle argille con quella dei termini più estremi dei degrassanti.

Per quel che riguarda la tecnologia di produzione, un dato da tenere in considerazione è la distribuzione delle ricette nel tempo (fig. 3.17). Le ricette del periodo del Ferro Antico sono 2 e fanno riferimento al gruppo petrografico 1, che è caratterizzato da scheletro costituito da grani di quarzo, e al gruppo petrografico 3 che presenta ARF, arenarie e quarzo. Nel periodo del Ferro Tardo si vede la comparsa di nuovi tipi di impasto, tanto da arrivare fino a bene 8 diverse ricette principali. Di queste, le prime 5 sono da considerarsi di produzione locale e quindi rispecchiano l'evoluzione della tecnologia produttiva della ceramica di Tayma, mentre quelle relative ai gruppi 6, 7 e 8, che sono di probabile importazione, testimoniano lo sviluppo dei rapporti commerciali della città con altre realtà produttive. L'unico reperto assegnato al periodo islamico appartiene al gruppo petrografico 9, ed in particolare alla *islamic stonepaste* che è stata probabilmente prodotta a partire dal IX secolo. Per quel che riguarda l'altro campione appartenente a questo gruppo, cioè *egyptian faience*, vista la loro ampia produzione sia in termini storici che geografici, che ne vedono la produzione a partire dal IV millennio a.C. fino ad oggi nell'area mediorientale, non possibile in base all'attribuzione sulla tecnologia produttiva assegnarne una certa datazione.

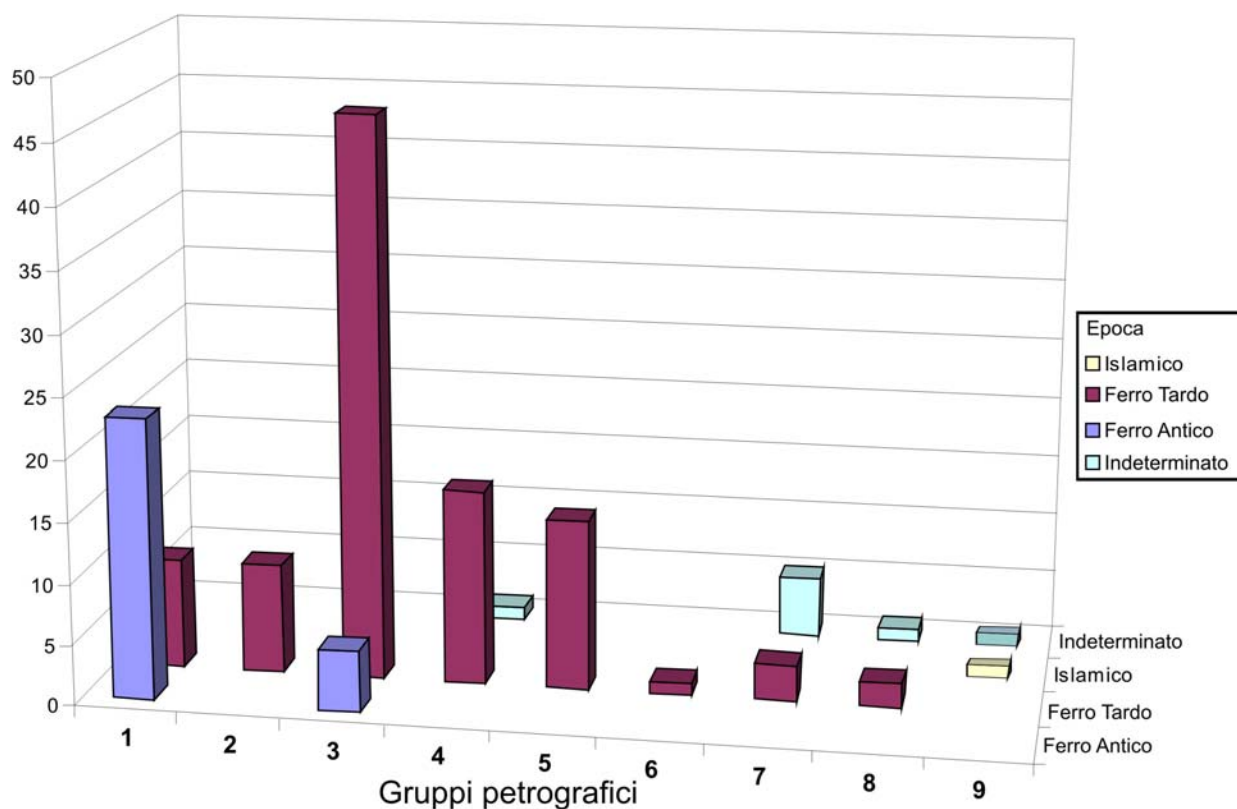


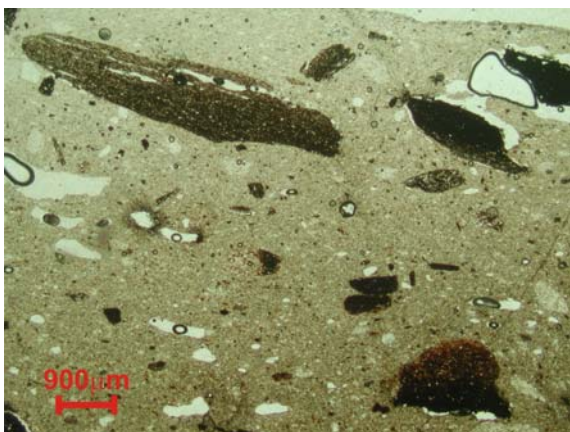
Figura 3.17: Gruppi petrografici/ricette di impasto delle ceramiche in rapporto alle epoche storiche considerate.

Per quel che riguarda invece il processo di cottura, le massime temperature sono state stimate in base al confronto tra le associazioni mineralogiche, definite attraverso l'analisi in diffrazione dei raggi X su polveri, e i risultati di prove sperimentali di cottura di materiali argillosi (Letsch & Noll, 1983; Riccardi *et al.*, 1999; Aras, 2004; Maritan *et al.*, 2005; 2006). Vista infatti le diverse associazioni mineralogiche osservate, ed in particolare la presenza di specifiche fasi, quali la mullite e l'illite da un lato e il diopside e la gehlenite dall'altro, si sono pertanto considerate prove sperimentali condotte rispettivamente su argille illitico-caolinitiche e illitiche ricche in carbonati.

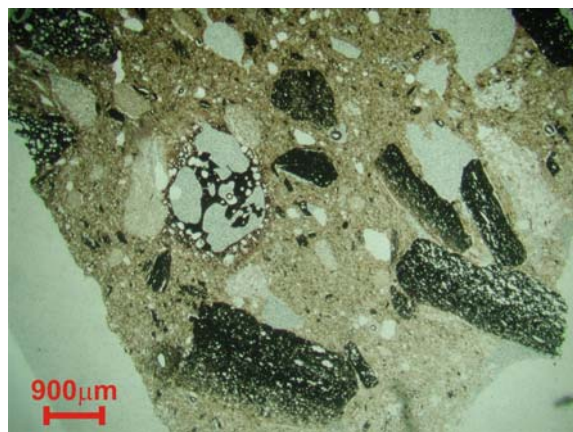
Bisogna inoltre dire che in alcuni casi sono stati utilizzati i caratteri microstrutturali e le fasi mineralogiche osservate per taluni inclusi per fornire dei vincoli sulle temperature di cottura, nello specifico la presenza di ARF vetrificati, caratterizzati da una struttura fortemente vescicolare e dalla presenza di ercinite e fayalite (vedasi capitolo 2.2). La composizione chimica di questi inclusi, ottenuta da analisi areale SEM-EDS (tab. 2.1) indica come questi siano ricchi in ferro, alluminio e potassio e silice, avvicinandosi alla composizione di alcune glauconiti (Longuépée & Cousineau, 2006). Inoltre, studi sperimentali condotti da Pavlyukevich *et al.* (2005) hanno messo in evidenza come la cottura di glauconite a

temperature comprese tra 1100°C e 1200°C produca una fase vetrosa a struttura porosa vescicolare contenente fayalite e wüstite. Le vescicole si sarebbero formate a causa della riduzione, a queste alte temperature, dell'ematite in wüstite. Si è pertanto ritenuto opportuno condurre delle prove sperimentali per verificare che la struttura fortemente vescicolare e la formazione di fayalite e ed ercinite avvenisse anche partendo da frammenti di roccia a composizione argillosa, quali gli ARF presenti in molti dei reperti studiati. A tale scopo alcuni campioni ceramici contenenti ARF nei quali si riconoscesse ancora la struttura sedimentaria e nei quali non fosse pertanto presente porosità, sono stati sottoposti a cotture, o per meglio dire a ricotture, a 1100°C e 1200°C, secondo condizioni che andassero a riprodurre le cotture in forno, tipo *kiln firing* (Rye, 1981), cioè con riscaldamento lento (200°C/ora), mantenendo la massima temperatura per tempi lunghi (6 ore) e lasciando raffreddare secondo la deriva del forno (Maritan, 2003; Maritan *et al.*, 2006). I risultati ottenuti sono stati molto interessanti, visto che i campioni ricotti a 1100°C non hanno mostrato alcun cambiamento nella struttura degli ARF (fig. 3.18a), mentre in quelli cotti a 1200°C gli ARF hanno sviluppato una struttura decisamente vescicolare (fig. 3.18b).

Inoltre, sebbene l'analisi al SEM degli inclusi a struttura vescicolare non abbia permesso l'individuazione di fayalite ed ercinite, l'analisi in diffrazione dei raggi X su polveri dell'intero campione di ricotto ha evidenziato la presenza di ercinite (fig. 3.19), analogamente a quanto anche osservato nei campioni di ceramica antica contenenti gli inclusi a struttura vescicolare.



a)



b)

Figura 3.18: a) campione di ceramica 3275/6III ricotto a 1100 °C – ARF senza struttura vacuolare; b) campione 3275/26VI ricotto a 1200 °C – ARF a struttura vacuolare.

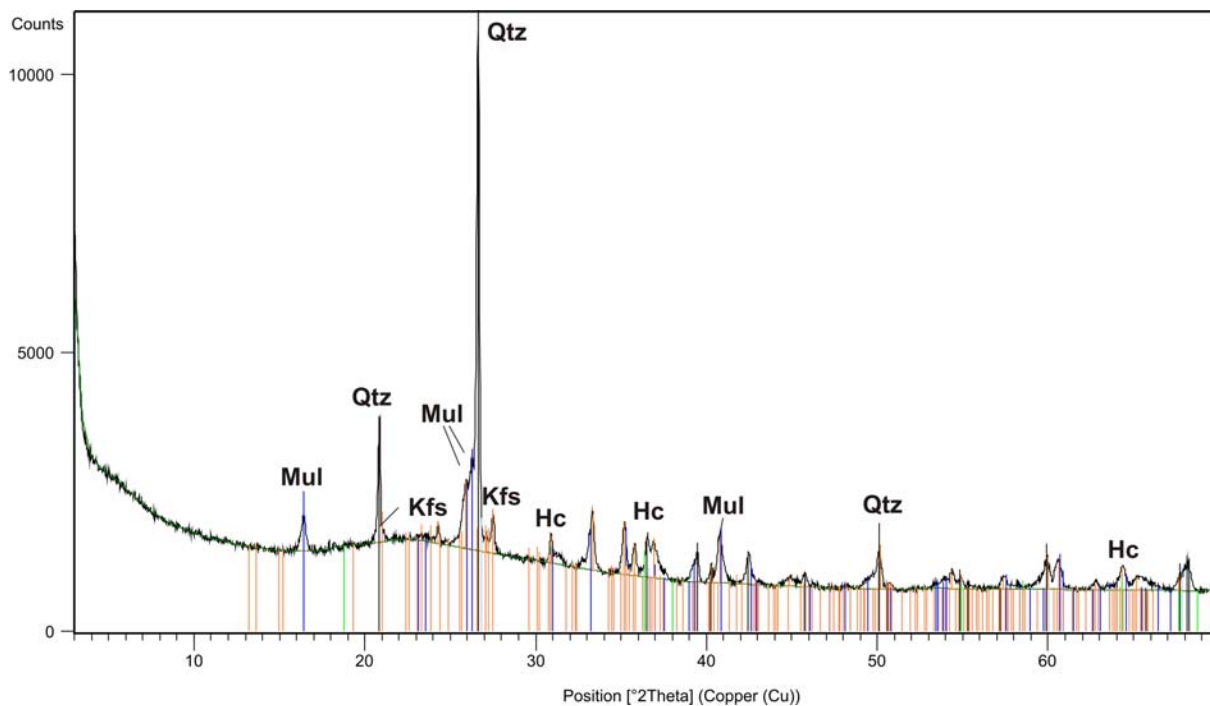


Figura 3.19: Diffratogramma di uno dei campioni (3275/26VI) 1200°C, nei quali si sono sviluppate strutture fortemente vacuolari negli ARF. L'associazione mineralogica è data da: (Qtz), mullite (Mu) K-feldspato (Kfs), ercinite (Hc).

Le temperature di cottura così stimate per la produzione ceramica di Tayma, cioè per i campioni localmente prodotti (gruppi 1, 2, 3, 4 e 5) risultano essere limitate ad un intervallo termico non troppo ampio (fig. 3.20) e a temperature piuttosto elevate. Infatti, la maggior parte delle ceramiche risulta essere stata cotta a temperature superiori a 950°C sia nel periodo del Ferro Antico che nel periodo del Ferro Tardo. Due gruppi più ristretti di campioni registrano temperature di cottura comprese negli intervalli 750-950°C e 900-950°C, rispettivamente. Solo in alcuni casi i reperti registrano temperature di cottura superiori a 1100-1200°C.

Temperature di cottura molto elevate ed intervalli termici ristretti per la produzione ceramica di Tayma sono indicative di una buona tecnologia di produzione ceramica già a partire dal Ferro Antico, e della presenza di forni in grado di raggiungere alte temperature di cottura e un alto grado di omogeneità termica nella camera di cottura.

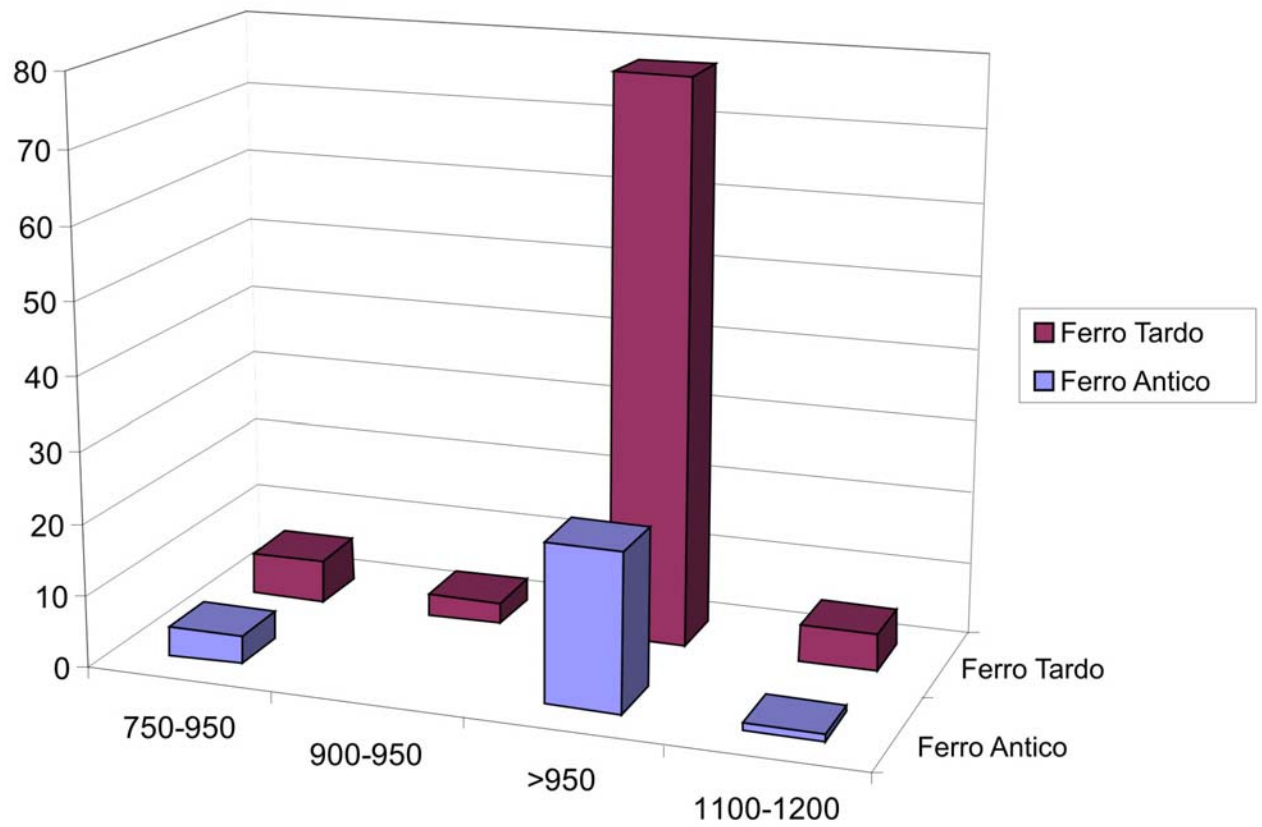


Figura 3.20: Intervalli di temperatura di cottura della produzione ceramica locale.

CONCLUSIONI

Le analisi minero-petrografiche, chimiche e microstrutturali, condotte con diverse tecniche analitiche sulle ceramiche rinvenute a Tayma e sulle materie prime campionate nel territorio circostante il sito archeologico e costituite da argille e sabbie di varia natura, hanno permesso di identificare la provenienza dei reperti e far luce su molti aspetti della tecnologia produttiva. Attraverso l'analisi petrografica al microscopio ottico è stato possibile definire 9 gruppi petrografici che corrispondono alle ricette utilizzate dai vasai nel corso dei secoli. Riconoscendo la natura degli inclusi delle ceramiche e tramite il confronto con le litologie affioranti nell'area di Tayma è stato possibile avere una prima importante verifica su quali reperti fossero con maggiore probabilità di produzione locale e quali di importazione. La maggior parte dei reperti datati stratigraficamente, sono costituiti da inclusi di natura sedimentaria quali sabbie quarzose, argilliti ed arenarie (gruppi petrografici 1, 2, 3,4, 5) che rappresentano anche la gran parte degli affioramenti dell'area di Tayma, suggerendo una possibile produzione locale di questi reperti. Un certo numero di campioni (gruppi petrografici 6, 7, 8) sono invece costituiti da inclusi la cui natura minero-petrografica non trova riscontro nelle litologie affioranti nell'area di Tayma, ed è quindi lecito ipotizzare che si tratti di ceramiche importate. Gli unici due reperti riferibili alle *stonepaste* o *faience*, pur essendo costituiti prevalentemente da quarzo, e quindi teoricamente compatibili con le materie prime disponibili sul territorio di Tayma, sono stati realizzati con tecniche totalmente differenti rispetto a quelle utilizzate per la produzione delle altre ceramiche. Un numero così limitato di campioni di questo tipo non permette quindi di fare ipotesi sulla possibile origine di queste ceramiche, anche se la scarsità di questi reperti sembra far pensare a materiale di importazione. Anche i campioni di argilla sono stati caratterizzati in microscopia ottica e la mineralogia e granulometria delle frazioni limoso-sabbiose è stata confrontata con la matrice delle ceramiche, assegnando determinate argille a specifici gruppi petrografici. La corrispondenza tra gruppi petrografici ed argille si è osservata solo nel caso di ceramiche che dal punto di vista petrografico erano state riconosciute come di probabile produzione locale, fornendo un ulteriore sostegno a tale ipotesi. Ulteriori informazioni relative alla provenienza delle ceramiche sono state ottenute attraverso l'elaborazione statistica dei dati chimici in XRF delle ceramiche provenienti da contesti stratigrafici e dei campioni di argilla raccolti. Dal dendrogramma dell'analisi dei *cluster* (CA) si nota una suddivisione in gruppi (*cluster*) che corrisponde con la classificazione in gruppi petrografici delle ceramiche, e dai diagrammi dei

punteggi e dei pesi dei fattori ottenuti attraverso l'analisi delle componenti principali (PCA), si evince come le ceramiche che petrograficamente sono riferibili ad una produzione locale si distribuiscano in una nuvola uniforme di punti, e come le argille locali si proiettino nella medesima regione dei diagrammi, indicando un buon grado di compatibilità tra composizione delle argille locali e materiale ceramico. Le ceramiche che sono state considerate di importazione su base petrografica, risultano avere una composizione chimica molto diversa da quella delle argille, e si proiettano in regioni molto distanti nel diagramma dei punteggi. Effettuando un trattamento statistico dei dati chimici relativi alle ceramiche, alle argille e ai diversi tipi di inclusi che costituiscono lo smagrante nelle ceramiche, è stato possibile individuare, attraverso il diagramma dei punteggi della PCA, dei sistemi di mixing tra argille e inclusi, confermati anche dall'elaborazione di opportuni diagrammi chimici ternari, lungo i quali si collocano le composizioni delle ceramiche di produzione locale. Questi sistemi da un lato spiegano le differenze compositive osservate tra argille e ceramiche appartenenti a determinati gruppi petrografici, dall'altro testimoniano il processo di tempera effettuato dai vasai secondo ricette di impasto differenti nella produzione di ceramiche.

I diversi gruppi petrografici rappresentano pertanto le diverse ricette utilizzate dai vasai. L'analisi dell'evoluzione temporale nell'utilizzo dei diversi impasti ha quindi permesso di collocare temporalmente l'utilizzo delle diverse ricette e l'evoluzione della produzione ceramica di Tayma nei millenni. Nel periodo del Ferro Antico si osserva, infatti, l'utilizzo di ricette di produzione compatibili con solo due dei gruppi petrografici (gruppi 1 e 3), mentre nel periodo del Ferro Tardo si assiste al fiorire di nuove e più varie ricette. La comparsa in questo periodo di materiali ceramici probabilmente di importazione sottolinea il forte sviluppo di scambi commerciali con altre popolazioni in questo periodo storico. L'unico reperto riferibile al periodo Islamico è stato assegnato alla classe delle *islamic stonepaste* sulla base delle indagini effettuate in microscopia elettronica a scansione.

Attraverso l'analisi in diffrazione XRD è stato possibile determinare le associazioni mineralogiche che contraddistinguono le ceramiche e, tramite il confronto con dati sperimentali di letteratura, si sono definite le temperature di cottura. La maggior parte dei reperti studiati sono stati cotti a temperature superiori a 950°C. L'analisi dettagliata di alcuni reperti contenenti inclusi a struttura vacuolare ha permesso di stimare per questi materiali temperature di cottura comprese tra 1100 e 1200°C. Questi inclusi sono risultati compositivamente corrispondenti agli ARF (*Argillaceous Rock Fragment*) rinvenuti in molte delle ceramiche di Tayma. La ricottura di alcuni frammenti di ceramica contenente ARF a 1100°C e a 1200°C ha permesso di verificare lo sviluppo di una struttura vescicolare, la

vetrificazione degli ARF e la cristallizzazione di ercinite. In questo modo è stato possibile determinare un preciso intervallo di cottura per quelle ceramiche che contengono tali inclusi e che rappresentano le più elevate temperature raggiunte dalla tecnologia produttiva della ceramica a Tayma.

In definitiva si può affermare che lo studio archeometrico dei reperti ha permesso di far luce su molti aspetti che riguardano la produzione ceramica di Tayma nel corso dei secoli, sia per la definizione della provenienza sia per la tecnologia produttiva.

Per quanto riguarda la provenienza, la maggior parte delle ceramiche rinvenute a Tayma si sono rivelate di produzione locale e pochi reperti riguardano casi di importazione limitati al periodo del Ferro Tardo. La tecnologia utilizzata per produrre la ceramica di Tayma prevedeva ricette ottenute con l'aggiunta di smagrante alle argille di partenza. L'utilizzo di nuove ricette nel periodo del Ferro Tardo testimonia una notevole evoluzione della tecnologia produttiva a Tayma.

BIBLIOGRAFIA

- AL-ASWAD, A.A., AL-BASSAM, A.M., 1997. *Proposed hydrostratigraphical classification and nomenclature: application to the Paleozoic in Saudi Arabia*. Journal of African Earth Sciences, **24-4**, 497-510.
- AL-NAJR, S., OWENS. B., 2000. *Stratigraphic paleontology of the Paleozoic of Saudi Arabia: Gulf PetroLink*, Bahrain.
- ARAS, A., 2004. *The change of phase composition in kaolinite- and illite-rich clay-based ceramic bodies*. Applied Clay Science, **24**, 257-269.
- AVANZINI, A., 1997. *Profumi d'Arabia. Atti del convegno*. L'erma di Bretschneider ed., Rome.
- BAWDEN, G., EDENS, C., MILLER, R., 1980. *Preliminary archaeological investigations at Tayma*. ATLAL-The Journal of Saudi Arabian Archaeology, **4**, 69-106.
- BAXTER, M.J. (2006) A review of supervised and unsupervised pattern recognition in archaeometry, Archaeometry 48, 671-694.
- BAXTER, M.J. 1994 Exploratory multivariate analysis in archaeology. Edinburgh University Press, Edinburgh.
- BAXTER, M.J. 1999 Detecting multivariate outliers in artefact compositional data, Archaeometry 41, 321-338.
- BAXTER, M.J. E BUCK, C.E. (2000) Data handling and statistical analysis, in: Ciliberto E. e Spoto G. (Eds.), Modern analytical methods in art and archaeology. John Willey, New York, 681-746.
- BRONGNIART, A., 1844, *Traité des arts céramiques, ou des poteries considérées dans leur histoire, leur pratique et leur théorie*, Paris, 2 vol. in-8° et atlas in-4°.
- CAVIGNEAUX, A., KHALIL, I.B., 1990. *Die statthalter von Suhu and Mari im 8. Jh. v. Chr.* Baghdader Mitteilungen, **21**, 321-456.
- CULTRONE, G., RODRIGUEZ-NAVARRO, C., SEBASTIAN, E., CAZALLA, O. E DE LA TORRE, M.J., 2001, *Carbonate and silicate phase reactions during ceramic firing*, European Journal of Mineralogy **13**, 621-634.
- CUOMO DI CAPRIO, N. E VAUGHAN, S.J., 1993, *An experimental study in distinguishing grog (chamotte) from argillaceous inclusions in ceramic thin sections*, Archeomaterials, **7**, 21-40.

- CUOMO DI CAPRIO, N., 1985, *La ceramica in archeologia: antiche tecniche di lavorazione e moderni metodi d'indagine*, Ed. La Fenice.
- DALLEY, S., 1986. *The god šalmu and the winged disk*. Iraq, **48**, 85-101.
- EICHMANN, R., SCHAUDIG, H., HAUSLEITER, A., 2006(a). *Archaeology and epigraphy at Tayma (Saudi Arabia)*. Arabian archaeology and epigraphy, **17**, 163–176.
- EICHMANN, R., HAUSLEITER, A., AL-NAJEM, M.H., AL-SAID, S.F., 2006(b). *Tayma – Spring 2004, report on the Joint Saudi-Arabian-German archaeological project*. ATLAL- The Journal of Saudi Arabian Archaeology, **19**, 91-116.
- GERRARD, C.M., 1991, *Sedimentary petrology and the archaeologist: the study of ancient ceramics*, in Development in sedimentary provenance studies, Eds. A.C. Morton, S.P. Todd e P.D.W. Haughton, Geological Society Special Publication **57**, 189-197.
- GHEBREAB, W., 1998. *Tectonics of the Red Sea reassessed*. Earth Science Reviews, **45**, 1-44.
- GOSSELAIN, O.P. E LIVINGSTONE SMITH, A., 2005, *The Source Clay Selection and Processing Practices in Sub-Saharan Africa*, in Pottery Manufacturing Processes: Reconstitution and Interpretation, Eds. A. Livingstone Smith, D. Bosquet e R. Martineau, BAR International Series 1349, 33-47.
- GREENBERG, J.K., 1981. *Characteristic and origin of Egyptian younger granites*. Geological Society of American Bulletin, **92**, I224-I232, II749-II840.
- GREENWOOD, W.R., HADLEY, D.G., ANDERSON, R.E., FLECK, R.J., SCHMIDT, D.L., 1976. *Late Proterozoic cratonization in southwestern Saudi Arabia*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series, **A 280**, 517-527.
- GRIFA, C., CULTRONE, G., LANGELLA, A., MERCURIO, M., DE BONIS, A., SEBASTIAN, E., MORRA, V., 2009, *Ceramic replicas of archaeological artefacts in Benevento area (Italy): Petrophysical changes induced by different proportions of clays and temper*. Applied Clay Science, **46**, 231-240.
- HADLEY, D.G., SCHMIDT, D.L., 1980. *Sedimentary rocks and basins of the Arabian shield and their evolution*. Institute of Applied Geology, Bulletin King Abdulaziz University, **4**, 26-50.
- HART, W.K., WOLDEGABRIEL, G., WALTER, R.C., MERTZMAN, S., 1989. *Basaltic volcanism in Etiopia: constraints in continental rifting and mantel interaction*. Journal of Geophysical Research, **94**, 7731-7748.

- HAUSLEITER, A., 2006. *Tayma, Northwest-Arabia – The context of archaeological research*. Special Issue of Oriental Studies. A collection of papers on Ancient Civilizations of Western Asia, Asia Minor and North Africa, Yushu Gong-Yiyi Chen eds., pp. 158-180.
- HEIMANN, R.B. E MAGGETTI, M., 1981, *Experiments on simulated burial of calcareous terra sigillata: mineralogical change – preliminary results*, British Museum Occasional Paper 19, 163-177.
- HEIMANN, R.B., 1982, *Firing technologies and their possible assessment by modern analytical methods*, in Archaeological ceramics, Eds. Olin J.S. e A.D. Franklin, Smithsonian Institution Press, Washington, 89-96.
- HEIMANN, R.B., 1989, *Assessing the technology of ancient pottery: the use of ceramic phase diagrams*, *Achaeomaterials* **3**, 123-148.
- HUSSAIN, M., 2007. *Elemental chemistry as a tool of stratigraphic correlation: A case study involving lower Paleozoic Wajid, Saq, and Qasim formations in Saudi Arabia*. *Marine and Petroleum Geology*, **24**, 91-108.
- JOHNSON, D.E. (1998) *Applied multivariate methods for data analysts*, Duxbury Press.
- KHAN, M., 1993. *Prehistoric Rock Art of northern Saudi Arabia*. Ministry of Education, Riyadh, pp. 104-108.
- KILIKOGLU, V., MANIATIS, Y. E GRIMANIS, A.P., 1988, *The effect of purification and firing of clays on trace element provenance studies*, *Archaeometry* **30**, 37-46.
- LACHANCE, G.R. & TRAILL R.J. (1966): *Practical solution to the matrix problem in X-ray analysis*. – *Canadian Spectroscopy* **11**, 43-48.
- LE CHÂTELIER, H., 1907, *Archaologisch-keramische Untersuchungen*, *Zeitschrift für Angewandte Chemie* **13**, 517-523.
- LE NINDRE, Y.M., VASLET, D., LE METOUR, J., BERTRAND, J., HALAWANI, M., 2003. *Subsidence modelling of the Arabian Platform from Permian to Paleogene outcrops*. *Sedimentary Geology*, **156**, 263-285.
- LEIBNIZ LABOR FÜR ALTERSBESTIMMUNG, 2005. Sample no. KIA24635. Christian-Albrechts-Universität, Kiel.
- LETSCH, J., NOLL, W., 1983. *Phase formation in several subsystem at 600 °C-1000 °C as a function of oxygen fugacity*. *cfi/Ber. DKG*, **7**, 259-267.
- LEVI, A., 1931, *L'Analyse Chimique des Terres Cuites Anciennes et leur provenance*, *Museion* **15**, 64-66.

- MAGGETTI, M., 1982, *Phase analysis and its significance for technology and origin*, in *Archaeological ceramics*, Eds. J.S. Olin e A.D. Franklin, Smithsonian Institution Press, Washington, 121-133.
- MARITAN, L. E MAZZOLI, C., 2004, *Phosphates in archaeological finds: implications for environmental conditions of burial*, *Archaeometry* **46**, 673-683.
- MARITAN, L., 2003, *Studio archeometrico di ceramiche di tipo etrusco padano dell'area veneta: indagini petrografiche, chimico-fisiche e confronto con i risultati ottenuti da prove sperimentali di cottura di materiali argillosi*, Unpublished PhD thesis, Università di Padova.
- MARITAN, L., ANGELINI, I., ARTIOLI, G., MAZZOLI, C. & SARACINO, M., 2009, *Secondary phosphates in the ceramic materials from Frattesina (Rovigo, North-Eastern Italy)*, *Journal of Cultural Heritage* **10**, 144-151.
- MARITAN, L., NODARI, L., MAZZOLI, C., MILANO, A., RUSSO, U., 2006, *Influence of firing conditions on ceramic products: Experimental study on clay rich in organic matter*. *Applied Clay Science*, **31**, 1-15.
- MASON, R.B., TITE, M.S., 1994, *The beginnings of Islamic Stonepaste Technology*. *Archaeometry*, **36**, 77-91.
- MASS, J.L, WYPYSKI, M.T., STONE, R.E., 2002, *Malkata and Lisht glassmaking technologies: towards a specific link between second millennium BC metallurgists and glassmaker*. *Archaeometry*, **44**, 67-82.
- MIRABELLA, A., 2005, *Analisi qualitativa di minerali argillosi su polveri orientate per DRX in Argille e Minerali delle Argille*, vol.V, Aisa Onlus, pp.51-74.
- MOMMSEN, H., KREUSER, A. EWEBER, J. (1988) A method for grouping pottery by chemical composition, *Archaeometry* 30, 47-57.
- NEFF, H., BISHOP, R.L. E SAYRE, E.V., 1988, *A simulation approach to the problem of tempering in compositional studies of archaeological ceramics*, *Journal of Archaeological Science* **15**, 159-172.
- NODARI, L., MARCUZ, E., MARITAN, L., MAZZOLI, C. E RUSSO, U., 2007, *Hematite nucleation and growth in the firing of carbonate-rich clay for pottery production*, *Journal of the European Ceramic Society* 27, 4665-4673.
- OWENS, B., AL-TAYYAR, H., VAN DER EEM, J.G.L.A., AL-HAJRI, S., 1995. *Paleozoic palynostratigraphy of the Kingdom of Saudi Arabia*. *Rev. Paleobot. Palynol.*, **89**, 1-150.
- PAPAGEORGIOU, I., BAXTER, M.J. E CAU, M.A (2001) Model-based cluster analysis of artefact compositional data, in *Archaeometry*, 43, 571-588.

- PAVLYUKEVICH, YU.G., LEVITSKII, I.A., GAILEVICH, S.A., 2005, Raw Materials, *Glauconite materials from Belarus and their application prospects*. Glass and ceramics, **62**, 159-161.
- RICCARDI, M.P., MESSIGA, B., DUMINUCO, P., 1999. *An approach to the dynamics of clay firing*. Applied Clay Science, **15**, 393-409.
- RICE, P.M., 1987, Pottery Analysis: A Sourcebook, University of Chicago Press.
- RYE, O., 1981, *Pottery technology: principles and reconstruction*. Taraxacum Inc. Washington.
- SCHAUDIG, H., 2001. *Die Inschriften Nabonidus von Babylon und Kyros' des Großen samt den in ihrem Umfeld entstandenen Tendenzschriften. Textausgabe und Grammatik*. AOAT, **256**, 9-23.
- SCHLEICHER, L., MILLER, W., WATKINS-KENNEY, S., CARNES-MCNAUGHTON, L. E WILDE-RAMSING, M., 2008, Non-destructive chemical characterization of ceramic sherds from Shipwreck 31CR314 and Brunswick Town, North Carolina, *Journal of Archaeological Science* 35, 2824-2838.
- SCHWEDT, A., MOMMSEN, H. AND ZACHARIAS, N., 2004, Post-depositional elemental alterations in pottery: neutron activation analyses of surface and core samples, *Archaeometry*, 46, 85-101.
- SCHWEDT, A., MOMMSEN, H., ZACHARIAS, N. E BUXEDA I GARRIGÓS, J., 2006, Analcime crystallization and compositional profile-comparing approaches to detect post-depositional alteration in archaeological pottery, *Archaeometry* 48, 237-251.
- STACEY, J.S., HEDGE, C.E., 1984. *Geochronological and isotopic evidence for early Proterozoic crust in the eastern Arabian shield*. Geology, **112**, 310.
- STERN, R.J., 1981. *Petrogenesis and tectonic setting of Late Precambrian ensimatic volcanic rocks, Central Eastern Desert of Egypt*. Precambrian Research, **16**, 195-230.
- STERN., R.J., AVIGAD, D., MILLER, N.R., BEYTH, M., 2006. *Evidence for the Snowball Earth hypothesis in the Arabian-Nubian Shield and the East African Orogen*. Journal of African Earth Sciences, **44**, 1-20.
- STUMP, T.E., VAN DER EEM, J.G., 1995. *The stratigraphy, depositional environments and periods of deformation of the Wajid outcrop belt, southwestern Saudi Arabia*. Journal of African Earth Sciences, **21**, 421-441.
- TITE M.S. E MANIATIS, Y., 1975, Examination of ancient pottery using the scanning electron microscope, *Nature* 257, 122-123.

- TITE, M.S., FREESTONE, I.C., BIMSON, M., 1983. *Egyptian Faience: an investigation of the methods of production*. *Archaeometry*, **25**, **1**, 17-27.
- TITE, M.S., FREESTONE, I.C., MEEKS, N.D. E BIMSON, M., 1982, The use of scanning electron microscopy in the technological examination of ancient ceramics, in *Archaeological ceramics*, Eds. J.S. Olin e Franklin A.D., Smithsonian Institution Press, Washington, 109-120.
- VASLET, D., KELLOG, K.S., BERTHIAUX, A., LE STRAT, P., VINCENT, P., 1986. Geologic map of the Baq'a quadrangle, Sheet 27F. Ministry of Petroleum and Mineral Resources, Deputy Ministry for Mineral Resources, Kingdom of Saudi Arabia.
- VERNEUIL, M.A., 1911, *Sur la préparation de l'Email Noir, ou Lustre des Poteries Italogrecques*, C.R. Hebd. Séances Acad. Sci 152, 380.
- WHITBREAD, I.K., 1989. *A proposal for the systematic description of thin sections towards the study of ancient ceramic technology*. Proceedings of the 25th International Symposium on Archaeometry. Elsevier, pp. 127-138.
- WHITBREAD, I.K., 1995, *Greek Transport Amphorae: A Petrological and Archaeological Study*, Fitch Laboratory Occasional Paper 4, British School at Athens.
- WHITBRED, I.K., 1986, *The characterisation of argillaceous inclusions in ceramic thin sections*, *Archaeometry* 28, 79-88.
- WHITE, R., McKENZIE, D., 1989. *Magmatism at rift zones; the generation of volcanic continental margins and flood basalts*. *Journal of Geophysical Research*, **94**

ALLEGATO A - Condizioni analitiche

Microscopia a scansione elettronica

Strumento: SEM Camscan MX 2500 del dipartimento di Geoscienze dell'Università degli Studi di Padova.

Fascio elettronico incidente accelerato da una differenza di potenziale di 20 kV con una intensità di corrente di 160 mA. Rilevatori:

- elettroni secondari (*Secondary Electrons*, SE)
- elettroni retrodiffusi (*Backscatter Electrons*, BSE)
- radiazione X caratteristica (spettrometro EDS, *Energy Dispersion System*)

Working distance 25 mm.

Diffrazione dei raggi X (XRPD)

Strumento: Diffratometro PANalytical X'Pert PRO con geometria Bragg-Brentano

Velocità angolare: 30s per $2\theta = 0.02^\circ$

Intervallo di misurazione: $3^\circ < 2\theta < 70^\circ$

Velocità di Cristallo monocromatore: grafite

Materiale dell'anodo: Cu

Impostazioni del generatore: 40 Kv, 40 mA

Raggio del goniometro [mm]: 240.0

Fluorescenza a raggi X

Strumento: Spettrometro a dispersione di lunghezza d'onda ARL Advant'XP con tubo al Rh, in dotazione al Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Ferrara.

Elaborazione intensità acquisite e correzione degli effetti matrice secondo il metodo proposto da Traill & Lachance (1966).

Accuratezza dati analitici entro il 2-5% per gli elementi maggiori (riportati in percentuale in peso dei rispettivi ossidi) e il 5-10% per gli elementi in traccia (espressi in ppm).

Limite di rivelabilità: 0.01% per elementi maggiori, prossimo al ppm per gli elementi in traccia.

ALLEGATO B - Caratterizzazione ceramiche

Gruppo	Campione	Tipologia ceramica	Pasta di fondo			Porosità					c:f ratio	Distribuzione	Dim. Max (mm)	Inclusi				
			Omogeneità	Otticità b-fab	Orientamento	%	Dim. Max (µm)	Ch	PV	Ve				Vu	A	SA	SR	R
1a	3553/20	coppa, ciotola	om	no	si	3-5	600			*	20:80	seriale	650	*				
1a	4039/6	brocca, vaso	om	si	speckled	si	5	250			*	15:85	seriale	700	*			
1a	4307/3	coppa, ciotola	om	no	si	3	1000			*	20:80	seriale	650	*				
1a	4307/5	coppa, ciotola	om	no	si	5	300			*	15:85	seriale	400	*	*			
1a	4307/7	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3	200			*	20:80	seriale	500	*			
1a	4307/8	coppa, ciotola	om	no	si	3-5	350			*	20:80	seriale	700	*	*			
1a	4307/9	non definito	om	no	si	5	400			*	15:85	seriale	500	*				
1a	156/3	coppa, ciotola	om	no	si	3	1100			*	20:80	seriale	400	*				
1a	5627	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3	1800	*		*	20:80	seriale	700	*			
1a	5627/2	coppa, ciotola	om	no	si	1	2100			*	20:80	seriale	2600	*				
1a	5627/3	coppa, ciotola	om	no	si	3-5	1000			*	20:80	seriale	3000	*				
1a	5627/4	coppa, ciotola	om	no	si	3	2300			*	20:80	seriale	2000	*				
1a	5627/6	coppa, ciotola	dis	no	si	3	1500			*	20:80	seriale	2800	*				
1a	3553/5	coppa, ciotola	om	si	speckled	no	5	800			*	20:80	seriale	700	*	*		
1b	3418/36	brocca, vaso	om	no	si	3	1200			*	15:85	seriale	750	*	*			
1b	2763/3	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3	1700	*		*	15:85	seriale	800	*	*		
1b	4039/1	coppa, ciotola	om	no	si	5	1000			*	15:85	seriale	700	*				
1b	4039/2	coppa, ciotola	om	no	si	3	1500	*		*	15:85	seriale	1800	*				
1b	4039/3	coppa, ciotola	om	no	si	3	1300			*	20:80	seriale	2400	*				
1b	4039/4	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	5	2000			*	20:80	seriale	1500	*			
1b	4039/5	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3	2100			*	20:80	seriale	1400	*			
1b	4307/1	coppa, ciotola	om	no	si	5	2200			*	20:80	seriale	1300	*				
1b	3470/5	coppa, ciotola	om	no	si	3	1000			*	20:80	seriale	700	*	*			
1b	156/6	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3	1300			*	20:80	seriale	1800	*			
1b	156/10	coppa, ciotola	dis	si	speckled	si	3-5	2200			*	20:80	seriale	800	*			
1b	5627/1	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	1-3	1600			*	20:80	seriale	700	*			
1b	5627/7	coppa, ciotola	om	no	si	5	2200			*	20:80	seriale	2900	*				
1b	3746	non definito	om	no	si	5	2000			*	20:80	seriale	800	*				
1c	3418/20	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	5	2200			*	20:80	seriale	800	*			
1c	3418/45b	brocca, vaso	om	no	si	3	1300			*	15:85	seriale	2300	*	*			
1c	3418/75	coppa, ciotola	om	no	si	5	1400	*		*	15:85	seriale	800	*	*		*	
1c	3107/1	pentola	om	si	speckled	si	3	900			*	15:85	seriale	1750	*			
2a	2792/11	piatto	om	si	striated	si	3	1700			*	1:99	seriale	100	*	*		
2b	2763/12	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3	1100			*	5:95	seriale	3000	*			
2b	3135/15	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3-5	400			*	5:95	seriale	950	*			
2b	3135/42	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3-5	600			*	5:95	seriale	800	*			
2b	3135/49	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3-5	1000			*	5:95	seriale	1200	*	*		
2b	3553/11	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	5	800			*	5:95	seriale	700	*			
2b	3553/15	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	5	1000			*	5:95	seriale	2000	*	*		
2b	3553/29	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3	1600			*	5:95	seriale	1800	*			
2b	3553/33	non definito	om	si	speckled	si	3	1100	*		*	5:95	seriale	2600	*	*		
3a	3470/3	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3-5	1500	*		*	30:70	seriale	2500	*			
3a	3275/rf1	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3	1600	*		*	30:70	seriale	2700	*	*		
3a	3275/rf2	brocca, vaso	dis	si	speckled	si	3	1600	*		*	30:70	seriale	2500	*	*		
3a	3275/2	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3	1400	*		*	30:70	seriale	3500	*	*		
3a	3275/7	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	1	700			*	20:80	seriale	1300	*			
3a	3275/18	brocca, vaso	dis	si	speckled	si	5	1600	*		*	30:70	seriale	3500	*			
3a	3275/19	brocca, vaso	om	si	speckled	si	1	1500	*		*	20:80	seriale	1700	*			
3a	3275/23	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3	2700	*		*	20:80	seriale	1900	*			
3a	3275/25	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3-5	3500	*		*	30:70	seriale	2800	*			
3a	2792/18	brocca, vaso	om	si	speckled	si	5	3000	*		*	30:70	seriale	3000	*	*		
3a	3116/1	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3	650			*	40:60	seriale	3500	*	*		
3a	3553/2	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3-5	1000	*		*	40:60	seriale	2000	*	*		

Gruppo	Campione	Tipologia ceramica	Pasta di fondo				Porosità				c/f ratio	Inclusi Distribu- zione	Dim. Max (mm)	forma			
			Omogeneità	b-fab	Orienta- mento	%	Dim. Max (µm)	Ch	PV	Ve				Vu	A	SA	SR
3a	3553/6	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3-5	1100	*		*	40:60	seriale	3000		*	*
3a	3553/9	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3-5	1200	*		*	35:65	seriale	2500		*	*
3a	3553/12	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3-5	800			*	30:70	seriale	2100		*	*
3a	3553/13	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3	1150	*		*	30:70	seriale	3250		*	*
3a	3553/18	brocca, vaso	om	si	speckled	si	10	600		*	*	35:65	seriale	2000		*	*
3a	3553/19	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	5	2250	*		*	35:65	seriale	2100		*	*
3a	3553/31	plate	om	si	speckled	si	3	2200	*		*	35:65	seriale	3150		*	*
3a	4039/7	non definito	om	si	speckled	si	3	900			*	35:65	seriale	3100		*	*
3a	4307/2	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	5	1100			*	35:65	seriale	2500		*	*
3b	3418/3	pentola	om	si	speckled	si	3	1200	*		*	30:70	seriale	3000		*	*
3b	3418/34	brocca, vaso	om	si	speckled	si	5	2400	*		*	20:80	seriale	1500		*	*
3b	3418/59	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3	1100			*	30:70	seriale	1900		*	*
3b	3418/63	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3	1100			*	30:70	seriale	3600		*	*
3b	3418/68	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3	1300	*		*	30:70	seriale	1100		*	*
3b	3470/2	non definito	om	si	speckled	si	3-5	1200	*		*	35:65	seriale	2400		*	*
3b	3275bf	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3	1800			*	30:70	seriale	2700		*	*
3b	3275rf3	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3-5	3500	*		*	30:70	seriale	3100		*	*
3b	3275/1	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3	1500			*	30:70	seriale	2200		*	*
3b	3275/3	coppa, ciotola	om	deb	speckled	si	3	1400			*	20:80	seriale	2700		*	*
3b	3275/4	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	5	1600	*		*	30:70	seriale	1700		*	*
3b	3275/6	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3	1500		*	*	30:70	seriale	2100		*	*
3b	3275/10	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3	500			*	20:80	seriale	2500		*	*
3b	3275/12b	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3	5000	*		*	30:70	seriale	3000		*	*
3b	3275/16	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3	1500		*	*	30:70	seriale	2100		*	*
3b	3275/21	brocca, vaso	dis	deb	speckled	si	3	1300	*		*	30:70	seriale	3300		*	*
3b	3275/22	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3-5	1800			*	20:80	seriale	3000		*	*
3b	3058/4	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3-5	2100	*		*	30:70	seriale	3500		*	*
3b	3553/10	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	5	2200	*		*	30:70	seriale	2210		*	*
3b	3553/16	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3	1100	*	*	*	35:65	seriale	2500		*	*
3b	3553/25	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3-5	900	*		*	40:60	seriale	2450		*	*
3b	3553/26	pentola	om	si	speckled	si	3-5	800		*	*	30:70	seriale	3000		*	*
3b	4307/4	non definito	om	si	speckled	si	3	1100		*	*	20:80	seriale	2000		*	*
3b	4307/6	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3	1200	*	*	*	35:65	seriale	2100		*	*
3c	3470/10	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3	1700	*		*	35:65	seriale	3000		*	*
3c	3275/9	coppa, ciotola	om	no	speckled	si	3	1200	*	*	*	35:65	seriale	2400		*	*
3c	3058/8	coppa, ciotola	Om	no	speckled	si	3	2100	*		*	40:60	seriale	2200		*	*
3c	3553/7	coppa, ciotola	si	si	speckled	si	3	800			*	35:65	seriale	1500		*	*
3c	4307/10	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3-5	600			*	35:65	seriale	1500		*	*
3c	7106/c	non definito	om	si	speckled	si	3	900			*	40:60	seriale	2000		*	*
3d	3418/17	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3	1200	*		*	20:80	seriale	1200		*	*
4a	3418/24	vassoio	om	si	speckled	si	3-5	1100	*		*	5:95	seriale	2500		*	*
4a	3275/11	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3-5	2200			*	10:90	seriale	3100		*	*
4a	3275/12a	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3	2500			*	5:95	seriale	2400		*	*
4a	3275/13	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3-5	2300	*		*	10:90	seriale	4500		*	*
4a	3275/15	brocca, vaso	om	si	speckled	si	5	2600		*	*	5:95	seriale	3000		*	*
4a	3275/20	coppa, ciotola	dis	si	speckled	si	3-5	2500	*		*	10:90	seriale	2300		*	*
4a	2763/6	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3-5	1100	*		*	20:80	seriale	2600		*	*
4a	2763/8	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	5	2500	*		*	15:85	seriale	2000		*	*
4a	2763/10	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	10	1500	*	*	*	10:90	seriale	2600		*	*
4a	3107/4	brocca, vaso	om	si	speckled	si	1-3	2000	*		*	10:90	seriale	3200		*	*
4a	3135/7	brocca, vaso	om	si	speckled	si	10	2300	*		*	20:80	seriale	3000		*	*
4b	3470/7	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3-5	1800	*		*	10:90	seriale	1700		*	*
4b	3135/11	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3-5	1800	*		*	10:90	seriale	1900		*	*
4b	3135/13	coppa, ciotola	dis	si	speckled	si	3-5	2000	*		*	5:95	seriale	2000		*	*
4b	3135/19	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3-5	1900		*	*	10:90	seriale	1900		*	*
4b	3135/26	coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3	1500	*		*	10:90	seriale	1800		*	*
4b	233	non definito	om	si	speckled	si	3	200	*		*	5:95	seriale	1000		*	*
5	3418/7	coppa, ciotola	om	deb	speckled	si	10	1000			*	30:70	seriale	1600		*	*
5	3418/11	pentola	om	si	speckled	si	10	1700	*		*	25:65	seriale	1000		*	*
5	3418/15	non definito	om	si	speckled	si	20	1300	*		*	20:80	seriale	1000		*	*
5	3418/16	brocca, vaso	om	si	speckled	si	5	1700			*	20:80	seriale	2900		*	*

Gruppo	Campione	Tipologia ceramica	Pasta di fondo				Porosità					c:f ratio	Distribuzione	Inclusi Dim. Max (mm)	forma			
			Omogeneità	Otticità		Orientamento	%	Dim. Max (µm)	Forma						A	SA	SR	R
				b-fab					Ch	PV	Ve							
5	3418/39	brocca, vaso	om	deb	speckled	si	3	550	*		*	25:65	seriale	550			*	
5	3418/45a	pentola	om	deb	speckled	si	10	1700	*		*	25:65	seriale	900			*	
5	3418/57	brocca, vaso	om	deb	speckled	si	3	1150	*		*	25:65	seriale	1250			*	
5	3418/65	brocca, vaso	om	si	speckled	si	3	1000	*		*	30:70	iatale	2400			*	
5	3418/70	brocca, vaso	om	si	speckled	si	1	300	*		*	30:70	seriale	1250			*	
5	3418/74	pentola coppa, ciotola	om	si	speckled	si	3	600	*		*	30:70	seriale	650			*	
5	3470/4	ciotola coppa, ciotola	om	si	speckled	si	5	1500	*		*	30:70	seriale	500			*	
5	3275/24	ciotola coppa, ciotola	om	si	speckled	si	10	1100		*	*	30:70	seriale	2500			*	
5	3275/26	ciotola coppa, ciotola	om	si	speckled	si	10	3500			*	25:65	seriale	4300			*	
5	3553/3	ciotola	om	si	speckled	si	5	1300	*		*	15:85	seriale	700			*	
6	3470/1	coppa, ciotola	si	no		no	3	600	*		*	40:60	seriale	1700	*			
7a	7106/g11	invetriato	om	no		no	1-3	300			*	3:97	seriale	150			*	*
7a	7106/g12	invetriato	om	no		no	1-3	300			*	1:90	seriale	300			*	*
7b	3418/71	invetriato	om	no		si	3	1900	*		*	15:85	seriale	1800			*	*
7b	3435	invetriato	om	no		si	3-5	1700	*		*	10:90	seriale	600			*	*
7b	7106/a	non definito	om	no		si	3-5	600			*	10:90	seriale	700			*	*
7b	7106/b	non definito	om	no		si	3-5	600			*	15:85	seriale	750			*	*
7c	3418/73	invetriato	om	no		si	3-5	700			*	25:75	seriale	600			*	*
8a	3470/9	non definito	om	no		si	5	110	*	*		25:75	seriale	1600			*	*
8b	3418/72	invetriato	om	no		si	1-3	500			*	20:80	seriale	300			*	*
8b	3910	invetriato	dis	no		si	1-3	600			*	20:80	seriale	300			*	*
9	4036	invetriato		assente								90:10	seriale	600			*	*
9	4318	invetriato		assente								90:10	seriale	900			*	*

Inclusion composition

Gru ppo	Cam pione	Qzt	Pl	Kfs	Bt	Ms	Op	Px	zircono	Rt	Clay pellet	ARF	siltite	arenite	carbonato micritico	vulc. ac	vulc. Bas	calc. selce	calc. Sec.
1a	3553/20	++++	+		+	±					+								
1a	4039/6	+++			+														
1a	4307/3	+++	+		+	±													
1a	4307/5	+++	+																
1a	4307/7	+++			+	±													
1a	4307/8	++++	+		+	±													
1a	4307/9	+++	+		+														
1a	156/3	++++	+		++						+								
1a	5627	++++	±								+		±						
1a	5627/2	++++	+			+					++	+							
1a	5627/3	++++				+	+					++	+						
1a	5627/4	++++	+			+	+					++		+					
1a	5627/6	++++	+		+	+	+				++		+						
1a	3553/5	++++	+			±	+				+								
1b	3418/36	++++				+						+	+	+					
1b	2763/3	++++	+			±						+++		++					
1b	4039/1	++++	+			+													
1b	4039/2	++++	+			±	+				+	+							
1b	4039/3	++++	+			±	+												
1b	4039/4	++++	+			+						++							

Gru p po	Cam pione	Inclusion composition											carbonato micritico	vulc.ac	vulc. Bas	calc. Sec.	
		Qzt	Pl	Kfs	Bt	Ms	Op	Px	zircono	Rt	Clay pellet	ARF					siltite
1b	4039/4	++++	+			+						++					
1b	4039/5	++++				+	+										
1b	4307/1	++++	+			+	+										
1	3470/5	++++	+		+	±	+										
1b	156/6	++++	±			++	+			+	+			++			
1b	156/10	++++	+			++				++							
1b	5627/1	++++	±		+	++				+							
1b	5627/7	++++	+			±	+			++	+	+					
1b	3746	++++	+		+		+										
1c	3418/20	++++	+				+				++						
1c	3418/45b	+++	±		++	±	+				+++			++			
1c	3418/75	+++	+		+	±	+				++						
1c	3107/1	++++	+			±							+	+			
2a	2792/11	+					++	+									
2b	2763/12	++					++	+									
2b	3135/15	+					++++	+									
2b	3135/42	++					++	+									
2b	3135/49	+			+	++++	+				+++						
2b	3553/11	+					++	+									
2b	3553/15	++			+	++	+				+++						
2b	3553/29	++				+++	+										
2b	3553/33	+++				+++	+				+++			++			
3a	3470/3	+++				+					++	++	+				
3a	3275rf1	+++					++	+			+	+	+				
3a	3275rf2	+++					+	+			+++	+					
3a	3275/2	+++					+	+			+++	++	++				
3a	3275/7	++					++				+++	++	++				
3a	3275/18	+++					++				++++	+	+				
3a	3275/19	+++					+	+		±	+++	++	++				
3a	3275/23	+++					+	+			+++	++	++				
3a	3275/25	+++					+				+++	++	+				
3a	2792/18	+			++	+	+				++++	+++					
3a	3116/1	++				+	+				+++	+					
3a	3553/2	++			+	++	+				+++						
3a	3553/6	++				+					++++	+	+				
3a	3553/9	+			+	++					++++	++	+				
3a	3553/12	+++				+	+				+++	+					
3a	3553/13	++			+	+	+				+++		+				
3a	3553/18	+			+	++	+				++++						
3a	3553/19	++				+					++++	+					
3a	3553/31	++				+	+				+++		+				
3a	4039/7	++				+	++				++	+					
3a	4307/2	+				++	++				+++						
3b	3418/3	+++				+++	+				+++	+	+				
3b	3418/34	+++				+	+				+++						
3b	3418/59	+++			++	++					+++	++	++				
3b	3418/63	+++			++	++					+++	++	++				
3b	3418/68	+++			+	+++	+++			+	++		++				
3b	3470/2	+++	±		+	+					++	+++					
3b	3275bf	+++				++					+++	+	++				
3b	3275rf3	++									++	+	+++				
3b	3275/1	+++				++					+++	+	+				
3b	3275/3	+++				+					++	+	+				
3b	3275/4	++				±					++++		+				
3b	3275/6	+++				+					++	++	++				
3b	3275/10	+++				+					+++	+	+				
3b	3275/12b	+++				+					+++	++	++				

Gru p po	Cam pione	Inclusion composition														carbonato micritico	vulc. ac	vulc. Bas	calc. Sec.
		Qzt	Pl	Kfs	Bt	Ms	Op	Px	zircono	Rt	Clay pellet	ARF	siltite	arenite	selce				
3b	3275/16	+++				++						+++	++						
3b	3275/21	++			++	+						++	++	++					
3b	3275/22	+++				+						+++	++	++					
3b	3058/4	+++	+		±	±	+					+++	+++	+++					
3b	3553/10	++			+	+	+					++		++					
3b	3553/16	++			+	+	+					++	+	+					
3b	3553/25	+++	+		+	+	+					++		+					
3b	3553/26	+++	+			+	+					++	++						
3b	4307/4	+++			+	++	+					++	++						
3b	4307/6	+++	+		+		+					++	+						
3c	3470/10	++										+++	+	+					
3c	3275/9	+++	+			+						+++	+	++++					
3c	3058/8	++++				+	+					++		++++					
3c	3553/7	+++	+											+++					
3c	4307/10	+++	+									+		+++					
3c	7106/c	+++	+			+	+					+	+	++					
3d	3418/17	+++	+			++						+++		++					
4a	3418/24	++				+	+					+++	+						
4a	3275/11	+++				+						++++	±	+					
4a	3275/12a	+++					+			±		++++	++	+					
4a	3275/13	++				+	+					+++		+					
4a	3275/15	++				±						++++	+	±					
4a	3275/20	++				±	+					++++	+	+					
4a	2763/6	++			+	+	+					++++	+						
4a	2763/8	++			+	+						++++							
4a	2763/10	+			+	++	+					++++	++						
4a	3107/4	++				+	+					+++							
4a	3135/7	++			+	++	+					++++							
4b	3470/7	++				++	+					++++							
4b	3135/11	+				++	++					+++							
4b	3135/13	+				+	++					++++							
4b	3135/19	++				+	+					+++							
4b	3135/26	+				+	++					++++							
4b	233	++				++						±							
5	3418/7	++++	±		±	++						++		++					
5	3418/11	++++	±		+	+++						+		+					
5	3418/15	++++				+							+						
5	3418/16	+++				+++						++	+	+					
5	3418/39	++++					+							++					
5	3418/45a	++++											+	+					
5	3418/57	++++			++	+						+		+					
5	3418/65	++++			+	+						++							
5	3418/70	++++			+	+					+	++		+					
5	3418/74	+++			±	++	+				++	++							
5	3470/4	++++			+	+							+						
5	3275/24	++++				+						++							
5	3275/26	++	±			+						++++	+	+					
5	3553/3	+++			+	+						+	+						
6	3470/1	++	++++																
7a	7106/gl1	++++																	
7a	7106/gl2	++++																	
7b	3418/71	++++				+					+	+							
7b	3435	+++	±									+							
7b	7106/a	++++	+								+								
7b	7106/b	++++	+			+													
7b	3418/73	++++													+				
8a	3470/9	++	+												+++				
8b	3418/72	++	++		+			++			±					++	++		
8b	3910	++	++			±		+			±					++		+	
9	4036	++++																	
9	4318	++++																	

ALLEGATO C - Associazioni mineralogiche

Qtz = quarzo
Kfs = K-feldspato
Hem = ematite
Ill = Illite
Mul = mullite
Spl = spinello
Hc = ercinite
An = anortite
Di = diopside
Gh = ghelenite
Pl = plagioclasio
Cc = calcite

Campione

3418-16	Qtz	Kfs	Hem	Ill		
3418-57	Qtz	Kfs	Hem			
3470-3	Qtz	Kfs		Ill		
3553-16	Qtz	Kfs	Hem	Ill		
3553-6	Qtz	Kfs	Hem	Ill		
2792-11	Qtz	Kfs		Ill		
4039-4	Qtz	Kfs	Hem	Ill		
4307-2	Qtz	Kfs	Hem	Ill		
5627-2	Qtz	Kfs	Hem	Ill		
3275-1	Qtz	Kfs	Hem	Ill	Mul	Spl
3275-7	Qtz	Kfs	Hem	Ill	Mul	Spl
3553-13	Qtz	Kfs	Hem	Ill	Mul	Spl
5627	Qtz	Kfs	Hem	Ill	Mul	Spl
156-10	Qtz	Kfs	Hem		Mul	Spl
156-3	Qtz	Kfs	Hem		Mul	Spl
156-6	Qtz	Kfs	Hem		Mul	Spl
2763-12	Qtz	Kfs	Hem		Mul	Spl
2763-3	Qtz	Kfs	Hem		Mul	Spl
2763-6	Qtz	Kfs	Hem		Mul	Spl
2763-8	Qtz	Kfs	Hem		Mul	Spl
2792-18	Qtz	Kfs	Hem		Mul	Spl
3058-4	Qtz	Kfs	Hem		Mul	Spl
3058-8	Qtz	Kfs	Hem		Mul	Spl
3107-1	Qtz	Kfs	Hem		Mul	Spl
3116-1	Qtz	Kfs	Hem		Mul	Spl
3135-11	Qtz	Kfs	Hem		Mul	Spl
3135-13	Qtz	Kfs	Hem			Spl
3135-15	Qtz	Kfs	Hem		Mul	Spl
3135-19	Qtz	Kfs	Hem			Spl
3135-26	Qtz	Kfs	Hem		Mul	Spl
3135-42	Qtz	Kfs	Hem		Mul	Spl
3135-49	Qtz	Kfs			Mul	Spl
3135-7	Qtz	Kfs	Hem			Spl
3275-10	Qtz	Kfs	Hem		Mul	Spl
3275-11	Qtz	Kfs	Hem		Mul	Spl
3275-12a	Qtz	Kfs	Hem		Mul	Spl
3275-12b	Qtz	Kfs	Hem		Mul	Spl

3275-13	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3275-15	Qtz	Kfs	Hem		Spl
3275-16	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3275-18	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3275-19	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3275-2	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3275-20	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3275-21	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3275-22	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3275-23	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3275-24	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3275-25	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3275-26	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3275-3	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3275-4	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3275-6	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3275-9	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3275bf	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3275rf1	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3275rf2	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3275rf3	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3418-11	Qtz	Kfs	Hem		Spl
3418-17	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3418-20	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3418-24	Qtz	Kfs	Hem		Spl
3418-3	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3418-34	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3418-36	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3418-39	Qtz	Kfs	Hem		Spl
3418-45b	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3418-59	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3418-63	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3418-65	Qtz	Kfs	Hem	Mul	
3418-68	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3418-7	Qtz	Kfs	Hem		Spl
3418-70	Qtz	Kfs	Hem		Spl
3418-74	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3418-75	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3470-10	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3470-2	Qtz	Kfs	Hem	Mul	
3470-4	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3470-7	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3553-10	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3553-11	Qtz	Kfs		Mul	Spl
3553-12	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3553-15	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3553-19	Qtz	Kfs	Hem		Spl
3553-2	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3553-20	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3553-25	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3553-26	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3553-29	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3553-3	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl
3553-31	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl

3553-33	Qtz	Kfs		Mul	Spl			
3553-5	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl			
3553-7	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl			
3553-9	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl			
4039-1	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl			
4039-2	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl			
4039-3	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl			
4039-5	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl			
4039-6	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl			
4039-7	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl			
4307-1	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl			
4307-10	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl			
4307-3	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl			
4307-4	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl			
4307-5	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl			
4307-6	Qtz	Kfs	Hem		Spl			
4307-7	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl			
4307-8	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl			
4307-9	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl			
5627-1	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl			
5627-4	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl			
5627-6	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl			
5627-7	Qtz	Kfs	Hem	Mul	Spl			
2763-10	Qtz	Kfs		Mul			Hc	
3107-4	Qtz	Kfs		Mul			Hc	
3418-15	Qtz			Mul			Hc	
3418-45a	Qtz			Mul			Hc	
3553-18	Qtz	Kfs		Mul			Hc	
5627-3	Qtz	Kfs		Mul			Hc	
3470/1	Qtz	Kfs						Pl
3418-71	Qtz				An	Di	Gh	
3418-72	Qtz				An	Di	Gh	
3418-73	Qtz				An	Di	Gh	
3435	Qtz				An	Di	Gh	
3470-5	Qtz				An	Di	Gh	
3470-9	Qtz				An	Di	Gh	
3746	Qtz				An			
3910	Qtz				An	Di	Gh	
7106a	Qtz				An	Di	Gh	
7106b	Qtz				An	Di	Gh	
7106c	Qtz				An	Di	Gh	
7106GL1	Qtz				An	Di	Gh	
7106GL2	Qtz				An	Di	Gh	
4036	Qtz							Cc

ALLEGATO D - Composizioni chimiche ceramiche

Campione	SiO2%	TiO2%	Al2O3%	Fe2O3%	MnO%	MgO%	CaO%	Na2O%	K2O%	P2O5%
3418/3	51.95	1.34	30.19	8.49	0.03	0.19	0.80	0.68	6.14	0.19
3418/7	59.64	1.07	21.16	8.10	0.06	1.39	1.37	1.26	5.65	0.30
3418/11	58.49	1.15	23.95	6.86	0.05	0.92	1.76	0.93	5.73	0.16
3418/15	59.25	1.09	21.23	7.25	0.05	1.00	4.50	0.60	4.94	0.09
3418/16	55.95	1.32	27.07	5.70	0.02	0.72	1.45	1.18	6.47	0.11
3418/17	51.80	1.38	30.78	7.77	0.02	0.59	0.58	0.59	6.35	0.14
3418/20	55.71	1.20	25.51	7.32	0.05	1.21	2.57	0.73	5.54	0.16
3418/24	52.74	1.30	29.40	7.95	0.02	0.78	0.89	0.59	6.13	0.20
3418/34	55.29	1.31	27.34	7.31	0.02	0.90	0.83	0.76	6.13	0.10
3418/36	58.53	1.18	23.77	7.06	0.04	1.46	1.32	0.86	5.62	0.16
3418/39	56.33	1.14	24.67	5.59	0.04	0.82	4.51	1.10	5.60	0.21
3418/45a	59.49	1.10	21.30	7.00	0.04	1.03	4.33	0.69	4.96	0.08
3418/45b	60.08	1.02	18.73	9.23	0.08	2.16	1.42	0.75	5.62	0.90
3418/57	55.72	1.11	23.38	5.63	0.05	1.32	5.12	1.35	6.13	0.20
3418/59	57.93	1.29	27.09	6.18	0.02	0.25	0.74	0.65	5.68	0.16
3418/63	57.17	1.26	25.84	6.30	0.02	0.81	0.96	0.99	6.42	0.23
3418/65	57.84	1.20	24.04	6.14	0.05	1.33	3.20	0.64	5.45	0.11
3418/68	54.73	1.34	28.13	7.08	0.02	1.02	0.72	0.66	6.19	0.10
3418/70	61.04	1.05	23.59	6.09	0.05	1.11	1.33	0.77	4.81	0.16
3418/74	57.92	1.18	24.72	6.44	0.04	1.06	2.53	0.72	5.20	0.19
3418/75	55.85	1.22	25.60	7.21	0.05	1.23	2.40	0.77	5.48	0.19
3275/1	54.08	1.24	27.58	8.77	0.03	0.86	0.45	0.69	6.17	0.14
3275/2	54.10	1.27	29.01	7.42	0.02	0.72	0.60	0.73	5.93	0.20
3275/3	54.53	1.33	28.72	7.97	0.03	0.66	0.34	0.52	5.77	0.13
3275/4	54.66	1.31	28.58	7.82	0.02	0.69	0.35	0.55	5.86	0.16
3275/6	55.84	1.22	26.16	8.19	0.02	0.79	0.62	0.89	5.86	0.41
3275/7	54.25	1.32	29.16	6.64	0.03	0.76	0.57	0.80	6.30	0.19
3275/9	52.78	1.32	27.28	10.05	0.03	0.81	0.64	0.59	6.23	0.27
3275/10	51.50	1.34	31.34	7.86	0.01	0.53	0.40	0.70	6.13	0.18
3275/11	54.55	1.26	27.99	8.69	0.03	0.73	0.41	0.53	5.61	0.21
3275/12a	53.57	1.26	28.44	8.66	0.03	0.71	0.53	0.80	5.85	0.15
3275/12b	55.96	1.27	27.38	7.61	0.03	0.76	0.43	0.69	5.77	0.11
3275/13	53.28	1.25	28.58	7.98	0.02	0.75	0.81	0.93	6.15	0.25
3275/15	51.85	1.27	30.07	7.96	0.02	0.87	0.76	0.81	6.20	0.20
3275/16	51.41	1.33	31.46	8.21	0.02	0.51	0.34	0.67	5.95	0.11
3275/18	52.93	1.27	28.66	8.41	0.03	0.87	0.63	0.81	6.14	0.25
3275/19	55.68	1.30	27.77	7.31	0.02	0.73	0.56	0.78	5.75	0.10
3275/20	53.35	1.33	30.02	7.77	0.02	0.65	0.45	0.62	5.63	0.15
3275/21	52.82	1.33	30.42	7.34	0.02	0.74	0.36	0.83	6.04	0.11
3275/22	55.58	1.29	28.18	6.98	0.03	0.79	0.52	0.70	5.82	0.12
3275/23	55.00	1.29	28.23	7.55	0.03	0.73	0.42	0.63	5.98	0.16
3275/24	58.53	1.04	23.29	7.43	0.06	1.03	2.44	0.87	5.16	0.15
3275/25	54.22	1.31	28.80	7.61	0.03	1.01	0.37	0.53	5.99	0.13
3275/26	51.09	1.21	27.88	12.02	0.04	0.75	0.47	0.51	5.74	0.30
3275/bf	52.55	1.33	30.67	8.16	0.01	0.51	0.29	0.49	5.82	0.16
3275/rf1	55.02	1.36	28.30	6.83	0.04	1.01	0.78	0.91	5.66	0.10
3275/rf2	54.75	1.32	28.68	6.46	0.02	0.82	0.74	0.96	6.12	0.13
3275/rf3	51.52	1.26	29.53	9.74	0.02	0.54	0.45	0.69	6.04	0.21
3470/1	63.97	0.46	19.43	3.72	0.03	0.64	1.13	1.34	9.16	0.10
3470/2	55.98	1.32	26.20	8.81	0.03	0.87	0.50	0.57	5.54	0.16

Campione	SiO2%	TiO2%	Al2O3%	Fe2O3%	MnO%	MgO%	CaO%	Na2O%	K2O%	P2O5%
3470/3	52.12	1.20	26.56	10.35	0.03	1.19	0.70	0.81	6.69	0.33
3470/4	60.10	1.23	26.01	5.41	0.03	1.05	0.66	0.59	4.76	0.17
3470/5	55.94	1.14	17.59	8.05	0.13	3.24	8.88	1.50	3.05	0.49
3470/7	53.17	1.36	31.09	6.84	0.02	0.84	0.41	0.49	5.61	0.18
3470/9	69.16	0.48	15.38	5.25	0.11	1.57	3.03	1.88	2.95	0.19
3470/10	53.45	1.37	26.69	10.10	0.04	0.61	1.07	0.45	5.97	0.25
2763/3	56.57	1.23	24.55	8.87	0.06	1.24	1.08	0.61	5.65	0.15
2763/6	56.53	1.23	27.27	7.71	0.03	0.71	0.46	0.62	5.29	0.16
2763/8	52.97	1.30	28.70	8.24	0.03	0.87	0.62	0.70	6.44	0.14
2763/10	53.74	1.31	27.09	9.94	0.03	1.08	0.26	0.36	6.05	0.14
2763/12	57.00	1.40	32.11	2.64	0.00	0.39	0.29	0.83	5.18	0.15
2792/11	56.69	1.41	29.82	3.26	0.01	0.71	0.64	0.72	6.60	0.14
2792/18	54.46	1.28	26.78	9.75	0.04	0.77	0.28	0.52	5.96	0.16
3058/4	55.75	1.20	24.99	9.07	0.05	1.14	1.12	0.65	5.86	0.18
3058/8	55.13	1.23	25.08	9.52	0.05	0.99	0.57	0.57	6.54	0.32
3107/1	60.24	1.13	23.44	6.67	0.03	0.73	2.16	0.53	4.91	0.18
3107/4	50.62	1.25	28.49	12.56	0.02	0.69	0.42	0.32	5.38	0.26
3116/1	53.42	1.37	30.02	7.69	0.02	0.71	0.44	0.38	5.85	0.10
3135/7	49.38	1.22	29.05	13.04	0.03	0.69	0.40	0.44	5.51	0.25
3135/11	55.81	1.41	31.82	3.76	0.01	0.58	0.42	0.57	5.47	0.15
3135/13	54.81	1.34	28.68	6.14	0.01	0.80	1.08	0.85	5.86	0.43
3135/15	54.04	1.42	32.64	4.84	0.01	0.38	0.27	0.81	5.36	0.24
3135/19	55.84	1.41	31.45	3.57	0.01	0.99	0.43	0.67	5.51	0.12
3135/26	56.08	1.41	30.58	4.58	0.01	0.12	0.66	0.48	5.93	0.14
3135/42	56.34	1.42	32.13	3.85	0.01	0.01	0.01	0.53	6.43	0.16
3135/49	56.41	1.39	29.94	3.64	0.01	0.75	0.49	0.76	6.45	0.15
3553/2	53.86	1.37	28.85	7.37	0.04	0.74	0.95	0.57	6.15	0.11
3553/3	61.10	0.96	20.34	8.17	0.03	1.46	1.80	0.84	4.74	0.57
3553/5	60.95	1.24	24.04	7.10	0.01	0.77	0.28	0.53	4.92	0.15
3553/6	52.50	1.27	27.13	9.98	0.03	1.10	0.64	0.67	6.29	0.39
3553/7	54.35	1.30	27.47	8.90	0.03	0.31	0.74	0.48	6.15	0.27
3553/9	56.22	1.31	28.64	5.97	0.02	0.65	0.23	0.60	6.23	0.12
3553/10	54.63	1.30	28.25	7.70	0.03	1.06	0.37	0.50	6.02	0.13
3553/11	56.65	1.49	33.32	2.80	0.00	0.01	0.88	0.61	4.22	0.20
3553/12	54.58	1.33	29.16	7.02	0.03	1.08	0.40	0.47	5.83	0.11
3553/13	52.90	1.32	29.08	8.76	0.04	0.66	0.40	0.57	6.09	0.17
3553/15	57.55	1.44	32.15	2.61	0.01	0.39	0.37	0.65	4.68	0.15
3553/16	54.40	1.30	29.24	6.86	0.03	1.04	0.46	0.57	5.97	0.12
3553/18	54.72	1.30	27.23	8.46	0.05	1.06	0.37	0.43	6.15	0.23
3553/19	54.70	1.30	28.81	6.54	0.05	1.07	0.70	0.64	6.07	0.13
3553/20	58.45	1.34	26.28	6.40	0.02	0.40	0.53	0.69	5.58	0.33
3553/25	57.54	1.44	27.29	7.00	0.02	0.58	0.35	0.60	5.06	0.12
3553/26	56.55	1.43	27.11	8.10	0.03	0.69	0.35	0.57	5.03	0.15
3553/29	56.10	1.42	34.14	3.40	0.01	0.01	0.01	0.45	4.27	0.20
3553/31	54.35	1.31	29.36	6.57	0.02	0.74	0.47	0.72	6.32	0.15
3553/33	55.04	1.47	33.78	2.27	0.00	0.34	0.40	0.75	5.76	0.18
156/3	60.72	1.22	23.22	7.50	0.02	1.02	0.31	0.90	4.95	0.13
156/6	56.83	1.26	25.28	9.23	0.04	1.17	0.81	0.54	4.67	0.17
156/10	58.39	1.21	24.51	8.65	0.02	0.87	0.69	0.61	4.79	0.27
4039/1	56.45	1.28	26.42	9.87	0.02	0.36	0.27	0.34	4.78	0.22
4039/2	58.58	1.39	26.88	7.75	0.00	0.01	0.01	0.52	4.71	0.15
4039/3	58.97	1.26	23.66	8.85	0.04	0.67	0.67	0.62	5.09	0.17

Campione	SiO2%	TiO2%	Al2O3%	Fe2O3%	MnO%	MgO%	CaO%	Na2O%	K2O%	P2O5%
4039/4	55.83	1.22	25.59	10.57	0.03	0.92	0.50	0.31	4.81	0.22
4039/5	59.13	1.31	26.08	6.23	0.02	0.40	1.90	0.62	4.18	0.14
4039/6	59.13	1.32	25.48	6.46	0.03	0.92	0.67	1.18	4.68	0.12
4039/7	56.26	1.31	31.36	6.09	0.00	0.01	0.01	0.41	4.36	0.19
4307/1	59.97	1.27	24.96	7.82	0.01	0.75	0.39	0.59	4.09	0.14
4307/2	54.02	1.32	29.34	7.57	0.04	0.97	0.36	0.47	5.82	0.09
4307/3	59.64	1.31	26.10	6.69	0.01	0.72	0.39	0.50	4.48	0.15
4307/4	56.01	1.37	27.22	8.82	0.02	0.72	0.47	0.73	4.50	0.12
4307/5	61.70	1.28	25.94	5.95	0.01	0.01	0.01	0.51	4.42	0.15
4307/6	56.79	1.45	27.47	8.44	0.02	0.16	0.30	0.80	4.45	0.14
4307/7	62.26	1.22	24.09	6.35	0.01	0.72	0.44	0.56	4.21	0.14
4307/8	59.20	1.34	26.34	6.56	0.01	0.78	0.58	0.61	4.43	0.15
4307/9	58.81	1.32	26.44	6.12	0.02	0.45	1.11	0.72	4.84	0.18
4307/10	61.12	1.19	23.74	8.97	0.02	0.06	0.01	0.30	4.75	0.20
5627	59.55	1.24	24.75	7.42	0.04	0.96	0.39	0.56	4.95	0.14
5627/1	57.41	1.22	24.04	10.17	0.02	0.95	0.26	0.67	5.09	0.17
5627/2	57.21	1.33	26.24	8.59	0.02	0.76	0.35	0.47	4.90	0.14
5627/3	57.35	1.25	24.12	9.86	0.06	0.99	0.68	0.45	5.08	0.15
5627/4	59.60	1.35	26.44	6.23	0.01	0.76	0.43	0.63	4.40	0.13
5627/6	56.12	1.28	25.74	9.66	0.05	1.17	0.44	0.74	4.62	0.18
5627/7	58.16	1.38	25.13	8.52	0.02	0.56	0.86	0.62	4.62	0.14
3418/71	55.05	0.62	10.41	4.35	0.15	7.67	16.08	1.75	3.64	0.27
3418/72	53.00	0.76	11.66	6.92	0.15	6.88	15.53	3.08	1.68	0.32
3418/73	54.67	0.61	10.32	4.34	0.15	8.41	16.28	1.82	3.15	0.26
3435	57.70	0.57	9.36	4.28	0.13	9.26	13.95	2.58	1.91	0.26
3746	54.82	0.94	17.35	9.13	0.16	4.91	5.40	1.41	5.00	0.89
3910	52.49	0.74	11.27	6.72	0.15	6.28	18.25	2.14	1.75	0.22
4036	90.52	0.00	3.17	0.40	0.00	1.95	2.29	1.29	0.34	0.04
7106/a	54.84	0.90	13.55	6.08	0.11	4.45	15.35	1.35	2.83	0.53
7106/b	54.29	0.89	13.28	6.08	0.12	4.75	16.04	1.33	2.67	0.55
7106/c	60.77	1.45	20.10	4.10	0.02	0.98	9.82	0.42	2.16	0.17

Campione	Ba	Ce	Co	Cr	La	Nb	Ni	Pb	Rb	Sr	Th	V	Y
3418/3	640	122	5	163	73	27	12	35	146	130	23	146	33
3418/7	710	106	15	136	57	20	33	44	128	160	19	116	34
3418/11	647	114	10	135	85	24	20	32	147	175	21	112	36
3418/15	691	103	9	120	56	21	29	47	148	185	19	116	31
3418/16	727	165	12	146	68	24	9	59	145	164	26	132	36
3418/17	623	127	7	161	82	29	24	48	148	135	32	152	32
3418/20	572	127	20	154	77	25	36	67	144	215	26	128	36
3418/24	565	111	8	163	90	28	29	52	168	191	32	136	36
3418/34	717	121	9	144	68	28	23	40	158	186	26	147	35
3418/36	629	143	14	137	57	22	33	55	157	194	24	121	38
3418/39	693	109	6	141	68	22	17	31	138	194	21	141	31
3418/45a	703	96	10	123	59	21	28	47	145	182	22	118	32
3418/45b	673	79	22	124	53	18	51	29	127	172	12	87	29
3418/57	679	98	9	137	69	22	28	12	141	225	24	156	31
3418/59	691	148	6	155	81	28	11	74	151	138	27	135	35

Campione	Ba	Ce	Co	Cr	La	Nb	Ni	Pb	Rb	Sr	Th	V	Y
3418/59	691	148	6	155	81	28	11	74	151	138	27	135	35
3418/63	694	126	5	131	92	24	24	47	144	193	33	118	30
3418/65	690	131	13	140	78	24	34	42	164	201	25	128	36
3418/68	667	147	10	151	83	28	26	56	158	176	30	140	37
3418/70	527	105	9	127	54	21	25	59	126	163	23	128	30
3418/74	659	131	11	142	69	25	23	59	146	198	25	132	35
3418/75	583	138	12	144	68	25	33	70	146	206	26	134	35
3275/1	666	129	6	147	77	28	29	40	173	143	27	129	37
3275/2	605	115	7	163	90	32	31	49	169	164	31	146	39
3275/3	697	128	7	148	79	34	30	62	184	144	29	141	40
3275/4	632	109	7	156	86	32	29	56	180	143	29	139	42
3275/6	684	131	7	149	73	29	30	57	171	157	23	129	34
3275/7	668	135	7	149	92	34	26	47	172	157	30	128	38
3275/9	781	114	9	150	85	26	36	48	168	169	22	140	37
3275/10	637	114	7	172	73	34	25	56	147	134	28	161	35
3275/11	661	103	11	161	80	31	32	45	180	142	30	140	39
3275/12a	566	122	7	158	76	31	30	35	173	151	28	145	39
3275/12b	703	141	10	150	79	30	30	44	172	143	30	140	38
3275/13	528	104	6	167	80	30	32	28	168	171	31	141	36
3275/15	513	117	6	186	94	32	33	25	175	163	35	155	39
3275/16	645	125	7	166	75	33	25	33	151	132	30	154	32
3275/18	633	119	8	163	73	30	31	34	172	162	31	137	37
3275/19	697	138	9	150	76	31	27	33	169	162	32	137	38
3275/20	547	137	8	165	78	34	33	49	170	143	32	147	38
3275/21	669	135	6	158	80	32	24	39	159	144	31	154	35
3275/22	693	137	11	157	71	31	29	47	169	146	33	156	38
3275/23	708	142	11	159	80	32	29	50	175	145	29	142	38
3275/24	670	114	11	137	65	24	31	51	140	171	23	117	31
3275/25	643	112	12	158	79	30	37	40	169	125	32	151	44
3275/26	634	109	12	171	67	26	34	49	167	128	24	151	33
3275/bf	642	120	6	160	78	32	27	66	157	124	29	160	35
3275/rf1	661	123	10	156	83	34	30	61	157	181	31	149	44
3275/rf2	662	141	5	160	79	34	27	34	174	182	34	133	38
3275/rf3	668	121	6	160	73	28	28	47	152	145	25	137	34
3470/1	511	118	4	45	80	21	19	13	192	56	17	49	51
3470/2	718	140	11	153	68	27	29	121	163	170	27	141	38
3470/3	626	133	16	156	70	21	40	38	151	126	23	150	39
3470/4	570	106	7	153	66	27	25	146	132	185	27	146	37
3470/5	330	85	17	145	66	35	67	40	61	2413	14	133	28
3470/7	531	141	8	174	97	30	29	65	190	134	37	170	40
3470/9	499	49	7	63	26	6	8	11	58	197	0	74	38
3470/10	807	185	11	149	87	26	24	63	161	176	23	146	37
2763/3	694	134	17	144	71	23	41	69	161	167	23	141	39
2763/6	571	108	10	150	71	27	25	61	153	143	28	124	35
2763/8	621	99	11	158	74	28	25	41	171	197	29	141	37
2763/10	715	145	17	150	79	26	36	48	173	116	26	148	43
2763/12	535	123	1	157	77	34	25	141	108	227	38	144	34
2792/11	636	157	5	141	84	36	21	34	159	165	42	125	42
2792/18	709	115	11	147	72	25	30	41	184	136	27	139	39
3058/4	712	107	13	142	66	23	30	36	183	162	23	124	38
3058/8	838	104	14	138	67	21	36	18	169	148	19	127	34
3107/1	653	132	8	129	78	22	16	59	143	144	23	119	32
3107/4	520	100	7	182	76	23	31	73	177	132	22	165	35
3116/1	655	123	5	161	73	29	24	63	158	152	30	160	36
3135/7	547	100	6	187	72	21	27	83	173	135	22	176	32

Campione	Ba	Ce	Co	Cr	La	Nb	Ni	Pb	Rb	Sr	Th	V	Y
3135/13	542	108	5	152	59	32	22	49	165	140	25	129	32
3135/15	615	107	7	170	75	33	26	96	116	277	35	183	34
3135/19	499	132	3	152	90	36	27	58	154	148	44	141	43
3135/26	667	164	2	145	80	33	16	44	161	138	31	128	39
3135/42	682	179	1	160	103	32	0	37	143	170	29	96	37
3135/49	651	118	7	145	83	36	20	37	156	198	37	161	42
3553/2	680	172	11	166	75	31	23	32	164	133	32	129	43
3553/3	567	85	8	127	46	18	17	32	137	204	14	91	27
3553/5	713	121	7	124	53	25	23	151	128	182	24	131	32
3553/6	663	132	14	159	69	24	35	36	162	155	24	137	36
3553/7	820	165	12	148	87	23	20	59	148	195	22	142	36
3553/9	708	142	4	138	69	30	21	38	168	147	32	126	38
3553/10	661	144	13	154	75	26	31	46	162	132	28	143	40
3553/11	508	215	2	174	104	36	7	134	98	313	37	141	37
3553/12	646	109	13	159	74	29	30	35	165	125	32	156	41
3553/13	662	148	16	166	87	26	27	43	160	118	24	156	41
3553/15	525	115	3	150	80	38	20	124	118	241	38	133	35
3553/16	627	141	11	155	77	30	29	33	159	129	33	185	41
3553/18	762	144	20	152	73	27	36	32	174	136	28	136	39
3553/19	648	110	16	153	74	29	29	28	157	138	30	144	41
3553/20	731	126	5	144	74	27	10	112	138	179	25	119	33
3553/25	717	153	8	153	78	34	21	219	139	202	28	154	34
3553/26	756	115	10	173	77	30	24	237	139	204	27	166	36
3553/29	549	111	10	196	147	16	0	131	86	161	22	107	29
3553/31	642	130	9	153	74	29	22	38	163	171	29	146	37
3553/33	620	124	4	155	77	40	17	104	117	304	40	137	39
156/3	778	139	13	126	69	27	36	153	143	199	24	130	41
156/6	758	111	19	138	69	27	44	167	142	216	22	129	40
156/10	709	131	13	138	64	27	39	162	140	242	20	126	33
4039/1	737	125	15	146	56	23	27	149	139	181	21	139	36
4039/2	790	117	0	156	78	19	1	192	126	163	18	122	32
4039/3	777	153	17	135	68	23	28	81	144	176	21	130	40
4039/4	911	108	15	134	60	22	36	159	133	181	19	117	31
4039/5	716	157	17	157	72	23	16	142	122	205	27	130	34
4039/6	654	116	10	170	66	28	23	91	131	247	28	160	38
4039/7	655	157	8	159	87	24	0	393	104	264	21	133	28
4307/1	673	138	9	133	59	26	26	189	130	198	23	134	35
4307/2	646	113	13	153	75	28	28	39	160	129	32	130	40
4307/3	673	132	7	141	56	27	23	173	124	185	25	140	33
4307/4	792	141	8	157	70	27	22	240	132	209	23	153	34
4307/5	701	126	14	177	57	14	0	99	107	135	24	102	40
4307/6	850	174	6	169	73	28	5	215	134	202	24	155	37
4307/7	672	118	9	164	57	26	24	166	113	196	24	134	34
4307/8	732	125	8	153	61	29	23	157	120	211	25	150	36
4307/9	709	134	8	139	72	27	11	117	133	174	27	135	36
4307/10	781	117	11	118	53	21	20	124	135	158	18	98	32
5627	747	110	18	137	78	29	40	166	135	195	24	129	41
5627/1	764	124	15	136	62	25	43	95	145	185	21	132	38
5627/2	879	145	12	158	64	30	33	236	145	185	27	155	35
5627/3	719	147	17	139	70	26	48	136	150	187	24	137	42
5627/4	704	113	8	166	71	34	29	185	133	200	31	142	38
5627/6	760	113	15	149	63	28	42	167	139	198	21	142	38

Campione	Ba	Ce	Co	Cr	La	Nb	Ni	Pb	Rb	Sr	Th	V	Y
5627/7	712	124	8	197	73	31	29	278	126	261	27	176	35
3418/71	455	56	14	92	28	14	42	10	30	199	7	78	19
3418/72	264	14	33	414	27	9	231	7	15	361	4	147	17
3418/73	447	65	10	104	37	13	42	7	21	205	7	78	20
3435	315	40	13	82	31	12	39	4	23	203	6	78	17
3746	483	44	36	700	26	14	324	5	143	213	6	119	17
3910	320	34	33	352	28	10	254	67	21	413	2	135	16
4036	121	0	0	0	13	0	0	89	13	82	0	6	7
7106/a	388	57	18	132	38	23	88	17	49	566	5	108	18
7106/b	341	56	19	133	34	24	88	18	46	571	5	106	17
7106/c	199	103	8	100	50	37	36	33	49	235	17	142	31

Campione	Zn	Zr	Cu	Ga	Nd	Sc
3418/3	63	174	45	36	32	28
3418/7	93	246	34	30	42	19
3418/11	73	195	35	29	36	24
3418/15	59	177	22	33	35	20
3418/16	63	213	39	33	39	25
3418/17	48	169	40	44	35	23
3418/20	79	195	43	36	41	22
3418/24	49	145	55	40	40	23
3418/34	55	207	28	39	35	23
3418/36	99	255	122	33	43	20
3418/39	61	159	29	29	32	22
3418/45a	59	173	18	31	37	18
3418/45b	143	261	25	29	49	16
3418/57	58	158	42	32	33	20
3418/59	50	211	31	36	38	23
3418/63	50	188	31	37	47	19
3418/65	101	205	44	35	45	20
3418/68	62	216	34	41	40	22
3418/70	66	176	36	30	34	19
3418/74	77	190	40	32	39	26
3418/75	80	201	38	36	42	24
3275/1	71	199	47	39	38	24
3275/2	69	171	57	43	39	27
3275/3	65	195	42	45	37	26
3275/4	64	185	48	46	46	23
3275/6	75	219	44	40	42	23
3275/7	58	193	49	43	35	25
3275/9	130	258	50	40	48	22
3275/10	55	175	51	46	29	27
3275/11	70	173	41	43	43	25
3275/12a	61	165	53	43	33	26
3275/12b	79	221	41	40	39	23
3275/13	51	154	48	42	41	26
3275/15	53	138	59	47	41	28
3275/16	55	172	124	46	27	28

Campione	Zn	Zr	Cu	Ga	Nd	Sc
3275/18	65	171	52	41	36	26
3275/19	68	219	39	44	36	24
3275/20	52	164	53	47	41	26
3275/21	52	192	38	46	31	25
3275/22	75	217	41	41	38	24
3275/23	74	217	45	43	38	25
3275/24	64	172	42	31	32	23
3275/25	89	193	41	44	46	23
3275/26	79	171	42	36	33	27
3275/bf	65	179	43	45	29	26
3275/rf1	80	217	38	47	40	24
3275/rf2	55	191	54	47	36	24
3275/rf3	66	183	128	41	31	26
3470/1	65	323	16	28	61	8
3470/2	82	227	35	38	47	21
3418/59	50	211	31	36	38	23
3418/63	50	188	31	37	47	19
3418/65	101	205	44	35	45	20
3418/68	62	216	34	41	40	22
3418/70	66	176	36	30	34	19
3418/74	77	190	40	32	39	26
3418/75	80	201	38	36	42	24
3275/1	71	199	47	39	38	24
3275/2	69	171	57	43	39	27
3275/3	65	195	42	45	37	26
3275/4	64	185	48	46	46	23
3275/6	75	219	44	40	42	23
3275/7	58	193	49	43	35	25
3275/9	130	258	50	40	48	22
3275/10	55	175	51	46	29	27
3275/11	70	173	41	43	43	25
3275/12a	61	165	53	43	33	26
3275/12b	79	221	41	40	39	23
3275/13	51	154	48	42	41	26
3275/15	53	138	59	47	41	28
3275/16	55	172	124	46	27	28
3275/18	65	171	52	41	36	26
3275/19	68	219	39	44	36	24
3275/20	52	164	53	47	41	26
3275/21	52	192	38	46	31	25
3275/22	75	217	41	41	38	24
3275/23	74	217	45	43	38	25
3275/24	64	172	42	31	32	23
3275/25	89	193	41	44	46	23
3275/26	79	171	42	36	33	27
3275/bf	65	179	43	45	29	26
3275/rf1	80	217	38	47	40	24
3275/rf2	55	191	54	47	36	24
3275/rf3	66	183	128	41	31	26
3470/1	65	323	16	28	61	8
3470/2	82	227	35	38	47	21
3470/3	104	172	64	34	45	24

Campione	Zn	Zr	Cu	Ga	Nd	Sc
3470/4	57	229	31	39	46	23
3470/5	68	241	45	21	32	23
3470/7	50	127	61	46	51	26
3470/9	123	200	21	20	25	17
3470/10	151	227	57	35	54	28
2763/3	140	237	35	33	45	21
2763/6	55	173	45	38	38	22
2763/8	57	162	57	41	34	26
2763/10	97	202	54	41	49	23
2763/12	24	212	42	49	50	25
2792/11	31	194	28	47	50	21
2792/18	74	194	46	37	45	23
3058/4	81	198	45	35	38	20
3058/8	143	229	88	33	42	21
3107/1	60	166	40	28	35	25
3107/4	57	125	49	38	43	26
3116/1	56	194	43	45	37	26
3135/7	57	121	57	36	36	28
3135/13	35	155	35	42	32	26
3135/15	49	214	45	49	42	26
3135/19	36	144	45	51	54	26
3135/26	42	180	35	40	46	26
3135/42	35	177	44	35	43	28
3135/49	36	191	39	45	58	24
3553/2	99	194	53	39	40	22
3553/3	84	192	71	24	35	22
3553/5	69	354	33	30	39	20
3553/6	99	191	49	37	49	22
3553/7	110	225	50	29	46	22
3553/9	45	212	44	38	41	22
3553/10	84	204	44	38	38	24
3553/11	29	202	51	51	46	28
3553/12	74	181	44	39	38	24
3553/13	92	186	141	36	40	27
3553/15	26	225	35	51	40	30
3553/16	74	186	43	40	37	24
3553/18	88	196	46	40	45	22
3553/19	74	195	44	39	37	25
3553/20	113	282	36	33	39	27
3553/25	48	256	42	41	42	23
3553/26	71	260	46	38	41	24
3553/29	45	165	47	34	42	28
3553/31	52	182	48	39	34	25
3553/33	23	231	39	57	37	29
156/3	108	339	30	33	44	21
156/6	102	303	39	36	42	23
156/10	108	307	45	34	42	24
4039/1	110	257	35	29	39	29
4039/2	79	237	45	24	28	21
4039/3	104	280	27	30	45	24
4039/4	122	291	39	29	32	22
4039/5	69	245	39	28	24	26

Campione	Zn	Zr	Cu	Ga	Nd	Sc
4039/6	61	337	28	35	40	21
4039/7	29	214	46	38	32	32
4307/1	90	338	40	32	38	20
4307/2	82	192	45	39	40	23
4307/3	71	337	35	32	37	21
4307/4	69	264	44	37	40	21
4307/5	84	266	54	27	51	24
4307/6	82	261	52	35	43	26
4307/7	75	352	35	29	37	21
4307/8	62	335	36	33	36	22
4307/9	74	271	37	34	44	27
4307/10	113	282	31	22	34	24
5627	104	345	35	34	43	21
5627/1	121	321	34	33	44	22
5627/2	92	264	51	38	42	24
5627/3	102	280	35	37	48	22
5627/4	76	339	37	40	46	24
5627/6	104	280	41	38	42	23
5627/7	72	325	43	38	44	24
3418/71	65	123	411	10	21	18
3418/72	69	99	482	10	10	24
3418/73	71	122	374	11	17	17
3435	51	107	352	10	15	14
3746	90	138	72	23	22	24
3910	64	87	222	9	12	21
4036	19	36	27	0	13	10
7106/a	62	157	36	17	23	21
7106/b	65	149	34	17	21	21
7106/c	31	295	23	25	30	23