

TRANSPORT I EMMAGATZEMATGE DE LES ÀMFORES EN L'ANTIGUITAT: L'APORTACIÓ DE LES CIÈNCIES DELS MATERIALS

Propietats mecàniques, àmfores ibèriques, àmfores romanes, tecnologia, funcionalitat

Verònica Martínez Ferreras* **Evanthia Tsantini*** **Llorenç Vila Socias****** **Emilio Jiménez Piqué****
Vassilis Kilikoglou***

Las ánforas son ejemplos claros de cerámicas utilitarias que requieren de unas características técnicas necesarias para cumplir su funcionalidad: servir de envase de almacenamiento y transporte. En este trabajo se propone el estudio del comportamiento funcional de estos envases a través de la evaluación de las propiedades mecánicas de resistencia y tenacidad a la fractura.

Propiedades mecánicas, àmforas ibéricas, àmforas romanas, tecnología, funcionalidad.

Amphorae represent clear examples of utilitarian pottery. Their functionality as transport and storage vessels require specific performance characteristics, specially related to functional properties. This paper focuses on the study of the mechanical behaviour through the evaluation of strength and fracture toughness.

Mechanical properties, Iberian amphorae, Roman amphorae, technology, functionality.

Les amphores sont claires exemples de céramiques utilitaires. Leur fonctionnalité est conditionné par les caractéristiques techniques nécessaires pour servir de conteneur de stockage et transport. Ce travail propose l'étude du comportement mécanique à partir de l'évaluation de la résistance et la ténacité à la fracture.

Propriétés mécaniques, amphores ibériques, amphores romaines, technologie, fonctionnalité.

39

INTRODUCCIÓ

Durant les darreres dècades, els estudis arqueològics sobre la producció amforal al nord-est peninsular en època ibèrica i romana han comportat un gran avenç en el coneixement dels sistemes de producció i difusió dels diferents envasos. Aquesta problemàtica arqueològica ha estat àmpliament abordada des de diverses disciplines que han donat lloc a grans treballs de síntesi (Comas 1985; Miró 1988; Revilla 1995; Tremoleda 2000; Tsantini 2007; Martínez 2008; López/Martín en premsa). Aquests permeten perfilar unes tendències generals sobre el context socio-econòmic en el que es va desenvolupar la producció i la difusió amforal. Tanmateix, resta clar que

la realitat a les diverses àrees productores de la província i a l'interior de cada centre productor és força complexa. L'abast comercial d'aquestes àmfores és també divers segons les èpoques i les zones, però els diversos ports marítims de la Gàl·lia meridional semblen ser l'objectiu principal d'aquestes exportacions. L'estudi de l'arquitectura naval i portuària informa, d'altra banda, de les característiques tècniques utilitzades en aquest transport (rutes comercials, sistemes de navegació, tipus de vaixells, disposició del carregament etc.), que ens permeten entendre alguns dels aspectes que caracteritzen la producció d'aquests contenidors (Gianfrotta/Pomey 1981; Nieto/Raurich 1998). Finalment, la caracterització arqueomètrica d'aquests

* Equip de Recerca Arqueomètric de la Universitat de Barcelona (ERAUB), Departament de Prehistòria, Història Antiga i Arqueologia, Facultat de Geografia i Història, Universitat de Barcelona, C/ de Montalegre, 6-8, 08001, Barcelona, Tf: 93 403 75 54 (vmartinez@ub.edu; evantsantini@yahoo.es; lvila@catalonia.net).

** Centre d'Integritat Estructural i Fiabilitat dels Materials, Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica Universitat Politècnica de Catalunya, Av. Diagonal, 647, 08028, Barcelona (emilio.jimenez@upc.edu).

*** Laboratory of Archaeometry, Institute of Materials Science, National Center of Scientific research "Demokritos", Agia Paraskevi, 15310, Athens (kilikog@ims.demokritos.gr).

**** Cultura Material; Arqueometria UB (ARQ/UB). Departament de Prehistòria, Història Antiga: Arqueologia, Universitat de Barcelona, C/ de Montalegre, 6-8, 08001, Barcelona, Tf: 934037535 (lvila@catalonia.net).

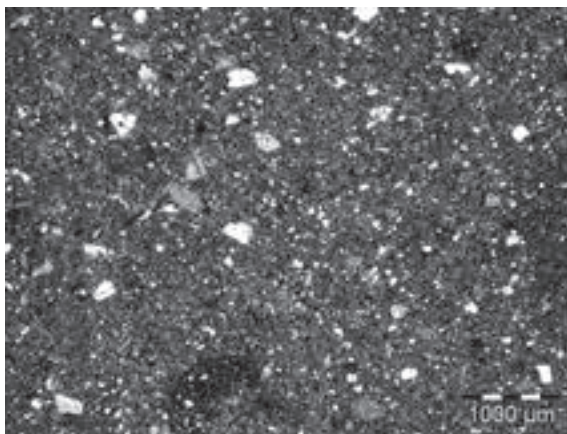
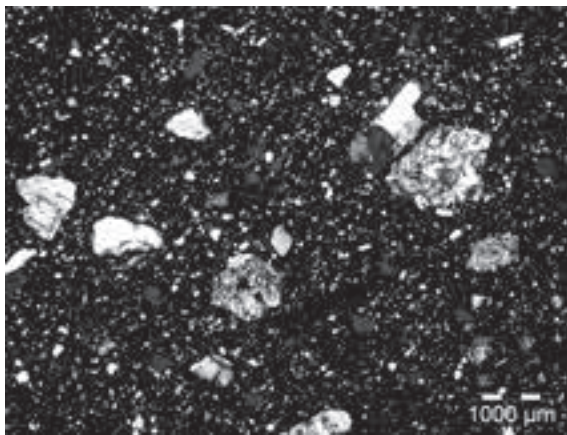
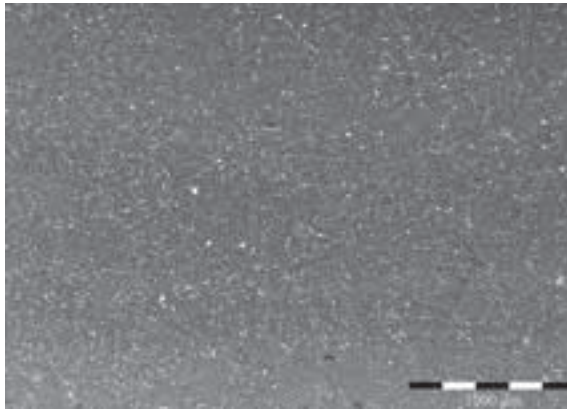


Figura 1. a: Microfotografia de la pasta ceràmica d'una àmfora ibèrica en làmina prima. Observació per microscopi petrogràfic utilitzant nícols creuats, a 40X; b: Microfotografia de la pasta ceràmica d'una àmfora romana de tonalitat vermella, procedent de Ca l'Arnau (Cabrera de Mar) de típica pasta "Tarraconense". Observació per microscopi petrogràfic utilitzant nícols creuats, a 40X; c: Microfotografia de la pasta ceràmica d'una àmfora romana procedent del Vilarenc (Calafell). Observació per microscopi petrogràfic utilitzant nícols creuats, a 40X.

materials ha proporcionat darrerament valuoses dades sobre la provenença d'algunes àmfors i les característiques tecnològiques que diferencien els processos de fabricació dels diferents contenidors (Buxeda/Gurt 1998; Martínez/Buxeda/Martín 2005; Tsantini *et alii* 2005a, 2005b; Vila/Buxeda/Tremoleda 2005, 2006; Casas/Martínez 2006; Martínez/Buxeda/López 2006; Tsantini 2007; Martínez *et alii* 2007; Vila *et alii* en premsa).

Podem pensar que tant els canvis tecnològics com de disseny que comporta la producció de cada tipus amforal en època ibèrica i romana al nord-est peninsular són el resultat de processos culturals diferenciats. És a dir, els canvis tecnològics podrien respondre a unes eleccions que estarien influenciades i interconnectades amb altres pràctiques socials i amb les tradicions tecnològiques que estan profundament encaixades en el coneixement de la societat de la que el ceramista forma part (Sillar 2000; Sillar/Tite 2000). Tanmateix, a part de la connotació cultural, la producció amforal ha de respondre a unes necessitats funcionals i utilitàries com a envasos d'emmagatzematge i transport i per aconseguir exitosament aquesta finalitat, la seva fabricació comporta uns requeriments tècnics determinats (Steponiatis 1984; Bronitsky 1986; Schiffer/Skibo 1987, 1997; Kingery 2001; Skibo/Schiffer 2001; Schiffer *et alii* 2001). En aquest sentit, hem d'entendre els canvis tecnològics i formals existents entre les àmfors ibèriques i romanes i a l'interior de cada tradició ceràmica com l'adopció de processos tecnològics renovadors i innovadors necessaris per aconseguir un envàs que assoleixi el màxim rendiment durant les diferents etapes de la cadena operacional i de comportament (manufactura, distribució, ús i refús). Per tal d'avaluar l'adequació de cada producció amforal a l'emmagatzematge i al transport, segons les condicions que l'arqueologia ens mostra, s'han analitzat algunes de les propietats mecàniques d'aquests contenidors, com la resistència i la tenacitat a la fractura.

LA DIVERSITAT DE TECNOLOGIES I LES EXPECTATIVES UTILITÀRIES DELS CONTENIDORS AMFORALS

La producció amforal al nord-est peninsular ha estat força desenvolupada des del període protohistòric, amb els tipus ibèrics, els antecedents dels quals són les àmfors fenícies. Les àmfors d'època ibèrica presenten unes pastes molt fines i depurades, molt dures (Fig. 1a). Les de procedència laietana, com les procedents del centre de la Riera de Sant Simó i dels abocadors del Camí de Vista Alegre (Mataró), es caracteritzen per presentar inclusions de mica daurada i una matriu molt sovint tricolor, amb el nucli de tonalitat grisa i les parets de color marró vermellós (CODEX 1992). Els processos tecnològics que porten a crear aquesta matriu

semblen més relacionats amb una cocció ràpida que amb l'existència d'atmosferes oxidants i reductores durant la cocció (Tsantini 2007). En canvi, les àmfores de procedència cossetana, com les de Darró, són de tonalitat beige groguenc amb inclusions fines de partícules blanques, vermelles i miques daurades (López 1993).

A partir de principis del s. I aC i al llarg del s. I dC, com a conseqüència dels esdeveniments ocasionats per la segona guerra púnica i l'establiment dels romans al nord-est peninsular, es produeix un canvi en el sistema de fabricació ceràmica, adoptant-se els models itàlics en un primer moment, com les àmfores greco-itàlica i Dressel 1 Citerior, o creant nous dissenys regionals com els tipus Tarraconense i Pascual 1 entre d'altres (López/Martín 2006, en premsa). Tanmateix, el coneixement actual sobre els processos de fabricació ceràmica en època ibèrica i romana i sobre la funcionalitat dels diferents envasos és desigual i imprecís i ha estat centrat bàsicament en àrees i produccions concretes.

L'adopció dels models amforals itàlics i de la tecnologia de fabricació romana a principis del s. I aC s'ha d'entendre com un aspecte més del procés d'aculturació dels pobles del nord-est peninsular. La intensificació de la producció vinícola que comportava un excedent comercialitzable requeria d'un envàs d'emmagatzematge i transport, fàcilment identificable i apte per als nous requeriments funcionals. La fabricació d'àmfores greco-itàliques i Dressel 1 citeriors es centra bàsicament a l'àrea de l'antiga Laietània i, macroscòpicament, es poden identificar una gran diversitat de pastes. Unes són més pròximes als materials ibèrics, evidenciant l'aplicació de processos tecnològics locals en el procés de fabricació d'aquests contenidors. D'altres àmfores, més grolleres, testimonien la clara voluntat de canvi dels processos tecnològics per assemblejar el més possible les noves produccions als models tecnològics i funcionals itàlics. Si bé als centres receptors, com els *oppida* de Burriac i Montapalau o ciutats com *Baetulo* (Badalona), les àmfores Dressel 1 citerior que segueixen una tradició ibèrica apareixen en contextos més antics que les fabricades seguint una tecnologia romana (García/Gurri 1996; Comas *et alii* 1998), alguns autors no consideren que les diferències tecnològiques puguin ser considerades com un criteri cronològic per datar dos moments de la producció, ja que a Can Pau Ferrer i a Ca l'Arnau apareixen en els mateixos contextos (López/Martín 2006, en premsa). Un altre fenomen es documenta als centres ceràmics més meridionals, com Darró (Vilanova i la Geltrú) i el Vilarenc (Calafell), que iniciaren la fabricació d'àmfores Dressel 1 Citerior cap als anys 50-40 aC. Aquestes produccions es caracteritzen per presentar una pasta diferent als tipus laietans descrits anteriorment. És molt depurada, de color beige clar, groguenc o rosat, molt semblant a la pasta característica de les àmfores ibèriques de proce-

dència cossetana (López 1993; López/Martín 2006; Tsantini 2007).

Cap a mitjans del s. I aC, la majoria de centres comencen a fabricar nous dissenys ceràmics destinats a l'emmagatzematge i al transport del vi local. Si bé aquestes noves produccions responen a una gran diversitat de formes, han estat classificades des de la seva identificació, als anys 1980, en una única forma tipològica, coneguda com Laietàna 1 o Tarraconense 1. En un treball recent, López i Martín (2006) recuperen totes les possibles variants identificades amb aquest tipus i estableixen una nova classificació adoptant noves denominacions per als diferents dissenys. Les variants que conformen l'àmfora Tarraconense 1 (A, B, C, D i E) apareixen associades en alguns centres productors de la Laietània, com a Ca l'Arnau, en derelictes, com a Cala Bona (Cadaqués) i en els mateixos contextos arqueològics en centres receptors com Narbona (Anteas 1993; Nieto/Raurich 1998). Tot i la diversitat de pastes, la majoria de contenidors presenten una pasta de tonalitat vermella similar a la dels tipus Dressel 1 Citerior fabricats amb processos tècnics clarament romans i que ha estat identificada per Tchermia i Zevi (1972) com a 'Tarraconense' (Fig. 1b). Aquests contenidors poden ser macroscòpicament diferenciats de les àmfores Tarraconense 3 procedents del Vilarenc (Calafell), tant pel disseny com per les característiques de la pasta. Les pastes de les àmfores Tarraconense 3 es caracteritzen per presentar certes similituds amb els tipus ibèrics locals anteriors. La pasta és dura i compacta, de color beige en les superfícies i beige marronós en el nucli (Fig. 1c). El desgreixant és de mida petita però abundant, fonamentalment quars blanc i mica daurada (López/Martín en premsa).

Durant la segona meitat del s. I aC, l'adopció de l'àmfora Pascual 1, d'una relativa estandardització des del punt de vista formal, ve acompanyada, en alguns centres, d'una sèrie de canvis en els processos tecnològics de fabricació. Tot i la relativa homogeneïtat formal que presenten aquests contenidors, un estudi recent identifica dues variants a partir de les seves variacions mètriques (López/Martín en premsa). En quant a la tecnologia, alguns tallers meridionals, com el Vilarenc, adopten el disseny però mantenen una tecnologia de producció similar als tipus anteriors. En canvi, en altres àrees, aquests contenidors es caracteritzen per presentar una gran varietat de pastes grolleres, que Tchermia (1971) va classificar inicialment com àmfores de pasta de color blanc groguenc i àmfores de color marró vermellós. La identificació de pastes vermelles i clares als centres receptors de Narbona i Burdeus sembla respondre, en certa manera, a moments cronològics diferenciats. En aquest sentit, les primeres àmfores Pascual 1 recuperades a Narbona en contextos de mitjans s. I aC presenten una pasta generalment vermella amb una gran quantitat de desgreixador, bàsicament

quars i mica daurada (Sánchez 2003). En canvi, les àmfors Pascual 1 que formen part del sistema de drenatge realitzat a Malard (Narbona) en època d'August, presenten pastes de diverses tonalitats (Chapon *et alii* 2006). A Burdeus, les àmfors Pascual 1 recuperades en els contextos més antics són de tonalitat similar als primers envasos procedents de Narbona. En canvi, en un moment posterior, apareixen àmfors amb una gamma de colors més àmplia que varien entre el color rosa clar, beige i marró clar (Berthault 2000). A les darreres dècades del s. I aC, el major nombre d'àmfors Pascual 1 identificades en un dels edificis d'emmagatzematge amb *dolia* del port de *Lattara* (Lattes) correspon a individus de pasta vermella, molt fosca, menys grollera, però amb abundants fragments de quars (García/Vallet 2002, 91). Una minoria correspon a àmfors de pasta vermella amb importants inclusions de quars i mica daurada i a àmfors de tonalitat groguenca o blanquinosa, amb abundants grans de quars però absència total de miques. Als abocadors ceràmics del mercat de Santa Caterina (Barcelona), formats durant els darreres anys del regnat d'August i durant el regnat de Tiberi, les àmfors Pascual 1 majoritàries són de pasta de color clar, mentre que un nombre minoritari correspon a àmfors de tonalitat vermella (Aguelo/Carreras/Huertas 2006).

42

Tant les àmfors ibèriques com romanes són contenidors ceràmics dissenyats per a l'emmagatzematge i el transport. Tanmateix, tant les diferències formals com les característiques de la pasta reflecteixen tradicions formals diferents i, en conseqüència, eleccions tecnològiques que podrien respondre a uns objectius i compromisos diferenciats (Buxeda/Martínez/Vila en premsa). Així, les diferències en els tipus ibèrics i romans han d'entendre's com a petits canvis en la configuració normal d'una àmfora, possiblement provocats per diferències en les expectatives funcionals dels envasos (Kington 2001; Skibo/Schiffer 2001).

Els canvis en la producció poden ser entesos com una reacció al rendiment inadequat de la tecnologia utilitzada per a satisfer les funcions utilitàries o tècniques, socials o ideològiques que han d'acomplir aquests contenidors (Buxeda/Martínez/Vila en premsa). Per això, s'ha de tenir en compte la cadena de comportament dels diferents envasos, en la que els aspectes tecnològics, però també els econòmics i socials, degueren tenir fortes implicacions. En aquest sentit, tant el disseny com les propietats del material han de ser les adequades per aconseguir el requeriment mínim necessari de suportar un transport terrestre i marítim en unes condicions d'estiba no sempre massa adequades. A més, s'han de valorar els costos i beneficis de les diverses produccions, ja que tot i requerir-se un producte d'alta qualitat, la vida funcional d'aquests envasos és molt curta, ja que generalment s'amortitzen en un sol viatge. D'aquesta manera, tot i que els diferents

contenidors comparteixen uns propòsits i uns objectius similars, cada producció respon a diferents eleccions tecnològiques en la cadena operacional, encaminades a obtenir un rendiment òptim de l'envàs segons el seu comportament funcional.

EL COMPORTAMENT MECÀNIC DE LES ÀMFORES IBÈRIQUES I ROMANES

L'estudi del comportament mecànic de les àmfors requereix, d'una banda, analitzar les característiques físiques de l'àmfora, com la forma, el perfil, l'amplada de les parets, etc. (Vila *et alii* 2007). D'altra banda, és necessària l'anàlisi de les propietats del material ceràmic per tal d'entendre el seu comportament davant de tensions que simulen els impactes, contactes estàtics, traccions, compressions, abrasions puntuals, etc. ha que han estat sotmesos aquests materials.

Però la ceràmica és un material fràgil que conté nombrosos defectes i imperfeccions microestructurals ocasionats durant la fabricació i al llarg del seu ús i maneig. Les esquerdes s'inicien per la concentració de tensions en els defectes presents a la superfície i a l'interior de la matriu ceràmica, com són la porositat, els contorns entre l'argila i les inclusions, així com les esquerdes microscòpiques (Bronitsky 1986; Feathers 1989; Kilikoglou/Vekinis/Maniatis 1995; Kilikoglou *et alii* 1998; Tite 1999; Tite/Kilikoglou/Vekinis 2001). D'aquesta manera, els mecanismes que condicionen que una ceràmica es trenqui són l'estat microestructural de la matriu ceràmica, que depèn de la composició de la pasta, el tipus d'estructura atòmica, l'estat de sinterització i vitrificació de la matriu i del tipus, mida, freqüència i distribució de les inclusions no plàstiques i dels lligams d'interconnexió entre aquestes partícules i la matriu ceràmica. Per tal de determinar tots aquests factors relacionats amb la composició de la pasta i els processos tecnològics seguits pel ceramista durant la seva fabricació es requereix la combinació de diverses tècniques d'anàlisi. D'una banda, la composició de la pasta pot ser mesurada químicament per Fluorescència de Raigs X (FRX). La composició mineralògica, que ens permet estimar alguns aspectes tecnològics relacionats amb l'atmosfera i la temperatura de cocció, pot ser identificada mitjançant la Difracció de Raigs X (DRX). L'anàlisi petrogràfica per làmina prima (MO) permet identificar alguns processos tecnològics i ens informa del tipus de matèries primeres que conformen la pasta ceràmica i dels processos tècnics relacionats amb el modelatge i la cocció. Mitjançant la Microscòpia Electrònica de Rastreig (MER) es pot obtenir informació sobre la microestructura i l'estadi de sinterització i vitrificació de la matriu ceràmica i, així, estimar la temperatura de cocció. Finalment, l'efecte que pogueren tenir els diferents dissenys de les àmfors en el seu comportament

mecànic pot ésser avaluat mitjançant l'Anàlisi d'Elements Finitos (AEF) (Kilikoglou/Vekinis 2002; Vila *et alii* 2007).

Les àmfores, com a ceràmiques clarament utilitàries, han de mostrar unes propietats mecàniques específiques per tal de resistir tensions i impactes accidentals durant el seu transport i maneig. De manera simplista, han de resistir, d'una banda, el pes del seu contingut i, d'altra, els impactes fortuïts que es produeixen durant el seu ús, molt especialment al llarg del transport marítim. En exercir una força sobre un sòlid com la ceràmica es produeix una tensió (σ), però el component elàstic del material fa que aquest es deformi de manera proporcional a la tensió exercida (Ashby 2003). La tensió per compressió implica que els àtoms que formen el material són forçats a ajuntar-se en una direcció central particular. En canvi, en exercir una tensió mitjançant la tracció, el material és forçat a separar-se en diverses direccions. Quan la tensió sobrepassa la capacitat elàstica de la ceràmica, la ceràmica patirà una deformació permanent (ϵ) i probablement es trencarà completament (Fig. 2).

La rigidesa o flexibilitat del material es mesura amb el càlcul del mòdul de Young (E) o mòdul d'elasticitat, que mesura la quantitat de tensió (σ) requerida per produir una deformació elàstica (ϵ) determinada i s'expressa en unitats de pressió (Pa)

$$E = \sigma / \epsilon$$

El valor del mòdul d'elasticitat correspon a la pendent de la part elàstica (sense deformació permanent), com es representa al gràfic de força-desplaçament de la Figura 3.

Un cop iniciada la fractura, aquesta pot propagar-se de tres maneres diferents, depenent de les característiques de la matriu ceràmica, del tipus de tensió aplicada i de les dimensions de la peça. En materials de

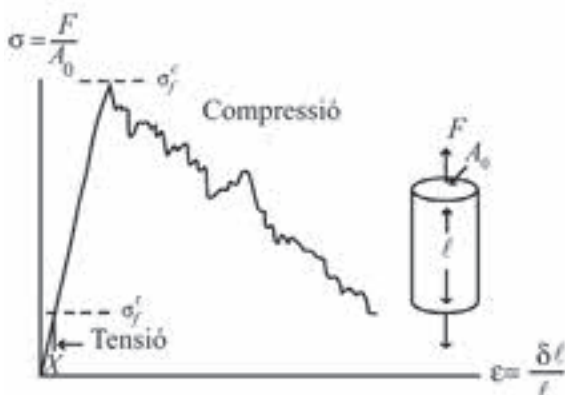


Figura 2. Gràfic resultant en aplicar una força de tensió per compressió sobre una ceràmica, on σ és el total de la força aplicada, σ_t^r és la resistència a la tensió, σ_c^r és la resistència a la compressió i ϵ és la càrrega axial (Ashby 2003).

fractura inestable (Fig. 3a), el trencament complet es produeix al punt de màxima energia resistida i la força exercida cau dràsticament, originant una fractura total i instantània. En d'altres casos, un cop iniciada la fractura, aquesta es propaga de forma semi-estable (Fig. 3b) o estable (Fig. 3c), ja que és aturada ràpidament en xocar amb una inclusió, una porositat o una imperfecció, que absorbiran part de l'energia cinètica fins que l'increment continu de la tensió portaria al trencament final. L'energia elàstica emmagatzemada en el moment de la fractura ve donada per l'àrea creada sota la part elàstica de la corba força-desplaçament (Fig. 3a). L'energia dissipada durant la propagació de la fractura ve representada en la part no elàstica de la corba (Fig. 3b, c).

LA RESISTÈNCIA MECÀNICA A LA FRACTURA

El grau de durabilitat d'una ceràmica s'ha considerat com una funció simple de la seva duresa i de la seva resistència mecànica a un impacte, impliqui o no deformació plàstica. La resistència mecànica a la fractura (σ_f) és la màxima tensió que un material aguanta fins a trencar-se i es calcula mesurant la quantitat d'energia requerida per a iniciar la fractura (Fig. 2). Les unitats resultants s'expressen en unitats de pressió (Pa) (Ashby 2003, 25). D'aquesta manera, en exercir una força sobre una ceràmica, la màxima tensió assolida en el moment del trencament correspondrà a la seva resistència a la fractura. La resistència d'una ceràmica a la fractura no és una propietat intrínseca del material ceràmic ja que depèn de diversos factors, com el tipus de força, de les propietats de la microestructura ceràmica i de l'estat de vitrificació aconseguit durant la cocció, així com dels defectes i imperfeccions presents a la

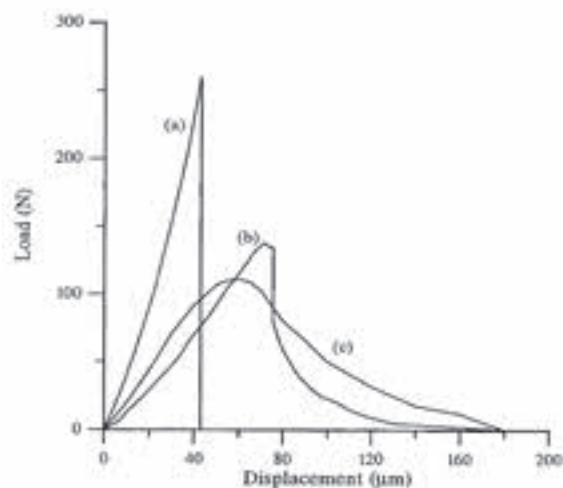


Figura 3. Gràfic força-desplaçament mostrant les corbes típiques del trencament inestable (a), semi-estable (b) i estable (c) resultants de l'aplicació d'una força (Tite/Kilikoglou/Vekinis 2001).

matriu, que actuaran com a concentradors de tensió. Per això, el tipus, la mida i la distribució de les inclusions, així com la temperatura de cocció utilitzada, són factors claus que influeixen en la resistència mecànica (Steponaitis 1984; Bronitsky 1986; Feathers 1989; Tite/Kilikoglou/Vekinis 2001, 303). L'avaluació d'aquesta propietat en les àmfores ibèriques i romanes ha estat realitzada mesurant la resistència mecànica a la flexió (σ_{max}), que defineix la màxima tensió en el moment de la fractura (Ashby 2003; Kilikoglou/Vekinis/Maniatis 1995):

$$\sigma_{max} = \frac{3P_f S_1}{2bd^2}$$

LA TENACITAT A LA FRACTURA

L'habilitat del material per a resistir la propagació de la fractura és una funció de la seva tenacitat de fractura, K_{Ic} , és a dir, l'habilitat per dissipar energia mecànica (Bronitsky 1986; Feathers 1989; Kilikoglou/Vekinis/Maniatis 1995; Kilikoglou *et alii*. 1998; Tite/Kilikoglou/Vekinis 2001). S'expressa en MPa m^{1/2} i es determina

44

$$K_{Ic} = \frac{3P_f (S_1 - S_2)}{2bd^2} \sqrt{\pi t F(\alpha)}$$

on P_f és la màxima càrrega aplicada, $F(\alpha)$ és una funció resultant de la geometria de la proveta ceràmica i igual a $1.122 - 1.121\alpha + 3.74\alpha^2 + 3.873\alpha^3 - 19.05\alpha^4 + 22.55\alpha^5$, t és la profunditat de l'entalla inicial, α és igual a t/d i d és el gruix de la mostra (en mm).

En el cas que la propagació de la fractura sigui inestable (Figura 3a), la tensió requerida per produir el trencament és igual a l'energia intrínseca dissipada durant la fractura (G_f), que estarà unívocament relacionada amb la tenacitat del material (Kilikoglou *et alii* 1998). En el cas de ceràmiques que presenten una fractura semiestable o estable (Fig. 3b, c) hi haurà una energia de fractura estable representada en la part final de la corba de la gràfica de tensió-deformació d'un assaig de fractura (Fig. 3b, c).

RUTINA ANALÍTICA

La majoria d'estudis que han avaluat les propietats mecàniques de les ceràmiques arqueològiques han utilitzat rèpliques experimentals que intenten reproduir les pastes arqueològiques en estudi. Això es deu a que aquests estudis requereixen testar un gran nombre de provetes de cada mostra per tal d'obtenir resultats estadístics fiables i precisos. D'altra banda, els assaigs

requereixen mostres de mides específiques i forma plana, amb les parets paral·leles, difícils d'obtenir donada la curvatura característica dels vasos ceràmics. Altres autors també eviten treballar directament sobre material ceràmic arqueològic perquè creuen que el comportament mecànic original del material pot haver-se degradat durant el seu ús i enterrament i aquests mecanismes poden falsejar els resultats i les interpretacions actuals (Steponaitis 1984; Mabry *et alii* 1988; O'Brien *et alii* 2003).

El nostre estudi, realitzat directament sobre el material arqueològic, requereix la preparació de les mostres ceràmiques per tal d'aconseguir unes provetes ceràmiques de dimensions i formes determinades. L'anàlisi de la resistència i de la tenacitat a la fractura requereixen convertir el fragment de ceràmica en una proveta en forma de maó rectangular de mides específiques (aproximadament 10x10x40 mm), de costats paral·lels i polits (Fig. 4a). Les provetes utilitzades en els tests de tenacitat són similars però han estat tallades de forma transversal amb un tall d'1mm, per tal de simular l'inici de la fractura i calcular, doncs, la tensió que la ceràmica resisteix durant la propagació de la fractura (Fig. 4b). Aquests estudis també requereixen testar diverses provetes per mostra estudiada, per tal d'obtenir una bona estadística en els resultats experimentals, donades les particularitats del material ceràmic. Aquests condicionants han portat a dissenyar maneres alternatives per a calcular la resistència i la tenacitat a la fractura de ceràmiques arqueològiques (Fournier 1990; Marby *et alii* 1981; Neupert 1994). Una de les més recents és la presentada per Vekinis i Kilikoglou (1998). Aquests autors proposen el càlcul de la resistència a la fractura hertziana i de la resistència a l'abradió com a indicadors de la resistència a la fractura i la tenacitat, respectivament. Els avantatges que presenta aquesta tècnica és que el test experimental emprat en la determinació d'aquests paràmetres requereix d'uns espècimens en forma de disc, d'una mida menor a la dels maons rectangulars (d'entre 25-30 mm de diàmetre i 3 mm de gruix) i, a més, ambdós paràmetres poden ser determinats amb un sol espècimen.

Els tests s'han realitzat en uns aparells Instron, models 1195 i 8511. La tensió ha estat exercida sobre la proveta amb un valor constant de 10N i a una velocitat de 100 N/s. En el cas de la resistència mecànica a la fractura, la tensió ha estat exercida mitjançant tres cilindres metàl·lics. En el cas de la tenacitat, han estat utilitzades quatre cilindres (Fig. 4 a i b). La separació dels dos punts de pressió inferiors ha estat de 30.6 mm en el cas de treballar amb l'aparell Instron 1195, i de 40.25 en el cas de treballar amb el model 8511. Els gràfics obtinguts de cada assaig han estat avaluats per determinar el caràcter estable o inestable de la fractura així com el component de tenacitat. Les fractures del material ceràmic han estat igualment observades a la lupa binocular.

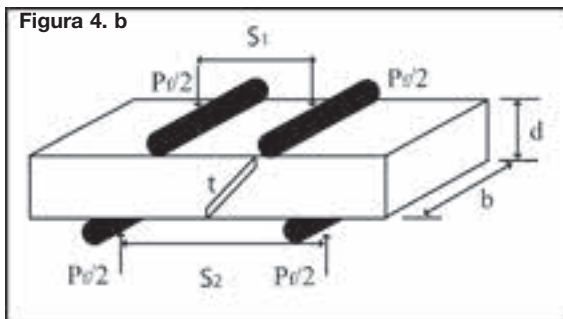
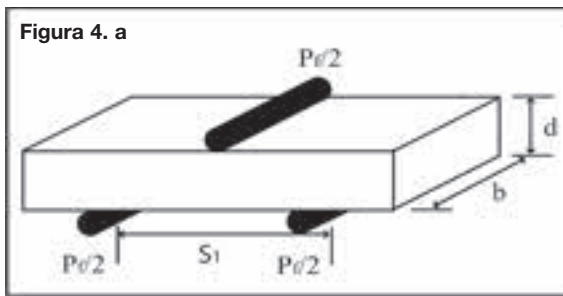


Figura 4. a: Representació d'una proveta ceràmica utilitzada per al càlcul de la resistència mecànica a la fractura (σ_{max}) testada mitjançant 3 punts de tensió; b: Representació d'una proveta ceràmica utilitzada per al càlcul de la tenacitat a la fractura, amb el tall (t) que simula l'inici de la fractura, testada mitjançant 4 punts de tensió.

DISCUSSIÓ SOBRE ELS RESULTATS

No és la nostra intenció en aquest primer treball fer una recerca profunda sobre el comportament de cada fàbrica ceràmica caracteritzada en els tallers ceràmics estudiats (Buxeda *et alii* 1995). La nostra intenció és oferir una visió més general sobre el comportament mecànic de contenidors fabricats amb tecnologies clarament diferenciades, com són la de tradició ibèrica i la tradició greco-romana.

Els contenidors ibèrics mostren uns valors de resistència mecànica que oscil·len entre 8 i 40 MPa, és a dir, que l'estructura atòmica de la pasta ceràmica d'aquests envasos suportaria entre 80 i 400 Kg/cm² segons cada cas (Fig. 5). Els majors valors de resistència s'observen en àmfores cuites a elevada temperatura, amb un alt grau de vitrificació, en pastes poc poroses. En tots els casos, el tipus de fractura és inestable, típic de materials fins, durs i compactes, en el que la fractura es propaga sense interrupcions. Els casos que presenten una baixa resistència mecànica són materials excessivament fràgils com per haver suportat un transport a llarga distància, ja que no aguantarien la contínua exposició a tensions. Podrien haver estat transportades en curtes distàncies i serien materials ideals per a l'emmagatzematge de productes (Tsantini 2007).

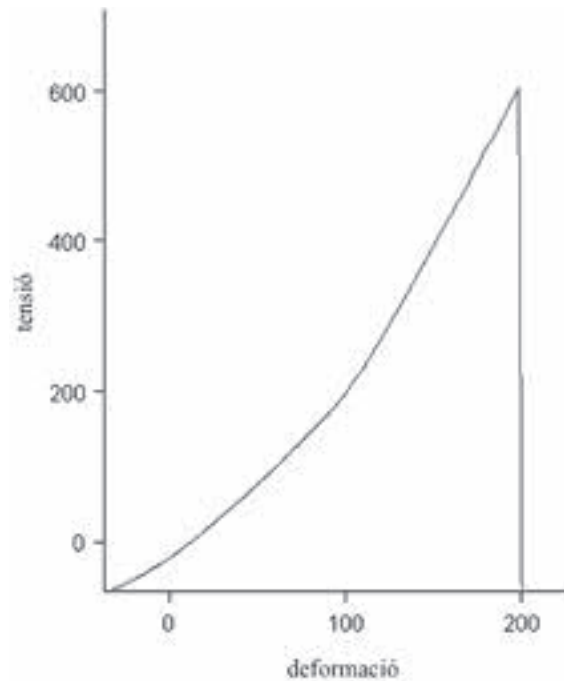
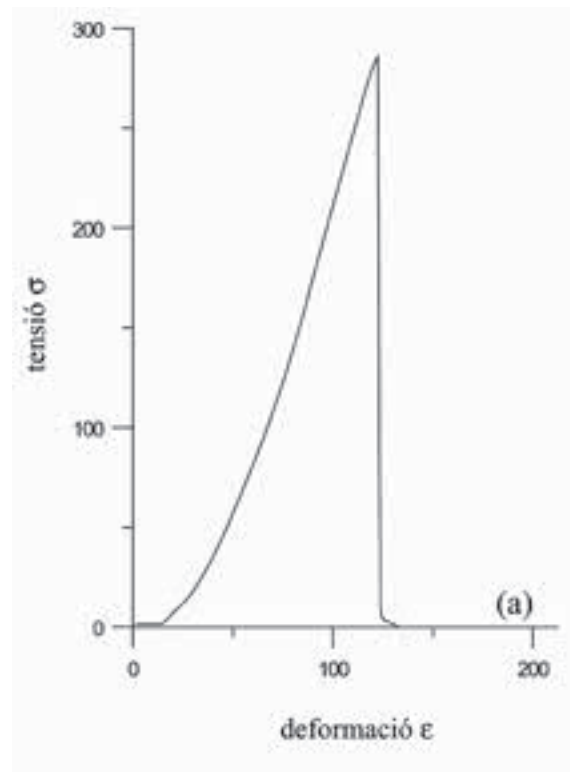
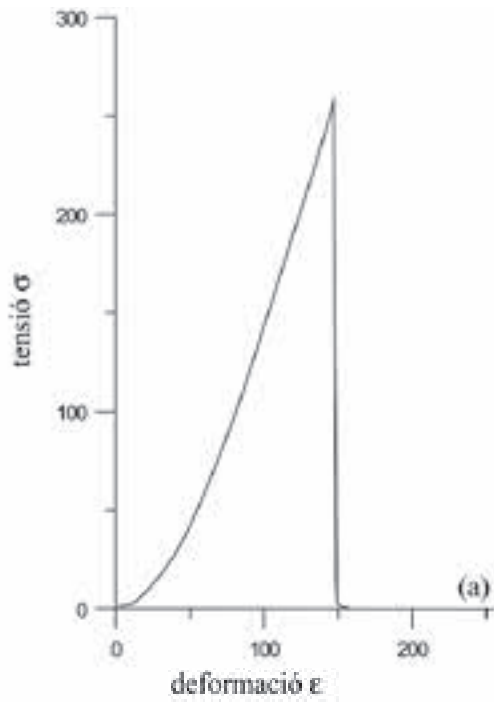


Figura 5. Gràfic tensió-deformació que representa una alta resistència mecànica a la fractura transversal (σ_{max}) d'una àmfora ibèrica.

Les àmfores Dressel 1, Tarraconense i Pascual 1 presenten uns valors que varien entre els 2 i el 30 MPa. Això significa que les parets d'aquestes àmfores poden resistir tensions d'entre 20 i 300 Kg/cm². Els valors més elevats, entre 15 i 30 MPa, corresponen majoritàriament a individus que presenten una pasta de color rosat, marró o taronjós. La tecnologia de fabricació d'aquests individus correspon bàsicament a pastes mitjanament calcàries (Fig. 6a) o calcàries (Fig. 6b), cuites a bona temperatura. Tanmateix, alguns individus poc calcaris presenten també valors alts de resistència mecànica. El tipus de fractura en aquests individus és inestable o quasi semi-estable. Finalment, les àmfores de tonalitat clara presenten una pasta molt poc resistent, amb uns valors que oscil·len entre 2 i 7 MPa. Tanmateix, el tipus de fractura és semi-estable (Fig. 6c). Es tracta en tots els casos d'individus calcaris cuits a elevada temperatura, que poden haver patit processos secundaris d'alteració i contaminació, com veurem més endavant.

En quant als tests de tenacitat a la fractura, es produeix l'efecte contrari. Normalment les àmfores ibèriques són més tenaces a l'energia intrínseca de la fractura però un cop aquesta s'ha iniciat, el material es trenca de forma inestable o catastròfica, com un vidre, mostrant molt poca resistència a la propagació de la fractura.

En el cas de les àmfores romanes, els valors de la tenacitat a la fractura d'aquests individus es troben al voltant de 0.3 i 3 MPa m^{1/2}, si bé dos individus superen els 4 MPa m^{1/2}. Ja que existeixen molts factors que



46

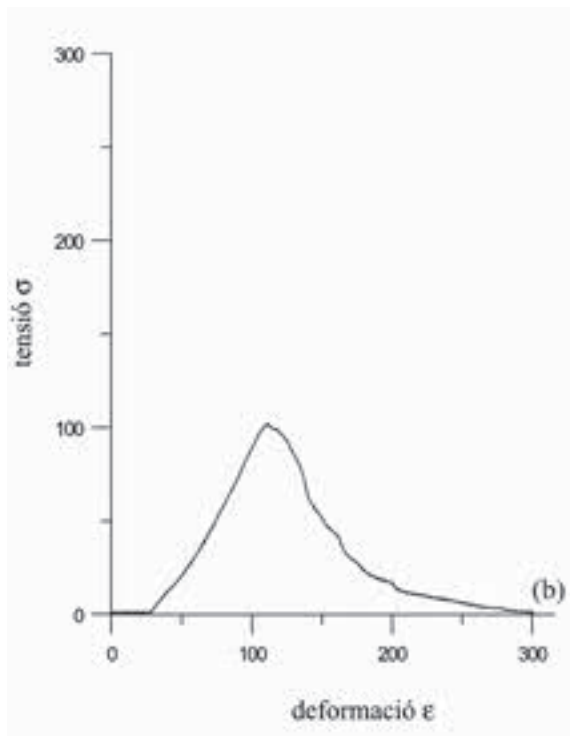
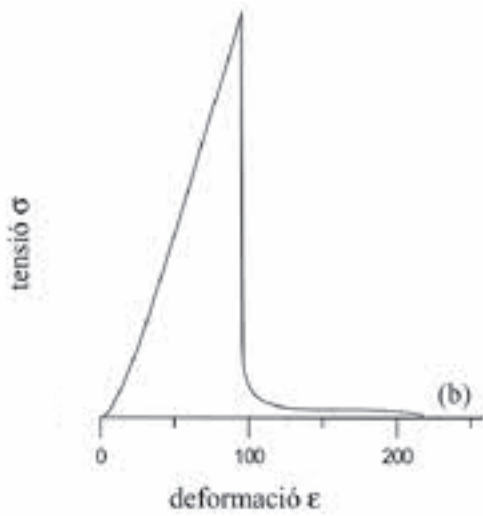


Figura 6. Gràfics tensió-deformació que representen diferents graus de resistència mecànica a la fractura (σ_{max}) de diversos contenidors d'època romana: a: resistència alta i fractura inestable; b: resistència mitjana i fractura quasi semi-estable; c: resistència baixa i fractura semi-estable.

Figura 7. Gràfics tensió-deformació que representen graus diferents de tenacitat a la fractura de les àmfores d'època romana: a: Material poc tenaç, resistent a la fractura però poc resistent a la seva propagació; b: material tenaç, poc resistent a la fractura però resistent a la seva propagació.

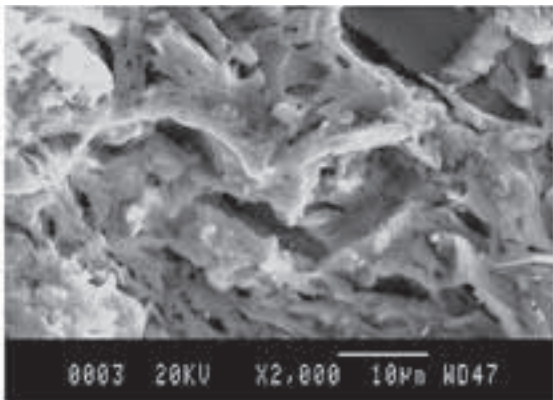


Figura 8 a

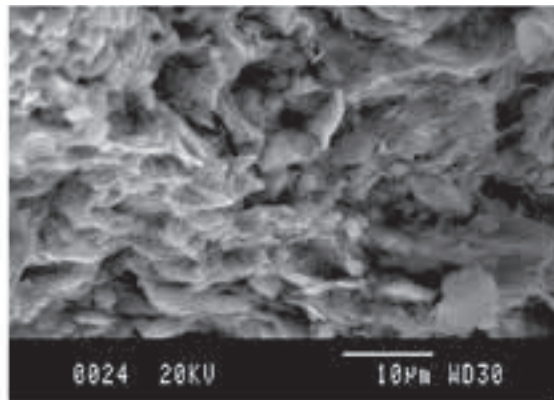


Figura 8 c

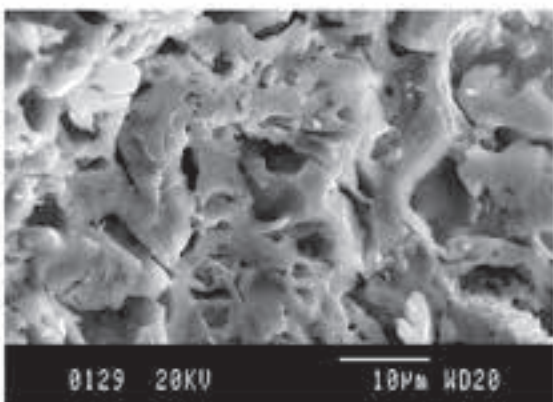


Figura 8 b

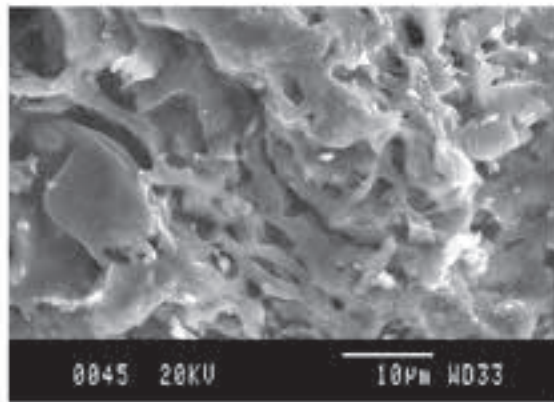


Figura 8 d

Figura 8. Fotografies de la matriu ceràmica a 2000X realitzades amb el Microscopi Electrònic de Rastreg: a: Microestructura d'una àmfora poc calcària, que presenta una vitrificació inicial, incompleta, característica de temperatures inferiors als 850°C; b: Microestructura d'una àmfora poc calcària que presenta una vitrificació intensa, extensiva a tota la matriu, característica de temperatures de cocció entre 850-1050°C; c: Microestructura d'una ceràmica mitjanament calcària sense estat de vitrificació, típica de temperatures de cocció inferiors als 750°C; d: Microestructura d'una àmfora de pasta calcària que presenta una vitrificació total de la matriu, indicant que la temperatura de cocció és superior a 1050°C.

condicionen el comportament mecànic de les ceràmiques, i més en el cas de ceràmiques arqueològiques que han estat utilitzades i enterrades durant centenars d'anys, és molt difícil associar el grau de tenacitat a unes característiques tecnològiques concretes. Tanmateix, s'observa una tendència que, tot i massa general, apunta a que les àmfores que presenten més tenacitat intrínseca són els materials poc o mitjanament calcaris (fins a un 8% CaO) de color vermell a marró o taronjós, cuites a temperatures entre 800 i 1050°C. Tanmateix, la resistència a la propagació de l'energia de fractura és pràcticament inexistent (Fig. 7a). En canvi, un grup d'àmfores més calcàries (per sobre de 8% CaO) cuites a més elevada temperatura (> 1050°C), de tonalitat clara, presenten una valors de tenacitat molt baixos, entre 0.3 i 0.7 MPa m^{1/2} tot i que presenten més tenacitat al desenvolupament de la fractura, ja que aquesta es produeix de forma semi-estable (Fig. 7b).

Aquestes àmfores han mostrat un comportament mecànic similar en els tests de resistència mecànica i, coneixem, per l'anàlisi mineralògica, l'existència de processos secundaris d'alteració i contaminació post-deposicional en la majoria d'individus de pasta clara (Martínez/Buxeda/Martín 2005; Martínez/Buxeda/López 2006; Martínez *et alii* 2007; Vila *et alii* en premsa). Aquesta alteració vindria originada per la cristallització de l'analcima (Na[AlSi₂O₆]-6H₂O), una zeolita sòdica que apareix com a fase secundària en àmfores calcàries cuites a alta temperatura (Buxeda 1999; Schwedt *et alii* 2006). La seva formació està relacionada, possiblement, amb l'alteració de la fase vítria desenvolupada en la matriu ceràmica calcària a alta temperatura. Aquestes alteracions contribueixen a canviar tant la composició química com les característiques de la microestructura ceràmica, en relació als envasos reals. Per aquest motiu, els valors obtinguts dels tests de resistència

mecànica i de tenacitat a la fractura no són vàlids ja que no responen a valors d'un envàs real sinó d'un envàs alterat per diversos mecanismes durant la seva deposició.

L'anàlisi per MER de les àmfores d'època romana poc calcàries (< 5% CaO), com alguns exemplars de Dres-sel 1 Citerior de Ca l'Arnau i Can Pau Ferrer (Martí-nez/Buxeda/Martín 2005), cuites a baixa temperatura, mostra un estat de vitrificació inicial de la matriu cerà-mica a partir dels 750-800°C, i en aquest estat les partícules no plàstiques i la matriu no apareixen força fusionades (Fig. 8a). La fase líquida augmenta de forma estable i paral·lela a l'augment de la temperatu-ra, fins crear una estructura vitrificada contínua, caracteritzada per la presència de grans porositats en la matriu ceràmica, que perdurarà de forma estable durant un rang de 150°C (Fig. 8b). Amb temperatures superiors a 1050-1100°C, es produeix el col·lapse de les partícules de la matriu creant-se una textura de porositats fines (Jones 1986). En canvi, les fàbriques calcàries (> 5% BaO) cuites a baixa temperatura, presenten una matriu amb una estructura laminar dels minerals argilosos, poc fusionada, sense intercon-neixió amb les partícules no plàstiques (Fig. 8c). Això es deu al baix grau de vitrificació i a l'expansió que pateixen els grans de quars a partir dels 600°C i que com-porta tensions entre les partícules i la matriu ceràmica. El baix estat de vitrificació i la poca fusió existent entre matriu i inclusions fa que la fractura es produeixi de forma estable. Tot i que es tractarà de ceràmiques poc resistents, tendiran a trencar-se de manera estable, ja que la dissipació de l'energia de fractura és elevada per què tant la porositat com les inclusions frenen la propa-gació de la fractura. Així, in cop iniciada, les inclusions, majoritàriament de quars, i la porositat de l'àrea danya-da, interactuen produint una xarxa extensiva de micro-fractures, originant la dissipació de l'energia mitjançant mecanismes de desviament i bifurcació. A temperatu-res superiors als 800-850°C, els mecanismes que por-ten a l'estat de vitrificació característic d'argiles calcà-ries està en relació amb la descomposició de la calcita al voltant dels 750-800°C i amb la formació de fases cristal·lines d'alts punts de fusió com aluminosilicats de calci (anorthita i gehlenita) i silicats de calci i magnesi (wol·lastonita i diòpsid) a temperatura elevada. En assolir els 850°C, les argiles calcàries produeixen una vitrificació contínua i extensiva a tota la matriu i una microestructura estable durant un rang de 200°C en atmosfera oxidant. El grau de vitrificació assolit contri-bueix a una major resistència a la fractura, ja que el trencament de les unions atòmiques s'inicia amb una tensió més alta. Com que l'energia acumulada és alta, la dissipació d'energia durant la propagació de la frac-tura és ineficient per aturar la fractura, que es produirà de forma inestable. A temperatures superiors als 1050°C es produeix una vitrificació molt intensa o total, en la que la matriu i les partícules apareixen totalment

adherides i la matriu es trenca com si es tractés d'un vidre (Fig. 8d). Tanmateix, altres factors com la mida i la distribució dels components calcaris de l'argila esdevenen uns factors crítics en l'estabilitat de la vitrifi-cació extensiva de l'estructura ceràmica. D'aquesta manera, per tal d'obtenir una vitrificació extensiva esta-ble en les pastes calcàries, que implica un material més dur i perdurable, són necessaris uns processos de coc-ció d'alta temperatura. Tanmateix, els riscos disminuï-ten ja que les argiles calcàries presenten l'avantatge de romandre estables en un estat de vitrificació exten-siva, durant un rang de temperatura de 200°C, entre 850-1050°C (Maniatis/Tite 1981; Kilikoglou/Vekinis/Maniatis 1995; Kilikoglou *et alii* 1998; Tite/Kilikoglou/Vekinis 2001).

CONCLUSIONS

Les diferents eleccions tecnològiques preses pels cera-mistes, des de la selecció de les matèries primeres (tipus d'argila i desgreixador), el processat i modelat de la pasta i les condicions de la cocció (atmosfera i tem-peratura), determinen quin serà el comportament mecànic de les àmfores. En aquest sentit, l'anàlisi de les propietats mecàniques, concretament la resistència mecànica i la tenacitat a la fractura, aporta informació valuosa per a conèixer les característiques utilitàries dels diferents envasos.

A partir dels experiments realitzats, es desprenen dues conclusions preliminars. D'una banda, les àmfores ibè-riques, de parets primes, serien aparentment uns enva-sos més fàcilment manejables, especialment sense contingut, que no pas els de tipologia romana. Tot i pre-sentar una pasta fina i depurada, cuita generalment a bona temperatura, són altament resistents a la fractura. Tanmateix, quan aquesta es produeix, les àmfores es trenquen de forma instantània, ja que la matriu no dis-posa de mecanismes per dissipar l'energia de fractura. Tot i l'evidència arqueològica de l'exportació d'aquests materials al sud de França (Sánchez 2003) i a les Illes Balears (Tsantini 2007), el comportament mecànic d'a-quests contenidors no sembla gaire adequat per al transport marítim. En qualsevol cas, no es pot negligir el fet que les àmfores podrien disposar d'alguna mena de protecció externa que contribuís a disminuir els efectes dels impactes fortuïts produïts durant el viatge en vaixell. Aquests envasos, en canvi, presenten unes característiques que els fan ideals per a l'emmagatze-matge de productes, tant líquids com sòlids, ja que la pasta és compacta i poc porosa, presentant una distri-bució homogènia de les inclusions i de la porositat, tan-cada i de mida petita, que la fa resistent i impermeable (Tsantini 2007).

Les àmfores vinàries de tradició greco-romana fabrica-des al nord-est peninsular presenten un comportament mecànic diferent als contenidors ibèrics. Les parets són

més gruixudes, el desgreixador és més abundant, de mida més gran i mostren una resistència similar o inferior als envasos ibèrics. Les àmfores més resistents estan cuites a alta temperatura, que dóna lloc a la creació d'una fase vítria contínua, en la que els components de la matriu ceràmica es troben totalment fusionats i es necessita més tensió per iniciar la fractura. En canvi, les àmfores cuites a baixa temperatura són poc resistents, ja que la fase vítria no està ben formada. A més, en aquest estadi inicial de la cocció es produeixen una sèrie de tensions entre la matriu i les inclusions, que dóna lloc a la creació d'una xarxa de microfractures al seu voltant. La microestructura, fortament danyada, presentarà un mòdul d'elasticitat inferior i manifestarà poca resistència a la fractura. Tanmateix, les inclusions, la porositat i aquesta xarxa de microfractures actuaran com a mecanismes de xoc i desviament, contribuint a dissipar la tensió durant la propagació de la fractura i evitant una fractura inestable i catastròfica dels contenidors ceràmics. D'aquesta manera, les àmfores d'època romana poden considerar-se materials més tenaços que resistents, i semblen més adequats per al transport que per a l'emmagatzematge. En el cas de ser utilitzats com a envasos d'emmagatzematge de productes líquids, en produir-se una petita esquerda que connectés la superfície interna i externa, l'àmfora començaria a perdre el seu contingut. Això no passaria, però, si a l'interior tingués un recobriments de resina que actués com a impermeabilitzador, com presenten molts dels individus amforals recuperats en derelictes i centres receptors. Però es tracta d'un material més adequat a les característiques del transport, sobretot marítim, d'època romana, ja que en produir-se fortes tensions, el material no es trencaria de forma instantània i catastròfica, sinó que l'energia de fractura seria aturada o disminuïria en topant amb la porositat i les inclusions.

Els canvis formals i tecnològics que experimenta la producció de contenidors ceràmics al nord-est peninsular a principis del s. I aC, amb la substitució dels tipus de tradició ibèrica pels tipus de tradició romana pot respondre, doncs, no només a la introducció de nous valors culturals, sinó també a un canvi de les característiques utilitàries de les àmfores, que requereixen d'uns dissenys i d'unes propietats mecàniques determinades.

AGRAÏMENTS

Agraïm el finançament d'aquesta recerca a la DGIMCT i la FEDER per la subvenció dels projectes PRODIFAN (BHA2003-04589) i BHA2000-0727-C03-02), al DGCDURSI per la concessió d'una beca FI a Evanthia Tsantini i a Llorenç Vila, i a la Universitat de Barcelona per la concessió d'una beca en la Recerca i la Docència a Verònica Martínez, que han permès la realització d'aquest treball. Agraïm al Servei d'Arqueologia de la

Generalitat de Catalunya, al Museu d'Història de la Ciutat de Barcelona i als arqueòlegs col·laboradors, la prestació dels materials arqueològics necessaris per realitzar aquestes anàlisis.

BIBLIOGRAFIA

AGUELO, J., CARRERAS, C., HUERTAS, J. 2006, L'ocupació altimperial del solar del mercat de Santa Caterina, un possible centre productor ceràmic, *QUARHIS - Quaderns d'Arqueologia i d'Història de la Ciutat de Barcelona*, època II 2, 60-73.

ANTEAS 1993, *Rapport Fouille de Sauvetage n° 001714. Réalisé du 18.12 au 25.04.1993. Site: Port La Nautique Narbonne (Aude)*, ANTEAS, Association Narbonnaise de Travaux et d'Études Archéologiques Sub-aquatiques, Narbonne.

ASHBY, M. F. 2003, *Materials selection in mechanical design*, 2ª ed., Butterworth Heinemann, Oxford.

BERTHAULT, F. 2000, *Aux origines du vignoble bordelaise il y a 2000 ans, le vin à Bordeaux*, Éditions Féret, Burdeus.

BRONITSKY, G. 1986, The use of materials science techniques in the study of pottery construction and use, in Shiffer (ed.), *Advances in archaeological method and theory* 9, Academic Press, Orlando, 209-276.

BUXEDA i GARRIGÓS, J. 1999, Alteration and Contamination of Archaeological Ceramics: The perturbation problem, *Journal of Archaeological Science* 26, 295-313.

BUXEDA, J., CAU, M. A., GURT, J. M., Tuset, F. 1995, Anàlisi tradicional y anàlisi arqueomètric en el estudio de las cerámicas comunes de época romana, *Ceràmica Comuna Romana d'època Alt-Imperial a la Península Ibèrica. Estat de la qüestió, Monografies Emporitanes VIII, Empúries*, 39-60.

BUXEDA i GARRIGÓS, J., GURT i ESPARRAGUERA, J.M. 1998, La caracterització arqueomètrica de les àmfores de Can Peixau (Badalona) i la seva aportació al coneixement de la producció de Pascual 1 al territori de Baetulo, *El vi a l'Antiguitat. Economia, producció i comerç al Mediterrani Occidental*, Monografies Badaloneses 14, Museu de Badalona, Badalona, 193-217.

BUXEDA i GARRIGÓS, J., MARTÍNEZ FERRERAS, V., VILA SOCIAS, L. en premsa, Les primeres produccions d'àmfores romanes a la Tarraconense. Per una arqueometria del canvi tecnològic, de la producció i del consum, in López Mullor, A. (ed.), *La producció i el comerç de les àmfores de la província Tarraconense*, Museu d'Arqueologia de Catalunya.

CASAS BLASI, J., MARTÍNEZ FERRERAS, V. 2006, El taller ceràmic d'època romana del carrer Princesa de Barcelona. Estudi arqueològic de les restes i estudi arqueomètric del material ceràmic, *QUARHIS, Quaderns d'Arqueologia i d'Història de la Ciutat de Barcelona* 2, 36-59.

- CHAPON, P., BARDOT, A., CANUT, V., ÉCARD, P., MARTÍNEZ, V., SÁNCHEZ, C. 2006, *Boulevard de Malard, une vaste zone d'aménagement antique en limite d'un système fluvio-lagunaire à Narbonne (Aude)*, Dossier INRAP n°CN2005/268, Institut National de Recherches Archéologiques Préventives Méditerranée.
- CODEX SCCL 1992, Excavacions a l'autopista A-19, variant Mataró. Tres exemples del poblament del Maresme: De l'ibèric Ple a la romanització, *Laietània* 7, 157-189.
- COMAS i SOLA, M. 1985, *Baetulo. Les Àmfores*, Museu de Badalona, Badalona.
- COMAS i SOLÀ, M., MARTÍN i MENÉNDEZ, MATA-MOROS, D., MIRÓ, J. 1998, Un tipus d'amfora Dressel 1 de producció laietana, in Mayer, M., Nolla, J.M., Pardo, J. (eds.), *De les estructures indígenes a l'organització provincial romana de la Hispania Citerior, Ítaca. Anexos* 1, Barcelona, 151-161.
- FEATHERS, J.K. 1989, Comments. Effects of tempering on strength of ceramics: response to Bronitsky and Hamer, *American Antiquity* 54, 3, 579-588.
- FOURNIER, P. 1990, Un estudio sobre arqueología experimental: efectos de acabados de superficie en la resistencia a la ruptura de cuerpos cerámicos, *Boletín de Antropología Americana del Instituto Panamericano de Geografía e Historia* 21, 103-128.
- GARCÍA ROSELLÓ, J., GURRI i COSTA, E. 1996, Les imitacions laietanes d'amfores itàliques a la zona central de la comarca del Maresme en època tardo-republicana, *Annals de l'Institut d'Estudis Gironins* 36, Girona, 397-423.
- GARCÍA, D., VALLET, L. 2002, L'espace portuaire de Lattes antique, *Lattara* 15, Lattes.
- GIANFROTTA, P.A., POMEY, P. 1981, *Archeologia subacquea. Storia, techniche, scoperte e relitti*, Milà.
- KILIKOGLU, V., VEKINIS, G., MANIATIS, Y. 1995, Toughening of ceramics earthenwares by quartz inclusions: an ancient art revised, *Acta Metallurgica et Materialia* 43, 2959-2965.
- KILIKOGLU, V., VEKINIS, G., MANIATIS, Y., DAY, P.M. 1998, Mechanical performance of quartz-tempered ceramics: Part I, Strength and toughness, *Archaeometry* 40, 261-277.
- KILIKOGLU, V., VEKINIS, G. 2002, Failure prediction and function determination of archaeological pottery by Finite Elemental Analysis, *Journal of Archaeological Science* 29, 1317-1321.
- KINGERY, W.D. 2001, The design process as a critical component of the Anthropology of Technology, in Schiffrer (ed.), *Anthropological perspectives on technology*, University of Mexico Press, Albuquerque, 123-138.
- LÓPEZ MULLOR, A. 1993, Los talleres anfóricos de Darró (Vilanova i la Geltrú, Barcelona). Notícia de su hallazgo, *Empúries* 48-50, II, 64-76.
- LÓPEZ MULLOR, A., MARTÍN i MENÉNDEZ, A. 2006, La production d'amphores Gréco-italiques, Dressel 1, Lamboglia 2 et Tarraconense 1 à 3 en Catalogne, typologie et chronologie, *SFECAG 2006*, 441-460.
- LÓPEZ MULLOR, A., MARTÍN i MENÉNDEZ, A. (en premsa), Tipologia i datació de les àmfores tarraconenses produïdes a Catalunya. *Jornades d'Estudi. La producció i el comerç de les àmfores de la província Tarraconensis. Homenatge a Ricard Pascual Guasch*, Museu d'Arqueologia de Catalunya, Servei de Patrimoni Arquitectònic Local, Generalitat de Catalunya, Diputació de Barcelona, Barcelona.
- MABRY, J., SKIBO, J.M., MICHAEL, B., SCHIFFER, B., KVAMME, K. 1988, Use of a falling-weight tester for assessing ceramic impact strength, *American Antiquity* 53-4, 829-839.
- MARTÍNEZ FERRERAS, V. 2008, Estudi arqueomètric i arqueològic de la producció i difusió d'amfores vinàries de la zona central i sud de la costa catalana durant els segles I aC i I dC. Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona. Barcelona.
- MARTÍNEZ FERRERAS, V., BUXEDA i GARRIGÓS, J., MARTÍN, MENÉNDEZ, A. 2005, L'évolution des premières amphores romaines produites à Cabrera de Mar (Catalogne) d'après leur caractérisation archéométrique, *SFECAG 2005*, 391-401.
- MARTÍNEZ FERRERAS, V., BUXEDA i GARRIGÓS, J., LÓPEZ MULLOR, A. 2006, La caractérisation archéométrique des amphores vinaires produites à l'atelier du Barri Antic (Sant Boi de Llobregat), *SFECAG 2006*, 599-610.
- MARTÍNEZ FERRERAS, V., BUXEDA i GARRIGÓS, J., GURT i ESPARRAGUERA J.M., KILIKOGLU, V. 2007, Archaeometric characterisation of roman wine amphorae from Barcelona (Spain), *Archaeometric and Archaeological Approaches to Ceramics, BAR International Series*, 1691, 113-119.
- MIRÓ, J. 1988, *La producción de ánforas romanas en Catalunya. Un estudio sobre el comercio del vino de la Tarraconense (siglos I aC.-I dC.)*, BAR International Series 473, Oxford.
- NEUPERT, M. A. 1994, Strength testing archaeological ceramics: A new perspective, *American Antiquity* 59-4, 709-723.
- NIETO, X., RAURICH, X. 1998, El transport naval de vi de la Tarraconense, *El Vi a l'Antiguitat. Economia, Producció i Comerç al Mediterrani Occidental*, Monografies Badalones 14, Museu de Badalona, Badalona, 113-137.
- O'BRIEN, M.J., HOLLAND, T.D., HOARD, R.J., FOX, G.L. 2003, Evolutionary implications of design and performance characteristics of prehistoric pottery, in O'Brien, M. J., Lyman, R. C. (eds.), *Style, Function, transmission, evolutionary archaeological perspectives*, University of Utah Press, 199-226.
- REVILLA CALVO, V. 1995, *Producción cerámica, viticultura y propiedad rural en la Hispania Tarraconensis (siglos I A.C.-III D.C.)*, Cuadernos de Arqueología 8, Edicions Servei del Llibre L'Estaquiro, Barcelona.
- SÁNCHEZ, C. 2003, *Le mobilier céramique de Narbonne et sa région (fin Ile. s. av. n. è. /Ier. s. de n. è.)*. Pour une approche du processus de romanisation, Tesis Doctoral, Université Lumière, Lyon II.

- SCHIFFER, M.B., SKIBO, J.M. 1987, Theory and experiment in the study of Technological change, *Current Anthropology* 28, 5, 595-622.
- SCHIFFER, M.B., SKIBO, J.M. 1997, The explanation of artifact variability, *American Antiquity* 62, 1, 27-50.
- SCHIFFER, M.B., SKIBO, J.M., GRIFFITHS, J.L., HOLLENBACK, K.L., LONGACRE, W.A. 2001, Behavioral archaeology and the study of technology, *American Antiquity* 66, 4, 729-738.
- SCHWEDT, A., MOMMSEN, H., ZACHARIAS, N., BUXEDA, J. 2006, Analcime crystallization and compositional profiles-comparing approaches to detect post-depositional alterations in archaeological pottery, *Archaeometry* 48, 2, 237-251.
- SILLAR, B. 2000, Dung by preference: The choice of fuel as an example of how Andean pottery production is embedded within wider technical, social, and economic practices, *Archaeometry* 42, 1, 43-60.
- SILLAR, B., TITE, M.S. 2000, The challenge of 'Technological choices' for materials science approaches in archaeology, *Archaeometry* 42, 1, 2-20.
- SKIBO, J.M., SCHIFFER, M.B. 2001, Understanding Artifact Variability and Change: A Behavioral framework, in Schiffer (ed.), *Anthropological perspectives on technology*, University of Mexico Press, Albuquerque, 139-149.
- STEPONAITIS, V. P. 1984, Technological studies of prehistoric pottery from Alabama: physical properties and vessel function, in Ian van der Leeuw, S.E., Pritchard, A.C. (eds.), *The many dimensions of pottery*, University of Amsterdam, Amsterdam, 79-127.
- TCHERNIA, A. 1971, Les amphores vinaires de Tarraconense et leur exportation au début de l'Empire, *Archivo Español de Arqueología* 44, 38-85.
- TCHERNIA, A. i ZEVI, F. 1972, Amphores vinaires de Campanie et de Tarraconaise à Ostia, *Recherches sur les amphores romaines*, Roma, 35-68.
- TITE, M.S. 1999, Pottery production, distribution and consumption – The contribution of the physical sciences, *Journal of archaeological method and theory* 6, 3, 181-233.
- TITE, M.S., KILIKOGLU, V., VEKINIS, G. 2001, Review Article. Strength, toughness and thermal shock resistance of ancient ceramics, and their influence on technological choice, *Archaeometry* 43, 3, 301-324.
- TREMOLEDA i TRILLA, J. 2000, *Industria y artesanado cerámico de época romana en el nordeste de Cataluña, Época augustea y altoimperial*, BAR Internacional Series 835. Oxford.
- TSANTINI, E. 2007, Estudi de la producció i la distribució d'àmfores ibèriques en el nord-est peninsular a través de la seva caracterització arqueomètrica, Tesi Doctoral, Universitat de Barcelona, Barcelona.
- TSANTINI, E., BUXEDA, J., GURT, J.M., MADRID, M., MIÑARRO, M. 2005a, Amphorae production in the pre-Roman north east of the Iberian Peninsula, and evidence of trade to the Balearic Islands, *Understanding people through their pottery*, Série monogràfica del Instituto Português de Arqueologia, Lisboa, 279-289.
- TSANTINI, E., BUXEDA i GARRIGÓS, J., GURT i ESPARRAGUERA, J.M. 2005b, Estudi arqueomètric de les àmfores ibèriques de Puig Castellar (Santa Coloma de Gramenet), *Actes del XIII Col·loqui Internacional d'Arqueologia de Puigcerdà*, Puigcerdà, 312-318.
- VEKINIS, G., KILIKOGLU, V. 1998, Mechanical performance of quartz-tempered ceramics: Part II, hertzian strength, wear resistance and applications to ancient ceramics, *Archaeometry* 40, 2, 281-292.
- VILA i SOCIAS, L., BUXEDA i GARRIGÓS, J., TREMOLEDA i TRILLA, J. 2005, Caracterització arqueomètrica de la producció d'àmfores Pascual 1 i Dressel 7/11 del taller romà de Llafranc (Palafrugell, Catalunya), *SFECAG 2005*, 761-769.
- VILA i SOCIAS, L., BUXEDA i GARRIGÓS, J., TREMOLEDA i TRILLA, J. 2006, Amphores romaines du Haut-Empire: Caractérisation Archéométrique de l'atelier du Collet de Sant Antoni de Calonge (Girona, Espagne), *SFECAG 2006*, 691-702.
- VILA i SOCIAS, L., MARTÍNEZ FERRERAS, V., BUXEDA i GARRIGÓS, J., KILIKOGLU, V. en premsa, Differences in technological and functional models of contemporary amphorae production in neighbouring areas, *Proceedings of the International Symposium on Archaeometry (Quebec, May 2006)*, Publications in Archaeometry, Université de Laval, Québec.
- VILA i SOCIAS, L., HEIN, A., KILIKOGLU, V., BUXEDA i GARRIGÓS, J. 2007, Disseny anforal i canvi tecnològic al voltant del canvi d'Era: l'aportació de l'anàlisi d'elements finits, *Empúries* 55, 27-38.

