

**Canvi tecnològic, disseny  
ceràmic i simulació  
virtual: el cas de les  
àmfores romanes, o la  
mida és realment tan  
important?**

Llorenç Vila Socias

*Mayurqa* (2009-2010), 33:  
161-174

# CANVI TECNOLÒGIC, DISSENY CERÀMIC I SIMULACIÓ VIRTUAL: EL CAS DE LES ÀMFORES ROMANES, O LA MIDA ÉS REALMENT TAN IMPORTANT?

Llorenç Vila Socias\*

**RESUM:** Per què un objecte es va construir d'una manera determinada i no d'una altra? Un mètode per tractar aquesta qüestió és l'anàlisi d'elements finits (AEF), que permet predir el comportament d'un artefacte en ser sotmès a unes forces d'ús determinades. L'AEF es basa en l'avaluació conjunta de les propietats mecàniques del material amb què està fet l'artefacte i del disseny que té. Il·lustrem el mètode amb el canvi de les àmfores ibèriques als primers tipus d'àmfora romana produïda a la *Tarraconensis*.

**PARAULES CLAU:** Canvi tecnològic, anàlisi d'elements finits, àmfores, producció, consum.

**ABSTRACT:** Why was an artefact made in one way and not another? Finite Element Analysis (FEA) provides a reliable approach to this question. FEA enables us to predict the mechanical behaviour of an artefact under any kind of bearing conditions by taking into consideration the mechanical properties of the material from which the artefact is made and the design of its shape. This approach is illustrated by a case-study: the change from Iberian amphorae to the first Roman amphorae designs produced in the *Tarraconensis* area.

**KEYWORD:** Technological change, Finite Element Analysis, amphorae, production, consumption.

## INTRODUCCIÓ

L'estudi de la tecnologia i dels canvis que ha experimentat al llarg del temps i de l'espai actualment són objecte d'estudi de moltes disciplines, com ara l'arqueologia, l'enginyeria, la filosofia i l'antropologia (veg. Schiffer 2001 i les referències que recull). En tots els casos, alguns dels interrogants més fascinants són: per què un objecte es va construir —o es construeix— d'una manera determinada i no d'una altra? Per què varia el disseny d'un artefacte al llarg del temps? Hi ha dissenys que s'adeqüen més bé que d'altres a una funcionalitat en concret? Fins a quin punt pot ser aquesta la raó per la qual canvia?

En aquest treball suggerim que l'aplicació de l'anàlisi d'elements finits (AEF) pot ajudar a dilucidar aquest tipus de qüestions. L'aplicació d'aquesta tècnica d'anàlisi, desen-

\* *Cultura Material i Arqueometria (ARQUIB)*. Facultat de Geografia i Història, Departament de Prehistòria, Història Antiga i Arqueologia. Universitat de Barcelona. Carrer de Montalegre, 6, 08001. Barcelona, Espanya. Adreça de correu electrònic: [lvila@catalonia.net](mailto:lvila@catalonia.net)

volupada originàriament per l'enginyeria, permet conèixer en quines circumstàncies es produiria el trencament d'un artefacte. L'AEF parteix de la recreació virtual de l'artefacte que pretén analitzar. Posteriorment, mitjançant una simulació per ordinador, l'artefacte és sotmès a un seguit de forces que suposadament hauria hagut de suportar en l'ús quotidià. Els resultats mostren quines són les parts més febles del disseny i on s'haurien produït les fractures en el context d'una activitat determinada. L'avaluació diacrònica d'aquestes dades permet suggerir si els canvis en la tipologia d'un artefacte poden ser conseqüència d'un intent premeditat per evitar aquests punts febles.

El discurs està centrat en el cas de les ceràmiques. No obstant això, la teoria de fons i l'AEF poden tenir una aplicació gairebé inabastable en el camp de l'arqueologia (des de ceràmiques fins a estructures complexes, com ara vaixells, edificis, o, fins i tot, fòssils animals).

En aquest treball, il·lustrem l'aplicació de l'AEF amb el canvi del disseny de les primeres àmfores romanes produïdes en el litoral de la província *Tarraconensis* en el canvi d'era (Dressel 1, Laietana 1 / Tarraconense 1, Pascual 1).

#### L'ANÀLISI D'ELEMENTS FINITS (AEF). UNA APROXIMACIÓ INTUÏTIVA

L'AEF és una tècnica de càlcul numèric desenvolupada per estimar el grau de deformació que pot experimentar un objecte abans de l'aparició d'una fractura i, d'aquesta manera, predir les circumstàncies sota les quals es produiria el trencament (Kilikoglou, Vekinis 2002; Zienkiewicz, Taylor 1994). Vegem la idea subjacent de l'AEF i en què es basa per efectuar aquesta predicció.

Imaginem un objecte qualsevol. Si li aplicam una força amb les mans, aquest objecte patirà una deformació, és a dir, un canvi de forma (tot i que, tal vegada, no sigui perceptible a la vista). En qualsevol cas, aquesta deformació desapareixerà en el moment en què hi deixem d'aplicar la força i l'objecte recobrarà la forma original. Ara bé, si la força que li aplicam és suficientment gran, l'objecte pot patir una deformació irreversible i, per tant, no desapareixerà en deixar d'aplicar-hi la força. Si anam més enllà i hi aplicam una força encara més gran, aquesta deformació irreversible pot fer aparèixer una fractura i que l'estructura de l'objecte es trenqui completament.

Sembla clar, doncs, que l'aparició d'una fractura depèn, en primera instància, del tipus de força aplicada, però també del material del qual està fet l'objecte. Així, per exemple, sota unes mateixes circumstàncies, una ampolla de plàstic tindrà un grau més elevat de deformació abans de la fractura que no pas una de ceràmica. Per predir quan es produirà la fractura d'un objecte és necessari, doncs, conèixer algunes de les propietats físiques del material que volem analitzar. En el cas de les ceràmiques arqueològiques, les propietats que es requereixen són el mòdul de Young i la raó de Poisson (Kilikoglou, Vekinis 2002).

Tanmateix, les propietats físiques del material no són suficients per saber quan es produirà una fractura en un objecte. La geometria específica és igualment important, o, fins i tot, més, ja que també condiona la resistència a les fractures. Una ceràmica que tingui unes parets més gruixudes, per exemple, serà més resistent que no una altra que les tingui més primes (i això mateix és vàlid per a l'ampolla de plàstic). Per aquesta raó, l'AEF calcula, a partir de les propietats físiques i la forma que té, la deformació que experimenta un objecte quan és sotmès a una força determinada.

Les forces aplicades a l'objecte, així com els càlculs necessaris per saber el moment en què es produirà el trencament, es fan mitjançant una simulació per ordinador.

Actualment hi ha programes diversos per fer aquestes anàlisis i nosaltres hem fet servir el paquet informàtic Ansys 7.0 (Madenci, Guven 2005).

La primera passa en l'AEF és crear per ordinador un model acurat de l'objecte que pretenem analitzar. Posteriorment, dividim aquest model en un nombre determinat de petites unitats (els elements finits) que estan connectades entre si i que poden tenir formes geomètriques diverses (paral·lelepípede, piràmide, etc.). A la figura 1 il·lustrem les passes que hem seguit per crear un model tridimensional d'elements finits; en aquest cas, d'una àmfora tipus Pascual 1.

Per completar el model del nostre objecte, les propietats físiques del material de què està fet —les hem calculades prèviament— són atribuïdes a cada un dels elements finits. D'aquesta manera, obtenim un model que no solament representa la forma específica de l'objecte, sinó que també les propietats físiques i, per tant, la capacitat específica que té de deformar-se.

Una vegada que hem creat el model, la darrera passa és aplicar, mitjançant una simulació per ordinador, les forces en el context en què volem avaluar el comportament de l'objecte. La interpretació dels resultats és força senzilla: si la deformació que experimenta l'objecte és superior a la deformació que és capaç de suportar el material, hem d'entendre el resultat com una fallida de l'objecte perquè s'ha trencat.

A continuació il·lustrarem l'aplicació d'aquesta anàlisi amb un cas d'estudi arqueològic.

#### EL CAS DE LES ÀMFORES ROMANES

Aquest cas d'estudi tracta del canvi del disseny de les primeres àmfores romanes produïdes en el litoral de la província romana *Hispania Citerior* (anomenada *Tarraconensis* després de la reforma augustal; actualment correspondria aproximadament als territoris litorals de Catalunya) (Vila et al. 2008).

Entre els segles I aC i I dC, bona part de l'activitat d'aquests territoris costaners es va centrar a produir vi i exportar-ne a gran escala, i també les àmfores emprades per transportar-lo. Els primers indicis d'una producció local d'àmfores romanes daten de mitjan el segle I aC, i corresponen a uns dels dissenys itàlics per excel·lència: el tipus Dressel 1. Poc temps després, a partir del darrer terç del mateix segle, aquest tipus és substituït per dos dissenys típics de l'àrea catalana: el tipus Laietana 1 (també anomenada *Tarraconense 1*) i el tipus Pascual 1. El final de la producció de l'àmfora Laietana 1 / *Tarraconense 1* se situa als primers anys del segle I dC, mentre que el tipus Pascual 1 es mantindrà com a contenidor de vi principal fins ben entrat el primer terç de segle. En aquest sentit, les dades del registre arqueològic mostren també més distribució espacial per a aquest darrer tipus (Miró 1988; Revilla 1995; Tremoleda 2000).

Tradicionalment, els diversos dissenys han estat interpretats com a símbols destinats als grups consumidors, de manera que la forma d'una àmfora informaria sobre alguna propietat del producte que conté (tipus de vi o qualitats diferents, la provenença, etc.). Certament, seria ridícul negar el valor simbòlic que tenen els artefactes en qualsevol context. No obstant això, l'AEF permet plantejar l'estudi tipològic des d'una perspectiva completament diferent. Les àmfores són ceràmiques dissenyades específicament per ser emprades com a envasos de transport (fonamentalment naval) i emmagatzematge. En conseqüència, gran part de l'èxit d'aquests envasos rau en la capacitat que tenen per suportar les condicions que es generen durant aquestes activitats. L'aplicació de l'AEF en aquest

cas concret ens permetrà saber si els tipus d'amforals romans s'haurien comportat d'una manera similar si haguessin estat emprats com a envasos de transport, és a dir, si els tres dissenys tindrien les mateixes «competències tècniques». A partir d'aquesta anàlisi sabrem si, en les mateixes circumstàncies, uns tipus d'àmfora haurien resistit més que d'altres les condicions del transport o de l'emmagatzematge.

Ara bé, el canvi del disseny de les àmfores romanes només és una part de la història. Aquestes àmfores romanes substitueixen els amforals ibèrics que varen ser produïts en aquests territoris i distribuïts arreu de la Mediterrània fins al final de la segona guerra Púnica (Tsantini 2007). Es tracta, doncs, d'un doble procés de canvi. D'una banda, els tipus romans substitueixen els dissenys ibèrics procedents de clara tradició púnica i, de l'altra, es produeix una substitució diacrònica entre els mateixos tipus amforals romans. És per això que, per ampliar la perspectiva de l'estudi, aplicarem l'AEF als tres dissenys romans (Dressel 1, Laietana 1 / Tarraconense 1, Pascual 1) i també a un disseny representatiu de les àmfores ibèriques precedents (figura 2).

Per fer una primera aproximació a les competències tècniques dels envasos, hem simulat les mateixes activitats sobre els quatre tipus. Com que la intenció és avaluar exclusivament la influència del disseny en el comportament mecànic de les àmfores, hem mantingut constats tant les forces aplicades com les propietats físiques de la ceràmica. És a dir, l'única variable que canvia és la forma de l'àmfora. Dit amb altres paraules, és com si féssim la simulació sobre alguns tipus d'àmfora, però totes produïdes en un mateix taller, amb les mateixes matèries primeres i emprant la mateixa tecnologia de producció. En aquest cas, les propietats materials que es mantenen constants són el mòdul de Young (15 GPa), la raó de Poisson (0.27) i la densitat de la ceràmica ( $2000 \text{ kg/m}^3$ ) (taula 1). La màxima deformació que pot experimentar un material d'aquestes característiques és de 0,1%. Per tant, hem d'entendre que les forces que provoquin una deformació superior a aquest límit implicarien el trencament complet de l'envàs.

Les forces simulades sobre els quatre models representen algunes de les activitats més habituals en l'ús d'aquestes àmfores:

**Simulació 1.** En primer lloc, hem simulat les forces que es generarien en l'alçament dels envasos. En aquesta simulació, hem considerat que els envasos estarien buits i que l'alçament s'efectuaria de manera simultània per a les dues nanses (figura 3a). En aquest cas, les forces aplicades equivalen al pes dels envasos (taula 1).

**Simulació 2.** Ara tornam a simular l'alçament dels envasos per les nanses, però ara consideram que són plens d'aigua. En aquest cas, les forces aplicades equivalen al pes dels envasos més el pes del contingut (taula 1).

**Simulació 3.** En aquesta simulació, hem tingut en compte que, especialment en el cas de les àmfores romanes, les evidències arqueològiques indiquen una estiba dels envasos dins els vaixells formant capes o fileres. Per aquesta raó, hem simulat les forces que hauria d'haver suportat una àmfora situada a la filera inferior d'una càrrega (figura 3b). Les forces aplicades corresponen a 1000 N (aproximadament 100 kg) a cada un dels punts on descansaria la filada superior. Aquesta força és equivalent a un carregament de vuit fileres, amb un pes individual de 50 kg per àmfora. Per bé que aquesta quantitat de fileres comportaria un vaixell de grans dimensions —cosa que no sembla que sigui el cas de les naus que transportarien aquestes àmfores des del litoral català, almenys les que es varen enfonsar) (Nieto, Raurich 1998)— hem de tenir en compte que la simulació representa una força estàtica. Per tant, la realitat de la navegació, amb el moviment constant provocat per l'onatge, podria imposar unes condicions encara més severes. En aquest sentit, hem de precisar que tampoc no hi hem afegit els impactes laterals que provocarien els envasos d'una

mateixa filera durant el moviment del vaixell i que també farien augmentar la probabilitat hi apareguessin fractures.

Els resultats de les tres simulacions apareixen il·lustrats en la figura 4. Pel que fa a la simulació 1, és evident que la màxima deformació experimentada en l'alçament per les nanses no resulta crítica en cap tipus d'àmfora, la qual cosa confirma uns resultats que eren d'esperar. L'àmfora que patiria més deformació seria la ibèrica, tot i que amb un valor màxim (0.005) situat molt per sota de la línia discontinua que representa el límit establert per les propietats del material i, per tant, lluny de l'aparició d'una fractura. Per part seva, les tres àmfors romanes tenen un comportament molt similar, molt allunyat també del perill de trencament. En conclusió, i com era d'esperar, els quatre dissenys d'àmfora podrien haver estat alçats per les dues nanses sense que aquesta activitat hagués provocat cap fractura crítica per a la integritat dels envasos.

Hem obtingut uns resultats similars en el cas de l'alçament de l'àmfora plena. Aquí torna a ser l'àmfora ibèrica la que pateix més deformació, tot i que tampoc no hauria suposat un perill per a la integritat de l'envàs. A la figura 4 podem observar clarament que el valor de deformació màxima d'aquesta àmfora (0.019) està molt allunyat, no solament del valor límit, situat en 0,1% (línia discontinua), sinó també de l'interval crític (àrea grisa), que es podria situar de manera poc conservadora en un 70% del límit de màxima deformació (Kilikoglou i Vekinis 2002). Pel que fa a les àmfors romanes, els tres dissenys tornen a tenir un comportament molt semblant. La màxima deformació que experimenten els tres tipus està molt allunyada del límit de deformació i hem d'entendre, per tant, que l'alçament d'aquests envasos plens per les nanses no hauria suposat en cap cas l'aparició de fractures crítiques. Aquesta activitat no sembla, doncs, que permeti explicar la modificació del disseny de les àmfors romanes.

Cal destacar que la diferència de comportament entre l'àmfora ibèrica i les romanes es fa més evident ara del que ho era en la simulació 1. L'explicació d'aquest fet és la següent. La part de l'àmfora que pateix més estrès (i, per tant, més deformació) en ser alçada per les nanses és la mateixa en els quatre casos: els punts d'unió de les nanses i el cos de l'àmfora. Així doncs, l'àmfora ibèrica experimenta més deformació perquè té les nanses més petites i circulars, i, per tant, els punts d'estrès estan molt a prop; tot el contrari del que succeeix amb el tipus Dressel 1. Aquesta àmfora és la que té les nanses més allargades, cosa que es tradueix en més bona distribució de l'estrès generat durant l'alçament. Evidentment, aquestes diferències s'accentuen en el cas dels envasos plens, donat que l'estrès que es genera és més gran (el doble, en el cas de la Dressel 1 i més del triple, en la ibèrica). En qualsevol cas, no podem considerar aquestes diferències significatives, ja que no implicarien cap perill per a la integritat física de les àmfors.

Uns resultats força diferents són els obtinguts en la simulació 3. Com podem veure a la figura 4, la màxima deformació que experimenta l'àmfora ibèrica (0.176) se situa un 76% per sobre del límit establert per les propietats físiques de la ceràmica. Aquest resultat indica que les condicions d'apilament simulades haurien provocat clarament la fallida de l'àmfora ibèrica. Ara bé, la interpretació d'aquest resultat necessita algunes precisions. Una és respecte de les propietats físiques de la ceràmica que han estat atribuïdes als elements finits. Tot i que aquestes propietats es poden trobar en algunes produccions d'àmfors ibèriques (Tsantini 2007), el que és cert és que són especialment freqüents entre les àmfors romanes (Vila et al. 2006; Vila et al. 2008). En aquest sentit, cal tenir en compte que la fàbrica de les àmfors ibèriques presenta diferències significatives respecte de les romanes. Mentre que les àmfors romanes es caracteritzen per tenir una fàbrica grollera, amb mides de desgredador de quars diferents, les àmfors ibèriques tenen una freqüència i

mida de desgreixador significativament més petita, cosa que s'hauria de traduir amb més resistència a la fractura (Kilikoglou et al. 1998). Igualment, desconeixem fins a quin punt aquestes àmfors ibèriques s'haurien estibat formant diverses fileres, cosa que sí que es constata en molts de vaixells carregats amb els tipus diversos d'àmfora romana. En qualsevol cas, de l'AEF desprenem que aquest tipus amforal no és un disseny adient per ser estibat en vàries capes dins un vaixell. Tot i això, té molta estabilitat per ser dipositat verticalment a terra i recolzat a un altre envàs similar, cosa que succeiria, per exemple, en el context d'una activitat d'emmagatzematge o en una estiba d'una sola filera.

A l'altre extrem d'aquest comportament, hi trobam els tipus Laietana 1 / Tarraconense 1 i Pascual 1. En aquests dos casos, la màxima deformació experimentada per les àmfors és pràcticament la mateixa (0.0499 i 0.048, respectivament), cosa que indica un comportament gairebé idèntic dels dos dissenys, malgrat la diferència considerable de mida. Els valors d'aquests dos dissenys són clarament inferiors al límit imposat pel material i, per tant, podem entendre que les forces provocades per l'apilament de les àmfors no haurien provocat el trencament de la filada inferior. En aquest sentit, és important destacar el fet que, en ambdós casos, l'estrès provocat per l'apilament es concentra exclusivament en els punts de contacte de les àmfors. La figura 6 ens ajuda a il·lustrar-ho. Aquesta imatge mostra la deformació que experimentaria una àmfora Pascual 1 situada a la filada inferior de la càrrega simulada. El grau de deformació queda representat per l'escala tèrmica situada a baix de l'àmfora. D'esquerra a dreta, apareix una gradació de colors, des de colors freds fins a colors càlids, que representen un augment progressiu en la deformació, de manera que el color blau intens situat a l'esquerra equival al grau mínim de deformació, mentre que el color vermell intens situat a la dreta representa tot el contrari. Podem observar que les parts de l'àmfora que patirien més estrès durant l'apilament queden limitades a una petita àrea al voltant dels punts de contacte amb la filada superior. Aquest estrès és de 5.9 MPa, en el cas de la Laietana 1 / Tarraconense 1, i de 5.66 MPa, en el cas de la Pascual 1, la qual cosa representa, respectivament, al voltant d'un 50% i un 48% del límit màxim de deformació, clarament inferior tant al límit marcat per la línia discontinua com a l'interval crític marcat de color gris.

Els resultats més sorprenents són els de l'àmfora Dressel 1. En primer lloc, podem observar que la deformació és molt superior a la dels altres dos tipus d'àmfora romana. Aquest resultat indica que el disseny itàlic s'adequa més malament a les condicions d'estiba simulades que els tipus posteriors Laietana 1 / Tarraconense 1 i Pascual 1. A més, el valor de deformació màxima (0.0864) se situa plenament en l'interval crític, molt pròxim al límit establert en 0,1%, i, per tant, en una zona on és altament probable que apareguin fractures crítiques.

L'explicació d'aquesta gran diferència de comportaments respecte de les altres àmfors romanes rau en la carena que uneix la panxa i el coll de l'àmfora Dressel 1. Aquesta carena dibuixa un angle marcat que provoca una gran concentració de l'estrès generat durant l'apilament de les àmfors. Aquesta concentració d'estrès causaria l'aparició de fractures, i la propagació posterior resultaria ràpidament en la fallida completa de l'àmfora, molt probablement des de les parts menys gruixudes al voltant de la carena, especialment on comença el coll. A diferència d'aquest disseny, els tipus posteriors Laietana 1 / Tarraconense 1 i Pascual 1 no tenen aquesta carena marcada, sinó un perfil molt més sinuós, la qual cosa facilita la distribució de la força provocada per la càrrega envers el pivot, la part més robusta de l'àmfora. Ara bé, fins a quin punt la constatació d'aquest taló d'Aquil-les va provocar la modificació de la carena en els dissenys posteriors?

Abans d'acabar cal dir que, a diferència del que succeeix amb l'àmfora ibèrica, les propietats físiques de la ceràmica que hem atribuït als elements finits representen una fàbrica típicament romana. Això, juntament al fet d'haver emprat molts d'elements finits per crear el model d'aquestes àmfors (taula 1), ofereix un grau d'exactitud molt elevat a la nostra simulació (Madenci, Guven 2005). Ara bé, l'AEF és una aproximació al que seria la realitat. En aquest sentit, és important tenir present que aquestes ceràmiques no presenten en absolut una microestructura uniforme, sinó que hi abunden les petites porositats i esquerdes microscòpiques, les quals concentren l'estrès i faciliten l'aparició de fractures. De fet, aquesta és una de les característiques principals d'aquestes produccions amforals, a conseqüència del grau d'estandardització baix que varen seguir en la preparació de les pastes argiloses (Vila et al. 2006; Vila et al. en premsa). Ateses aquestes característiques, és especialment recomanable que fem una interpretació conservadora dels resultats de l'AEF (Kilikoglou, Vekinis 2002). Per tant, és plausible pensar que els envasos es trencarien abans del que ens indica l'AEF. En qualsevol cas, els resultats obtinguts indiquen clarament que el disseny de la Dressel 1 hauria patit deformacions considerables, no solament en cas de ser estibada formant grans càrregues —com serien els casos dels derelictes de la Madrague de Giens o d'Albenga (Vila et al. en premsa)—, sinó, fins i tot, en el cas d'un carregament de poques fileres.

## CONCLUSIÓ

L'AEF és una tècnica que ofereix oportunitats il·limitades en els estudis arqueològics. A partir d'una simple representació gràfica de l'objecte que volem estudiar i de les propietats mecàniques bàsiques (paràmetres que poden ser obtingudes amb facilitat i a baix cost), podem plantejar explicacions acurades sobre les circumstàncies que haurien pogut provocar-ne la fallida. L'aplicació de l'AEF pot oferir dades noves sobre les variacions del disseny de molts dels artefactes i tecnologies documentats diàriament en el registre arqueològic. De fet, el seu camp d'aplicació depèn exclusivament de la nostra imaginació. Artefactes lítics, vaixells, estructures arquitectòniques, forns i un ampli ventall de tipus ceràmics són casos paradigmàtics per ser estudiats mitjançant l'AEF.

Els resultats obtinguts en el cas concret de les àmfors mostren que el tipus ibèric seria especialment estable, en cas de ser disposat verticalment i recolzat a altres envasos similars, però no seria un disseny adient per ser apilat en fileres. Igualment hem pogut comprovar que aquests envasos plens podrien haver estat alçats per les nanses sense cap perill de trencament i, per tant, sense necessitar un suport addicional al voltant.

Això a banda, hem constatat diferències significatives entre les tres àmfors romanes en el context d'una activitat àmpliament documentada en l'ús d'aquests envasos: l'apilament d'àmfors per al transport o l'emmagatzematge. Els resultats indiquen que un carregament d'àmfors Laietana 1 / Tarraconense o de Pascual 1 seria molt més segur que no pas un que estigui format per Dressel 1. La causa principal és l'existència d'una carena marcada en el cas de la Dressel 1, que facilita la concentració d'estrès i l'aparició de fractures. Al contrari, el perfil més sinuós dels tipus Laietana 1 / Tarraconense i Pascual 1 explica que el comportament d'aquests dos dissenys sigui similar i significativament millor que el del tipus precedent. La qüestió que continua oberta és el pes que haurien tingut aquestes diferències en el canvi de disseny de les àmfors. Igualment, aquests resultats plantegen interrogants nous. Per exemple, quina explicació hi ha en el fet que l'àmfora Pascual 1 tingui una difusió espacial i temporal més àmplia que la Laietana 1



/Tarraconense 1, tot i que aquesta darrera, gràcies a la mida que té, té un comportament mecànic idèntic i unes característiques que la fan més eficient com a envàs de transport (més bona relació pes/capacitat; menys quantitat de matèria primera i d'energia necessàries per fabricar una àmfora; més fàcil d'apilar; més aprofitament de l'espai d'una nau, etc.). Tal vegada la mida no és tan important en aquest context, o sí.

#### AGRAÏMENTS

Aquesta recerca ha estat finançada per la DGDURSI de la Generalitat de Catalunya, la DGIMCYT i els fons FEDER. Agraïm especialment a A. Hein, V. Kilikoglou i G. Vekinis la formació que ens han ofert i les facilitats que ens han donat en tot moment per emprar l'equipament del Laboratory of Archaeometry i de l'Advanced Ceramics Laboratory de l'Institute of Materials Science-NCSR «Demokritos» d'Atenes (Grècia). Igualment, agraïm a A. Martín els dibuixos arqueològics de les àmfores romanes i la discussió sobre el tema.

#### BIBLIOGRAFIA

- KILIKOGLU, V.; VEKINIS, G. (2002): «Failure prediction and function determination of archaeological pottery by finite element analysis». *Journal of Archaeological Science* 29 (núm. 11), pàg. 1317-1325.
- KILIKOGLU, V.; VEKINIS, G.; MANIATIS, Y.; DAY, P. M. (1998): «Mechanical performance of quartz-tempered ceramics. Part I, strength and toughness». *Archaeometry* 40 (núm. 2), pàg. 261-279.
- MADENCI, E.; GUVEN, I. (2005): *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using Ansys*. Springer, Nova York.
- MIRÓ i CANALS, J. (1988): *La producción de ánforas romanas en Catalunya. Un estudio sobre el comercio del vino de la Tarraconense (siglos I aC - I dC)*. Oxford: BAR International Series (473).
- NIETO PRIETO, F. J.; RAURICH i SANTALÓ, X. (1998): «El transport naval de vi de la Tarraconense». A: COMAS, M.; PADRÓ, P. (dir.). *El vi a l'antiguitat. Economia, producció i comerç al Mediterrani occidental*. Actes del II Col·loqui Internacional d'Arqueologia Romana, dies 6-9 de maig de 1998. Badalona: Monografies Badalonines, pàg. 113-137.
- REVILLA CALVO, V. (1995): *Producción cerámica, viticultura y propiedad rural en Hispania Tarraconensis (siglos I aC - III dC)*. Barcelona: Cuadernos de Arqueología (8).
- SCHIFFER, M. B. (ed.). (2001): *Anthropological Perspectives on Technology*. Amerind Foundation New World Studies Series (5). Albuquerque: University of New Mexico Press.
- TREMOLEDA i TRILLA, J. (2000): *Industria y artesanado cerámico de época romana en el nordeste de Catalunya (Época augustea y altoimperial)*. Oxford: BAR, International Series (835).
- TSANTINI, E. (2007): *Estudi de la producció i la distribució d'àmfores ibèriques al NE peninsular a través de la seva caracterització arqueomètrica*. PhD Thesis, TDX-0305107-083203. Barcelona: Universitat de Barcelona.
- VILA SOCIAS, L.; BUXEDA i GARRIGÓS, J.; TREMOLEDA i TRILLA, J. (2006): «Amphores romaines de l'haute-empire: caractérisation archéométrique de l'atelier du Collet de Sant Antoni de Calonge (Girona, Espagne)». *SFECAG*, pàg. 691-702.
- VILA SOCIAS, L.; HEIN, A.; KILIKOGLU, V.; BUXEDA i GARRIGÓS, J. (2008): «Disseny amforal i canvi tecnològic al voltant del canvi d'era: l'aportació de l'anàlisi d'elements finits». *Empúries* 55, pàg. 31-42.

- VILA SOCIAS, L.; BUXEDA i GARRIGOS, J.; KILIKOGLU, V.; HEIN, A. (en premsa). «Roman amphorae around the change of Era: production and consumption patterns in the north-east of the Iberian Peninsula». A: BIRO KATALIN, T. (ed.). *Vessels Inside and Outside*. Proceedings of the 9th European Meeting on Ancient Ceramics. Budapest: Hungarian National Museum.
- ZIENKIEWICZ, O. Z.; TAYLOR, R. L. (1994): *El método de los elementos finitos*. Vol. 1. Barcelona: CIMNE.

|                               | <b>Ibèrica</b> | <b>Dressel 1</b> | <b>Laietana 1</b> | <b>Pascual 1</b> |
|-------------------------------|----------------|------------------|-------------------|------------------|
| núm. d'elements finits        | 44582          | 39672            | 34248             | 50256            |
| mòdul de Young (GPa)          | 15             | 15               | 15                | 15               |
| raó de Poisson                | 0.27           | 0.27             | 0.27              | 0.27             |
| densitat (kg/m <sup>3</sup> ) | 2000           | 2000             | 2000              | 2000             |
| pes (kg)                      | 7.2            | 25.7             | 12.7              | 25.8             |
| capacitat (l)                 | 20             | 25.1             | 25                | 25.2             |

Taula 1. Quadre resum de les propietats dels models d'elements finits.

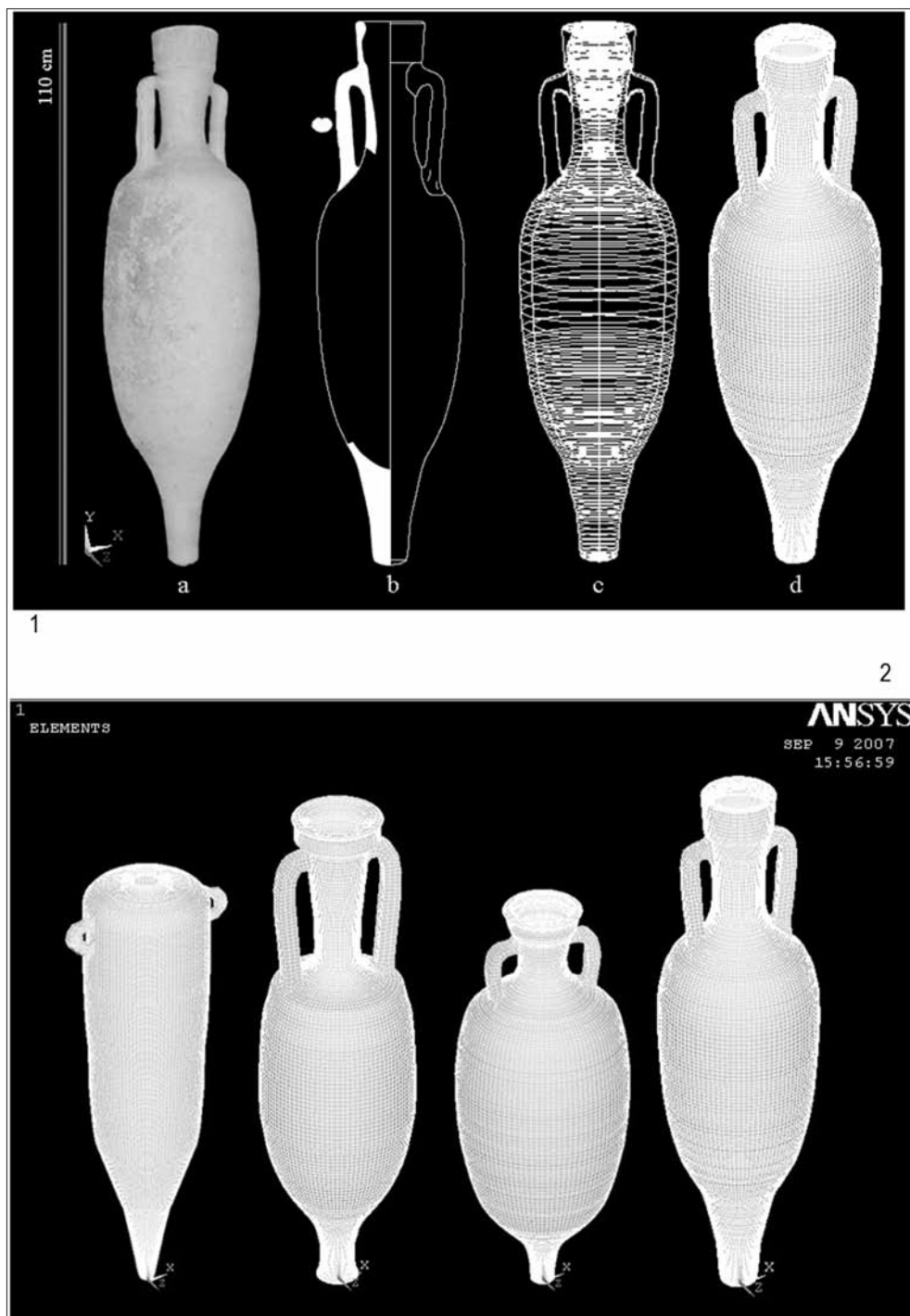


Fig. 1. (1) Seqüència de la creació d'un model d'elements finits. A: objecte real (àmfora Pascual 1); B: representació gràfica en 2D; C: model tridimensional; D: model tridimensional d'elements finits. La fletxa de la dreta representa 110 cm. (2) Models tridimensionals d'elements finits. D'esquerra a dreta: àmfora ibèrica, Dressel 1, Laietana 1 / Tarraconense 1, Pascual 1

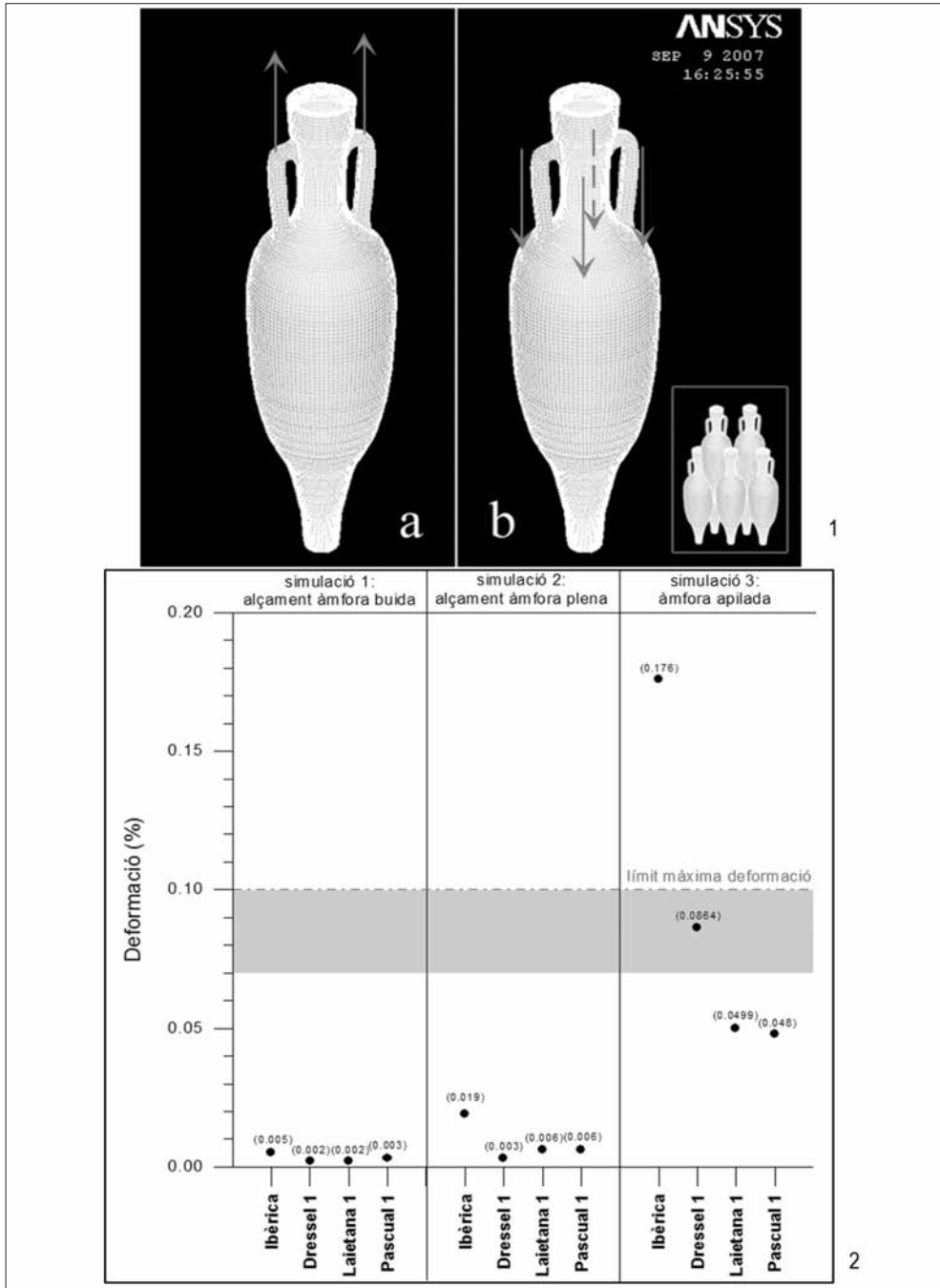


Fig. 2. (1) Forces simulades. A: alçament simultani per les dues nanses; B: àmfora situada en la filera inferior d'un carregament i amb el pivot fixat a terra (cada fletxa representa una força de 1000 N, equivalent a 100 kg). (2) Valors de màxima deformació en les tres simulacions. La línia discontinua representa el límit de màxima deformació establert per a les propietats del material. Els valors per sobre d'aquesta línia impliquen el trencament complet de l'envàs. L'àrea grisa representa l'interval crític on l'aparició de fractures esdevé altament probable

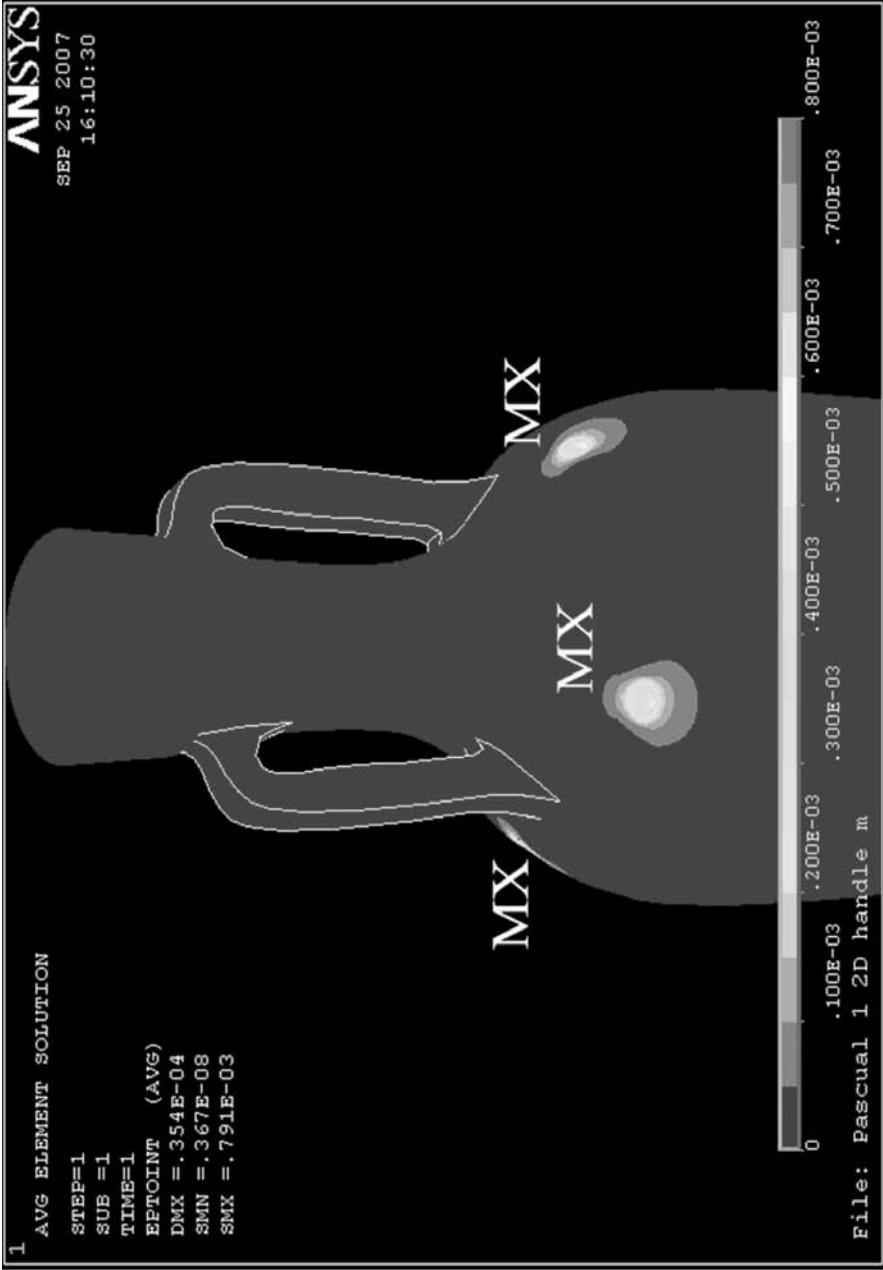


Fig. 3. Màxima deformació calculada a partir de l'AEF d'una àmfora Pascual 1 situada en la filera inferior de la càrrega simulada. La part on es concentra l'estrès apareix indicada amb MX.