

# *La lògica de l'espai construït al Sudest de la Península Ibèrica durant l'Argar (2200 – 1550 cal ANE): una aproximació metodològica.*

**Hendaya Serrano Gil**

Universitat Autònoma de Barcelona. MS en Prehistòria

## **RESUM**

L'estudi de l'arquitectura domèstica emprada per les societats del sud-est de la península Ibèrica durant l'Edat del Bronze requereix una sistematització de coneixements per esbrinar, en primer lloc, de quina manera construïen i sobretot quan temps invertien a construir els seus habitatges. És amb aquest objectiu que realitzem una proposta metodològica que conjuga disciplines com l'arquitectura, l'enginyeria i la mateixa restauració arqueològica sempre amb el propòsit de respondre aquestes qüestions fonamentals. Les respostes, al seu torn, ens proporcionen informació sobre el procés de producció i, per tant, ens aporten coneixement sobre les poblacions passades. Així doncs, proposem l'Anàlisi d'Elements Finitos com una eina eficaç de resolució per a les nostres formulacions.

## **Paraules Clau:**

Edat del Bronze, Argar, Arquitectura, Metodologia, Anàlisi d'Elements Finitos (FEA).

## **ABSTRACT**

The study of domestic architecture used by societies in the southeast of Iberia during Bronze Age requires a systematic and knowledges to determine firstly how to built and specially what time were invested to built their households. For this reason that we make a methodological approach which includes disciplines such as architecture, engineering or for example, archaeological restoration. Always the objective will be to answer these key issues wich also provide information about the process of production. Therefore provide information about lives of past populations. Thus, we propose the Finite Element Analysis (FEA) as an effective tool for solving our formulations.

## **Keywords:**

Bronze Age, Argar, Architecture, Methodology, Finite Element Analysis (FEA).

## **Introducció**

La problemàtica d'estudi que es planteja queda definida arqueològicament per les restes materials dipositades per la societat sent aquest únic testimoni del passat per resoldre qualsevol qüestió. Dit això, el nostre principal objec-

tiu serà esbrinar quina va ser la causalitat social que va provocar l'efecte observat materialment. Així doncs, l'objecte d'estudi al qual pretenem dirigir la nostra investigació seran les construccions arquitectòniques produïdes per la societat del sud-est de la penín-

sula Ibèrica durant l'Edat del Bronze (2200 – 1550 cal ANE) realitzant una proposta metodològica que permeti aproximar-nos al treball invertit en la seva realització. Concretament, la proposta que realitzem incideix en una metodologia ja aplicada a nombrosos estudis arquitectònics per edificis històrics, la qual té com a objectiu identificar els punts estructurals en què l'edifici presenta deformacions que poden desencadenar el seu enderroc. De forma molt abreujada es realitza primerament l'obtenció d'un model virtual de la construcció arquitectònica a partir de l'aplicació de fotogrametria o l'escaneig en 3D per, posteriorment analitzar a nivell físic – químic i mecànic els diversos materials emprats i obtenir en conseqüència la informació necessària per simular el comportament estructural de les construccions arquitectòniques.

D'aquesta manera, en el nostre cas d'estudi la proposta tindria com a principal objectiu enderrocar el model virtual de les construccions argàriques a partir de l'aplicació de càrregues, pressions i moviments exercits a partir de la simulació del seu comportament estructural. Així doncs, incidiríem en la manera en què varen ser construïts els espais arquitectònics a partir de la maçoneria.

A partir de l'obtenció d'aquestes nocions la posterior recerca tindria com objectiu avaluar la inversió de treball

social efectuada per a la construcció, mitjançant el coneixement previ de les matèries primeres, la seva procedència, temps de transport i la construcció pròpia.

Conseqüentment, haurem de prendre en consideració com abordar la problemàtica i els diferents mètodes disponibles que siguin adequats al nostre cas d'estudi. Per aquest motiu seran considerades les diverses disciplines involucrades, així com les seves aportacions dins l'anàlisi que proposarem.

### **Disciplines involucrades**

Som conscients de la dificultat que pot presentar que una arqueòloga es faci càrrec de fer operatives i desenvolupar disciplines com l'arquitectura o l'enginyeria. Però hem de prendre com a premissa d'una banda, que una construcció prehistòrica mai deixarà de ser una estructura i per tant, seran les disciplines encarregades de l'estudi d'aquesta mena d'estructures les que permetran obtenir la màxima eficàcia tant en la obtenció de dades com en la investigació arqueològica de la materialitat social.

D'altra banda, hem d'incidir en la multidisciplinarietat que comporta de forma intrínseca l'arqueologia i és que l'excavació arqueològica requereix coneixements geològics, topogràfics, botànics i faunístics entre molts d'altres que es presenten segons les hipòtesis i

formulacions arqueològiques dins la investigació. Així doncs, després de realitzar una revisió a les disciplines de l'enginyeria estructural, l'obra de paleta, l'arquitectura i la restauració arqueològica hem trobat moltes similituds i relacions amb el nostre plantejament del cas d'estudi com veurem a continuació.

Concretament, pel cas de l'enginyeria estructural la British Institution of Civil Engineers (Martini 1998b) defineix aquesta disciplina com la ciència i l'art de dissenyar i fer amb l'economia i l'elegància, edificis, ponts, mars i altres estructures similars per a què amb seguretat puguin resistir les forces a les quals són sotmeses.

D'altra banda, l'obra de paleta és definida per la *Real Academia de Bellas Artes de San Fernando* (1827) de forma molt similar:

*“[...] el arte de construir el todo ó parte de un edificio, colocando, enlazando y uniendo los materiales de que se usa, de modo que formando un cuerpo unido, se mantengan á sí mismos, y puedan sostener el peso que se les cargue”*

Òbviament tota definició és discutible, però a la vegada s'adapten a l'evidència arqueològica considerant que el disseny comporta planificació; l'economia accepta els recursos i l'elegància concedeix distinció. Així doncs, tots són elements que formen necessàriament

una estructura de la mateixa manera que col·locar, enllaçar i aparellar materials per formar un cos és intrínsec als tres aspectes destacats anteriorment com a execució pràctica de la construcció (Lourenço 2001; Zengotita 1827). En conseqüència, l'equivalència tant en l'enginyeria estructural com en l'obra de paleta *“poder sostener/resistir las fuerzas a las que son sometidas/el peso que se les cargue”* és lògica.

Per tant, el principal objectiu que ens concerneix queda reflex en aquestes definicions, ja que incidirem en la reconstrucció total de l'estructura per així sotmetre-la a les càrregues que evidenciiïn quin és el pes – força que no sostingui i en conseqüència mostrar com va ser construïda.

En el cas de la restauració arqueològica com a disciplina susceptible a ser incorporada haurem de situar-la dins l'àrea vinculada a la història per la seva relació amb l'objecte històric. Així doncs, com la restauració arqueològica s'ha encarregat de conèixer els mecanismes específics de la construcció amb l'objectiu de simular i diferenciar els materials originals dels empleats en la restauració (Arrechea 1992; Burgaya 2012). Per tant, ens influeix en tant que el seu objectiu tracta d'esbrinar quins són els materials i de quina manera s'empraven.

Per últim, l'arquitectura es dedica al

desenvolupament matemàtic de l'anàlisi estructural fet que ens relaciona directament amb el nostre cas d'estudi (Lourenço 2001; Zengotita 1827) sent en conseqüència una altra de les àrees en interacció que a la vegada ens introdueix a la necessitat científica de la nostra disciplina pel coneixement de la materialitat social .

En conseqüència, podem identificar com totes les disciplines esmentades ens aporten informació i documentació relativa a la investigació arqueològica i a la vegada, evidencien la necessitat de fer-les servir perquè ens ofereixen possibilitats de conèixer el comportament estructural de les construccions. Ja s'han fet alguns assajos d'interacció de la restauració, la història i l'arquitectura com els de Guarneri et al. (2006), Lourenço (2001), Hopkins (2008), Martini (1998), Mirabella y Spina (2001).

En definitiva, la interacció entre les disciplines de l'enginyeria, l'arquitectura, l'obra de paleta, l'arqueologia i la restauració serà adequada per resoldre la problemàtica d'estudi plantejada, que té l'objectiu fonamental de conèixer la inversió de treball necessària per a la construcció d'estructures arquitectòniques al sud-est de la Península Ibèrica durant l'Argar (ca. 2200 – 1550 cal ANE). A partir d'aquest punt, la qüestió a resoldre que es planteja dins qualsevol investigació és de quina manera

podem arribar a inferir en la producció social des de les restes arqueològiques observades.

### **L'enginyeria Inversa – Raonament Invers**

Per resoldre la qüestió plantejada hem considerat convenient recórrer a una inferència que ens proporcioni el coneixement de la causa de l'efecte observat (Barceló 2008) en les estructures arquitectòniques sempre parcials. D'aquesta manera, tenim les restes materials, és a dir, coneixem quin és el resultat de la interacció entre els factors socials i els efectes de fenòmens biològics, mecànics i físics que s'han desenvolupat durant el temps en un espai concret.

El concepte d'enginyeria inversa no té una definició precisa, ja que el terme fa referència a un ampli ventall de problemes que es descriuen senyalant que la seva resposta és coneguda, però no la seva pregunta. D'aquesta manera, fem referència directa al problema arqueològic en què tenim les respostes – efectes, i no les causes – accions socials i naturals que varen produir l'efecte observat (Barceló 2008).

D'altra banda, cal considerar que al tractar aquesta realitat emergeix una problemàtica que presenta una infinitat d'observacions que poden ser vinculades a una única acció social. D'aquesta manera, l'aprenentatge requereix con-

firmacions i refutacions de les prediccions, més enllà de les similituds i o semblances. Per aquest motiu, l'enginyeria inversa es converteix en una tasca de predicció de l'acció social amb l'objectiu d'extreure una regla de decisió a partir de les dades conegudes, les quals seran aplicables al nostre cas d'estudi de forma que tindrem el comportament estructural regit per la geometria, la física i el contacte que desencadenarà en un tipus de causa, en el nostre cas, la caiguda de l'estructura a partir de l'aplicació de les forces – càrregues.

Considerant aquesta premissa de plantejament, cal a la vegada considerar les possibles contrarietats que pot presentar aquest raonament en el moment d'obtenir les dades a partir de la mesura. Així doncs, són tres els principals aspectes a considerar.

En primer lloc, la relació específica de causa – efecte no és observable i en conseqüència, no puc observar un moviment social, ja que existeixen infinitat d'observacions que poden enllaçar-se dins una causa concreta d'origen social. D'aquesta manera, el cas d'estudi intrínsecament social s'ha d'enfocar en la seva generalitat i no especificitat, és a dir, no podem esbrinar la causa de la col·locació específica de cada element sinó la funció global que va determinar la seva estructura global. En el mateix sentit que una construcció com qualsevol altra estructura no és la

simple addició de cada un dels elements, ni s'explica per la mateixa.

En segon lloc, el procés causal acaba sempre en el present tractant-se d'un procés lent i complex definit d'ençà que succeeix l'acció social fins que la persona investigadora l'observa dins un període en conseqüència, curt. D'aquesta manera, sempre haurem de prendre en consideració que l'efecte observat no deriva únicament de l'acció social produïda, sinó que queden lligats fenòmens biològics, físics i mecànics que intervenen en la formació del registre arqueològic i que poden no ser d'origen antròpic (Estévez 2000).

Per últim, el procés causa – efecte al que ens referim pot ser global, sense identificar, i en conseqüència, no es pot observar el canvi que es realitza en la seva totalitat i especificitat. Així doncs, tots els factors poden no ser identificats degut tant a la mateixa complexitat del procés causa – efecte, com a la diversitat de factors enllaçats de tal manera que quedarem limitats a l'observació i identificació de la causa que va desencadenar l'efecte observat d'acord a la nostra problemàtica d'estudi concreta (Barceló i Moitinho 2011; Barceló 2008). Així doncs, podríem per exemple, no diferenciar aquelles causes provinents dels canvis en la matèria en moviment continu, és a dir, les físiques, químiques i mecàniques causades en darrera instància per la llei d'atracció



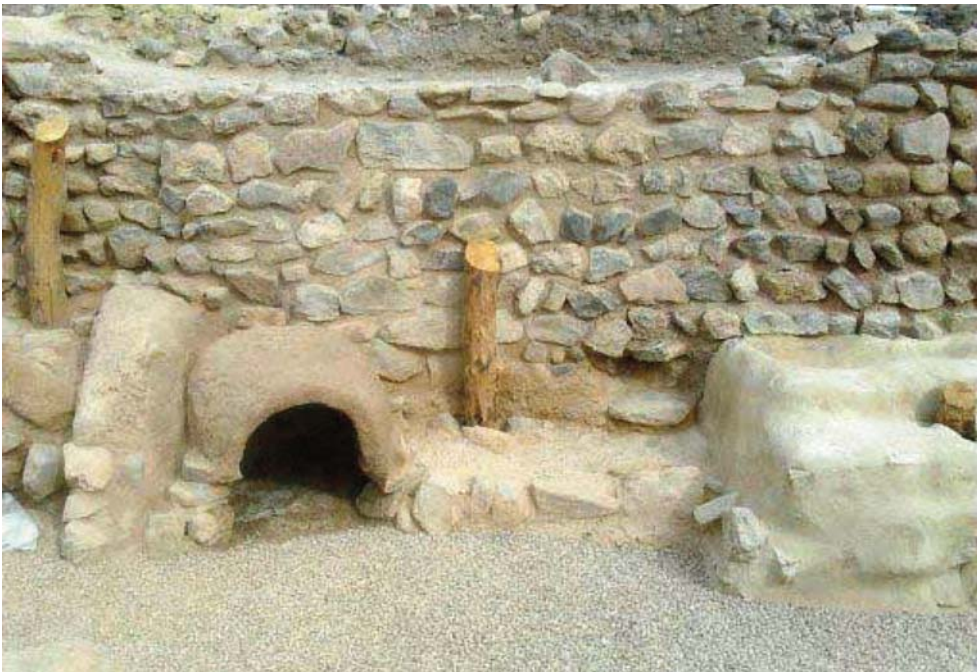
universal. El problema de l'equifinalitat en els processos arqueotafonòmics ja s'ha remarcat per part d'analistes que tenen la tendència en emfasitzar la individualització dels fenòmens mes que el seu context spatiotemporal.

En definitiva, el raonament – enginyeria inversa que portarem a terme queda justificat intrínsecament en el moment que tractem de conèixer com varen ser construïdes les estructures i tenim únicament les restes d'aquesta producció social. Per tant, després de realitzar aquesta aproximació, haurem d'investigar quins materials varen ser emprats en la producció arquitectònica.

### **Definició i caracterització de materials**

Per tal de poder realitzar la caracterització dels materials en l'àmbit físic, químic i mecànic i en conseqüència obtenir el seu comportament estructural és necessari establir els materials emprats i les seves característiques a nivell constructiu.

En el cas general del sud-est de la península Ibèrica tenim un origen geològic característic de la zona Bètica on predominen calcàries, pissarres, gabres, conglomerats, clorites, esquits i gresos entre d'altres, que quedarien assemblats mitjançant l'aplicació de terra, cal, cal i sorra a tall de morter.



Imatge 1: detall de paret restaurada. La Bastida de Totana (Font: Projecte la Bastida de Totana - ASOME)

Pel cas de la terra que s'empra per construir tapials i parets, la documentació consultada fa referència directa a la seva propietat argilosa, enganxosa, compacta, amb poca barreja de sorra i runa de forma generalitzada (Zengotita, 8). Més concretament, la utilització de sorra per a la construcció s'ha d'entendre de forma més complexa, és a dir, com un element estructural que permet modificar la forma del conjunt i que a la vegada, dóna solidesa i estabilitat físic – química dins les franges d'equilibri específiques. Així doncs, haurem de considerar tant la composició de sòls d'on prové la matèria primera com les propietats dels sòls en funció dels tipus d'argila i de les seves propietats relatives als components.

Per a la composició de sòls considerem tres tipus de terra en funció de les proporcions de grava (+2mm), sorra (0,06 – 2mm), llim (0,002 – 0,06mm) i argila (-0,002m). En el cas dels tipus d'argila, existeixen bàsicament dos en base a la separació de micel·les i als elements químics que els conformen. Així doncs, les inestables tenen com a característica la adherència i mutabilitat del seu volum de forma elevada i les casi inerts es caracteritzen per mostrar-se estables en contacte amb l'aigua. A partir d'aquests casos ens trobem, per una banda, que les terres argiloses mostren una elevada cohesió, però en cas de sofrir processos d'humidificació i assecat continus derivats del clima en el qual

es puguin trobar pateixen canvis volumètrics que generen esquerdes.

En el nostre cas d'estudi s'evidencien terres sorrenques, les quals reaccionen amb una gran estabilitat davant canvis d'humitat i temperatures, però amb una falta d'activitat argilosa per la seva menor proporció d'aquesta que la fa fràgil i de fàcil erosió. Així, es justificaria la utilització de revestiment de les parets mitjançant calç com s'ha pogut identificar a partir d'anàlisis químiques fetes en les construccions de jaciments argàrics com La Bastida de Totana.

Pel cas de la calç és la matèria que prové de sotmetre pedres calcàries a l'acció del foc perdent la seva duresa i gairebé la meitat del seu pes quedant reduïdes a pols molt fina (Zengotita 1827). Més concretament, l'ús de la calç ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) és un mètode d'estabilització heterogeni que actua com a consolidant ja que durant la carbonatació serveix de lligam a les partícules del sòl inertes augmentant la seva resistència a la compressió i al tall, així com disminuint els nivells d'absorció hídrica i en conseqüència, la seva possible tracció a l'assecat. De manera addicional, la calç no modifica la porositat de la terra mantenint la capacitat d'adherir-se a altres materials constructius i permetent el intercanvi d'aire i el vapor d'aigua. D'aquesta manera, en el nostre cas d'estudi, la sorra és barrejada amb calç i utilitzada com a revestiment de

parets, barrejada amb aigua i amb una quantitat concreta de sorra o argila torrada i mòlta. Així es forma una pasta anomenada mescla, la qual serveix per unir els altres materials i formar un cos amb ells. Amb el temps s'endureix de tal manera que pren la consistència de la pedra i és impermeable a l'aigua (Guerrero 2007; Zengotita 1827). En el nostre cas d'estudi haurem de considerar doncs les propietats d'impermeabilització que proporciona la calç, ja sigui a partir de la utilització com a revestiment de parets o a mode de morter, i seus els efectes en els comportaments estructurals de cadascuna de les estructures.

Les construccions de pedres són de dues maneres diferents depenent de la forma d'aquestes: una tosca i irregular, tal com surt de la pedrera, i una altra llaurada i regular. En el nostre cas ens trobem amb la tosca i irregular que pertoca al paleta. En el cas de la maçoneria, les indicacions referides pel paleta són les següents segons Zengotita (1827, 11):

*“Debe preferirse para la mampostería la piedra más dura, y por consiguiente la más pesada, y la de figura más regular y que más incline al cuadro, y en su defecto la más angulosa, para que pueda sentar y trabar mejor una con otra. La que se aproxima a la figura esférica no traba ni enlaza bien; y la demasiada redonda es difícil de asegurar, y muy expuesta a rodarse y a*

*deshacerse los cuerpos que con ella se construyen: sin embargo, si es pequeña y bien unida con buena mezcla, forma cuerpos de maravillosa duración”*

En el nostre cas d'estudi haurem de considerar la formació geològica sobre la que se situen els jaciments argàrics del sud-est peninsular per així conèixer tant la font d'extracció de la matèria primera com les tècniques constructives aplicades i el temps invertit en la seva extracció, transport i construcció.

A partir dels materials emprats en les construccions argàriques i les seves corresponents definicions que ens proporcionen una gran varietat de característiques a escala qualitativa, podem entreveure que necessitem un plantejament per l'obtenció de dades quantitatives que ens permeti aproximar-nos a la problemàtica d'estudi.

### **La Forma i la Composició**

La forma i la composició es presenten com aspectes clau dins l'estudi estructural, ja que es tracta de termes que condicionaran en tot moment el comportament estructural. D'aquesta manera, la forma d'una estructura concreta es deu també a la seva composició, de la mateixa manera que la composició condicionarà la forma en que estigui construïda.

Quan ens referim a la forma, parlem d'un aspecte clau per a la mecanització



visual. Segons el concepte matemàtic de la connectivitat, la forma vol dir qualsevol conjunt de punts connectats. En conseqüència, la forma no es una propietat intrínseca dels objectes observats, sinó que sorgeix en els límits inter-facials, superfícies i o contorns d'aquests, els quals, condicionaran el comportament de qualsevol objecte. Així doncs, el concepte matemàtic de connectivitat ens dirigeix cap a la geometria que caracteritza les construccions arquitectòniques de la mateixa manera que ens especifica una connexió de punts dins un conjunt (Barceló 2008).

En el nostre cas d'estudi les produccions arquitectòniques poden expressar-se a través d'una concepció matemàtica, ja que de manera general les construccions en maçoneria compostes de pedra i argamassa a tall d'acoblament contenen les connexions de punts que fan referència directe a la suma entre diverses pedres i morter formant en la seva totalitat un conjunt de punts connectats o cos.

Amb l'objectiu d'evidenciar de quina manera pot entendre's una estructura de forma matemàtica ens referim a l'escaneig 3D o a la fotogrametria de les estructures arquitectòniques amb l'objectiu d'adquirir les mesures morfològiques i topogràfiques que ens permetran portar a terme l'estudi del cas. L'ús de les tres dimensions o la foto-

grametria ens permet una millor estimació dels processos d'estrès de les estructures i l'adquisició d'una representació molt detallada de la geometria de les estructures (Barceló 2008; Guarnieri et al. 2006). D'aquesta manera, la idealització geomètrica que representa part de la forma ha de mantenir-se tan simple com sigui possible, sempre i quan es pugui considerar adequada pel problema a resoldre. Per consegüent, destacarem que els models 3D necessiten molt temps de processat respecte als càlculs reals per analitzar els resultats, de la mateixa manera que es produeix un augment de detalls i de la mida dels arxius de la informació que pot provocar una desfiguració dels aspectes realment importants en l'anàlisi (Lourenço 2001; Krakoviak et al. 2007; Martini 1998; Martini 1998b).

D'altra banda, la composició, o millor dit, les dades de composició són categories on està implícita la resolució d'una característica mitjançant la diferenciació de totes les categories que la constitueixen. Es tracta d'una visió utilitzada quan un objecte es defineix a partir de la col·lecció d'objectes primitius i o originals combinats mitjançant una operació d'enganxat (gluing operation). Podem referir-nos en el nostre cas a una composició – descomposició estructural, i en conseqüència a la pròpia definició d'una estructura com a combinació de components essencials/pri-

mitius fent referència a la definició de l'obra de paleta esmentada anteriorment entenent aquesta tal com hem citat anteriorment. Així doncs, tenim una sèrie de components que formen un cos lligat mitjançant el seu enllaç o operació d'enganxat, no obstant per tractar-se d'una composició, les dades han de complir dues condicions principals: d'una banda, han de ser genèrics, com en el nostre cas seria per exemple la formació d'una unitat domèstica mitjançant parets, sòl, sostre i un espai buit. D'altra banda els components hauran de ser expressats com una proporció de la suma total de components, és a dir, que les unitats domèstiques seran expressades com a vectors de dades que sumen una constant:

Parets = 32%

Sostre = 20%

Sòl = 13%

Espai buit = 35%

---

Unitat domèstica = 100%

En conseqüència obtindrem una sèrie de dades que podrem processar a nivell informàtic tenint en compte l'obtenció de vectors que codifiquen aquells components i dels que nosaltres volem obtenir informació relativa al funcionament o comportament estructural. Així doncs, l'objectiu serà trobar una norma de classificació no lineal, ja que les dades que obtenim i el mecanisme estructural que ens permeti re-

conèixer i explicar el comportament no està regit per una causa efecte simple, com ja hem comentat anteriorment. En conseqüència haurem de presentar com podem aplicar tècnicament l'anàlisi de dades.

### **Anàlisi d'Elements Finitos (FEA)**

L'Anàlisi d'Elements Finitos s'ha d'entendre en aquesta problemàtica com un mètode emprat per informar – documentar a la investigació històrica que proposem. Aquesta anàlisi és realitzada de manera interactiva per explotar, discutir i validar les hipòtesis estructurals amb la finalitat principal de comprendre el comportament estructural global i de la formació dels seus components (Morris, Gary i Tobriner 1995).

El principi de funcionament d'aquest procediment és l'avaluació de les propietats de rigidesa dels elements estructurals a partir de funcions matemàtiques que relacionen el desplaçament d'un element amb les forces internes corresponents. D'aquesta manera, l'anàlisi es fonamenta en un model abstracte que pot ser representat esquemàticament, definit espacialment i construït per a representar l'estructura a investigar. Dit això, els elements han de ser entesos com a cossos deformables que idealitzen l'estructura real en parts (membres). Aquests seran els que quedaran definits per les propietats de rigidesa, que provenen a la vegada, de les propietats del material (elasticitat,

expansió tèrmica, etc.) i les geometries reals (longitud, àrea de secció transversal, inèrcia, etc.) (Morris, Gary i Tobriner 1995). En conseqüència, en el nostre cas d'estudi els cossos deformables seran cadascuna de les estructures representades mitjançant un model matemàtic 3D on les seves parts (membres) estaran evidenciades a partir de roques i argamasses, de les quals ja hauríem obtingut les seves propietats físiques, químiques i mecàniques per portar a terme l'anàlisi.

La dinàmica realitzada pel FEA tracta fonamentalment de trencar qualsevol sistema estructural o continuum en segments discrets. Aquests elements contenen informació espacial i propietats mecàniques dels materials que els constitueixen. D'aquesta manera, l'Anàlisi d'Elements Finitos posteriorment crearà mitjançant algorismes matemàtics un model integral, de manera que podrà produir-se una avaluació general de l'estructura.

S'ha de tenir en compte que la informació espacial i les propietats mecàniques són tractades matemàticament i desenvolupades d'acord a un enfocament fenomenològic on els mecanismes observats estan representats de manera que les simulacions són equiparades a experiments per tant podem portar a terme mitjançant les simulacions les repeticions dels experiments tantes vegades com sigui necessari.

Així doncs, abans de realitzar aquestes simulacions seran necessaris els estudis previs per a caracteritzar les propietats de les estructures i la seva informació espacial.

Per últim, una vegada elaborat el model integral codificat en un ordinador, podem observar l'essència estructural interna que defineix el funcionament de la construcció a partir de diagrames de la seva forma desviada sota càrrega, forces axials i forces constants, entre d'altres (Lourenço 2001; Morris, Gary i Tobriner 1995).

Considerant aquest procediment, hauré de tenir en compte en primera instància que els resultats que obtinguem de l'anàlisi estaran sempre limitats per la qualitat de les hipòtesis formulades en la formació del model integral. Així doncs, els resultats del FEA hauran de ser confirmats de manera independent a partir d'una sèrie de controls sobre el terreny mitjançant càlculs estàtics que ens certifiquin la similitud entre l'abstracció matemàtica i l'estructura material real (Morris, Gary i Tobriner 1995). Així doncs, es tracta en definitiva d'un mètode de validació mitjançant una abstracció matemàtica que evidenciï la similitud entre la virtualitat i la realitat. D'aquesta manera, ens assegurem que les causes dels enderrocaments que puguem simular virtualment, siguin les mateixes que les reals.

D'altra banda, necessitem tenir nocions tècniques i tecnològiques bàsiques per entendre com funciona aquesta anàlisi. En conseqüència, haurem de conèixer amb quin tipus d'estructures tractem. Bàsicament existeixen dos tipus d'estructures: les discretes i les reticulars o contínues. Les que ens concerneixen en el nostre cas d'estudi són les discretes, ja que estan formades per un acoblament d'elements clarament diferenciats els uns dels altres en una sèrie concreta de punts de manera que l'anomenat sistema en composició estructural, forma una malla o retícula (Celigüeta 2000, 2). Aquesta malla o retícula és la que conté la informació pertinent a l'anomenada discretització i en conseqüència és la que efectua una separació entre els acoblaments de cadascun dels elements que formen l'estructura.

Així, considerarem la hipòtesi de discretització com un pilar fonamental dins el FEA. Aquesta hipòtesi sorgeix a partir de la deformació estructural. Així doncs, tota deformació estructural té una varietat infinita de comportaments que fan que la solució d'un vector sigui únicament aproximada. Dit d'una altra manera, en una estructura de tipus discret, la deformació ve definida per un nombre finit de paràmetres (deformacions i o girs), que de forma conjunta conformen el vector de deformacions. Així doncs, l'estructura té tantes formes de deformar-se com paràmetres tingui el vector, sent aquests infinits pel fet

que cada punt pot deformar-se d'infinítes formes independents unes de les altres. En definitiva, el vector passa a ser una funció vectorial (comunament coneguda com a matriu) que indica quines són les deformacions de qualsevol punt mitjançant tres components escalars<sup>1</sup> :

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix}$$

Imatge 2: funció vectorial (font: Celigüeta 2000)

Però aquesta funció presenta un problema i és que al tenir deformacions infinites dins els paràmetres establerts, calcular-la serà pràcticament impossible. Amb l'objectiu d'inferir analíticament en el càlcul d'aquestes deformacions, el FEA recorre a la hipòtesi de discretització ja anomenada, la qual té com a fonament les següents premisses:

- Un continu es divideix a partir de línies imaginàries en unes regions contigües i disjunctes entre sí que contenen formes geomètriques senzilles i normalitzades anomenades elements finits.
- Els elements finits s'uneixen entre si en un nombre finit de punts anomenats nodes.
- Els desplaçaments independents dels nodes són les nostres incògnites dins el problema estructural que pu-

guem plantejar.

- El desplaçament d'un punt qualsevol ve determinat pel desplaçament dels nodes de l'element estructural. Per això es defineixen per a cada element funcions d'interpolació<sup>2</sup> que permeten calcular el valor de qualsevol desplaçament interior per interpolació dels desplaçaments nodals.
- Les funcions d'interpolació i els desplaçaments nodals defineixen unívocament les deformacions unitàries al interior de l'element estructural mitjançant les equacions del material que defineixen l'estat de tensions en l'element i les seves vores.
- Per a cada element existeix un sistema de forces concentrades en els nodes que actuen equilibrant les tensions del contorn i les forces exteriors que actuen a l'element estructural.

Per últim i pel que fa a les qüestions bàsiques que concerneixen al FEA és necessari inferir en el criteri de convergència. Aquest, tracta bàsicament de crear més elements i per tant, més valors, de manera que es tendeix a un límit en un espai. Mitjançant aquest criteri, el FEA pot eliminar qualsevol distorsió que pugui sorgir al disminuir la mida dels elements i a la vegada, augmentar el número de nodes resultants tendint a l'exactitud de l'anàlisi (Celigüeta 2000, 3 – 8).

Considerades aquestes premisses que defineixen el funcionament del FEA de forma general, podem expressar de forma resumida que un element finit en el nostre cas d'estudi seria per exemple, una roca de l'estructura o l'argamassa que es trobi entre dos o més roques. És important mencionar en aquest cas que l'escala de l'element finit podrà variar en funció de l'anàlisi estructural que portem a terme. Així doncs, és probablement no cal obtenir un element finit per cada roca que compona una paret, ja que complicaria innecessàriament el model. D'altra banda, els nodes són aquells punts que connectaran cadascun dels elements finits i que a la vegada, es podran o no presentar com a incògnites dins la nostra problemàtica. Per exemple, un dels desplaçaments dels nodes que podrà ser aplicat en el nostre cas d'estudi és aquell que estigui localitzat en contacte entre dues parets de l'estructura. Avaluar el comportament estructural a partir de l'aplicació d'una càrrega en un punt de contacte entre dues parets pot evidenciar la flexibilitat que podria sostenir cadascuna d'aquestes. De la mateixa manera que es pot aplicar una pressió que sigui equiparable a la humidificació que patiria una paret a partir d'una hipotètica pluja. Així doncs, les funcions d'interpolació que es defineixin mitjançant aquestes càrregues o pressions i les propietats dels materials en una estructura seran les que ens determinin les deformacions patides per l'estructura.



Així doncs l'anàlisi d'elements finits s'adequa a la problemàtica d'estudi que proposem de manera que ens mostraria de quina manera varen ser construïdes les estructures que volem investigar. A partir d'aquest punt, haurem d'inferir quins son els aspectes concrets del funcionament d'una estructura que ens permet conèixer l'Anàlisi d'Elements Finites.

### **El Comportament Estructural**

El principi bàsic a enginyeria és que l'acció i la reacció són iguals i oposades a la vegada. D'aquesta manera, l'acció no hauria de representar cap efecte sobre una estructura. L'acció està causada pel vent, la temperatura i per elements intrínsecs a la mateixa estructura com per exemple, el seu propi pes. Però és el propi ordre de l'estructura el que per resistir a l'acció oposa una reacció d'igual magnitud. Un exemple d'aquest principi és una persona estirant de la cua d'un gat. La reacció la proporciona en aquest cas, l'activitat biològica dels músculs sense importar si el gat estira o no en direcció contrària. Doncs precisament de la mateixa manera es comporta una paret (Gordon 1978; Lourenço 2001).

A partir d'aquesta primera concepció la pregunta que deuríem formular és com pot un element inert com un mur, produir les forces reactives necessàries per seguir verticalment alçat. Per entendre aquesta dinàmica és necessari recórrer

a les teories que contempnen el comportament estructural.

L'any 1976 Robert Hooke va instaurar la base de la teoria de l'elasticitat ja establida al segle XIX a partir de l'observació de la qual cada tipus de sòlid canvia la seva forma quan una força mecànica s'aplica sobre ell. D'aquesta manera, Hooke va evidenciar de manera clara que quan una estructura canvia la forma, el material del que es compona és en si estirat i contret inter-nament a una escala atòmica. En conseqüència, milions d'enllaços químics que uneixen àtoms produeixen grans forces de reacció per estirament o compressió (Lourenço 2001).

Les mesures del científic anglès van indicar que la càrrega era generalment proporcional a la força, i la major part dels sòlids recuperaven la seva forma original al retirar la càrrega. D'aquesta manera, es produeix el que anomenaríem un comportament elàstic lineal, és a dir, proporcional. No obstant això, la majoria dels materials testats amb mètodes més precisos mostren un efecte en el comportament del material inelàstic o no lineal, donant com a resultat una relació no proporcional entre la força i el desplaçament, de la mateixa manera que succeeix en la maçoneria (Lourenço 2001).

Pel cas de les relacions lineals, la noció de les condicions elàstiques en un punt

específic d'un material fa referència al concepte d'estrès i tensió:

– L'estrès és la mesura utilitzada per a predir el col·lapse d'una estructura i ens diu quanta força està present als àtoms en qualsevol punt de separació:

$$\sigma = \frac{F}{A},$$

imatge 3: fórmula d'estrès (font: Lourenço 2001)

On  $F$  és la força elemental que es divideix entre la superfície o àrea total ( $A$ ).

– La tensió és la mesura que indica la quantitat dels enllaços entre àtoms que s'estiren, sent aquesta proporcional al canvi de longitud que es produeixi:

$$\epsilon = \frac{l}{L}.$$

Imatge 4: fórmula de tensió (font: Lourenço 2001)

On  $l$  és l'extensió que divideix la longitud original ( $L$ ).

D'aquesta manera, per a una determinació del comportament de tensió – deformació, és a dir, elasticitat, serà calculat el Mòdul de Young o Mòdul d'Elasticitat Longitudinal:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}.$$

Imatge 5: fórmula del mòdul de Young (font: Lourenço 2000)

On l'estrès ( $\sigma$ ) es divideix entre la tensió ( $\epsilon$ ).

Pel cas de les Relacions No Lineals o Comportaments Inelàstics contem llavors amb la no proporcionalitat de reacció davant l'aplicació d'una força. Quan contem amb materials que contenen característiques no lineals en el seu conjunt estructural i o quan els desplaçaments d'una estructura no són petits<sup>3</sup> ens enfrontarem al mateix succés. D'aquesta manera, els efectes de les aplicacions de càrrega i la forma en la intensitat d'aquestes donaran diferents resultats, és a dir, resultats no lineals.

Els diferents tipus de comportament tant lineal com no lineal poden ser agrupats i combinats mitjançant la física, la geometria i el contacte:

– La Física constitueix les relacions amb la no linealitat del material estructural.

– La Geometria estableix les relacions amb el punt d'aplicació de les càrregues i el canvi a partir de l'augment d'accions en les estructures, és a dir, desplaçaments no petits.

– El Contacte instaura la relació amb l'addició, la remoció i el canvi de contacte entre els cossos amb un augment de les accions.

A partir d'aquests tres elements dins el comportament estructural hem fixar-

nos en les deformacions i desplaçaments, ja que aquests ens marcaran les diferents actuacions analítiques. Així doncs, per realitzar qualsevol anàlisi, ja sigui lineal o no lineal requerim el coneixement de les propietats elàstiques, la resistència dels materials i la informació addicional inelàstica (diagrames d'esforç – deformació), la qual ens aportarà informació sobre la distribució de la tensió en el comportament de deformació i en la insuficiència del mecanisme (l'ordre) de l'estructura (*ultimate state*).

També hem de considerar els estudis realitzats per altres investigadors els quals ens indiquen que els materials emprats en la construcció de maçoneria tenen un comportament mecànic amb una resistència a la tensió molt baixa, i en conseqüència les anàlisis plàstiques (de col·lapse no lineals) seran d'utilitat per observar el comportament de l'estructura. L'avantatge principal que ofereixen les anàlisis no lineals és la capacitat de rastrejar la resposta completa d'una estructura i la possibilitat d'incorporar a l'anàlisi la seqüència de construcció (Lourenço 2001; Krakowiak et al. 2007; Morris et al. 1995; Mirabella i Spina 2001), encara que hem de considerar que els materials i en conseqüència el seu comportament podrà ser lineal en un aspecte, com per exemple a escala geomètrica, i podrà no ser-ho en un altre com per exemple en el seu contacte. Així doncs, en el

nostre cas d'estudi, hem d'avaluar mitjançant la física, geometria i contacte els comportaments que es puguin derivar per a procedir en primer lloc, a un estudi d'estrès que evidenciï quanta força és necessària per a enderrocar una estructura per a seguidament, avaluar per exemple la seva elasticitat davant fenòmens atmosfèrics com les pluges.

En conseqüència, haurem de conèixer les diverses problemàtiques i interrogants als quals ens podrem enfrontar durant la investigació, ja que podem trobar-nos amb la falta de dades geomètriques i de la documentació de nuclis interns dels elements estructurals considerant que tractem amb estructures de més de 4000 anys d'antiguitat i de les quals no s'han realitzat investigacions estructurals d'aquest tipus fins al moment.

Per últim, la caracterització de les propietats mecàniques dels materials emprats contenen part de la documentació essencial a l'hora de realitzar anàlisis del comportament estructural. Per aquest motiu en la investigació haurem d'incloure les anàlisis sobre la caracterització material a nivell físic – químic (determinació – composició) i les posteriors anàlisis mecàniques. Relacionat amb aquestes propietats mecàniques haurem de prendre en consideració la probabilitat de trobar-nos amb una gran variabilitat, ja que les estructures han estat resultat de l'acció social i de l'ús

de materials naturals.

### Consideracions finals

A partir de l'aproximació metodològica portada a terme, hem pogut evidenciar diversos trets metodològics que hauran de ser considerats en la investigació arqueològica:

En primera instància, haurà de produir-se una adaptació entre l'eina d'anàlisi i la informació que sol·licitem, sense tenir en compte el nivell de complexitat. Un dels grans avantatges que presenta aquesta metodologia és la simplificació d'estructures extremadament complexes a partir d'aplicacions geomètriques. D'aquesta manera, sempre serà necessària l'avaluació de l'eina d'anàlisi davant l'evidència arqueològica a tractar.

D'acord amb l'eina, també serà necessari avaluar la pertinència d'adquisició de programes que ens permetin resoldre la problemàtica, ja que existeixen una gran varietat de softwares de lliure accés i altres comercials que poden ser a vegades molt cars i poc adaptats a les nostres necessitats d'investigació.

D'altra banda, les recomanacions d'autors i els casos d'estudi observats mostren que és millor modelitzar parts estructurals que estructures completes, així com tenir precaució en el moment d'escollir els models 3D, ja que poden fer més complex el procés de coneixement del comportament estructural en

comptes de resoldre'l. En el nostre cas, s'ha incidit aquí en presentar en què consisteix la metodologia d'Anàlisi d'Elements Finitis i les seves aportacions al voltant de la problemàtica plantejada. Però serà qüestió prioritària avaluar els tipus d'escàners 3D disponibles al mercat i l'aportació de dades que ofereixen en front o com complement de la tècnica de la fotogrametria, ja que les opcions han de quedar supeditades sempre a l'adaptació a les necessitats de la recerca i, per tant, a les hipòtesis formulades.

### Bibliografia

**ARRECHEA, J. (1992):** “De la composició a la arqueologia”. Restauración arquitectónica, I. Fernández, Luis, A. (Eds.). *Arquitectura y Urbanismo*, 19. Universidad de Valladolid. Zaragoza: pp. 323.

**BARCELÓ, J.A. (2007):** Arqueología y Estadística (1). *Introducción al estudio de la variabilidad de las evidencias arqueológicas*. Barcelona: Servei de Publicacions de la Universitat Autònoma de Barcelona. Materials 187.

**(BARCELÓ, J.A. 2008):** *Computational Intelligence in Archaeology*. IGI Global USA: Information Science Reference, Henshey (VA).

**BARCELÓ, J.A. (2001):** *Análisis de Datos Arqueológicos. Teoría y Méto-*

dos. En premsa.

**BARCELÓ, J.A., MOITINHO, V. (2011):** “Towards an Understanding the Archaeological Artefacts through Reverse Engineering”. SCCH'11 – *Scientific Computing & Cultural Heritage*, 7 – 9 July, Heidelberg, Germany: pp. 1 – 6.

**BURGAYA, B. (2012):** Manual de restauració de camp. El cas d'Oxirinc: Metodologia i pràctica. Barcelona: Societat Catalana d'Egiptologia. *Quaderns de la Societat Catalana d'Egiptologia* 2.

**CELIGÜETA, J. (2000):** *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural*. Guipúzcoa: Campus Tecnológico de la Universidad de Navarra (tecnun).

**ESTÉVEZ, J. (2000):** “Aproximación Dialéctica a la Arqueotafonomía”. *Revista Atlántica – Mediterránea de Prehistoria y Arqueología Social*, 3: 7 – 28.

**GARNIERI, A., PIROTTI, F., PONTIN, M., VETTORE, A. (2006):** “3D surveying for Structural Analysis Applications”. *3rd IAG/12th FIG Symposium*, Baden, May 22 – 24: 14 – 29.

**(HOPKINS, H. 2008):** “Using Experimental Archaeology to Answer the Unanswerable: A case study using dyeing”. *Experiencing Archaeology by Experiment*. Cunningham, P., Heeb, J.

and Paardekooper, R. P (Eds.). *Owbow Books*: pp. 103 – 117.

**(LOURENÇO, P. B. 2001):** “Analysis of Historical Constructions: From Thrust – Lives to advanced simulations”. *Historical Constructions*. P. Roca (Eds.), Guimarães: University of Minho: pp. 78 – 96.

**LOURENÇO, P. B., MOURAO, S. (2001):** “Safety assessment of Monastery of Jerónimos, Lisbon”. In: P. B. Lourenço, P. Roca (Eds.) *Historical Constructions*, Guimarães: University of Minho: pp. 145 – 167.

**MARTINI, K. (1998):** “Structures and modern analysis: investigating damage and reconstruction at Pompeii”. *Automation in Construction*, 8: pp. 125 – 137.

**MARTINI, K. (1998b):** “Finite Element Studies in the Two – Way Out – of – Plane Failure of Unreinforced Masonry” *Proceedings of the 6th National Conference on Earthquake Engineering, Seattle WA*. Earthquake Engineering Research Institute: pp. 1 – 12.

**MIRABELLA, G., SPINA, O. (2001):** “Discrete Element Analysis in the Sardinian Nurghe”. *Historical Constructions*, P. B. Lourenço, P. Roca (Eds.), Guimarães: pp. 719 – 728.

**MORRIS, E. T., GARY, R., TOBRI-**



**NER, S. O. (1995):** “Report on the Application of Finite Element Analysis to Historic Structures: Wetminster Hall, London”. *Journal of the Society of Architectura Historians*, Vol. 54, 3: pp. 336 – 347.

**ZENGOTITA, P. (1827):** *Arte de Albañilería o instrucciones para los jóvenes que se dediquen a él, en que se trata de las herramientas necesarias al albañil, formación de andamios, y toda clase de fábricas que se puedan ofrecer con diez estampas para su mayor inteligencia*. Madrid: Oficina de Don Francisco Martínez Dávila.

#### NOTES

<sup>1</sup> Un component escalar és en base a la funció vectorial cadascun dels espais vectorials definits al voltant de les coordenades per les que sigui regit (Celigüeta 2000, 14).

<sup>2</sup> Les funcions d'interpolació i la interpolació en general fa referència a l'obtenció d'un ajustament de funcions a partir dels punts obtinguts dins d'un mostreig o experiment. D'aquesta manera s'obtenen nous punts partint del coneixement d'un conjunt discret de punts. (Celigüeta 2000)

<sup>3</sup> El terme petits proporciona una variable qualitativa en aquest cas. L'objectiu es referir-nos a la determinació quantitativa, la qual està condicionada pel tipus de material i les seves propietats intrínseques i extrínseques