QUADERNI DELLA RICERCA SCIENTIFICA

Serie Beni Culturali
10

diretta da
Gennaro Carillo, Piero Craveri, Massimiliano Marazzi

Isbn 978-88-96055-28-1

I volumi della collana sono distribuiti da

HERDER

00186 Roma piazza Montecitorio, 120
tel. +39 06.6794628 / 6795304
fax +39 06.6784751
www.herder.it
distr@herder.it

UNIVERSITÀ DEGLI STUDÎ SUOR ORSOLA BENINCASA

Maria Teresa Como

L'ARCHITETTURA DELLE 'THOLOI' MICENEE

ASPETTI COSTRUTTIVI E STATICI

progetto grafico
Sergio Prozzillo

tutti i diritti sono riservati
Suor Orsola Benincasa nell'Università il 2007
Napoli via Suor Orsola, 10

sommario

7 presentazione di massimiliano marazzi

9 nota di paolo belli

11 lista delle abbreviazioni

13 introduzione

19 I. ELEMENTI ARCHITETTONICI E COSTRUTTIVI DELLA 'THOLOS'

1. il pozzo di impianto 21
2. il 'dromos' 23
3. lo 'stomion' 29
4. la camera 32
5. il tumulo 45
6. riflessioni sulle caratteristiche architettoniche delle 'tholoi' 49

51 II. GLI STUDI ESISTENTI

1. dal tumulo alla 'tholos' 51
2. la classificazione di Wace 54
3. la classificazione di Pelon 55
4. antologie e pubblicazioni a seguito di campagne di scavo 56
5. studi sulle tecniche costruttive 57
6. analisi statica delle 'tholoi' 60

63 III. IL TESORO DI ATREO

1. introduzione e oggetto dell'analisi 63
2. principali fonti esaminate 67
3. selezione dei dati presenti in letteratura 70
4. ipotesi sulla configurazione delle parti 'nascoste' della struttura 73
5. tavole grafiche di sintesi 78
6. considerazioni sulla geometria 81

85 IV. 'FALSO ARCO' E 'VERO ARCO'

1. 'falso arco' e 'vero arco' 85
2. analisi della stabilità della parte anteriore del 'triangolo di scarico' del Tesoro di Atreo 93

109 V. 'FALSA CUPOLA' E 'VERA CUPOLA'
1. 'falsa cupola' e 'vera cupola' 109
2. analisi del comportamento della cupola muraria del Tesoro di Atreo 118

153 conclusioni

159 APPENDICE I
scheda di analisi del Tesoro di Atreo

175 APPENDICE II
richiami sull'analisi limite delle strutture murarie

179 APPENDICE III
richiami sull'analisi membranale applicata alle cupole

183 APPENDICE IV
valutazione della condizione di equilibrio della cupola all'intorno del foro del 'triangolo di scarico'

187 riferimenti bibliografici

L'idea di riconsiderare l'intera problematica storico-architettonica che investe un monumento quanto mai "equivoco", ancorché di grande impatto all'occhio, quale la *tholos* micenea, nacque quasi per gioco casuale, stimolata da un'animata discussione sorta fra chi scrive e l'Autrice del presente saggio, nell'estate del 2000, in occasione di una visita alle famose "*pseudotholoi*" di Pellana organizzata nell'ambito dell'attività di stage di un master europeo. Di fatto, però, a una successiva comune riflessione sull'argomento del dibattere - naturalmente sul concetto di "modello" applicabile a tale tipologia di monumento funerario - risultò chiaro a entrambi come non fosse assolutamente possibile giungere a una reciproca comprensione in quanto i due linguaggi, dell'archeologo e dell'architetto, partivano da sensibilità e punti di vista dissonanti, ancorché "giusti" se considerati ciascuno nell'ambito della propria esperienza scientifica.

La partita si chiuse sul momento con un pareggio, o, forse, sarebbe meglio dire con una reciproca convinzione che fino al momento in cui non si fosse raggiunta una comunione di linguaggio e un'interrelazione degli intenti, qualsiasi confronto sarebbe rimasto sterile esercizio accademico.

Fu questa ferma convinzione che mi spinse, quasi due anni dopo, quando si presentò l'occasione del conferimento di una borsa di studio nell'ambito del dottorato di ricerca sulla "Preistoria dei paesi del Mediterraneo", a proporre all'architetto Como di tentare un lavoro sperimentale su questa complessa tematica, partendo, appunto "da architetto", specializzato in problemi di tecnica delle costruzioni, da un'analisi approfondita degli assunti metodologici che avevano animato fino a quel momento i diversi studiosi che si erano confrontati con gli aspetti formali e strutturali delle diverse manifestazioni della *tholos* micenea, dalle sue prime forme attestate in Messenia, fino a quel modello di perfezione rappresentato dal cosiddetto Tesoro di Atreo.

Il compito si presentava, naturalmente, non semplice. Ai problemi posti da una seria riconsiderazione degli approcci metodologici che avevano caratterizzato le "storie" delle ricerche, si univano indissolubilmente quelli propri delle possibili "storie" architettoniche che si suppone abbiano portato all'insorgenza del tipo di manufatto. Ma la scommessa

più pericolosa, anche se naturalmente allo stesso tempo più stimolante, consisteva nel riuscire, mantenendo la propria identità di architetto, ad appropriarsi del linguaggio dell'archeologo, per comprenderne letture e argomentazioni.

Fu questa la ragione per la quale, nel momento in cui si pose il problema della individuazione del tutor cui demandare il complesso compito di indirizzare e seguire il lavoro, la scelta cadde sull'architetto Paolo Belli, ricercatore dell'Istituto di Studi Micenei ed Egeo-anatolici del CNR di Roma, il quale non solo rappresenta uno dei maggiori specialisti sull'argomento, ma unisce, in virtù della propria lunga esperienza nel settore delle ricerche egeistiche, alla capacità dell'architetto la conoscenza dell'archeologo.

Nei successivi anni di intenso lavoro, l'Autrice ha raccolto e vagliato una massa enorme di dati, arricchendo la ricerca attraverso numerosi viaggi sia sul continente greco che a Creta e partecipando a diversi incontri internazionali nell'ambito dei quali ha avuto modo di presentare e confrontare i risultati mano a mano acquisiti. Nel 2004, al termine del triennio del corso di Dottorato, pubblicava nei Quaderni della Ricerca Scientifica dell'Ateneo Suor Orsola Benincasa (vol. 2, Ricerche e Studi del Centro Mediterraneo Preclassico, pp. 13-50) un primo breve resoconto degli studi compiuti; nel 2005 e 2006, rispettivamente nell'ambito dell'International Congress on Contruction History di Cambridge, e del Seminario Internazionale di Ravenna su "Teoria e pratica del costruire", aveva l'occasione di illustrare gli aspetti più tecnico-statici del tipo di monumento.

Il presente volume è quindi il frutto di sei anni di ininterrotte e appassionate ricerche, presentate finalmente in forma organica, arricchita di un'accurata documentazione grafica.

Per quanto nell'ambito di una seria ricerca scientifica non si possa mai dire di aver esaustivamente considerato un qualsivoglia problema, ritengo che l'opera rappresenti certamente un solido progresso nell'indagine non solo della "costruzione della *tholos*", ma anche, più in generale, del "costruire" nella Grecia d'età micenea. Il suo pregio e l'innovatività consistono altresì nell'aver introdotto, anche nell'ambito degli studi egeistici, una metodologia di approccio e una visione del costruito che, in settori finitimi della ricerca, quali sono quelli pertinenti ai monumenti classici e medievali, sono già ampiamente diffusi e hanno determinato da lungo tempo enormi progressi nella conoscenza della storia delle tecniche costruttive.

La *tholos*, che il grande archeologo australiano Gordon Childe ebbe a definire già nel suo *Dawn of European Civilization* il segnale del verificarsi in Grecia di nuovo salto verso una "civiltà urbana", riceve con questo lavoro una migliore e più adeguata collocazione nella lunga storia dell'architettura dei paesi del Mediterraneo.

Massimiliano Marazzi

*Con molto interesse e vera gioia ho seguito la genesi della monografia sull'*Architettura delle tholoi *micenee derivante dalla tesi di dottorato dell'architetto Maria Teresa Como, che ho avuto occasione di seguire soprattutto nelle fasi di impostazione della ricerca.*

Ricordo i nostri periodici colloqui durante i quali ho cercato di introdurla ed accompagnarla in un percorso di studi analogo a quello che avevo compiuto io stesso molti anni prima, mettendola in guardia sulle specifiche difficoltà che può incontrare un architetto prestato alla ricerca archeologica, prospettandole allo stesso tempo l'interesse che può derivare dall'interazione con esperienze formative diverse.

Mi congratulo vivamente per gli eccellenti risultati conseguiti su un argomento apparentemente ampiamente dissodato – lo studio strutturale delle tholoi micenee – nel quale ha saputo apportare elementi innovativi tratti dalla sua personale preparazione, sensibilità e ben fondata competenza tecnologica.

Mi sento quindi onorato di aver potuto seguire le prime tappe della ricerca e sono oggi ben lieto di vedere concretizzato con la presente pubblicazione il frutto del suo pluriennale impegno.

Paolo Belli

Lo studio raccoglie il lavoro svolto presso l'Università degli Studî Suor Orsola Benincasa di Napoli durante il Dottorato di Ricerca in Preistoria dei Paesi del Mediterraneo.

Desidero ringraziare il professor Massimiliano Marazzi che con entusiasmo e lungimiranza mi ha introdotto al mondo dell'archeologia, condividendo e sostenendo lo studio architettonico delle costruzioni antiche.

Ringrazio l'Università Suor Orsola Benincasa per aver favorito una Ricerca fortemente interdisciplinare, e per il supporto alla pubblicazione del presente lavoro.

Sono profondamente grata all'architetto Paolo Belli per la cura e la straordinaria sensibilità con cui mi ha guidata nello studio delle tholoi micenee. Ringrazio inoltre l'Istituto per gli Studi Micenei ed Egeo – Anatolici del CNR Roma per l'accoglienza spesso concessami.

Un grazie a mio padre la cui passione per la meccanica delle murature ha segnato la mia formazione di architetto.

Il lavoro non avrebbe visto la luce senza il supporto affettuoso di mio marito Giacomo e gli stimolanti confronti.

Dedico questo libro ai miei figli Francesco Paolo e Mario la cui presenza mi ha donato anche concretezza e gioia per portare a termine gli impegni.

AA	Archäologischer Anzeiger
AD	Archeologhiko Deltion
AE	Archeologhiki ephimeris
Aegaeum	Annales d'archéologie égéenne de l'Université de Liège et UT-PASP
AJA	American Journal of Archaeology
AM	Mitteilungen des Deutschen Archäologischen Instituts, Athenische Abteilung
AnnG	Annals of Geophysics, rivista ufficiale dell'Istituto Nazionale di Geofisica
Antiquity	Antiquity. A Quarterly Review of Archaeology
ASAtene	Annuario della Scuola archeologica di Atene e delle Missioni italiane in Oriente
BAR	British Archaeological Reports
BAR-IS	British Archaeological Reports, International Series
BÉFAR	Bibliothèque des Écoles françaises d'Athènes et de Rome
BCH	Bulletin de correspondance hellé nique
BLund	Bulletin de la Société royale de lettres de Lund
BSA	Annual of the British School at Athens
CronCatania	Cronache di archeologia e di storia dell'arte, Università di Catania
EcHR	Economic History Review, Jounal of the Economic History Society

HESPERIA	Journal of the American School of Classical Studies of Athens
ISMEA	Istituto per gli Studi Micenei ed Egeo - Anatolici, CNR Roma
I.J. Sol. Str.	International Journal of Solids and Structures
J.P. Aci	Journal Proceedings of the American Concrete Institute
JSAH	Journal of the Society of Architectural Historians
Kokalos	Studi pubblicati dall'Istituto di Storia Antica dell'Università di Palermo
Meccanica	International Journal of the Italian Association of Theoretical and Applied Mechanics
ME	Medio Elladico
MME	Minnesota Messenia Expedition
OJA	Oxford Journal of Archaeology
OpAth	Opuscula Atheniensia
PAE	Praktika tis en Athine Archeologhikis Eterias
Restauro	Quaderni di Restauro dei Monumenti e di urbanistica dei Centri antichi
Schrift DArV	Schriften des deutschen Archäologen-Verbandes
SIMA	Studies in Mediterranean Archaeology
SIMA-PB	Studies in Mediterranean Archaeology. Pocketbook
SkrAth	Skrifter utgivna av Svenska Institutet i Athen
SMEA	Studi Micenei ed Egeo-Anatolici
TE	Tardo Elladico
Topoi	Revue édité à Lyon par la Société des Amis de la Bibliothèque Salomon-Reinach
TUAS	Temple University Aegean Symposium

La tomba a cupola micenea, comunemente denominata *tholos*, è tra le più mirabili realizzazioni architettoniche della tarda Età del Bronzo. Nel suo sviluppo ha raggiunto dimensioni monumentali, come il Tesoro di Atreo, che ha un diametro della camera di 14,6 m, costituendo per secoli, fino alla realizzazione delle cupole romane, la più grande cupola muraria costruita dall'uomo.

L'ampia letteratura esistente a riguardo non contempla tuttavia un sistematico approfondimento degli aspetti costruttivi e statici, tanto che la consistenza materiale e il comportamento statico risultano tuttora poco chiari, in particolare in riferimento alla cupola muraria abitualmente definita *pseudocupola*. Ciò è stato indubbiamente favorito dalla condizione ipogea di tali strutture, che rende complesso il rilievo e l'ispezione di tutte le parti.

I disegni di rilievo esistenti delle *tholoi* rappresentano generalmente solo il profilo della cupola all'intradosso e la proiezione di prospetto degli elementi lapidei, lasciando incogniti i dati relativi alle "parti nascoste" delle strutture ipogee, che costituiscono per altro informazioni necessarie all'approfondimento della conoscenza della costruzione e all'analisi del comportamento statico.

Lo studio delle *tholoi*, sviluppatosi prevalentemente in ambito archeologico, ha preso le mosse dalla ricerca di una cronologia relativa, ed è pervenuto, in base alla lettura delle evidenze, alla definizione di un principio classificatorio per una catalogazione ragionata [1].

Generalmente, a meno di studi ove l'approccio è più propriamente architettonico [2] o che risultino stimolati da particolari condizioni che abbiano consentito di visionare le parti nascoste della struttura [3], le relazioni sulle campagne di scavo trattano unicamente delle parti murarie visibili e, alla registrazione delle evidenze, di regola non segue un'interpretazione sintetica delle strutture degli elementi architettonici nell'ottica della funzione costruttiva e strutturale.

[1] Wace, 1921-23; Pelon, 1976.

[2] Belli, 1995.

[3] Gasche e Servais, 1971; Wilkie, 1992.

In ambito tecnico-scientifico vi sono rari studi sulla statica delle *tholoi* micenee [4], e, spesso, le speculazioni e i modelli statici adottati pervengono comunque a modelli estremamente semplificati dell'evidenza materiale, mostrando una distanza e una difficile comunicazione tra diversi campi disciplinari. In particolare, si rileva uno scarso interesse per strutture considerate minori, il cui comportamento statico è particolare rispetto ai modelli strutturali correnti della muratura.

I primi approcci analitici di tipo multidisciplinare sullo studio dell'identità statica e architettonica delle *tholoi* micenee, e che costituiscono attualmente i testi di riferimento in ambito archeologico [5], si limitano sovente a considerazioni di tipo qualitativo circa l'effettivo comportamento statico.

La definizione dell'identità architettonica e strutturale delle *tholoi* micenee risulta dunque una questione ancora aperta, la cui analisi non può comunque prescindere dal passaggio dalla catalogazione delle caratteristiche fisiche degli elementi architettonici al riconoscimento della loro funzione costruttiva e statica.

Da tali considerazioni, muovendo dallo studio delle fonti, relative principalmente alle osservazioni e ai rilievi esistenti sulla fattura di tali monumenti compiuti durante le campagne di scavo, si sono ricavati quegli elementi necessari per una lettura architettonica e costruttiva delle *tholoi* micenee e per formulare una descrizione sintetica della morfologia del monumento. Raggiunto questo primo obiettivo, si è potuto affrontare, su un modello completo, comprensivo anche delle parti comunemente nascoste della struttura, lo studio del comportamento statico e analizzare la funzione statica che ciascuna parte architettonica assume nell'insieme e che potrebbe aver assunto durante le complesse fasi di costruzione.

Lo studio, pertanto, intreccia strettamente la lettura dell'architettura con l'analisi del comportamento statico, condizione necessaria per la comprensione della natura architettonica delle *tholoi* micenee. Esso si articola in tre parti principali: lo studio architettonico della morfologia del monumento, attraverso l'analisi della letteratura esistente, dalla quale è stato possibile reperire informazioni relative alla consistenza materiale e identificare gli aspetti caratteristici della costruzione; lo studio di un caso particolare, quale il Tesoro di Atreo, che, essendo tra le *tholoi* integre il caso meglio documentato in letteratura, ha condotto ad un'ipotesi sulla configurazione e natura della parti non rilevate della struttura; l'approfondimento della funzione statica degli ele-

[4] Benvenuto e Corradi, 1987.

[5] Cavanagh e Laxton, 1981; Cavanagh e Laxton, 1987; Santillo Frizell e Santillo, 1984; Laffineur e Cremasco, 1999.

menti architettonici, basato sull'elaborazione dei dati relativi alle parti accessibili e non accessibili, da cui si è pervenuto a un modello per l'analisi statica congruente con la conformazione reale del monumento.

La prospettiva di base della ricerca induce a riflettere sullo stretto rapporto esistente tra tecniche costruttive, comportamento statico e forma architettonica, rilevando che le ragioni di talune scelte formali sono dettate dal consolidarsi di una tecnica costruttiva in rapporto alla stabilità della costruzione.

Nelle *tholoi* micenee quindi la forma materiale, che ne definisce *l'immagine*, e la struttura statica appaiono strettamente connesse. Il riconoscimento dell'identità statica individua, pertanto, quegli aspetti peculiari di tali costruzioni che permettono di suggerire delle linee guida per la conservazione e il restauro. Concetto questo che ribadisce il presupposto che la conoscenza del monumento è la base operativa della conservazione e del restauro che, per strutture architettoniche in ambito archeologico, che hanno generalmente perduto la propria funzione e una forma compiuta, si struttura soprattutto sulla lettura del dato materiale, la cui leggibilità si esprime nel lessico dei materiali e nelle tecniche costruttive impiegate alla luce del comportamento strutturale.

Oggi molte *tholoi* sono in un deplorevole stato di abbandono, e alcune risultano addirittura introvabili in sito anche dagli specialisti; tale condizione minaccia la scomparsa di numerose evidenze. Nei casi poi di interventi di restauro, generalmente compiuti solo sugli esempi più noti, da una parte gli interventi di reintegrazione (e a volte ricostruzione) sono difficilmente distinguibili dalle parti autentiche, e dall'altra sono state effettuate false ricostruzioni che modificano sostanzialmente il monumento.

Nel restauro dello *stomion* della *tholos* di Maratona del 1958 l'anastilosi compiuta dopo lo smontaggio della muratura e, in particolare, del *triangolo di scarico* è avvenuta assemblando i blocchi senza precisa corrispondenza, come è evidente dal confronto tra l'attuale condizione e i precedenti documenti di rilievo [6]; l'operazione lascia esterrefatti soprattutto nella messa in opera del *triangolo di scarico* in corsi leggermente inclinati, in totale contrasto con la precedente rilevata fattura e con la configurazione corrente dei *falsi archi*.

Nel restauro della *tholos* di Vaphio del 1962 [7] non si tiene conto della particolare inclinazione della parete destra dello *stomion* presente nel rilievo redatto da Tsountas durante lo scavo [8], lasciando supporre che l'anastilosi effettuata

[6] Pelon [1976, p. 230].
[7] AD 18, 1963, II, p. 87.
[8] Pelon [1976, p. 301].

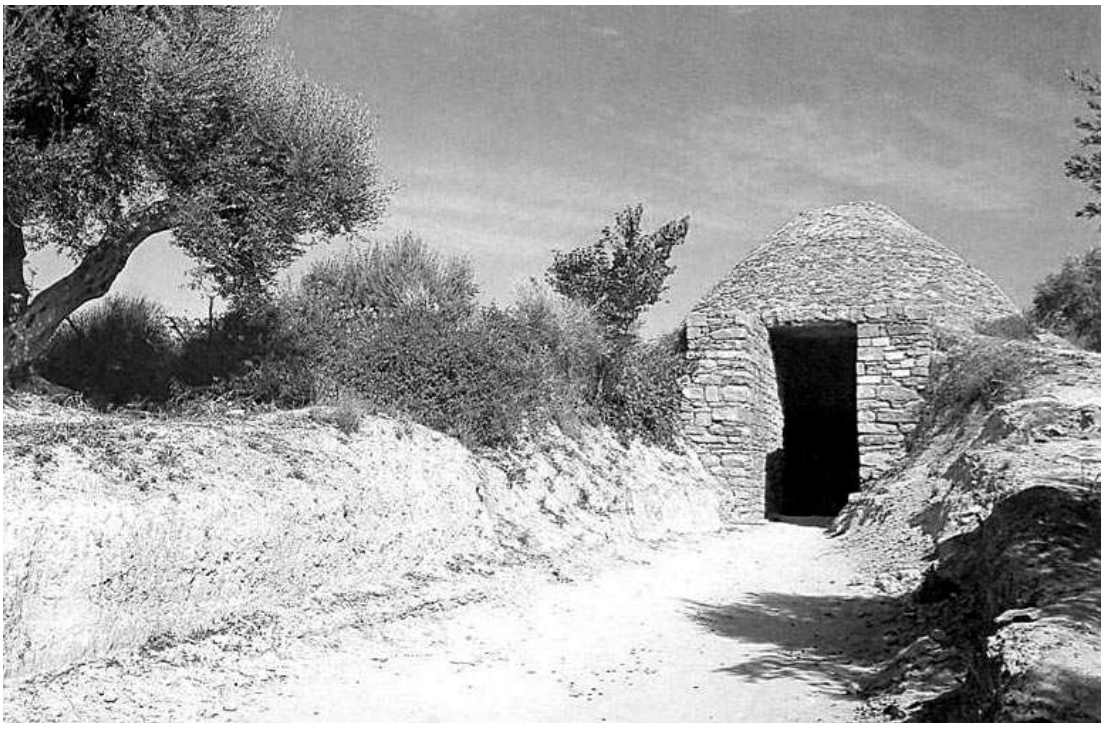
costituisca una ricostruzione ideale che si discosta notevolmente dall'evidenza.

Alcuni interventi, inoltre, prescindono da una conoscenza dell'architettura del monumento, intesa nel binomio natura statica - *immagine*, ripristinando, spesso mediante ricostruzione, le cupole murarie senza la messa in opera del tumulo all'estradosso. Le ricostruzioni della parte superiore della cupola della *tholos* IV di Englianos [8] (Ano Englianos), fig. 1, degli anni '50, e della *tholos* I di Peristeria [10], del 1972, sono state effettuate senza la ricostituzione del tumulo all'estradosso. Un contributo alla conservazione di tali monumenti appare pertanto urgente.

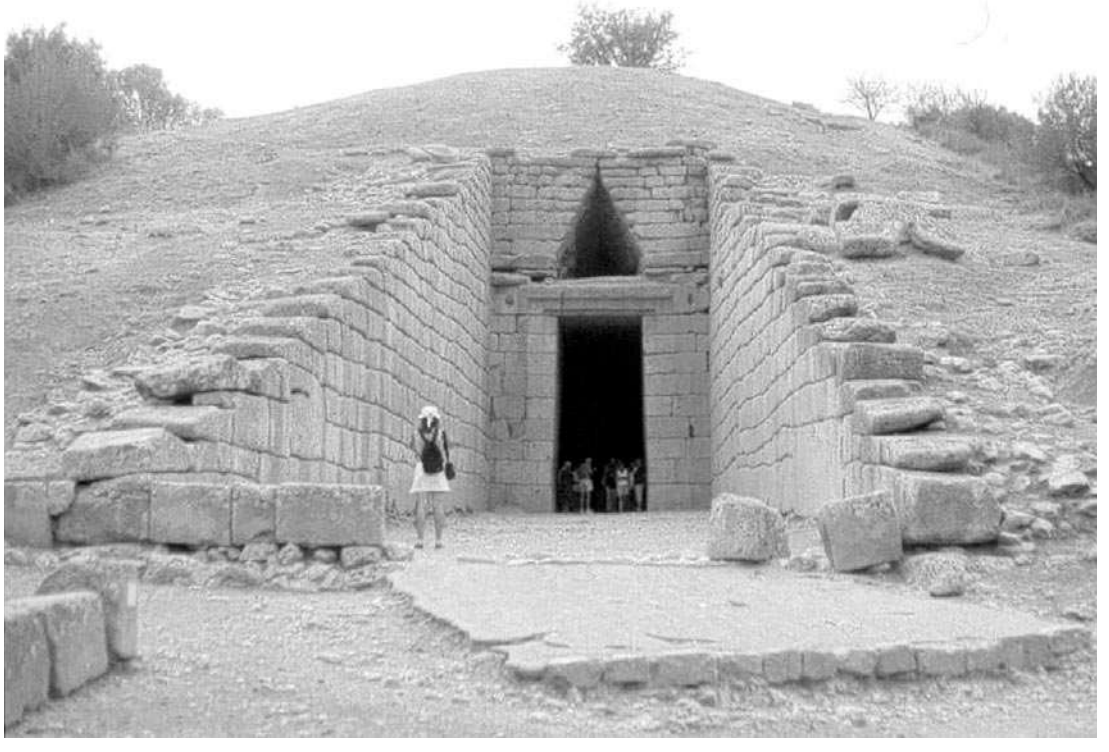
Particolare interesse nell'architettura del monumento, si pone nell'analisi della *cupola* muraria a copertura della camera, comunemente definita in letteratura *pseudocupola*. Lo studio rileva che la cupola muraria della *tholos* micenea risponde invece all'effettivo comportamento di una *vera* cupola muraria cerchiata ai fianchi, ottenuto attraverso la sapiente apparecchiatura dei corsi lapidei e la particolare morfologia del monumento: la cupola muraria è inserita in un pozzo di scavo e ricoperta dal tumulo all'estradosso.

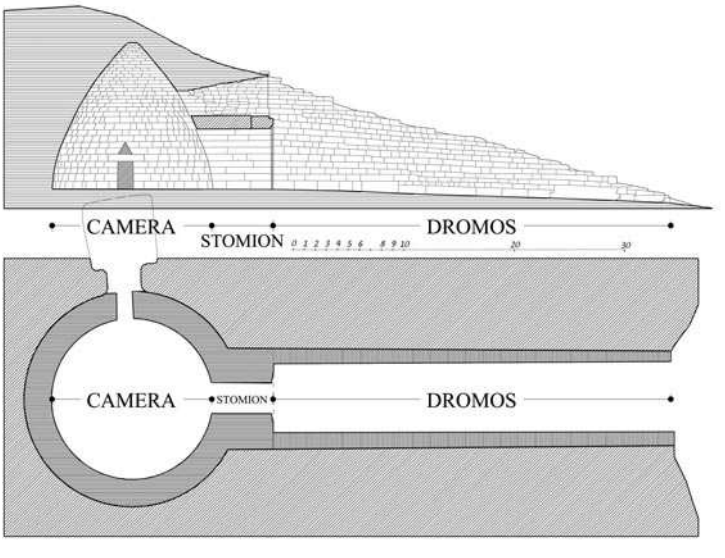
L'analisi costruttiva e statica fa luce su antiche capacità costruttive e sugli sviluppi delle conoscenze tecniche che hanno condotto alla costruzione dell'arco e delle cupole nella storia del costruire. In tal senso le *tholoi* micenee risultano particolarmente significative, sia perché aperto è il dibattito sul reale comportamento statico di tali cupole, sia perché l'evidenza degli accorgimenti tecnici utilizzati per la costruzione, analizzati in rapporto ai benefici che inducono alla statica, entrano nel merito dei passaggi intermedi, delle sperimentazioni empiriche, che guidano all'acquisizione di una tecnica, che nella statica degli ammassi murari vede le cupole e gli archi come le straordinarie soluzioni per la copertura dello spazio. Da ciò, la conservazione delle *tholoi* micenee è significativa non solo per evitare la perdita di espressioni significative della cultura che le ha prodotte e per la conservazione delle evidenze in sé, ma ad un livello superiore assume un valore più esteso che investe il faticoso e affascinante percorso dell'uomo nella storia del costruire.

[9] Boyd [2002, p. 148].
[10] Boyd [2002, p. 169].



1. Englianòs 'tholos' IV. Estradosso della cupola muraria della camera dopo il restauro degli anni '50





1.
'Dromos', 'stomion' e tumulo
del Tesoro di Atreo

2.
Tesoro di Atreo. Pianta e sezione longitudinale (elaborato sulla base di Wace [1921-23, pl. LVI])

I
elementi architettonici e costruttivi della 'tholos'

La *tholos* micenea costituisce un monumento estremamente significativo per la sintesi raggiunta tra elementi compositivi primordiali dell'architettura: l'emergenza del tumulo, segnacolo nel paesaggio[1] e monumento; il *dromos*, il percorso sacro che conduce all'interno; lo *stomion*, la porta di accesso allo spazio interno; la camera voltata, il segreto dello spazio scavato, l'interno sacro, figg. 1 e 2.

La *tholos* è struttura ipogea ed insieme visibile nel paesaggio; architettura realizzata tramite scavo (il sottrarre) e costruzione (l'aggiungere), una relazione tra tecniche che la caratterizza come la forma costruita più avanzata della cultura micenea. La morfologia delle *tholoi*, che si manifesta nella congiunzione tra la camera interna voltata a cupola ed il tumulo, evidenzia la complessità dell'impianto, relativa tanto all'idea architettonica quanto alle problematiche della costruzione.

L'analisi dell'architettura del monumento negli aspetti della forma materiale e della costruzione è stata generalmente poco affrontata in letteratura, mentre, in linee generali, sono stati privilegiati il tema della catalogazione delle espressioni nel tentativo di un'organica classificazione e la descrizione degli elementi relativi alle superfici visibili, soprattutto degli elementi architettonici più rilevanti da un punto di vista artistico e decorativo.

Un approccio analitico propriamente architettonico e tecnico costruttivo, che parte dalla lettura dell'evidenza fisica, conduce a riconoscere la funzione costruttiva delle parti del monumento e induce a ripercorrere le fasi della costruzione, a partire dalla scelta del sito fino alla copertura dello spazio interno e alla messa in opera del tumulo. In tal modo l'analisi si spinge all'interno della materia del monumento, nel tentativo di ripercorre la genesi della costruzione nella ricerca di evidenze concrete che possano svelare la natura della costruzione e il comportamento statico.

La presente descrizione della *tholos* micenea procede con il riconoscimento delle particolari soluzioni tecniche

[1] Gordon Childe [1966, p. 227] sottolinea la significatività dell'ubicazione delle *tholoi* micenee.

capaci di favorire la stabilità degli scavi e delle strutture murarie e di risolvere le problematiche della costruzione. Si descrive l'architettura del monumento in rapporto alle azioni concrete che possano essere state compiute, e alla funzione statica che tali elementi assolvono nel complesso architettonico.

Nella trattazione, apparirà evidente la necessità di un particolare approfondimento degli aspetti statici e costruttivi; il richiamo all'uso di particolari scelte tecnico – costruttive, presenti in esempi concreti e documentate in letteratura, svela infatti gradualmente una ricchezza di soluzioni e un uso sapiente di taluni accorgimenti tecnici, che guidano al superamento della definizione di *pseudocupola* comunemente attribuita a tali strutture. La descrizione architettonica della *tholos* mette in luce pertanto la complessità di una definizione dell'identità strutturale ed evidenzia quelle problematiche degli aspetti costruttivi e statici che attendono maggiore chiarificazione e che costituiscono l'oggetto dello studio.

Una descrizione completa della struttura muraria della *tholos* è una questione complessa, per la mancanza di dati a disposizione sufficienti. Per l'ubicazione ipogea del monumento solo il prospetto delle murature lungo il percorso di accesso e all'interno della camera risulta direttamente visibile; per una parte le strutture sono a ridosso delle pareti di scavo, del *dromos* e del pozzo, e per l'altra sono ricoperte dal tumulo o adiacenti ad esso. Tale condizione impedisce l'esecuzione diretta del rilevo di tutte le sue parti.

Mancano infatti in letteratura rilievi completi di *tholoi* integre, che descrivano anche le parti interne della struttura non direttamente ispezionabili, come, in particolare, la forma completa della muratura della camera, l'apparecchiatura muraria interna, la relazione tra muratura della cupola e pozzo di scavo, la forma dell'estradosso della cupola nella parte emergente coperta dal tumulo e il rapporto tra quest'ultima e il tumulo all'estradosso.

Per tentare di formulare una descrizione completa della conformazione del monumento, e in particolare della cupola muraria, e del complesso cupola – pozzo di impianto tumulo, si hanno a disposizione unicamente dati parziali provenienti da descrizioni e rappresentazioni di alcune *tholoi*, limitati a parti specifiche della struttura eccezionalmente osservate, o la possibilità dell'osservazione diretta di strutture parzialmente crollate. Pertanto, la raccolta ragionata dei dati esistenti e, in particolare, il loro esame, alla luce delle ragioni costruttive e statiche, hanno costituito un passaggio fondamentale, per tentare di delineare in sintesi le caratteristiche comuni del complesso cupola – pozzo – tumulo.

Alla descrizione di massima, ottenuta dalla raccolta dei dati suddetti, va premessa la classificazione architettoni-

ca presente in letteratura [2], che, fondata su un principio evoluzionistico della tecnica, definisce, attraverso una divisione in gruppi delle evidenze presenti, i diversi stadi dello sviluppo costruttivo della *tholos* che conducono, attraverso successive sperimentazioni, alle ultime espressioni della "catena evolutiva": la Tomba di Clitennestra, il Tesoro di Atreo e la *tholos* di Orchomenos. Tale classificazione riesce infatti a cogliere i caratteri architettonici salienti delle *tholoi* micenee, che permangono e si rafforzano nel tempo, e che attraverso successivi miglioramenti definiscono il consolidamento di una specifica tecnica costruttiva, e pertanto della tipologia architettonica della *tholos* micenea che costituisce l'oggetto della presente descrizione.

1.
Il pozzo di impianto

La tomba a *tholos* micenea è una camera sotterranea di impianto circolare, voltata a cupola muraria mediante corsi lapidei anulari concentrici progressivamente aggettanti, e ricoperta all'estradosso da un tumulo in pietrame e terra.

La condizione ipogea è ottenuta attraverso lo scavo di un pozzo circolare in cui sono inseriti lo spazio della camera e parte della struttura muraria della cupola a perimetro e copertura, e si conclude attraverso l'imposizione del tumulo all'estradosso.

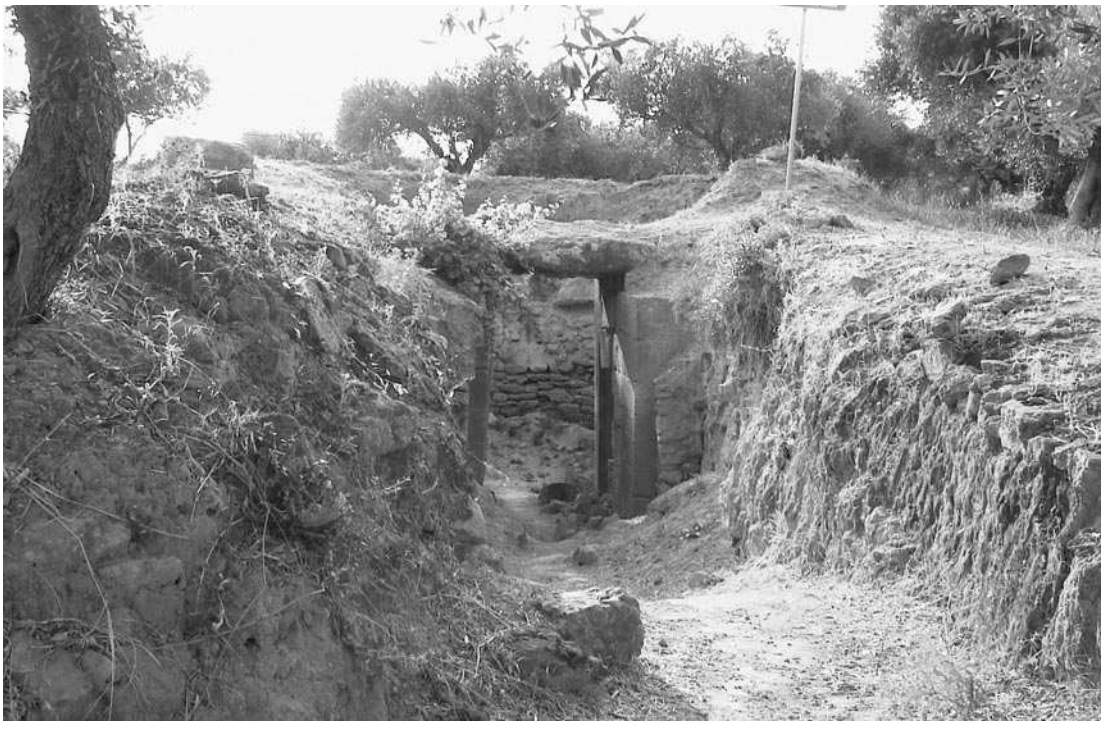
Per tale particolare rapporto con il suolo, le *tholoi* sono collocate generalmente, lungo le pendici di una collina, in modo da ricavare il pozzo di impianto attraverso lo scavo della pendice. La profondità dello scavo, e pertanto l'altezza del pozzo, è generalmente pari all'altezza della porta di accesso [3], fig. 3. In tal modo le pareti perimetrali della camera fino alla quota dell'architrave della porta sono controterra [4], mentre la restante struttura muraria, a copertura dello spazio, si eleva al di sopra del pozzo, generando con il tumulo sovrastante un volume emergente dal profilo del declivio della collina [5].

Nei casi in cui è stato possibile visionare parte delle pareti del pozzo circolare di impianto (*tholoi* parzialmente

[2] Wace 1931, Pelon 1976.

[3] Holland [1921-23, p. 397] per primo evidenzia che i blocchi architrave a copertura del vano di accesso sono posti nelle *tholoi* di Micene alla quota del suolo naturale. Inoltre, Wace [1921-23, p. 280] aggiunge che con tale ubicazione la messa in opera delle grandi lastre architrave avveniva per trascinamento lungo il pendio.

[4] Mediamente la parte della cupola inserita nel pozzo corrisponde a circa il 40% dell'altezza interna della camera; tale valutazione è stata ottenuta dall'autrice dalla media dei rapporti dei dati di altezza dello *stomion* con l'altezza interna della cupola relativa presenti in Pelon [1976, p. 482-491, Tav. IV]; Holland [1921-23, p. 397], per le *tholoi* di Micene considera, sinteticamente, circa metà della struttura della cupola emergente dal pozzo.



3.
Tragàna 'tholos' 1. Il pozzo di impianto (archivio Centro Mediterraneo Preclassico)

crollate o aventi una camera secondaria scavata nella roccia che consentisse di esaminare, nel vano di passaggio, un tratto della roccia a cintura delle pareti murarie) si è osservato che le pareti del pozzo sono verticali [6] o presentano una leggera inclinazione verso l'interno.

Nel Tesoro di Atreo, in prossimità del foro del *triangolo di scarico* sul vano di accesso alla camera secondaria, si riconosce che la parete del pozzo è lievemente inclinata verso la camera [7]. Una leggera inclinazione verso l'interno delle pareti del pozzo è stata individuata anche nella Tomba dei Ciclopi [8], nella Tomba di Egisto [9] e nella Tomba di Clitennestra [10]. Va sottolineato che la possibilità di realizzare un pozzo con pareti inclinate verso l'interno è data essenzialmente dalla consistenza della roccia in cui è eseguito lo scavo; pertanto è la natura geologica del territorio di Micene

[5] La *tholos* di Marathon costituisce un'interessante eccezione: è realizzata in pianura tramite un profondo scavo, evidente per la forte pendenza del *dromos*, in cui si inserisce tutta la struttura muraria di copertura della camera. Similmente, seppure trattasi di un esempio di transizione tra tomba a camera e *tholos*, la *tholos* di Kokla è interamente sotterranea e presenta un lungo *dromos* a forte pendenza.

[6] Pareti verticali del pozzo di impianto sono descritte per la *tholos* A di Kakovatos (Dörpfeld [1908, p. 303]), la *tholos* di Orchomenos (Schliemann [1881, p. 25]), la *tholos* circolare di Thorikos (Gasche - Servais [1971, p. 55]).

[7] La leggera inclinazione verso l'interno delle pareti del pozzo è descritta in Wace [1921-23, p. 349].

[8] Wace [1921-23, p. 290].

[9] Wace [1921-23, p. 301].

[10] Wace [1921-23, p. 362].

che ha permesso tale configurazione dei pozzi in cui sono inserite le suddette *tholoi*. D'altra parte, l'evidenza di pozzi di impianto siffatti, che tendono ove possibile a seguire la curvatura della cupola all'estradosso, suggerisce la necessità costruttiva di realizzare un pozzo strettamente connesso con la muratura perimetrale della camera.

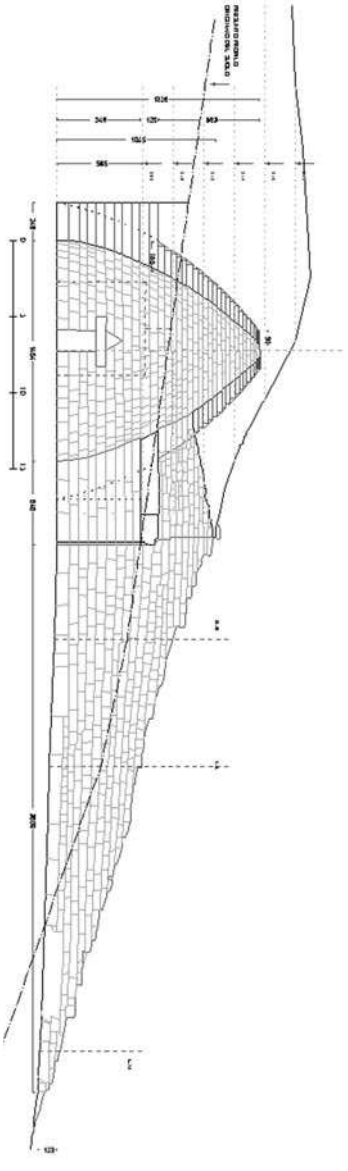
2.
Il dromos

L'ingresso alla camera ipogea avviene tramite una monumentale rampa rettilinea, il *dromos*, che si sviluppa, a meno di alcune eccezioni, come prolungamento entro il tumulo di uno dei raggi della camera circolare [11], e costituisce il percorso più diretto dall'esterno all'ambiente interno, fig. 4. Il *dromos* è generalmente in leggera pendenza in modo da raggiungere la quota del pavimento della camera; ciò è determinato dalla morfologia del sito di impianto [12], o è legato all'epoca della costruzione secondo l'evoluzione del *modus operandi* [13]. In ragione di ciò il *dromos* taglia la pendice della collina in cui è ricavata la camera e il tumulo sovrastante, ed è contenuto lateralmente da pareti murarie progressivamente più alte, costituite direttamente dalla collina tagliata [14], fig. 5, o da muri di contenimento, fig. 6.

La direzione del *dromos* non segue un determinato orientamento; la morfologia del luogo di impianto e la consistenza del terreno assumono infatti un ruolo primario nella scelta della direzione allo scopo di favorire le operazioni di cantiere e la stabilità delle strutture.

Potrebbe riconoscersi la regola, comune anche alle tombe a camera, seppure non sempre applicata [15], di realizzare il *dromos* in direzione ortogonale alle curve di livello, fig. 7.

Per l'incisione del percorso del *dromos* il pozzo di impianto risulta tagliato per un tratto, che generalmente corrisponde al lato verso valle e, a causa della non orizzontalità della pendice in cui è scavato, ha altezza variabile, altezza minima proprio in corrispondenza dell'ingresso ove viene comunemen-



4.
Tesoro di Atreo. Sezione longitudinale con ipotesi sull'andamento del profilo originario del suolo prima della messa in opera del tumulo e sulla geometria all'estradosso della muratura della cupola (elaborato sulla base di Wace [1921-23, pl. LVI] e di Wace [1940, figg. 1 e 2])

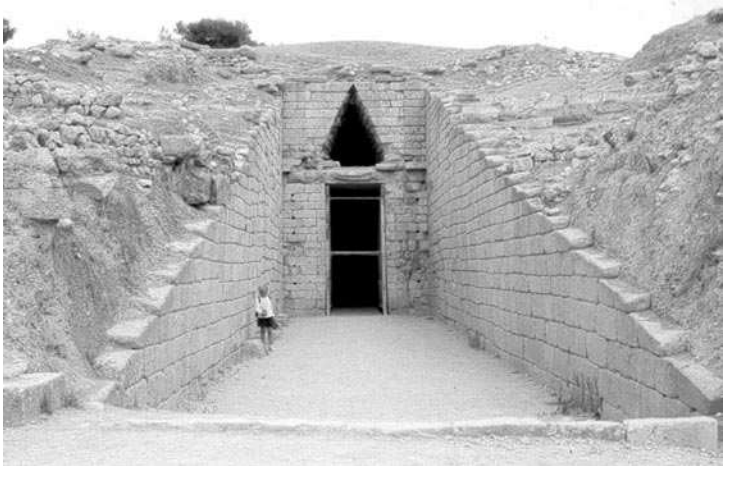
[11] Lo suggerisce Wace [1931, p. 144] e anche Wilkie [1992, p. 233] afferma che l'impianto del *dromos* avveniva estendendo una linea dal centro della camera proposto per opportuna lunghezza.

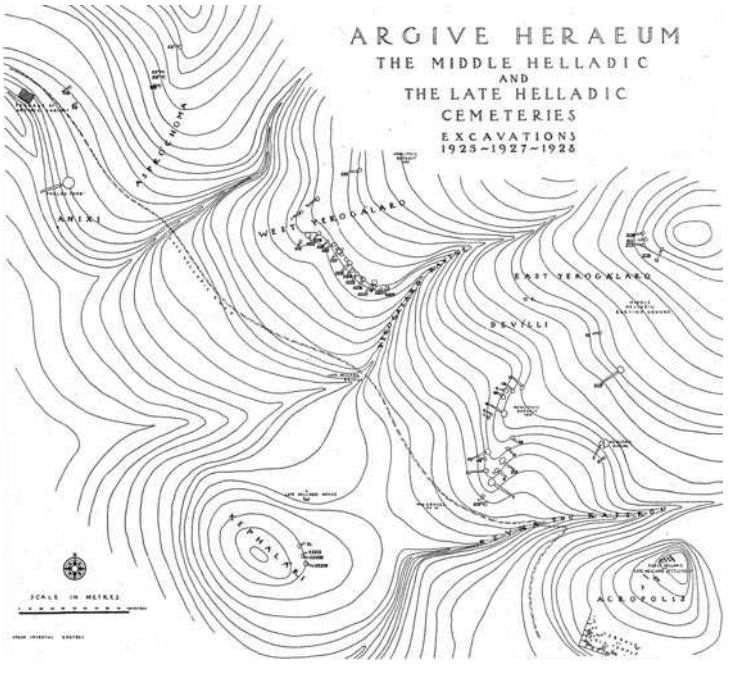
[12] Pelon [1976, p. 285] suggerisce che *dromoi* in pendenza verso lo *stomion*, particolarmente comuni in Messenia, sarebbero determinati dalla morfologia dei luoghi di impianto.

[13] Pelon [1976, p. 285] sottolinea che mentre le prime due *tholoi* di Micene hanno *dromoi* in pendenza verso la camera, in imitazione agli accessi delle tombe a camera locali, tutte le *tholoi* del terzo gruppo presentano pendenza contraria, e costituiscono un'evoluzione tecnica allo scopo di favorire il deflusso delle acque verso l'esterno.

[14] In alcune *tholoi* la natura geologica del suolo permette la mancanza di murature di contenimento.

[15] La *tholos* circolare di Thorikos ha il *dromos* orientato parallelamente alle curve di livello (Gasche - Servais [1971, p. 55]), stessa condizione si rileva per le tre *tholoi* di Kakovatos (Dörpfeld [1908, Taf. V]).





5.
'Tholos' di Archanes a Creta. Le pareti laterali del 'dromos' sono costituite direttamente dalla roccia tagliata in 'kouskouras'
6.
Tomba di Clitennestra. I paramenti murari del 'dromos'
7.
Prosymna, pianta della necropoli dell'Heraion di Argo con la 'tholos'. Si riconosce il rapporto dei 'dromoi' della 'tholos' e delle tombe a camera con le curve di livello (Blegen [1937, plan I])
8.
Tomba di Egisto. Particolare della muratura del 'dromos' a sostegno del tumulo in prossimità dello 'stomion'

te misurata come equivalente all'altezza del vano di accesso.

Molti hanno avanzato l'ipotesi che le prime operazioni nella costruzione della *tholos* fossero costituite dalle opere di scavo, sia del pozzo che del *dromos*, eseguite contemporaneamente, in modo da utilizzare il percorso del *dromos* per la rimozione del materiale di scavo [16].

Va d'altra parte sottolineato che l'apertura del pozzo con l'incisione del *dromos* doveva comportare, e in grado diverso a seconda delle caratteristiche del terreno in cui era realizzato lo scavo, la necessità di un contenimento del terreno proprio all'intersezione tra pozzo e *dromos*.

Le murature dello *stomion* proprio ivi poste, di struttura possente per tutta la loro estensione, potrebbero aver avuto durante la costruzione il ruolo del suddetto contenimento. Persson ipotizza per la *tholos* di Dendra una diversa successione delle fasi costruttive: *dromos* – *stomion* - scavo del pozzo[17], ciò probabilmente allo scopo di evitare la condizione critica di pozzo scavato in assenza di contenimento laterale, utilizzando il *dromos* per trasporto di materiale.

Si osserva tuttavia che l'ipotesi del Persson non contempla il fatto che nella maggior parte dei casi i paramenti murari ai lati del *dromos* poggiano sulle pareti dello stomion senza che questi siano ammorsati [18], e ciò è evidenza della successione *stomion* – paramento murario del *dromos*.

Tale condizione, d'altra parte, non contraddice l'ipotesi che lo scavo del *dromos* potesse comunque compiersi in precedenza, lasciando momentaneamente la parete di scavo senza rivestimento murario. Inoltre, l'analisi della fattura delle murature laterali dei *dromoi* evidenzia la mancanza di particolari difficoltà per il contenimento dello scavo e invece specifici accorgimenti tecnici per la realizzazione della parte superiore dei paramenti murari a contenimento del tumulo.

A conferma di ciò, ad esempio, nella Tomba di Egisto le pareti di scavo del *dromos* non presentano muratura di rivestimento e sono lasciate a vista, mentre murature di contenimento sono realizzate a sostegno del tumulo al di sopra del suolo originario, fig. 8.

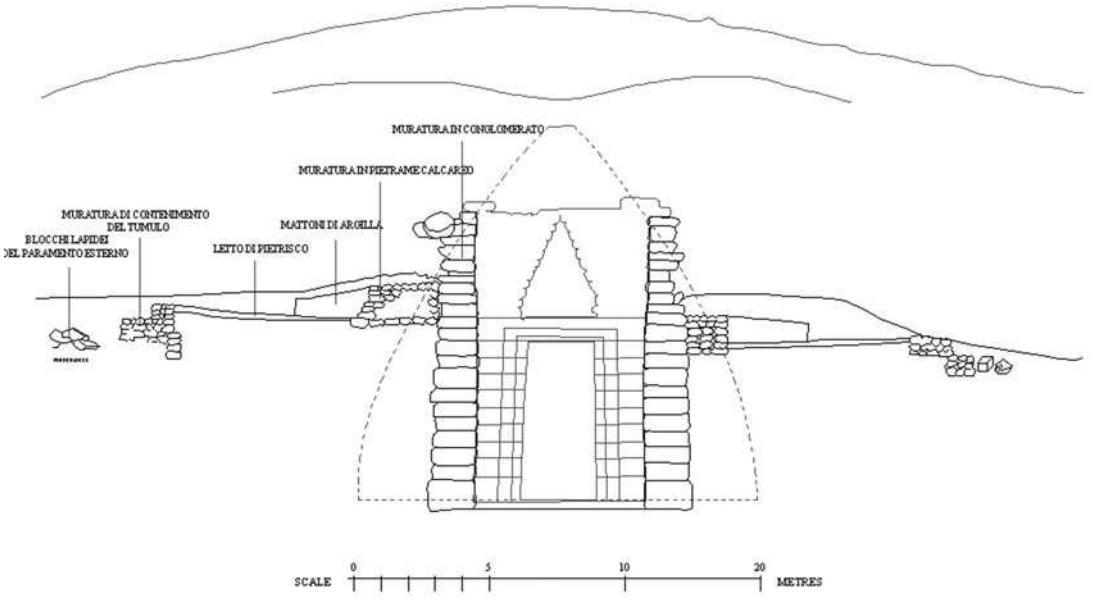
Gli accorgimenti tecnici riscontrati dai saggi eseguiti da Wace a tergo dei paramenti murari prospicienti il *dromos* del Tesoro di Atreo testimoniano una profonda esperienza costruttiva e l'utilizzo di due distinti criteri, uno per la parte bassa, allineata alla parete di scavo, e l'altro per la parte superiore a contenimento del tumulo soprastante.

I paramenti murari a ridosso della parete di scavo della

[16] Wilkie [1992, p. 242], Santillo [1986, p. 18].

[17] Persson [1931, p. 19].

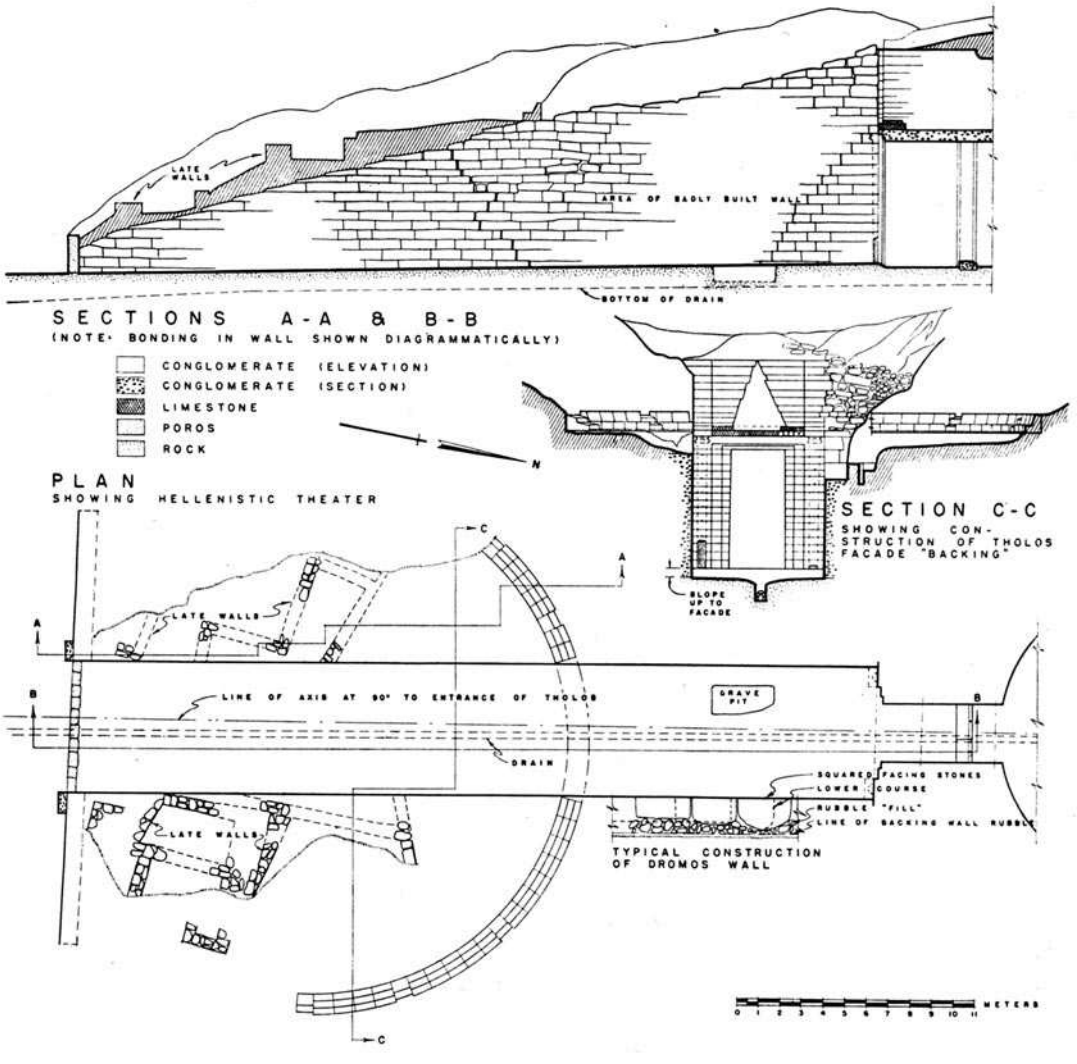
[18] Nel Tesoro di Atreo e nella Tomba di Clitennestra sono stati riscontrati alcuni blocchi lapidei comuni alle due murature, Wace [1964, p. 123; 1954, p. 197]. Ciò comunque non induce a confutare la successione *stomion* – muratura di contenimento del *dromos*.



9.
Tesoro di Atreo. Sezione traversale sul 'dromos' con indicazione della fattura delle murature laterali di contenimento (elaborato sulla base di Wace, 1940, p. 239, fig. 1)
10.
Il 'dromos' della tholos MME di Nichoria (archivio Centro Mediterraneo Preclassico)

pendice della collina sono costituiti da una sola fila di blocchi squadrati di pietra di conglomerato lavorati a martello dello spessore di circa 1,5 m, disposti con giunti verticali sfalsati. La fascia superiore dei paramenti, al di sopra dell'originario profilo del suolo naturale e dunque a contenimento del terreno del tumulo, beneficia di un notevole incremento di spessore e di un complesso sistema per favorire il deflusso delle acque piovane al perimetro del tumulo, fig. 9. Al paramento di prospetto in blocchi di conglomerato ad una fila viene ammorsata una retrostante muratura dello spessore di circa 3 m in pietrame calcareo allettato con argilla: alcuni blocchi lapidei di conglomerato del paramento di prospetto sono posti di testa e penetrano nella muratura retrostante rendendo solidali i due paramenti. Infine, alle spalle di tale complesso murario è presente uno spessore di mattoni di argilla cruda di circa 3 m che, posto su un letto di pietrisco, impedisce all'acqua di infiltrarsi nel *dromos* e la convoglia ai piedi del tumulo a perimetro [19].

Le murature di contenimento del *dromos* della *tholos* di Nichoria in Messenia, fig. 10, presentano una composizione per elementi costruttivi analoga a quella riscontrata nel Tesoro di Atreo, rispondendo alle necessità statiche e di protezione dalle infiltrazioni d'acqua con soluzioni tecniche simili. La parte della muratura a ridosso del taglio verticale della collina determinato dal percorso del *dromos* è in muratura piena di blocchi di calcare disposti a tre o a quattro teste, a seconda della dimensione dei blocchi lapidei; la parte superiore, a sostegno del tumulo, si compone di una sola fila di blocchi di calcare e di una retrostante muratura in pietrame allettato con malta di argilla. A tergo, un pacchetto di sabbia rossa mista ad argilla protegge la muratura e il *dromos* dalle infiltrazioni d'acqua [20].

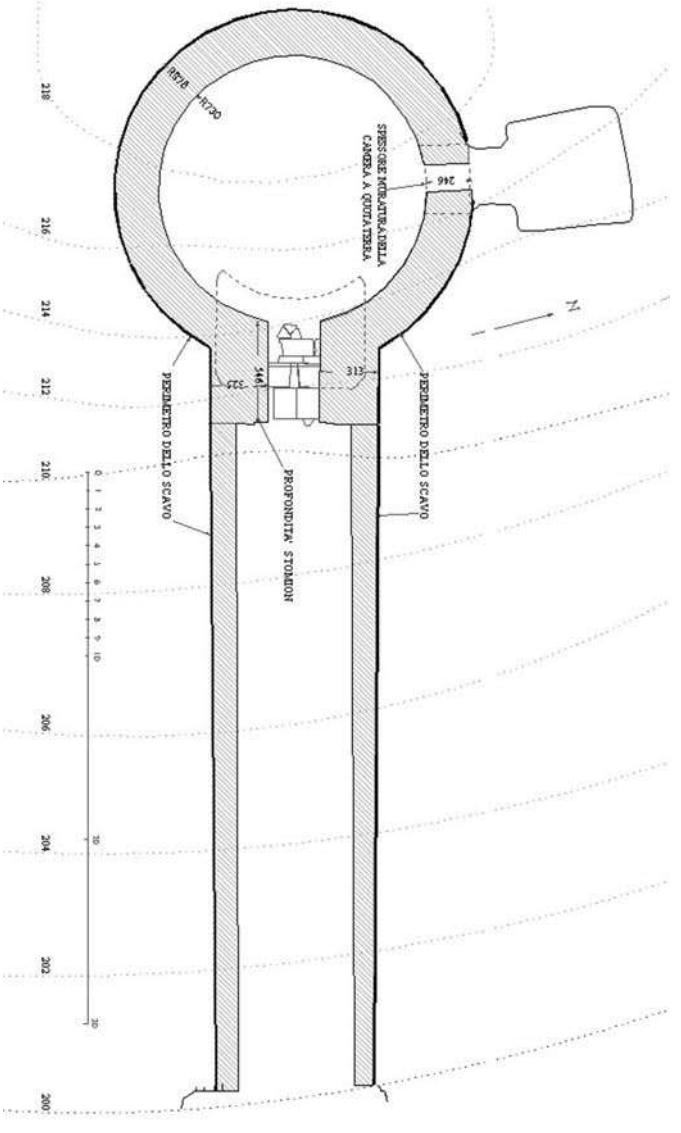


Che il punto più critico per la stabilità delle murature del *dromos* fosse costituito dalla parte superiore a contenimento del tumulo, e che richiedesse particolari soluzioni tecniche, viene confermato anche dall'esame della Tomba di Clitennestra, fig. 12. La parte superiore della muratura est del *dromos*, in stato di dissesto in quanto fortemente inclinata verso l'interno del *dromos*, fu oggetto di restauro nel 1950, fig. 11.

Le pietre di conglomerato del paramento di prospetto furono smontate e numerate per ricollocarle nella loro posizione originaria, e a tergo di tale paramento fu rinvenuto un primo riempimento di pietrame e argilla di circa 1,5 m di spessore e un'ulteriore muratura di pietrame [21]. Nonostante la particolare attenzione al contenimento del tumulo, data dal notevole spessore delle murature, l'infiltrazione delle acque aveva probabilmente provocato la rotazione del paramento.

11.
Tomba di Clitennestra. Pianta e sezione del 'dromos' eseguite dopo i lavori di restauro del 1950 (BSA 50, 1955, Tav. 35)
12.
Tomba di Clitennestra. I paramenti murari del 'dromos'

[19] Wace [1964, p. 123].
[20] Wilkie [1992, p. 241].
[21] Wace [1954, p. 196].



13.
Tesoro di Atreo. Pianta con ipotesi degli spessori delle murature a quota terra (elaborato sulla base di Wace, 1921-23, pl. LVI e Wace, 1940)
14.
Tomba dei Leoni. L'innesto, in continuità, dei grandi blocchi lapidei dello 'stomion' con la muratura della camera in blocchi più piccoli
15.
Tomba di Clitennestra. Murature dello 'stomion'
16.
'Tholos' di Dendra. 'Stomion'

3.
Lo stomion

All'intersezione dell'asse del *dromos* con la muratura circolare perimetrale alla camera è posto il sistema del portale di accesso, lo *stomion*, che, con l'apertura del vano di ingresso, apre la circonferenza muraria perimetrale fino alla quota dell'architrave.

I terminali dell'arco di circonferenza muraria, ottenuto dalla presenza del vano, fungono da piedritti dell'apertura, e definiscono verso il *dromos* la facciata monumentale di ingresso, tramite un incremento di spessore della muratura [22].

La parete muraria dello *stomion* verso il *dromos* si eleva verticalmente, mentre verso la camera segue la curvatura della cupola, integrandosi alle murature della camera.

I piedritti, e tutta la muratura dello *stomion*, sono generalmente più robusti della muratura della camera [23]; hanno maggiore spessore [24], fig. 13, e rivelano particolare cura nell'apparecchiatura muraria, fig. 15, distinguendosi come un'unità dalle restanti murature seppure poste generalmente in continuità, fig. 14. Nella tomba a *tholos* di Dendra, fig. 16, Persson si sofferma sull'uso di grossi blocchi lapidei nei cantonali interni, apparecchiati in modo da alternare blocchi di testa a blocchi di lungo [25], e dunque tali da conferire rigidezza al cantonale.

All'interno della camera i piedritti dell'apertura si connettono alle pareti murarie perimetrali formando una struttura muraria continua. Ciò avviene, generalmente, ammorsando le due murature tramite innesto per giunti sfalsati, anche nei casi in cui l'apparecchiatura delle murature perimetrali della camera è in corsi solo accennati, o l'altezza dei corsi non coincide con quella presente nei piedritti, figg. 17 e 18.

La particolare solidità e la cura nell'apparecchiatura delle strutture murarie dello *stomion* ha suggerito che, da un punto di vista costruttivo, la presenza del vano determini una zona di debolezza per la statica della costruzione [26].

17.
Nichoria. Particolare dell'innesto tra la muratura del piedritto e la muratura perimetrale della camera (archivio Centro Mediterraneo Preclassico)
18.
Tragana 'tholos' 1. Particolare dell'innesto tra la muratura del piedritto e la muratura perimetrale della camera (archivio Centro Mediterraneo Preclassico)

[22] Lo spessore della muratura dello *stomion* risulta generalmente maggiore di quello della muratura perimetrale della camera.

[23] Pelon [1976, p. 298] afferma che lo *stomion* doveva essere in grado di contenere le spinte laterali degli anelli murari orizzontali della camera e di fungere da contrafforte alla spinta della cupola verso l'esterno.

[24] Nel Tesoro di Atreo, nell'ipotesi che alla base lo spessore della camera corrisponda alla muratura visibile nel vano di accesso alla camera laterale (2,43 m ca.), la profondità dello *stomion* è più del doppio (5,40 m ca.). Analogamente nella *tholos* di Achladia la presenza del così detto *stomion* B ha consentito (Belli, 1995, pp. 89-113) di misurare lo spessore della muratura della camera (1,45 m) che risulta inferiore a quello dello *stomion* vero e proprio (1.90 m).

[25] Persson [1931, p. 22].

[26] Pelon [1976, p. 298] suggerisce che numerose delle *tholoi* crollate sembra abbiano ceduto in prima istanza allo *stomion*.

In tale zona della struttura architettonica, infatti, manca il contrasto ottenuto dalla parete del pozzo che cerchia la muratura della camera, e gli anelli murari orizzontali della muratura perimetrale sono interrotti.

Nella statica dell'insieme architettonico della *tholos* lo *stomion* sembra assumere la funzione di contrafforte alla muratura ad arco circolare della camera interna e di sostegno del terreno a ridosso del pozzo di scavo per la parte a tergo. Lo *stomion* sembra infatti costituire il necessario contenimento ai terminali delle pareti del pozzo di impianto nel punto in cui queste vengono interrotte dal vano di ingresso.

Tali osservazioni suggeriscono, nella ricerca della successione delle fasi costruttive, che alle preliminari opere di scavo seguisse in primo luogo proprio la costruzione dello *stomion*, e successivamente il completamento dello scavo del pozzo. Da tale ipotesi discenderebbe che la costruzione della struttura dello *stomion* costituisca essenzialmente la prima azione costruttiva dopo la definizione in sito dell'impianto di progetto, in modo da assicurare con la sua presenza il presidio necessario per le successive operazioni di scavo.

Tale ipotesi viene confermata per la *tholos* di Platyskinos, presso Achladia [27] (Creta), dalla forma in pianta della camera, che risulta leggermente schiacciata ai poli ove sono posti lo *stomion* di accesso e il così detto *stomion* B [28].

Il sistema trilitico del portale di accesso viene completato con la posa in opera di uno o più architravi in pietra a copertura del vano dello *stomion* sui piedritti.

Le lastre lapidee sono collocate ad un'altezza pari alla quota originaria del suolo naturale, al bordo superiore del pozzo circolare di scavo. Tale condizione consentiva di mettere in opera le grandi lastre trascinandole lungo il pendio, evitando, in tal modo, l'onerosa opera di sollevamento.

Va osservato che le azioni di trascinamento degli architravi e di messa in opera sui piedritti sarebbero state più agevoli se eseguite prima dello scavo del pozzo circolare di impianto. In questo modo, infatti, il percorso di trascinamento sui piedritti poteva essere diretto. Tale considerazione potrebbe supportare l'ipotesi di individuare proprio nello *stomion* il primo elemento architettonico da realizzare nella successione delle fasi costruttive.

La luce netta del vano di accesso diminuisce gradual-

[27] Belli [1995, pp. 89-113].

[28] La *tholos* presenta un'ulteriore apertura nella camera interna detta *stomion* B, posta in asse con lo *stomion* principale, e che non conduce ad una camera secondaria. I piedritti e l'architrave dello *stomion* B sono arretrati rispetto alla muratura della camera di circa 15 cm.

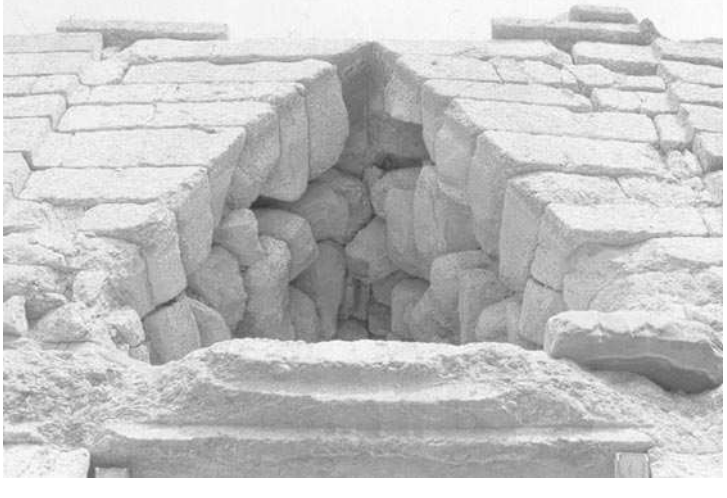
Presumibilmente, la mole dei blocchi ciclopici che formano la muratura perimetrale della camera può aver reso complesso seguire in corso d'opera la circonferenza di progetto, prefissata dalla presenza dei due *stomion*, determinando il leggero schiacciamento della pianta circolare della camera lungo l'asse di connessione dei due *stomion*, Belli [1995, p. 89-113].

mente dal suolo alla testa dei piedritti; questa caratteristica, che conforma la monumentale apertura con gli stipiti leggermente inclinati verso l'interno, risponde anche allo scopo pratico di contenere la luce degli architravi necessari alla copertura del vano, fig. 19.

Nei casi più monumentali gli architravi in pietra raggiungono eccezionali dimensioni e peso [29], e sono, generalmente, soggetti al solo peso proprio per la presenza di *un falso arco* all'estradosso, il così detto *triangolo di scarico*, fig. 20.

Tale dispositivo, caratteristico del linguaggio architettonico dell'architettura micenea, è realizzato disponendo sui lati dell'architrave blocchi lapidei progressivamente in leggero aggetto l'uno sull'altro, fino alla chiusura del vuoto. I blocchi sono assicurati da una sapiente alternanza dei giunti verticali che ne realizza l'ammorsamento.

Lo spazio vuoto realizzato all'interno dello spessore murario dello *stomion* e della cupola descrive in volume un prisma triangolare che, di regola, decresce in altezza, procedendo dal prospetto dello *stomion* sul *dromos* alla camera interna, assumendo in facciata la caratteristica apertura a triangolo isoscele e all'interno della camera a triangolo pressoché equilatero [30]. In letteratura il *falso arco* dello *stomion* viene denominato *triangolo di scarico* poiché si assume che costituisca l'espediente tecnico per evitare di caricare in mezzeria gli architravi lapidei [31].

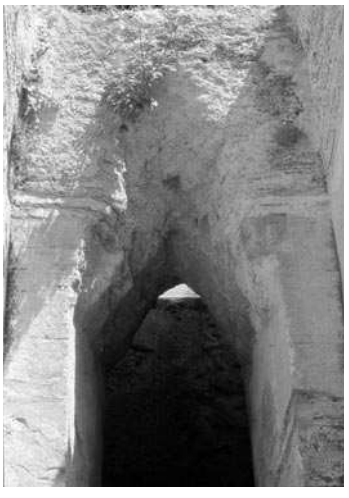


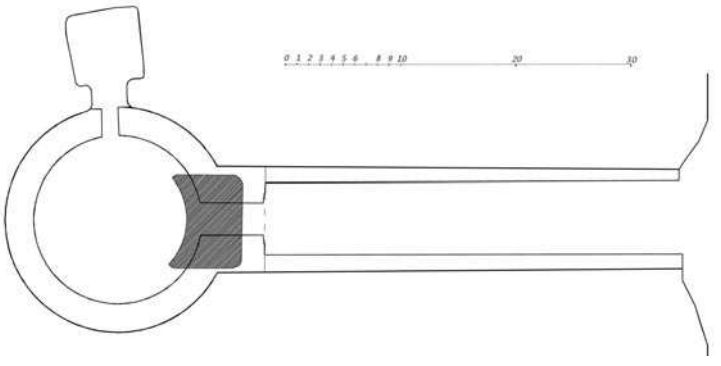
[29] Il peso del maggiore architrave in pietra del Tesoro di Atreo raggiunge circa 120 tonnellate.

[30] Generalmente il vuoto creato dal *triangolo di scarico* veniva occultato sulle superfici esterne, apparecchiando "ad una testa" blocchi lapidei in continuità con le murature adiacenti, o con lastre di rivestimento sul prospetto esterno.

[31] La limitata capacità di resistenza a trazione dei materiali lapidei rende complessa la costruzione degli architravi in pietra. In letteratura si sottolinea che l'esperienza costruttiva dei micenei si evidenzia sia per l'uso preferenziale di materiali, quali, ad esempio, i conglomerati, e sia per l'utilizzo dell'artificio del *triangolo di scarico*.

19.
Tesoro di Atreo. Vista dello 'stomion' dal 'dromos'.
20.
Tomba di Clitennestra. Il 'triangolo di scarico' dal 'dromos'





Tuttavia è da osservare che la sola realizzazione di un *falso arco* in una muratura produce un'apertura, così come avviene per i passaggi praticati nelle murature dai costruttori micenei, ad esempio le porte delle cinte murarie (a meno dei casi più monumentali). Sembra pertanto che una specifica caratteristica della tipologia della *tholos* è data dalla presenza dell'architrave orizzontale alla base del *falso arco*.

Inoltre, a tal proposito, è da sottolineare che nel vano di accesso alle *tholoi* gli architravi di maggiore dimensione sono, generalmente, quelli più interni, posti in adiacenza con la muratura della camera, fig. 21.

È inoltre interessante rilevare che nelle più monumentali tombe a camera, come le tombe a camera di Pellana in Laconia, che imitano, attraverso lo scavo della roccia, la forma architettonica delle *tholoi*, la porta di accesso riprende la forma triangolare del *falso arco* senza l'architrave orizzontale, fig. 22. Tale configurazione contribuisce a svalutare la necessità del *falso arco* allo *stomion* per scaricare il peso dall'architrave, e a considerare, invece, al contrario, la messa in opera delle lastre architrave sul vano di accesso come una caratteristica propria dell'architettura della *tholos*.

4.
La camera

La camera circolare [32] ipogea, voltata a cupola muraria mediante elementi lapidei in progressivo aggetto, e coperta dal tumulo all'estradosso, costituisce l'elemento architettonico caratterizzante la *tholos* micenea.

La pianta circolare della camera occupa la base del pozzo di scavo, a meno dello spessore delle pareti perimetrali.

Il diametro del pozzo di scavo alla base è dato, pertanto, dal diametro della camera più due volte lo spessore delle pareti perimetrali della camera alla base.

Si ipotizza che il tracciamento della forma circolare regolare della pianta fosse effettuato mediante una corda tenuta da un picchetto al centro della camera. I piccoli fori ritrovati nella *tholos* A di Kakovatos [33] e in quella di Orchomenos [34] al centro del pavimento della camera, di dia-

21.
Tesoro di Atreo. Posizione in pianta del grande architrave di circa 120 tonnellate
22.
Pellana. Tomba a camera 2. Forma del portale di accesso tagliato nella roccia (archivio Centro Mediterraneo Preclassico)

metri 4 e 3 cm e profondità 2 e 6 cm rispettivamente, sono stati interpretati come la traccia del suddetto picchetto.

Il primo corso della muratura perimetrale della camera si eleva direttamente dalla quota del pavimento [35], senza fondazione, e risulta generalmente costituito da blocchi lapidei di maggiori dimensioni rispetto ai restanti. In alcuni casi si osserva anche l'uso di differente materiale lapideo [36].

La presenza di una sorta di zoccolo di base ha analogie con l'edilizia corrente e trova ragioni di tecnica costruttiva piuttosto che statiche [37]: il primo corso imposta il disegno e le dimensioni del progetto e separa dal suolo la muratura in elevazione.

Le pareti perimetrali della camera vanno progressivamente a chiudere verso l'alto lo spazio interno, generalmente già dai primi corsi [38], generando all'intradosso una cupola di forma ogivale. Gli elementi lapidei sono apparecchiati, sia nel tratto controterra, inserito nel pozzo scavato, sia in quello superiore, per anelli concentrici [39] progressivamente in leggero aggetto verso l'interno, fino ad ottenere, all'apice, la completa copertura dello spazio.

[32] La *tholos* A di Thorikos costituisce un'interessante eccezione per la forma ovale della camera (Servais-Soyez [1984, p. 14]).

[33] Dörpfeld [1908, p. 299].

[34] Orlandos [AD 1, 1915, p. 53].

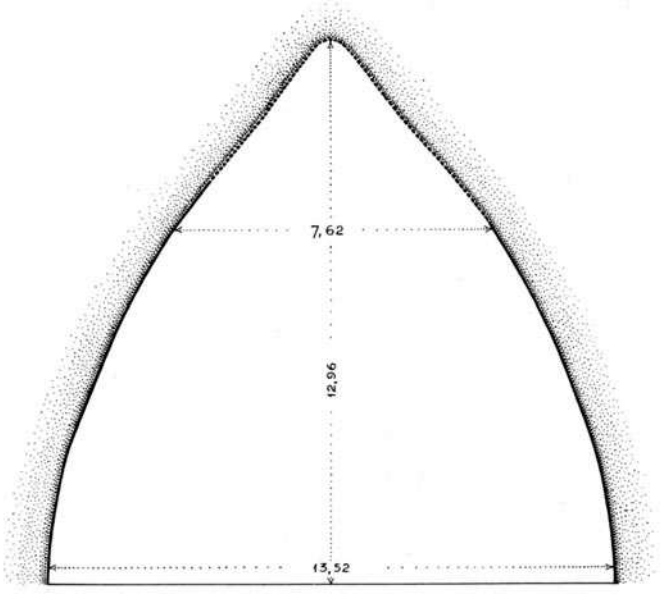
[35] Una particolarità è presente nelle *tholoi* I e II di Malti e nella Tomba di Egisto ove il primo corso orizzontale si inserisce in una trincea circolare di piccola profondità (Pelon [1976, p. 350]).

[36] Servais - Gasche [1971, pp. 51-52] osservano che nella *tholos* V di Thorikos il primo corso e parte del secondo sono realizzati in blocchi di prasinite, materiale di particolare durezza, mentre la restante muratura perimetrale della camera è costituita da pietre calcaree e scisti.

[37] I valori degli sforzi di compressione presenti alla base della *tholos* V di Thorikos, ricavati da Cremasco - Laffineur [1999, p. 144], sono relativamente bassi rispetto alla resistenza a compressione del materiale lapideo.

[38] Diversamente, nelle *tholoi* III e IV di Englianos la curvatura verso il centro della muratura interna della camera ha inizio rispettivamente a 1 metro e a 1,5 m dal suolo; nella *tholos* IV la curvatura parte al di sopra di un corso anulare continuo costituito da blocchi lapidei di dimensioni vistosamente maggiori in altezza rispetto a quelle della restante parte della muratura (Blegen [1973, p. 76 e p. 97]). Anche nella parte esistente della cupola della *tholos* MME di Nichoria la curvatura verso l'interno ha inizio dopo un primo tratto che si eleva verticalmente per circa 1,2 m di altezza (Wilkie [1992, p. 239]).

[39] Diversamente, la cupola muraria superstite della *tholos* di Berbati (manca infatti la parte superiore emergente dal pozzo di impianto), riesaminata da Santillo Frizell, in sito e sui documenti dello scavo di Persson del 1935, si presenta composta dalla successione di fasce murarie - spicchi meridiani- giuntate, in contrasto con la visione unitaria dell'anello lapideo orizzontale (Santillo Frizell [1984, p. 27]). Simile configurazione della parte inferiore superstite della cupola, in questo caso in fasce distinte di circa 1 metro di larghezza composte da elementi lapidei simili, è stata indicata per la *tholos* MME di Nichoria dalla Wilkie [1992, p. 239]. Anche Persson [1931, p. 22] ha sottolineato, ma riferendosi, in questo caso, alla porzione superstite più alta della *tholos* di Dendra, che la cupola muraria sembrerebbe realizzata per fasce verticali di altezza pari a circa 10 corsi lapidei e non per anelli concentrici.



23.
Il profilo interno della cupola della Tomba di Clitennestra rilevato da Stikas (Mylonas [1966, fig. 116])

L'intradosso della cupola non è caratterizzato generalmente dalla stessa curvatura. Sembra infatti che sia costituito da una medesima curvatura fino all'altezza dell'architrave, ovvero per la parte inserita nel pozzo, e successivamente da una curvatura che diminuisce procedendo verso l'apice e che ne determina una diminuzione dell'aggetto. Pertanto, la cupola assume la forma di ogiva stirata verso l'alto con punta terminale smussata [40]. Tale configurazione è stata osservata in alcuni casi, ove la parte superiore della cupola presenta un profilo denominato a "collo di bottiglia" [41], fig. 23, talvolta aperto in chiave mediante un foro centrale coperto poi da una singola lastra lapidea. La configurazione descritta non può essere generalizzata per la frequente assenza della parte superiore delle cupole nelle *tholoi* esistenti.

L'altezza interna della cupola all'apice è proporzionale alla dimensione della camera, e corrisponde all'incirca alla misura del diametro interno alla base [42].

Nella classificazione delle *tholoi* il tipo di apparecchiatura muraria utilizzata per la realizzazione della cupola ha un peso rilevante per definire il grado di evoluzione tec-

[40] Pelon [1976, p. 334].

[41] Nel 1951 Stikas intraprese il progetto di ricostruzione della parte terminale della cupola della Tomba di Clitennestra, parzialmente smantellata dai turchi nel 1808, e che si ergeva per un'altezza di 8,55 m dal suolo della camera. Dall'esame della curvatura dei blocchi smontati ivi presenti, che ammontavano a circa 1/5 del totale mancante, Stikas riconobbe per la geometria del profilo all'intradosso una diminuzione della curvatura nella parte terminale (Mylonas [1966, p. 123 e fig. 116], Pelon [1976, p. 170 e Tav. LXIX]), in disaccordo con il rilievo di P. De Jong (Wace [1921 – 23, Tav. LVIII]); secondo tale configurazione la parte terminale della cupola venne ricostruita. Un rimarcato profilo a "collo di bottiglia", con foro superiore centrale chiuso da una piastra lapidea, presenta la cupola integra della *tholos* di Tirinto (Müller [1975, p. 3 e Tav. 1]). Simile andamento della curvatura interna della cupola è stato descritto per la *tholos* I di Malti (Valmin [1926-27, p. 66]).

nica e identificare il gruppo di appartenenza della *tholos*.

La definizione dell'apparecchiatura si basa sulla lettura delle parti visibili della muratura all'interno della camera e dai pochi dati presenti di parti interne circoscritte della struttura. Nella definizione delle apparecchiature murarie si fa riferimento alle tipologie individuate da Pelon [43] e congruenti con l'analisi strutturale di Wace [44] applicata alle nove *tholoi* di Micene.

Se, da una parte, la scelta dei materiali lapidei utilizzati per la muratura della camera dipende essenzialmente dalla disponibilità locale del materiale lapideo [45], il tipo di apparecchiatura adoperato è strettamente connesso con le capacità tecniche [46], come si evince ad esempio nell'esame delle nove *tholoi* di Micene. Ivi alle medesime risorse materiali corrispondono distinte apparecchiature murarie associabili a classi progressive, in base ai miglioramenti tecnici apportati [47], che hanno consentito la classificazione cronologica dell'architettura della *tholos*.

Nelle classi di apparecchiatura muraria al primo stadio si colloca il tipo ciclopico, costituito da blocchi lapidei non lavorati di grande dimensione che compongono la muratura della cupola. La realizzazione secondo una disposizione per corsi anulari, orizzontali e concentrici è in questo caso complessa; i grandi blocchi vengono collocati nella posizione più conveniente a conformare la geometria interna della cupola

24.
L'apparecchiatura in muratura ciclopica della camera della 'tholos' di Achladia a Creta (Belli [1995, fig. 82, p. 112])

[42] Wace [1921-23, p. 290] individua nell'architettura della *tholos* la regola progettuale di far corrispondere l'altezza al diametro, in modo che la sezione verticale risulti iscrivibile in un quadrato; Pelon [1976, p. 335] constata che in realtà nelle *tholoi* esistenti l'altezza tende a coincidere con il diametro come rapporto massimo, ma risulta sempre ad esso minore, e di una quantità variabile da 1/10 a 1/30 del diametro stesso.

[43] Pelon [1976, p. 337- 350].

[44] Wace 1931.

[45] Pelon [1976, p. 337].

[46] A meno del confronto tra apparecchiature composte da elementi lapidei non lavorati, i cui caratteri dimensionali dipendono dalla natura geologica e, pertanto, la scelta dell'uno o dell'altro tipo è connessa con la disponibilità locale.

[47] Pelon [1976, p. 337].

e sono messi in opera colmando gli interstizi tra le pietre con pietre più piccole ed argilla. L'apparecchiatura ciclopica risulta difficilmente adattabile alla complessa forma geometrica della cupola e, per tale ragione, se ne riscontra un uso sporadico e circoscritto alle prime sperimentazioni.

Esempi sono individuabili nella Tomba dei Ciclopi a Micene, appartenente al I gruppo della classificazione di Wace, nelle *tholoi* di Médéon in Focide, nella *tholos* di Achladia a Creta, fig. 24, e ancora in Argolide nella parte bassa della *tholos* di Dendra e nelle *tholoi* di Kazarma e Berbati.

Gli ultimi tre esempi sono particolarmente significativi perché sottolineano la necessità di modellare l'apparecchiatura muraria per renderla maggiormente compatibile con la forma e con la stabilità della cupola. Si riconosce infatti il tentativo di organizzare l'apparecchiatura per ottenere una continuità del tessuto murario e per anelli lapidei continui, orizzontali e concentrici. Nella *tholos* di Dendra l'apparecchiatura ciclopica compete ai primi corsi; la parte superiore è apparecchiata con blocchi lapidei di minore dimensione, aventi lunghezza della base di gran lunga superiore all'altezza e disposti secondo letti di posa orizzontali che si sviluppano in continuità lungo tutta la circonferenza della camera, fig. 25. A Kazarma e Berbati si nota la scelta particolarmente accurata delle giustapposizioni dei blocchi adiacenti, per adattare il più possibile le forme naturali delle pietre alla continuità del tessuto murario; tale cura è particolarmente evidente nella muratura della camera di Berbati, più adeguatamente definibile come poligonale anziché ciclopica [48], fig. 26.

Il secondo tipo di apparecchiatura è realizzato con pietre piatte non lavorate, disposte in orizzontale secondo la dimensione maggiore, e con i giunti tra le pietre riempiti da pietre più piccole ed argilla. L'utilizzo di pietre piatte, o

25.
La muratura della cupola nella 'tholos' di Dendra (archivio Centro Mediterraneo Preclassico)
26.
La muratura della cupola nella 'tholos' di Berbati (da Pelon [1976, Pl. CLIX, fig. 1])

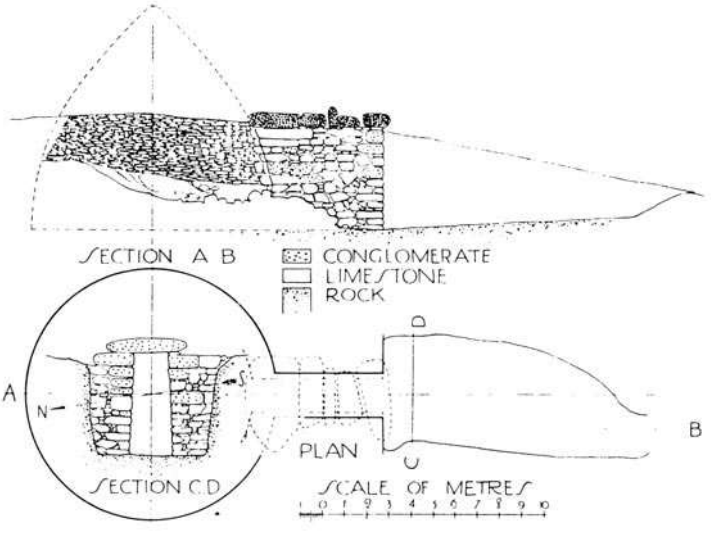
[48] Pelon [1976, p. 338].

lastre, per la prevalenza delle dimensione orizzontale e della profondità sull'altezza, garantisce l'orizzontalità dei letti di posa e facilita la modellazione della geometria della cupola all'intradosso. L'approvvigionamento del materiale è semplice e poco oneroso; le lastre lapidee sono facilmente cavabili da rocce scistose, i cui piani di frattura caratteristici dell'ammasso determinano lo spessore delle lastre stesse. La muratura della cupola composta con lastre orizzontali è, inoltre, adeguata ad assicurare la stabilità della struttura durante la costruzione: la considerevole profondità delle lastre facilita la realizzazione dell'aggetto, ottenendo un bilanciamento del momento ribaltante attraverso il carico gravante all'estremità opposta della lastra, fig. 27.

Questo tipo di apparecchiatura della muratura della camera caratterizza in particolar modo le *tholoi* della Messenia [49], anche se è impiegata diffusamente in diverse regioni della Grecia (*tholoi* di Thorikos, fig. 28, *tholos* di Maratona e di Menidi in Attica, e *tholos* di Dimini in Tessaglia, fig. 29).

Anche nella seconda classe di apparecchiature si riconosce lo sforzo di realizzare anelli lapidei orizzontali conti-

27.
'Tholos' di Korifasio (Messenia). Particolare della muratura in lastre lapidee in aggetto della cupola (archivio Centro Mediterraneo Preclassico)
28.
La muratura della cupola nella 'tholos' B di Thorikos (Servais - Gasche [1971, p. 53, fig. 29])
29.
La muratura della cupola nella 'tholos' di Dimini (archivio Centro Mediterraneo Preclassico)



30.
La muratura della cupola nella 'tholos' di Ano Englianos (archivio Centro Mediterraneo Preclassico)
31.
Particolare della muratura superstite della cupola nella 'tholos' 2 di Peristeria (archivio Centro Mediterraneo Preclassico)
32.
La muratura superstite della cupola della Tomba di Egisto
33.
Rilievo della 'tholos' di Epano Phournos (Wace [1921-23, p. 293. fig. 52])

nui. Ciò è evidente nelle correzioni effettuate in corso d'opera allo scopo di ottenere, malgrado il diverso spessore delle lastre, un letto di posa orizzontale comune a tutta la circonferenza, e nell'attenzione posta alla scelta delle lastre utilizzate nello stesso corso in base allo spessore. La regolarità dei corsi raggiunta in Messenia ad Ano Englianos [50], fig. 30, l'accurata apparecchiatura della parte superstite della *tholos* 2 di Peristeria, fig. 31, e della muratura della camera della Tomba di Egisto, fig. 32, a Micene (specie se confrontata con la precedente di Epano Phournos, fig. 33) evidenziano tali progressivi miglioramenti.

Il terzo tipo di apparecchiatura muraria è caratterizzato dall'esecuzione di una prima grossolana lavorazione dei blocchi lapidei, allo scopo di favorire un migliore contatto tra blocchi adiacenti e la continuità della forma geometrica della camera all'intradosso. Dal confronto tra la muratura

[49] Va sottolineato che in tale area geografica i depositi affioranti di rocce scistose sono numerosi.

[50] Nella parte inferiore della cupola; la parte superiore è frutto di un intervento di ricostruzione risalente agli anni '50.

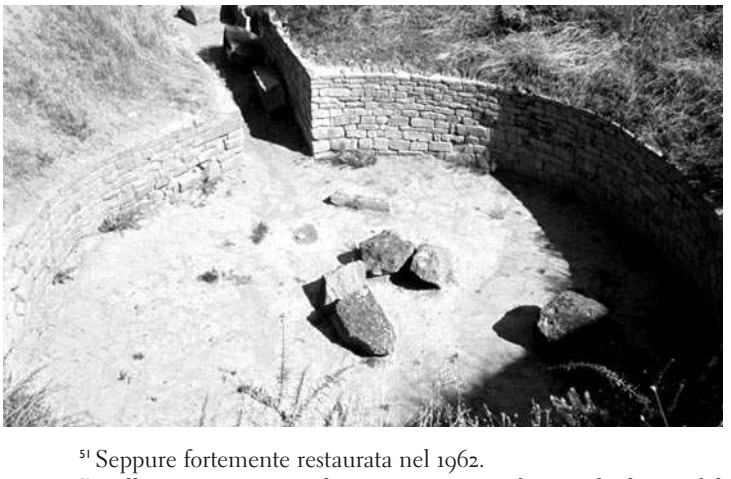
della camera in blocchi non lavorati della Tomba Panagia, fig. 34, e quella in blocchi leggermente lavorati della Tomba di Kato Phournos, fig. 35, site in Micene, si evidenzia il maggiore grado di sviluppo tecnico raggiunto attraverso la regolarità della tessitura del paramento.

In altre regioni la maggiore regolarità della tessitura acquisita con un'abbozzata lavorazione della pietra è chiaramente leggibile: nelle porzioni superstiti della muratura della camera della *tholos* di Vaphio [51], fig. 37, in Laconia e in Messenia nella *tholos* 1 di Peristeria [52], fig. 36, soprattutto in relazione con la parte superstite della muratura della camera della *tholos* 2, fig. 38, composta in un'apparecchiatura del II tipo.

Il quarto ed ultimo tipo di apparecchiatura si distingue dalla lavorazione del paramento murario all'intradosso in muratura squadrata. Tale caratteristica si ritrova nelle tre *tholoi* della classe terminale dello sviluppo tecnico e artistico definita da Wace: la Tomba di Clitennestra, fig. 41, e il Tesoro di Atreo, fig. 39, a Micene e la *tholos* di Orchomenos, fig. 40, in Beozia.

I blocchi lapidei sono accuratamente lavorati all'intradosso a seguire la curvatura della cupola e, per i quattro lati perimetrali del prospetto, per realizzare l'orizzontalità dei letti di posa circolari e concentrici e il perfetto contatto dei giunti verticali. La lavorazione dei lati verticali dei blocchi è eseguita solo per una profondità parziale dello spessore totale dei blocchi; la perfetta aderenza dei blocchi nei giunti verticali per tutto il loro spessore è ottenuta mediante il riempimento in forza dei vuoti, presenti nella parte retrostante, con pietre più piccole e argilla, fig. 42.

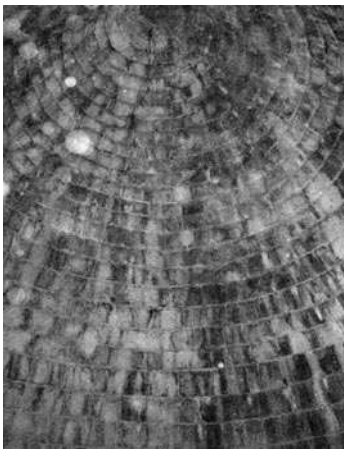
La geometria della faccia dei blocchi all'interno della camera presenta la prevalenza della dimensione della base dei blocchi rispetto all'altezza (come nel tipo III) ma con un valore minore del rapporto base/altezza.

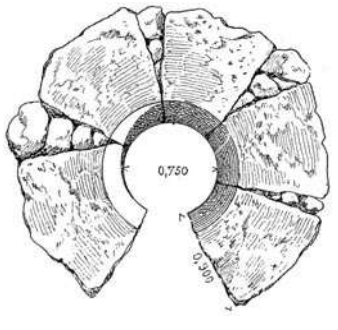


34.
Tomba Panagia. Particolare della muratura superstite (Pelon [1976, pl. CLIII, fig. 2])
35.
'Tholos' di Kato Phournos. Particolare della muratura superstite (Pelon [1976, pl. CLIV, fig. 2])
36.
'Tholos' 1 di Peristeria. La muratura della cupola in prossimità dello 'stomion' (archivio Centro Mediterraneo Preclassico)
37.
La muratura superstite della 'tholos' di Vaphio (archivio Centro Mediterraneo Preclassico)

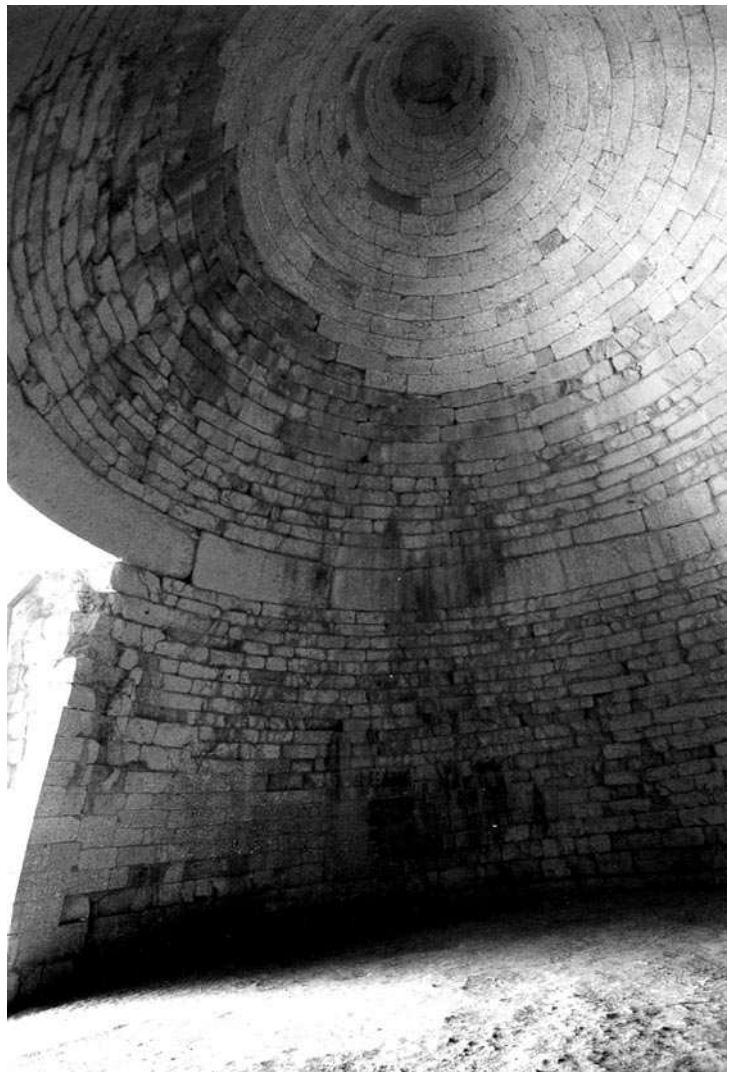
[51] Seppure fortemente restaurata nel 1962.

[52] Nella parte originaria; la parte superiore, da 5 m di altezza dal pavimento della camera fino all'apice posta a 8,5 m, è frutto di una ricostruzione risalente al 1972.





38.
La muratura superstite della 'tholos' 2 di Peristeria (archivio Centro Mediterraneo Preclassico)
39.
Tesoro di Atreo. La muratura della cupola.
40.
'Tholos' di Orchomenos. Particolare della parte superstite della muratura della cupola (archivio Centro Mediterraneo Preclassico)
41.
Tomba di Clitennestra. La muratura della cupola (da Stierlin [2001, p. 33])
42.
Tesoro di Atreo. Pianta dell'ultimo corso della muratura della cupola (da Blouet [1833 pl. 66 fig. 4])



Si osserva inoltre una progressiva diminuzione dell'altezza dei corsi dal basso verso l'alto. Lo sviluppo tecnico e la definizione di una specifica tecnica costruttiva comportano una sensibile regolarità nella successione dei corsi, e ciò si traduce nella messa in opera per anelli lapidei orizzontali e concentrici, di altezza progressivamente decrescente dal basso verso l'alto.

Un'attenzione particolare sembra essere posta nei corsi corrispondenti alla lastra architrave del vano di accesso: nella Tomba di Clitennestra è presente un unico corso di elevata altezza corrispondente a quello della lastra architrave, fig. 41, mentre nel Tesoro di Atreo sono realizzati due corsi ad occupare tutto lo spessore in altezza della lastra dell'architrave, ognuno dei quali ha un'altezza maggiore di quella corrispondente alla progressiva diminuzione dell'altezza dei corsi dal basso verso l'alto. Nella tessitura muraria delle ultime tre *tholoi* permane l'utilizzo del corso di base di maggiore altezza, che è presente in tutte le *tholoi* più evolute delle varie regioni e delle varie classi di apparecchiatura.

Dalle poche indagini effettuate nelle parti interne di alcune *tholoi* e dalle sezioni murarie esposte in *tholoi* parzialmente crollate può desumersi sinteticamente la struttura della cupola muraria nella forma volumetrica all'estradosso, nell'apparecchiatura e nella connessione con il pozzo di scavo.

La parte inferiore della muratura, a perimetro della camera inserita nel pozzo di impianto, cresce progressivamente di spessore [53] proporzionalmente alla dimensione dell'aggetto, fino a raggiungere il bordo superiore del pozzo, posto generalmente alla quota dell'architrave dello *stomion*.

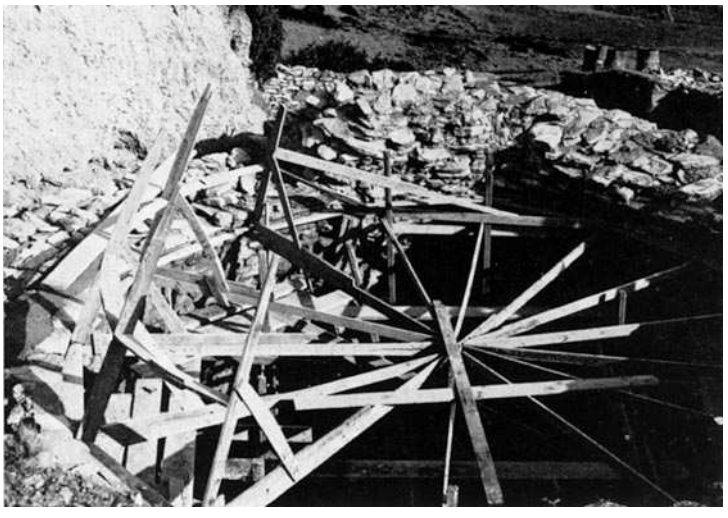
La prossimità della muratura alle pareti del pozzo rivela l'intenzione di porre in stretto contatto le due superfici.

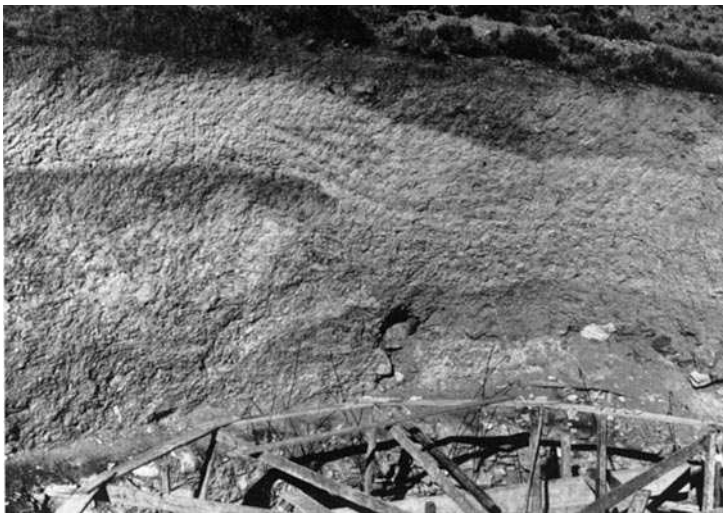
Va inoltre aggiunto che spesso si riscontra la presenza di un riempimento compattato a tergo della muratura perimetrale. Nella *tholos* di Menidi, Bohn si sofferma a descrivere il riempimento di terra fortemente compattato a colmare i vuoti tra il pozzo di impianto e le pareti murarie della camera [54]. Nella *tholos* MME di Nichoria, fig. 43, Wilkie riferisce di uno strato di argilla a tergo della muratura della camera [55], avente funzione analoga a quanto indicato da Bohn per la *tholos* di Menidi.

[53] Nelle porzioni superstiti della muratura della cupola della *tholos* A di Kakovatos, Dörpfeld ha riportato che lo spessore orizzontale aumenta progressivamente con l'altezza, passando da 0,7 – 0,75 m alla base a 1,10 m alla quota superiore della parte ancora i sito di 2,50 m di altezza, in modo da aderire alle pareti del pozzo cilindrico in cui è inserita la cupola (Dörpfeld [1908, p. 306]). La parte inferiore superstite della *tholos* 2 di Peristeria, pervenutaci per un'altezza di 3,5 m, raggiunge 1,80 m di spessore in corrispondenza del terminale superiore esistente (Pelon [1976, p. 210]). Nelle accurate sezioni di rilievo A e B della *tholos* B di Thorikos viene rilevato il progressivo incremento di spessore della muratura a contatto con le pareti del pozzo (Gasche – Servais [1971, pl. 4]).

[54] Lolling [1880, p. 46].

43.
La parte superstite della cupola 'tholos' MME di Nichoria, dall'alto (Archivio Centro Mediterraneo Preclassico)





44/45.
'Tholos' B di Thorikos. Immagini scattate durante l'intervento di ricostruzione della cupola (da Gasche – Servais [1971, p. 50, figg. 26 e 27])

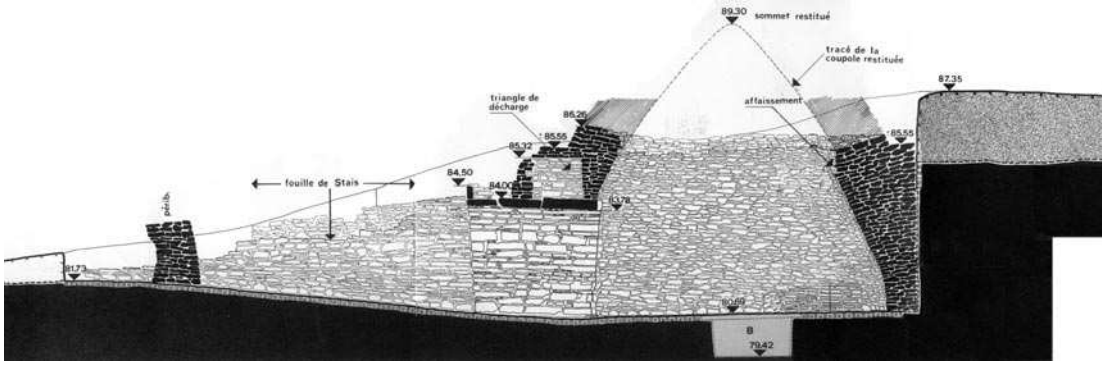
Nella *tholos* di Orchomenos Schliemann riporta la presenza di un riempimento di pietrame nella zona compresa tra la muratura e la roccia attribuendone il ruolo di vincolare i blocchi lapidei della muratura della cupola [56].

Il contatto tra le pareti del pozzo di impianto e la muratura sembra pertanto un efficace espediente per garantire il contenimento laterale delle pareti murarie della cupola da parte delle pareti del pozzo di scavo.

Dall'ispezione in alcune evidenze di zone dell'estradosso della cupola si è osservata una diminuzione dello spessore a partire dal bordo superiore del pozzo per passi successivi fino all'apice, comportando, per approssimazione, un andamento dell'estradosso non concentrico rispetto alla curvatura della cupola all'intradosso (in quanto la diminuzione avviene per intervalli discontinui).

Il restauro del 1970 della cupola parzialmente crollata della *tholos* B di Thorikos, figg. 44 e 45, ad opera del Servizio

[55] Wilkie [1992, p. 239].
[56] Schliemann [1881, p. 21].



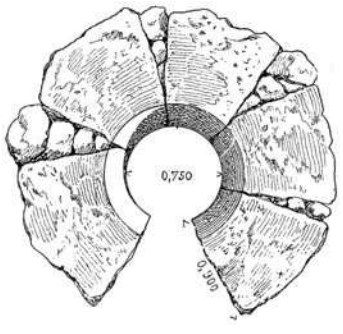
di *Anastilosi* greco ha eccezionalmente consentito, tramite saggi, di visionare in alcune zone la parte nascosta della struttura muraria della camera, a contatto con il pozzo scavato e con il tumulo, fig. 46. Da saggi eseguiti a tergo della muratura, Servais - Gasche [57] hanno desunto la fattura all'estradosso della muratura della camera per la porzione di cupola esistente. Nella parte inferiore inserita nel pozzo circolare di scavo la muratura è adiacente alle pareti del pozzo, e il suo spessore, in ragione della curvatura interna della volta, aumenta progressivamente verso l'alto. Nella parte in elevazione dal piano di campagna originario, invece, lo spessore decresce in modo discontinuo con andamento a gradini, tramite la posa in opera all'estradosso di anelli murari di dimensione minore, ciascuno di circa 1 m di altezza. L'esame dei materiali di cui è composto il tumulo ha inoltre consentito di verificare che la sua realizzazione avveniva contemporaneamente alla cupola mediante la posa in opera di fasce orizzontali successive.

Tra i pochi elaborati che descrivono l'apparecchiatura della muratura della camera, particolare interesse assume la pianta dell'ultimo corso della cupola del Tesoro di Atreo realizzata all'inizio dell'800 [58], quando, mancando la lastra di chiave in seguito ricostruita, era possibile visionare il corso lapideo in tutto il suo spessore, fig. 47.

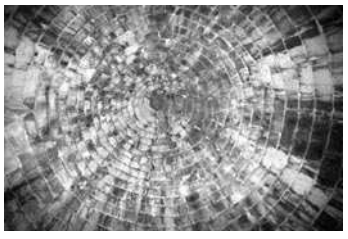
Il rilievo di Blouet, fig. 48, illustra la fattura dell'ultimo anello murario orizzontale. Il corso orizzontale di forma circolare è composto da blocchi lapidei di forma trapezoidale ad una fila, a contatto l'uno con l'altro solo all'intradosso, per una profondità di circa otto centimetri. Per la restante parte i blocchi lapidei sono resi solidali orizzontalmente tramite l'inserimento in forza di piccole pietre, che, come cunei tra i conci, serrano orizzontalmente i blocchi.

La stessa fattura è stata osservata da Wace nella Tomba di Clitennestra [59] quando prima della ricostruzione della parte terminale era possibile esaminare l'apparecchiatura interna: nel corso terminale della cupola superstite, la stretta aderen-

[57] Gasche - Servais [1971, p. 55].
[58] Blouet [1833, pl. 66 fig. 4].



46.
'Tholos' B di Thorikos. Sezione longitudinale est-ovest della camera con indicazione dell'apparecchiatura interna della muratura della cupola (da Gasche – Servais [1971, pl. 4])
47.
Tesoro di Atreo. Vista dell'intradosso della cupola prima della ricostruzione della lastra di chiave (eseguito da E. Dodwell nel 1808 (Pelasgic Remains, pl. 8, 1834))
48.
Tesoro di Atreo. Pianta dell'ultimo corso della muratura della cupola (da Blouet [1833 pl. 66 fig. 4])



49.
Tesoro di Atreo. Vista dell'intradosso della cupola dal centro della camera
50.
'Tholos' A di Kakovatos. Parte superstite-est della cupola. La sezione della muratura rileva la disposizione su letti di posa inclinati dei blocchi lapidei
(da Dörpfeld [1908, pl. XVI, 2])

za dei blocchi lapidei, di elevata profondità in rapporto alla larghezza, veniva raggiunta inserendo in forza piccole pietre nei profondi e stretti triangoli dei giunti verticali. Da tale perizia costruttiva si evince l'intenzione di rendere solidale ciascun filare tenendo serrati gli anelli murari orizzontali, che costituiscono i paralleli della cupola muraria.

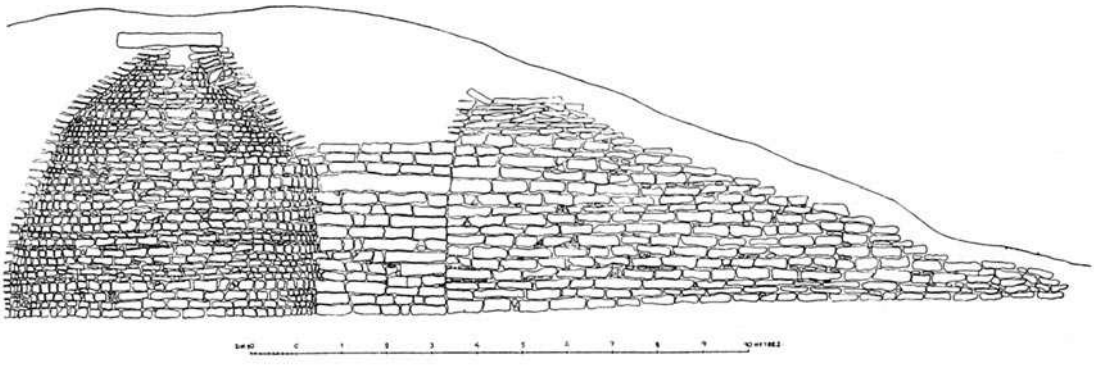
Nel Tesoro di Atreo, inoltre, lo sfalsamento dei giunti verticali tra le pietre dei filari successivi, visibile all'intradosso osservando il paramento lapideo dall'interno della camera, determina anche lungo i meridiani una continuità spaziale della struttura, fig. 49.

Il Tesoro di Atreo costituisce una delle tre *tholoi* più evolute, realizzate in blocchi lapidei pressoché squadrati; d'altra parte, la particolare cura posta nella fattura della muratura della camera è leggibile anche in strutture realizzate con materiali e tecniche più poveri. Anche l'apparecchiatura muraria della camera della *tholos* di Menidi, realizzata in blocchi calcarei irregolari tenuti in forza mediante l'inserimento di pietre più piccole, sottolinea la perizia nella scelta e nell'assemblaggio delle pietre, tale da generare un ordine complessivo, nonostante l'irregolarità del materiale impiegato [60].

In alcune evidenze sono state rilevate particolari fatture dell'apparecchiatura muraria della camera. Dörpfeld, nell'esaminare la disposizione delle pietre nella muratura superstite della camera della *tholos* A di Kakovatos, fig. 50, ha evidenziato la presenza di blocchi lapidei disposti a giacitura inclinata verso il centro della camera. La presenza di letti di posa con inclinazione verso il centro e crescente verso l'alto stabilisce una stretta analogia della struttura con la composizione per spicchi meridiani ad arco di una cupola muraria vera e propria.

Il tipo di apparecchiatura utilizzata a Kakovatos può infatti indurre a ritenere che si tratti di un accorgimento atto a ridurre la componente tangenziale della spinta, per rendere, per quanto possibile, la sollecitazione di compressione lungo la curva direttrice della *tholos* ortogonale alla giacitura dei conci. La disposizione a letti di posa inclinati è stata evidenziata anche da Gasche - Servais nella *tholos* B di Thorikos, osservando che i corsi sono orizzontali fino 1,2 m di altezza e vanno successivamente ad inclinarsi progressivamente procedendo verso l'alto. La medesima disposizione è stata supposta da Valmin nella *tholos* I di Malthi [61], fig. 51; ivi la muratura della camera in aggetto verso l'interno, relativa solo alla parte al di sopra dell'architrave di accesso, mostra un'inclinazione dei letti di posa tale da rendere l'intradosso dei blocchi congruente con la curvatura della cupola. In

[59] Wace [1921-23, p. 362].
[60] Bohn [1880, pp. 45-47].
[61] Valmin [1926-27, p. 67].



prossimità dell'apice tale curvatura decresce progressivamente fino ad ottenere nuovamente l'orizzontalità dei letti di posa al di sotto della lastra di chiave. Una simile apparecchiatura e morfologia della cupola è stata individuata anche per le parti superstiti della *tholos* MME di Nichoria [62].

Si è detto che l'inclinazione dei corsi ha indotto gli studiosi a supporre che l'uso di letti di posa inclinati verso il centro sia intenzionale, al fine di favorire la trasmissione della spinta nei modi di un arco murario. A tali rilevanti osservazioni presenti in letteratura non fanno seguito puntuali verifiche sulla conformazione dell'apparecchiatura muraria. Tale particolare configurazione è stata infatti osservata su cupole murarie in gran parte crollate o con evidenti fenomeni di dissesto, pertanto l'intenzionalità dell'inclinazione dei corsi è stata messa in discussione. Secondo alcuni studiosi infatti l'inclinazione potrebbe attribuirsi ai movimenti subiti per dissesto o per il crollo di parti murarie della cupola [63]. Le osservazioni condotte, di particolare interesse nello studio del comportamento statico della cupola delle *tholoi*, assumono attualmente il livello di ipotesi non fondate sull'evidenza.

5.
Il tumulo

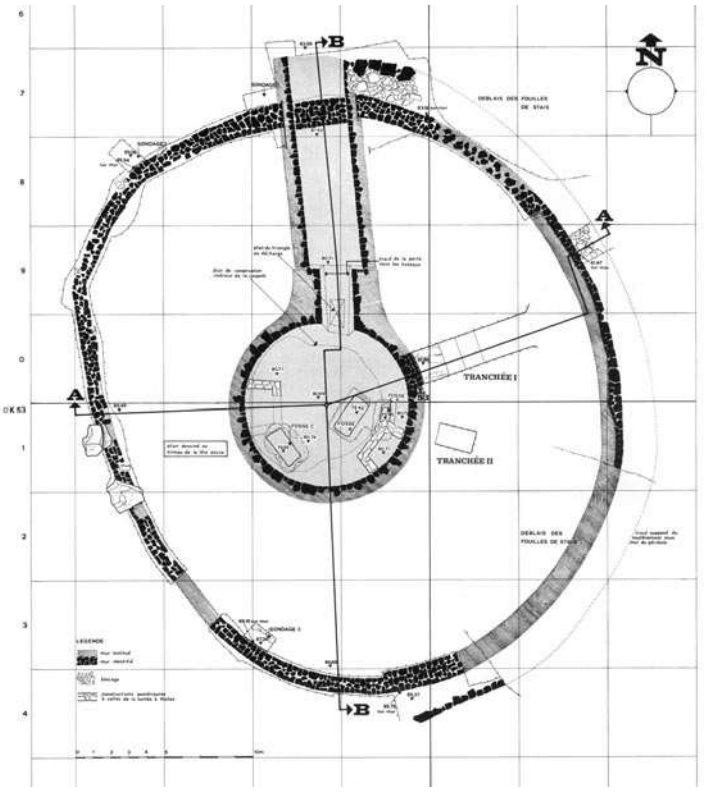
All'estradosso della cupola muraria un esteso ricoprimento, generalmente composto da un primo strato di argilla, da pietrame e terra e da strati superiori di ricoprimento di argilla compattata, configura la continuità del suolo con l'emergenza del tumulo, e restituisce la condizione ipogea alla parte emergente della cupola muraria, fig. 52.

Dall'esame delle poche indagini effettuate [64] in tumuli o in parti superstiti di tumuli, e soprattutto nelle zone di contatto con l'estradosso della cupola, si rileva che la struttura muraria della cupola è strettamente a contatto con il tumulo superiore. Ciò si realizza mediante la posa in opera

[62] Wilkie [1992, p. 239].

[63] Cavanagh – Laxton [1981, p. 113].

51.
'Tholos' I di Malti. Sezione longitudinale di rilievo (da Valmin [1926-27, pl. II])
52.
Tesoro di Atreo. Vista del 'dromos' dal tumulo

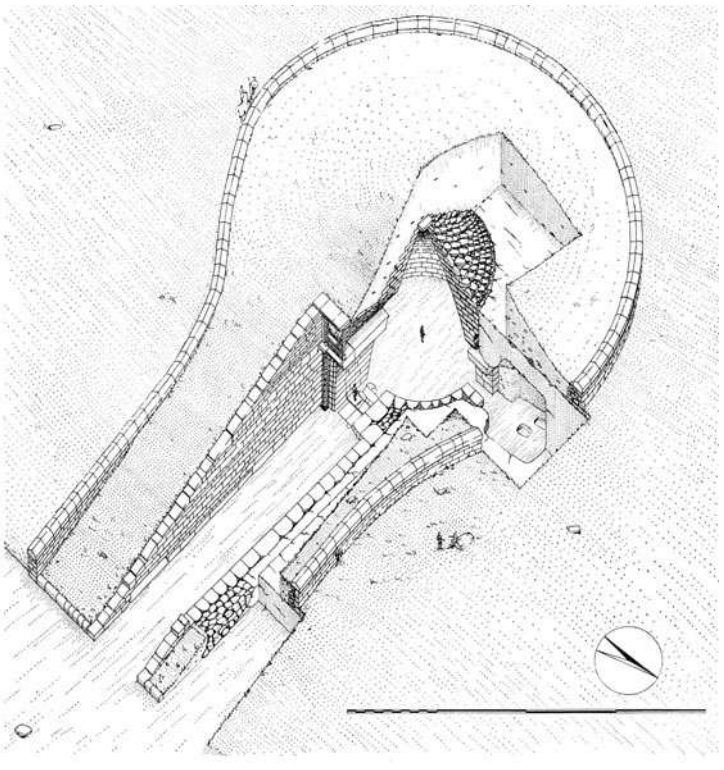


53.
'Tholos' B di Thorikos. Pianta di rilievo con l'andamento del muro a peribolo del tumulo (da Gasche - Servais [1971, pl. 4])

di un volume murario in pietrame, costituente l'ossatura interna del tumulo, sull'estradosso della cupola muraria, previa la realizzazione di una calotta di rivestimento in argilla per l'impermeabilizzazione. Il tumulo è inoltre protetto all'estradosso da una serie di strati sovrapposti di argilla intervallati da terra.

Il tumulo viene generalmente contenuto da una muratura a peribolo, il cui impianto planimetrico e la fattura tecnica sono funzione delle condizioni morfologiche dei luoghi e del valore monumentale attribuito alla tomba. Due sono i tipi più frequenti: ad anello circolare, come rinvenuto nella *tholos* B di Thorikos, fig. 53, e ad andamento a ferro di cavallo che si chiude ai terminali della muratura del *dromos*, come riscontrato dai saggi di Wace per il Tesoro di Atreo, fig. 54.

[64] Tra il 1939 e il 1955 Wace eseguì dei sondaggi stratigrafici nel tumulo del Tesoro di Atreo (Wace [1940, p. 249, fig. 8] e [1956, p. 120, fig. 7]). Nel 1952 furono realizzati una serie di sondaggi intorno alla Tomba di Clitennestra e di Egisto (Taylor [1955, pp. 207-223]. Con il restauro del 1970 della cupola parzialmente crollata della *tholos* B di Thorikos si è potuto indagare anche in alcune zone superstiti del tumulo, verificando la mancanza di uno strato di argilla impermeabilizzante a contatto con l'estradosso e la presenza di un muretto interno di sostegno disposto obliquamente (Gasche - Servais [1971, pp. 60-62]). Seppure non rimane evidenza del tumulo sulla cupola in gran parte crollata della *tholos* MME di Nichoria, la Wilkie riconosce all'estradosso della piccola parte superstite uno spesso volume di pietrame, e nel riempimento sabbioso di colore giallo, presente tra le pietre della volta e del pietrame provenienti dal crollo, la componente degli strati esterni (Wilkie [1992, pp. 239-241]).



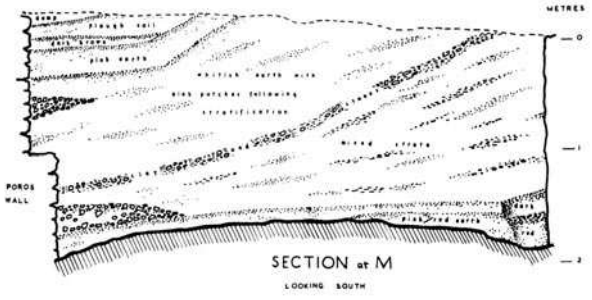
I sondaggi realizzati da Wace e Taylor tra il 1952 e il 1954 intorno alle *tholoi* di Egisto e Clitennestra hanno messo in luce la natura dei due tumuli [65].

Nel 1952 una serie di saggi intorno alla camera della Tomba di Egisto misero in luce parti di una superficie curva e pendente di argilla di colore verde, dello spessore di circa 10 cm, la cui conformazione, in pendenza verso il perimetro del tumulo dal centro della camera, suggeriva che si trattasse di parte di uno strato di copertura del volume emergente del tumulo. Tale calotta di argilla in alcuni punti risultava composta da 2 o 3 strati sovrapposti separati da terra di spessore dai 15 ai 45 cm. Nel 1954 fu messo in luce per una grande area, lunga circa 10 metri e larga 3,5 metri, uno strato della medesima argilla che confermava la conformazione dello strato superiore di rivestimento del tumulo.

All'interno della superficie costituita dal tumulo fu eseguito uno scavo per valutare lo spessore fino alla roccia; si riscontrò una profondità di circa 4,2 metri e, appena al di sopra della roccia, si ritrovò un ulteriore strato di argilla verde su un letto di pietrisco e argilla. Dalla stratigrafia ottenuta si rilevò che all'estradosso della cupola, previa una calotta di rivestimento in argilla, il tumulo era composto da un volume di pietrame e terra dello spessore di circa 3 metri superiormente rivestito da strati di argilla di rivestimento intervallati da alcuni centimetri di terra.

54.
Ricostruzione assonometrica del Tesoro di Atreo con il muro di contenimento del tumulo (redatta da S. Hood in Marinatos - Hirmer [1960, p. 160, fig. 24])

[65] Taylor [1955, pp. 207-19].



Il tumulo della Tomba di Clitennestra venne analizzato in prossimità del muro in *poros* al peribolo del tumulo e si riscontrò la successione di strati variamente composti di terre di diverse colorazioni intercalati da uno strato di argilla e pietre.

I sondaggi effettuati nel 1956 da Wace a sud ovest della camera del Tesoro di Atreo, ad un raggio di circa 25 metri [66], portarono alla luce parti del muro di peribolo; altri frammenti erano già stati rinvenuti in prossimità del *dromos* nel 1939, composto da muratura in pietrame rivestita da un paramento in *poros* in blocchi squadrati di forma trapezoidale, in cui erano inseriti sul retro dei perni in legno a coda di rondine per connettere le due parti distinte di muratura. In tutte le trincee di scavo venne rinvenuto sull'originario suolo naturale uno strato omogeneo di frammenti di roccia, in alcuni casi misto a frammenti di conglomerato provenienti dalla lavorazione dei blocchi per la costruzione delle murature della *tholos*. Nella trincea di scavo più prossima alla camera si rinvenne uno strato di argilla grigio-verde a ricoprimento del tumulo [67].

L'ispezione all'estradosso della muratura superstite della cupola crollata della *tholos* MME di Nichoria ha messo in luce uno spesso volume murario in pietrame calcareo di varia pezzatura gravante a tergo della muratura della cupola. Anche in questo caso il pietrame è poggiato su di uno strato sottile di argilla per impermeabilizzazione [68].

Nello studio della *tholos* MME di Nichoria Wilkie [69] ipotizza che la messa in opera del tumulo dovesse procedere gradualmente, di pari passo con la costruzione della cupola; in tal modo i blocchi lapidei dei corsi murari della cupola potevano essere assicurati tramite battitura a tergo di terra umida del tumulo, garantendo, in questo modo, una maggiore stabilità alla struttura parziale durante la costruzione, evitando l'uso di puntelli provvisori di sostegno. In tal modo, inoltre, le parti completate potevano essere utilizzate come piani di lavoro e trasporto dei materiali.

55.
Tomba di Egisto. Lo strato di argilla a copertura del tumulo rinvenuto nei sondaggi del 1954 (da Taylor [1955, p. 208, fig. 2])
56.
Tomba di Clitennestra. Sezione stratigrafica del tumulo in prossimità del muro di contenimento a sud (da Taylor [1955, p. 218, fig. 5])

[66] Wace [1956, p. 120, fig. 7].
[67] Wace [1956, pp. 116-117].
[68] Wilkie [1992, pp. 238-9].
[69] Wilkie [1992, p. 241].

6.
Riflessioni sulle caratteristiche architettoniche delle tholoi

La struttura muraria a copertura della camera viene usualmente definita in letteratura *pseudocupola* o *falsa cupola*.

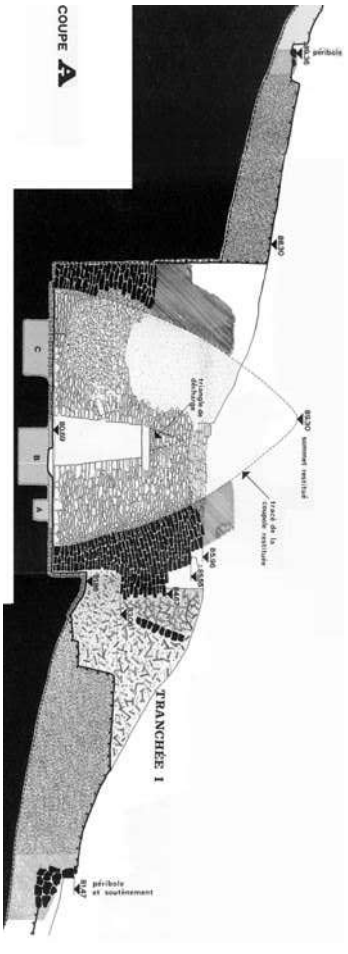
Le *pseudocupole* sono realizzate ottenendo la chiusura dello spazio interno mediante la sovrapposizione di corsi orizzontali disposti leggermente in falso, configurando un profilo ad alta ogiva. In letteratura tale configurazione viene associata ad un modello di comportamento statico: le *pseudocupole* sono stabili per trasmissione dei carichi mediante sole forze verticali, senza la trasmissione di spinte orizzontali. Tale ipotesi implica che la struttura statica della cupola sia composta dalla giunzione di una serie di *falsi* semiarchi ogivali tra loro staticamente autonomi.

L'apparecchiatura per elementi lapidei in corsi orizzontali ad anello, progressivamente aggettanti l'uno sull'altro, garantisce la stabilità della struttura parziale durante la costruzione, compensando il momento ribaltante dell'aggetto con il momento stabilizzante determinato dal peso della muratura verticale. Tuttavia, dall'esame delle caratteristiche delle *tholoi* esaminate si notano ulteriori particolari della fattura fisica che possono influire nella valutazione dell'effettivo comportamento statico.

La struttura della cupola si inserisce in un pozzo circolare di scavo che mediamente è profondo quanto l'altezza del vano di accesso. In realtà, le pareti del pozzo hanno altezza variabile, in relazione alla morfologia dei luoghi; trattandosi di uno scavo effettuato su una pendice, l'altezza è massima a monte e minima a valle, ove generalmente è posto il vano di accesso dello *stomion*. Nel Tesoro di Atreo il rapporto fra l'altezza del vano di accesso e l'altezza interna della cupola in chiave è circa 0,4, mentre esaminando l'altezza interna della camera secondaria scavata nella roccia, risulta che l'altezza del pozzo di scavo a monte sia circa la metà dell'altezza totale. Gran parte della struttura della cupola è dunque inserita in un pozzo.

Il saggio eseguito nel 1970 da Gasche e Servais [70] a tergo della muratura della camera nella *tholos* B di Thorikos, nella zona verso valle del perimetro murario (Trincea I), ove, a causa della morfologia del luogo, l'altezza da terra del pozzo risulta inferiore alla quota dell'architrave di accesso, ha messo in luce una particolare soluzione tecnica per rimediare alla mancanza di muratura di contrasto in tale punto. Dalla quota 83,06 s.l.m., bordo superiore del pozzo scavato, alla quota 84,0 s.l.m., quota dell'architrave della porta di accesso, la muratura della camera è caratterizzata da un notevole incremento di spessore (da 1,55 m a 2,59 m). Tale

[70] Gasche - Servais [1971, pl. 4].



particolarità sembra confermare l'importante ruolo che assume il pozzo di scavo per la stabilità della struttura della cupola[71]: la variazione tecnica infatti sopperisce all'assenza di contrasto offerta dal pozzo di scavo, fig. 57.

L'inserimento di cunei di pietra in forza tra conci adiacenti di ciascun corso orizzontale, come si è riscontato nel Tesoro di Atreo e nella Tomba di Clitennestra, assicura la continuità strutturale dei corsi murari orizzontali ad anello e la capacità di assorbire uno sforzo di compressione radiale. Lo sfalsamento dei giunti verticali lungo i meridiani costituisce un'ulteriore espediente costruttivo per garantire unità alla struttura muraria a cupola. Tali fatture risultano in contrasto con il modello di cupola a spicchi meridiani tra loro indipendenti.

Alla luce di tali considerazioni, assumere che lo schema statico della *tholos* sia quello di una *pseudocupola* appare un'estrema semplificazione del reale funzionamento statico della struttura. A ciò si aggiunge il tumulo all'estradosso della cupola muraria, che producendo una compressione radiale sugli anelli orizzontali dei corsi lapidei, suggerisce altresì l'uso di un espediente per capacitare la struttura a conformare un sistema strutturale resistente a cupola.

Le soluzioni tecniche costruttive sembrano finalizzate allo scopo di rendere la struttura capace di trasmettere la spinta. L'attrito e la compressione verticale presente tra le facce orizzontali delle pietre, incrementati dai carichi indotti, la sapiente apparecchiatura, l'effetto cerchiante esplicato dal pozzo circolare di scavo, sembrano tutti concorrere alla configurazione di una struttura capace di trasmettere la spinta.

Il modello di *pseudocupola* risulta pertanto semplicistico a fronte di tale quadro strutturale. Da ciò la necessità di un approfondimento dello studio statico delle *tholoi* micenee, al fine di definire un modello congruente con le evidenze concrete e con le particolari soluzioni tecniche adottate.

57.
'Tholos' B di Thorikos. Sezione trasversale sud-nord della camera con indicazione della particolare fattura della muratura ove le pareti perimetrali del pozzo di scavo sono di esigua altezza (da Gasche – Servais [1971, pl. 4])

[71] Il beneficio alla stabilità della cupola della *tholos* B di Thorikos apportato dal pozzo di scavo è stato verificato mediante simulazione con modello ad elementi finiti. In tal modo si è valutata l'altezza minima consentita che è stata posta a circa 1/3 dell'altezza della cupola in chiave. (Cremasco – Laffineur [1999, p. 142]).

II
gli studi esistenti

1.
Dal tumulo alla tholos

Dall'esame dell'architettura della *tholos* micenea si evince che il sistema costruttivo adottato per le opere murarie è in stretta relazione con la condizione ipogea del monumento. Il pozzo circolare, scavato nel suolo, in cui si inserisce la parte inferiore della struttura, e il tumulo, posto all'estradosso della parte superiore della cupola, costituiscono parti integranti e primarie dell'architettura del monumento, tanto che il binomio costruzione muraria - suolo, in cui è inclusa, ne costituisce il carattere distintivo.

Questo carattere specifico della *tholo*s individua un primo elemento per l'analisi critica del modello di *pseudocupole*, e guida a distinguere le *tholoi* micenee da strutture cosiddette a *pseudocupole* realizzate a secco fuori terra in altri luoghi e tempi.

A tale riguardo l'analisi dei tumuli e delle *tholoi* in Messenia, di epoca protomicenea, risulta di particolare interesse. Le ricognizioni di McDonald e Hope Simpson [1] hanno messo in evidenza la grossa concentrazione di tumuli in quest'area e gli scavi condotti in Messenia sui tumuli e sulle *tholoi*, da Marinatos prima e Korrés [2] poi, hanno mostrato uno stretto rapporto tra le due tipologie.

Le prime tombe a *tholos* micenee, il cui diametro risulta poco inferiore ai 6 m, compaiono alla fine dell'ME in Messenia [3], e nascono come modificazione di tumuli [4]. Solo in seguito a questa prima fase di consolidamento della tipologia architettonica, la *tholos* si diffonde in altre regioni: nel TE I-II in Laconia [5], Argolide [6] e Attica [7], raggiungendo dia-

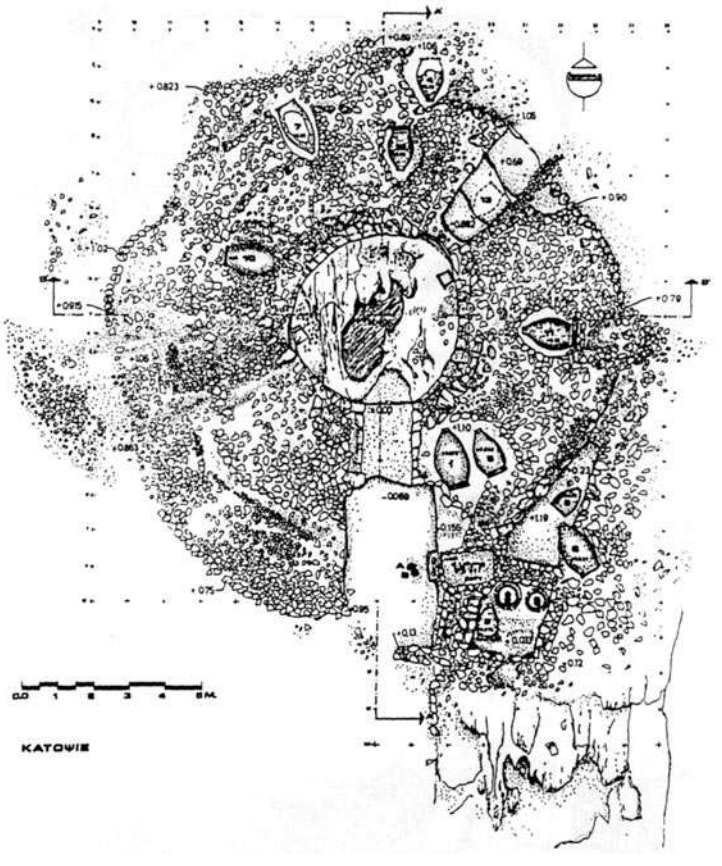
[1] McDonald – Hope Simpson, 1961, 1964 e 1969.

[2] Korrés, 1976 (1), (2), (3) e (4), 1978, 1979, 1983.

[3] La *tholos* di Koriphasion (Osmanaga) è ritenuta la più antica; Blegen la data alla fine del Bronzo Medio (Blegen [1954, p. 162]).

[4] Merkouri [1999, p. 34].

[5] Le nove tombe a *tholos* di Analipsis sono state datate dal TE I al TE II (Schachermeyr [p. 258]); la più grande e meglio conservata, di diametro di 8,65 m circa, è stata datata al TE II (Rhomaios [1954, p. 39]). Non si riscontrano in Laconia *tholoi* più antiche.



metri intorno ai 10 m; nel TE II B ha luogo una particolare ricchezza di manifestazioni [8] che condurrà alle più grandiose realizzazioni del TE III B [9]. In Messenia sono presenti evidenze della graduale trasformazione del tumulo in *tholos*.

Esempi di sperimentazione, per la conformazione di una tipologia architettonica, mostrano lo scavo in preesistenti tumuli di una camera interna o la realizzazione di piccole *tholoi* inserite radialmente all'interno del tumulo in terra, alla stessa maniera dei *pithoi* generalmente inclusi nei tumuli al perimetro.

Il tumulo di Agios Ioánnis a Papoúlia, fig. 1, ampliato in epoche successive, presenta al centro una costruzione

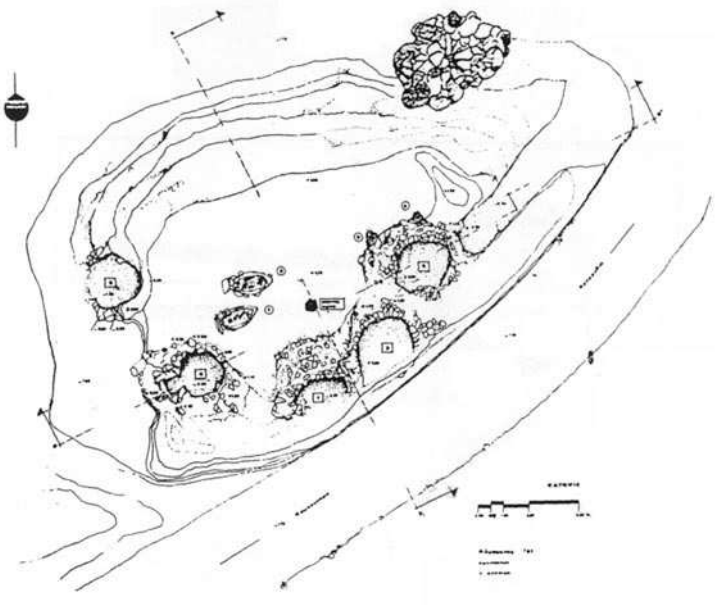
[6] Wace data le prime tombe a *tholos* di Micene non prima del TE I, più precisamente la Tomba dei Ciclopi e la Tomba di Egisto al TE I, e la Tomba di Epano Phournos all'inizio del TE II (Wace [1921 -23, pp. 292, 296, 316]. I rispettivi diametri misurano 8, 13 e 11 metri circa.

[7] Le più antiche tra le *tholoi* dell'Attica, le *tholoi* A e B di Thorikos, sono state datate al TE II A (Gasche– Servais [1971, p. 99] e Servais-Soyez [1984, p. 45]). La *tholos* B di Thorikos ha un diametro di 8,61 m.

[8] Nei maggiori siti della Messenia l'apice dello sviluppo architettonico viene raggiunto nel corso del TE II (Pelon [1976, p. 402]). Nelle varie regioni della Grecia numerose e rilevanti sono le evidenze datate al TE IIB (Pelon [1976, p. 482, Tav. IV]).

[9] Le ultime manifestazioni dello sviluppo evolutivo della *tholos* (Tesoro di Atreo, la Tomba di Clitennestra e *tholos* di Orchomenos) sono state datate al TE III B.

1.
Agios Ioánnis a Papoúlia. Pianta (da Korrés [1978, fig. 1])
2.
Voïdokiliá. Pianta (da Korrés [1978, fig. 1])



absidata senza tracce di sepolture [10], anticipando, per la presenza di una camera interna, la struttura architettonica della *tholos*.

Il tumulo di Voïdokiliá, fig. 2, testimonia il definitivo passaggio, alla realizzazione, nel TE I, di una *tholos* [11] al centro [12]. Si è ipotizzato che precedentemente, in loco della *tholos*, vi fosse una costruzione simile a quella del tumulo di Agios Ioánnis a Papoúlia o un *dromos* che conduceva al centro del tumulo [13].

L'esempio di Kaminia, fig. 3, costituisce uno stadio intermedio: all'interno di un tumulo, lungo il perimetro, sono ricavate delle piccole tombe a *tholos* con apertura rivolta verso l'esterno, poste in posizione analoga ai *pithoi* generalmente inseriti nei tumuli [14].

Le evidenze richiamate inducono a supporre che proprio in Messenia possa riconoscersi l'origine geografica della *tholos* [15], derivante della fusione del tumulo con la camera funeraria in un'unica organica forma architettonica.

L'ipotesi è di particolare interesse sia riguardo lo sviluppo compositivo della *tholos*, sia in relazione alle tecniche adottate per la costruzione. L'analisi delle prime sperimentazioni potrebbe infatti far luce sui graduali passaggi nella definizione della tipologia architettonica e nell'acquisizione della tecnica costruttiva.

[10] Boyd [2002, p. 120].

[11] La così detta *tholos* del figlio di Nestore (Trasimede) menzionata da Pausania (IV, 36, 2).

[12] Boyd [2002, p. 126].

[13] Merkouri [1999, nota 19].

[14] Pelon[1998, p. 128], Boyd [2002, p. 116], Merkouri [1999, p. 33].

[15] Korrés [1984, p. 149], Merkouri [1999, p. 40].

3.
Kaminia. Pianta (da Merkouri [1999, fig. 1])

4.
Tomba di Egisto. Il 'triangolo di scarico' rinvenuto durante il restauro (da French [2002, fig. 22])

2.
La classificazione di Wace

L'indirizzo metodologico che prevale nella letteratura sulle *tholoi* è caratterizzato dalla ricerca di una classificazione delle evidenze fisiche ai fini di una catalogazione ragionata (Wace, 1921-23 e 1931; Pelon, 1976).

La ragione di tale ricerca deriva dalla necessità di stabilire per tali monumenti una cronologia relativa. Le difficoltà nel definire una datazione delle *tholoi* sulla base dei corredi e dell'analisi stratigrafica, in quanto quasi nella totalità saccheggiate e disturbate, hanno condotto a elaborare una classificazione in base a criteri tipologici delle strutture architettoniche, all'evoluzione della tecnica costruttiva e ai materiali impiegati.

La prima sistematica trattazione delle *tholoi* micenee è costituita dall'analisi di Wace [16] delle nove *tholoi* di Micene, che costituisce il primo e tuttora valido modello di classificazione.

Le *tholoi* di Micene testimoniano il perfezionarsi della tipologia dal TE II al TE IIIB. La catena evolutiva che Wace propone si sviluppa attraverso l'acquisizione delle tecniche, l'uso dei materiali, il perfezionamento delle proporzioni architettoniche, e la definizione tipologica degli elementi costruttivi. Tutti questi elementi conducono ad un graduale ampliamento del diametro della camera e dunque, di conseguenza, della cupola muraria a copertura.

Wace struttura il percorso evolutivo attraverso tre fasi cui corrispondono tre gruppi di *tholoi*. Alla prima fase appartengono la Tomba dei Ciclopi (diametro 8 m), la Tomba di Egisto (diametro 13 m, fig. 2), e la *tholos* di Epano Phournos (diametro 11 m), che utilizzano blocchi lapidei senza tracce di lavorazione, architrave corta, e sono privi dell'artificio tecnico del *triangolo di scarico* [17].

La seconda fase, che si riferisce alle *tholoi* di Panagia (diametro 8 m), dei Leoni (diametro 14 m), e Kato Phournos (diametro 11 m), si caratterizza per la messa in opera del *triangolo di scarico*, per la presenza di architravi lapidee di maggiori dimensioni, e lavorate a seguire la geometria della camera, e per l'uso di blocchi lapidei grossolanamente sbozzati.

Il terzo gruppo, costituito dalla Tomba dei Genii (diametro 8,4 m), dalla Tomba di Clitennestra (diametro 13,4

[16] Wace [1921-23, p. 283] e Wace, 1931.

[17] Attualmente la mancanza di *triangolo di scarico* non costituisce un criterio di datazione. French [2002, p. 41] informa che il recente restauro della Tomba di Egisto ha rivelato la presenza del *triangolo di scarico*, fig. 4, che Wace aveva supposto mancasse. Inoltre, va sottolineato che le altre due *tholoi* del primo gruppo sono preservate solo fino all'architrave. Nessuna evidenza, dunque, conferma che la costruzione fosse in origine priva del *triangolo di scarico*.

m), e dal Tesoro di Atreo (diametro 14,5 m), al termine della catena evolutiva anche per l'uso di raffinate opere di decoro, utilizza la pietra di conglomerato anche per la camera interna, in blocchi lavorati a martello e sega nel seguire la curvatura all'intradosso della cupola, e imponenti architravi in pietra accuratamente lavorati.

I criteri adottati da Wace confidano nella validità di una lettura della costruzione a partire dalla consistenza materiale delle evidenze. Ciò deriva dalla convinzione che le strutture esistenti custodiscono un ricchissimo patrimonio di informazioni da interpretare a ritroso, mediante la scomposizione delle forme costruite in elementi costruttivi e attraverso la decifrazione dei segni e delle tracce impressi nella materia.

3·
La classificazione di Pelon

L'estesa trattazione di Pelon [18] sulle *tholoi*, sui tumuli e sui circoli funerari nell'Egeo dell'età del bronzo costituisce il testo più esauriente sulle *tholoi* micenee, il cui scopo è il riordino critico della letteratura e delle documentazioni esistenti in materia.

Mediante un catalogo diviso per regioni, le evidenze vengono organicamente sistemate secondo un ordine cronologico e formale. L'atlante costruito pone le basi per affrontare le questioni dell'origine e della diffusione geografica delle *tholoi*, in relazione all'esame dell'evoluzione tipologica, della cronologia relativa e della struttura architettonica [19].

Lo studioso riesamina i termini alla base della classificazione adottata da Wace e, sostenendo la necessità di uno studio regionale, individua nella misura della camera il fattore di classificazione capace di inglobare la totalità degli esempi [20]. Le *tholoi* vengono divise in tre classi: la classe A, con diametro inferiore a 6 m, la classe B, con diametro compreso tra i 6 e i 10 m, e la classe C, con diametro superiore ai 10 m, corrispondenti a stadi progressivi di acquisizioni tecniche e capacità di gestione delle risorse [21].

La misura del diametro della camera è quindi funzione delle capacità tecniche, delle risorse economiche e delle necessità funzionali e, dunque, lo sviluppo della tecnica costruttiva diviene il parametro significativo della "qualità" delle *tholoi* micenee.

La dimensione delle *tholoi* argoliche, la cui *tholos* più piccola, e la più antica tra le 9 *tholoi* di Micene, la Tomba dei Ciclopi, ha un diametro di 8 metri, induce pertanto a sup-

[18] Pelon, 1976, segue l'aggiornamento Pelon, 1998.
[19] Pelon [1976, p. 2].
[20] Pelon [1976, p. 390].
[21] Pelon [1976, p. 391].

porre che i costruttori delle *tholoi* argoliche usufruissero delle esperienze fatte precedentemente in Messenia [22].

Similmente agli studi di Wace, le considerazioni esposte da Pelon individuano nell'analisi tecnica costruttiva del monumento l'approccio più adeguato allo studio delle *tholoi* micenee e nella lettura dell'evidenza fisica, in base alle finalità architettoniche e costruttive, lo strumento operativo dello studio.

4.
Antologie e pubblicazioni a seguito di campagne di scavo

Nell'approfondimento della conoscenza delle *tholoi* attraverso l'interpretazione tecnica delle forme materiali le relazioni sulle campagne di scavo costituiscono una fonte privilegiata. Le relazioni di scavo contemplano frequentemente descrizioni accurate delle caratteristiche fisiche e della consistenza materiale dei monumenti ispezionati (aspetti talvolta oggi non più rilevabili in sito), seppure a queste non segue, di regola, una soluzione sintetica della relativa funzione architettonica e strutturale.

La cernita dei particolari significativi nella descrizione delle *tholoi* esaminate durante gli scavi e dei risultati di eventuali saggi effettuati ha costituito un lavoro di base per formare un repertorio generale di informazioni, da ordinare e interpretare secondo logica architettonica e fisica.

Il confronto sistematico tra le osservazioni acquisite e le riflessioni presenti in letteratura, relative ad epoche e esempi diversi, ha posto le basi per costruire la lettura sintetica della tipologia architettonica e strutturale delle *tholoi* esposta nel precedente capitolo. In tale ambito, in primo luogo, l'antologia di Pelon [23] ed anche, per alcune strutture, il recente catalogo di Boyd [24], relativo alle strutture funerarie del sud ovest del Peloponneso, hanno costituito un utile strumento, quale catalogo delle ricerche svolte, delle fonti, del materiale fotografico e di rilievo presente in letteratura.

Nell'ambito delle relazioni sulle campagne di scavo alcune dettagliate pubblicazioni sono risultate di particolare interesse ai fini della presente indagine in quanto vi si descrivono le strutture architettoniche associando alla raccolta dei dati un'interpretazione tecnica. Ci si riferisce alle relazioni di scavo sulla *tholos* B di Thorikos [25] del 1968, sulla *tholos* MME di Nichoria [26] del 1992 e sulla *tholos* di Platyskinos [27] presso Achladia, del 1995, ove oggetto degli studi è l'esame dell'architettura del monumento, che muove dalla descrizio-

[22] Pelon [1976, p. 405].
[23] Pelon, 1976 e 1998.
[24] Boyd, 2002.
[25] Gasche – Servais, 1971.
[26] Wilkie, 1992.

ne degli elementi architettonici dell'evidenza per condurre ad ipotesi su modalità e tempi di realizzazione, interpretando la consistenza materiale del manufatto alla luce degli aspetti costruttivi.

L'osservazione dei monumenti secondo le ragioni tecnico architettoniche ha stimolato gli autori a tentare di ripercorrere le fasi della costruzione, riflettendo sulle possibili modalità di risoluzione dei problemi tecnici, sugli eventuali strumenti utilizzati e sulle azioni messe in atto, e quantificando, in base a questo tipo di risorse ed alla manodopera, lo sforzo del costruire. In tale ottica, il confronto tra diverse evidenze della consistenza materiale e dei particolari tecnici utilizzati fa luce sugli sforzi compiuti nella graduale acquisizione di una tecnica.

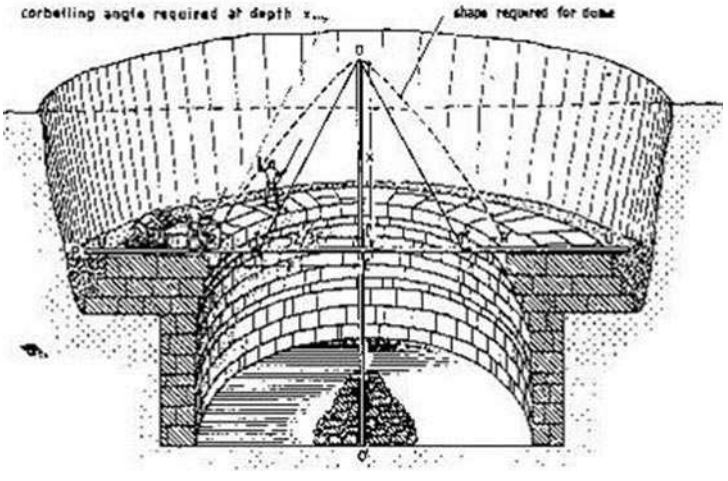
5.
Studi sulle tecniche costruttive

In letteratura non si rinviene una specifica corrente di studi relativa alle tecniche costruttive delle *tholoi* micenee, a meno di studi specialistici interessati a particolari tematiche. La tradizione culturale dell'analisi delle dimensioni del monumento, che, attraverso l'esame delle proporzioni e dei rapporti dimensionali tra le misure degli elementi architettonici, tenta di risalire ai sistemi di misura in uso e di ritrovare dei criteri unitari di proporzionamento degli elementi architettonici, ha ultimamente prodotto applicazioni nello specifico delle *tholoi* micenee [28]; un'estensione di tale metodologia alle *tholoi* cretesi circa l'uso del piede minoico nell'impianto geometrico è stata affrontata da Belli [29].

Manca tuttavia in letteratura un approccio sistematico alla ricerca delle possibili azioni pratiche adoperate per la definizione dell'impianto di progetto e, in generale, al tema della costruzione. Alcune osservazioni sulle eventuali tecniche costruttive adoperate sono state formulate a valle di campagne di scavo particolarmente attente all'analisi dell'architettura, o sono espresse nei rari studi presenti sulla statica della costruzione. Per Cavanagh e Laxton, che confidano nella definizione corrente di *pseudocupola* attribuita alle *tholoi*, il "principio del *corbelling*", ovvero la sapienza nel posizionare un blocco lapideo sull'altro in un aggetto di misura tale da mantenere la stabilità della struttura, identifica una possibile tecnica di messa in opera dei blocchi [30], fig. 5.

Le obiezioni di Santillo – Frizell [31] alle suddette tesi, che richiamano invece nel comportamento statico la confor-

[27] Belli [1995, p. 85].
[28] Kamm [2000, p. 19].
[29] Belli [2003 (2), p. 403].
[30] Cavanagh – Laxton [1981, p. 130].



mità delle cupole delle *tholoi* alle correnti cupole murarie, sono completate da ipotesi sulle azioni concrete attuate per la messa in opera, quali lo scavo, il trasporto dei blocchi, il puntellamento di alcune parti per la stabilità in corso d'opera, gli eventuali ponteggi, le rampe di lavoro, e sulla loro successione nel cantiere, fig. 6. In entrambi i casi il comportamento statico attribuito ai monumenti detta le regole e le tecniche operative da seguire nella costruzione, affinché le relative problematiche statiche vengano risolte, attraverso una costruzione congruente con l'attribuita identità strutturale e la conseguente corretta successione delle fasi costruttive.

In linea generale, va sottolineato che le tecniche costruttive dell'architettura micenea non costituiscono ancora un tema autonomo di studio in letteratura.

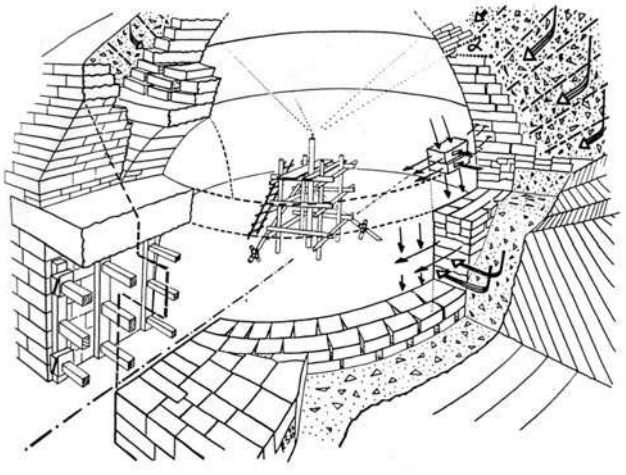
Gli argomenti nel campo della costruzione affrontati in letteratura vertono spesso sulle energie impiegate per le operazioni di cantiere rilevabili dall'osservazione del monumento. Nel recente studio di Cavanagh - Mee [32] il calcolo dei volumi e dei pesi dei materiali impiegati nella costruzione del Tesoro di Atreo e l'analisi delle azioni tecniche cui sono stati soggetti: cavatura, trasporto, lavorazione e messa in opera, costituiscono i dati per poter valutare le risorse umane impiegate nella costruzione e i tempi di realizzazione.

Va sottolineato che l'imponenza delle più rilevanti realizzazioni lascia stupefatti rispetto alla capacità di messa in opera dei materiali costruttivi. Nelle operazioni di cantiere il trasporto e la messa in opera dei materiali, in particolare dei blocchi lapidei di grande dimensione, come gli architravi in pietra [33], costituivano un'impresa estremamente complessa, la cui modalità di attuazione è ancora oggi poco chiara.

La capacità di sollevare grandi massi per la costruzione dell'opera era dovuta alla padronanza di tecniche complesse.

5.
Ipotesi del criterio pratico di messa in opera dei blocchi lapidei secondo la curvatura stabile (da Cavanagh – Laxton [1981, p. 130])

[31] Santillo - Santillo Frizell [1984, p. 45].
[32] Cavanagh – Mee [1999, p. 93].
[33] Nel Tesoro di Atreo l'architrave interna pesa 120 tonnellate.



I giganteschi blocchi lapidei messi in opera nelle grandi *tholoi* forniscono un aspetto monumentale alle costruzioni. Santillo Frizell [34] sottolinea che nelle *tholoi*, monumenti per eccellenza della cultura micenea, tale aspetto è intenzionale, e scaturisce dalla volontà di rendere evidenti pubblicamente le acquisite capacità tecniche.

Con tali criteri i giunti ai terminali dell'architrave interna nel Tesoro di Atreo, obliqui anziché verticali, sono stati interpretati da Santillo [35] come esemplificativi del meccanismo che, secondo l'autore, veniva utilizzato per la messa in opera. Un'asta a bilanciere, azionata sul bordo inclinato, consentiva di esercitare una spinta elevata, tale da trascinare agevolmente il blocco lungo il pendio.

Ad opera finita i bordi inclinati della lastra evidenziavano la conoscenza della tecnica di posa in opera. Nella parte basamentale della muratura di rivestimento del *dromos* verso nord, un blocco lapideo di eccezionale grandezza presenta un lato tagliato obliquamente e l'insellatura per il passaggio delle corde da tiro. Anche in questo caso, la traccia lasciata nella pietra costituirebbe un atto figurativo intenzionale, per illustrare la padronanza di complesse tecniche di trasporto e costruttive.

Si rileva per tanto che la decifrazione dei segni e delle tracce di lavorazione incise nelle pietre riconduce agli strumenti utilizzati e alla cultura materiale. Su tale principio Küpper [36] affronta il tema dell'architettura micenea, oggetto, per la prima volta, di una specifica monografia, confermando, con un'analisi sistematica dei segni rilevati su blocchi lapidei, un uso esteso della sega a pendolo per la lavorazione della pietra [37].

[34] Santillo Frizell [1997, p. 625].
[35] Santillo [1997, p. 439].
[36] Küpper, 1996.
[37] Küpper [1996, p. 123].

6.
Le fasi costruttive in base alle problematiche statiche (da Santillo - Santillo Frizell [1984, p. 47])

6.
Analisi della statica delle tholoi

Nel precedente paragrafo si è evidenziata la necessità di riguardare la connessione esistente tra le soluzioni tecniche adottate per la costruzione delle *tholoi* e i problemi statici delle strutture. Si ritiene infatti che ciascun aspetto della costruzione possa essere compreso concretamente solo alla luce della funzione statica che assolve nel complesso strutturale. Pertanto, lo studio dei principi statici delle cupole murarie costituisce parte integrante del tema della costruzione delle *tholoi*.

Heyman [38] definisce le metodologie di base per l'analisi del comportamento e la verifica delle strutture murarie applicando l'analisi limite alle strutture in muratura, e riallaccia le attuali conoscenze sulla stabilità delle strutture murarie ai vari momenti della loro evoluzione storica, dalle conoscenze medioevali agli studi del XVIII e XIX sec., antecedenti alla cultura tecnica e scientifica che si afferma con l'ingresso del cemento armato nella storia del costruire.

Le problematiche esistenti nel definire l'effettivo comportamento statico della cupola muraria delle *tholoi* richiedono di approfondire la ricerca dell'identità statica a valle di una conoscenza approfondita dell'architettura del monumento. D'altra parte lo studio della statica delle *tholoi* micenee è argomento poco discusso nel panorama degli studi sulle strutture murarie. Generalmente le cupole murarie delle *tholoi* sono definite *pseudocupole*, ovvero strutture in equilibrio per il trasferimento da corso a corso di sole forze verticali. Secondo tale modello di comportamento la cupola viene intesa come costituita strutturalmente dalla giunzione di *falsi* semiarchi tra loro staticamente indipendenti.

Dall'analisi della letteratura risulta manifesta la distanza e la difficile comunicazione tra gli studi archeologici e gli studi statici: tale distanza comporta, dal punto di vista statico, l'assenza di una descrizione delle evidenze tale da consentire l'elaborazione di un modello congruente e, dal punto di vista archeologico, manca la necessità di formulare un modello di comportamento statico in base alle evidenze.

Uno studio di Benvenuto e Corradi [39] sulla statica del *falso arco* e delle *false cupole* affronta il tema della stabilità delle *tholoi* procedendo a ritroso. Assumendo che il modello di *pseudocupola*, ovvero un sistema strutturale basato sulla trasmissione degli sforzi secondo la direzione verticale, valga per le cupole murarie delle *tholoi*, gli autori formulano l'equazione matematica atta a descrivere la geometria del profilo all'intradosso tale da garantire l'equilibrio della struttura con un fissato coefficiente di sicurezza.

[38] Heyman, 1966, 1967, 1972 e 1995.
[39] Benvenuto – Corradi [1987, p. 99].

Con simili propositi, ma partendo dal rilievo dei profili all'intradosso delle *tholoi* esistenti, Cavanagh e Laxton [40] si soffermano sul rapporto tra la geometria dei profili interni delle *tholoi* esistenti e la tecnica di messa in opera dei blocchi lapidei. Tale tecnica consiste nel porre leggermente in falso un blocco lapideo sull'altro in modo da garantire l'equilibrio della struttura muraria ("principio del *corbelling*"). L'analisi sistematica delle curvature interne delle cupole delle *tholoi* micenee, associata ad una sezione tipologica delle stesse, derivante dalle informazioni presenti in letteratura, conduce gli autori a definire un modello su cui verificare la trasmissione di soli carichi verticali. Il risultato ottenuto guida gli autori ad affermare che il "principio del *corbelling*" è sufficiente a giustificare la stabilità delle *tholoi*. Nella costruzione della cupola non sembrano necessarie ulteriori perizie tecniche, se non quella di posizionare le pietre con uno sbalzo in accordo con una curvatura in condizione di stabilità secondo il modello di un *falso arco*. E la messa in opera avverrebbe secondo un criterio pratico proposto dagli autori. La funzione della curvatura interna [41] delle *tholoi* viene richiamata per definire dei parametri oggettivi di confronto con strutture simili appartenenti a diversi contesti geografici e culturali [42], allo scopo di determinare un criterio oggettivo per stabilire le eventuali interazioni tra questi e il contesto culturale miceneo.

Al contrario, Santillo - Frizell [43] sottolineano la cosiddetta "verità" della cupola muraria delle *tholoi*, esponendo a livello qualitativo i principi statici delle strutture a cupola e i modi in cui tale comportamento risulta compatibile con le caratteristiche morfologiche delle *tholoi*.

Un approccio diverso ha l'articolo di Cremasco - Laffineur [44] sull'ingegneria delle *tholoi* micenee: mediante un modello di calcolo ad elementi finiti, basato sull'ipotesi di comportamento elastico lineare della muratura (la cupola parzialmente crollata della *tholos* B di Thorikos) gli autori verificano l'unità spaziale della struttura a cupola per la presenza di sforzi circumferenziali, di compressione nella parte alta della cupola, e di trazione a livello delle reni. Da tale analisi gli autori evidenziano il positivo rapporto esistente tra il volume di terra del tumulo all'estradosso e la profondità del pozzo di scavo, ai fini della stabilità della cupola, che si giustifica nel conciliare il raggiungimento della stabilità della cupola e lo sforzo costruttivo, fig. 7.

[38] Heyman, 1966, 1967, 1972 e 1995.

[39] Benvenuto – Corradi [1987, p. 99].

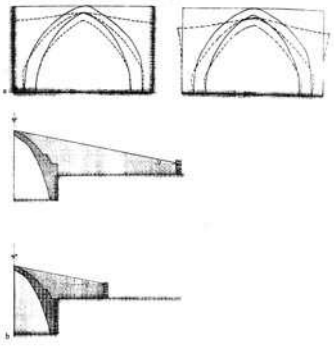
[40] Cavanagh – Laxton, [1981, p. 130].

[41] La funzione della curvatura è $f_{(x)} = c\, x^d$; ove $f_{(x)}$ è la misura del raggio della camera alla profondità x dalla chiave al piano di campagna; nel Tesoro di Atreo le costanti c e d sono state valutate pari a c = 2,7 e d = 0,69.

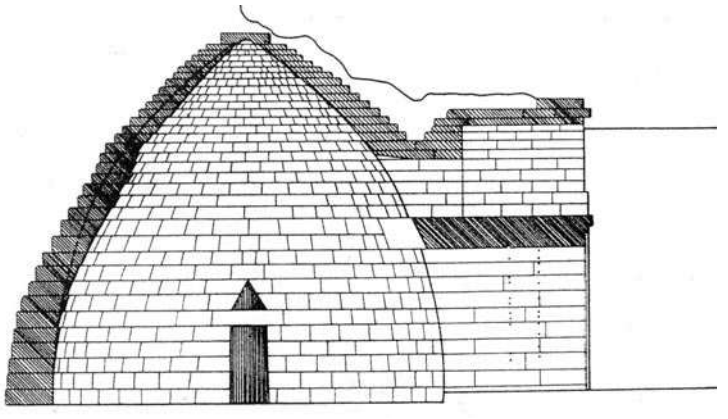
[42] Cavanagh – Laxton [1987, pp. 39-56] e Cavanagh – Laxton [1990, p. 141].

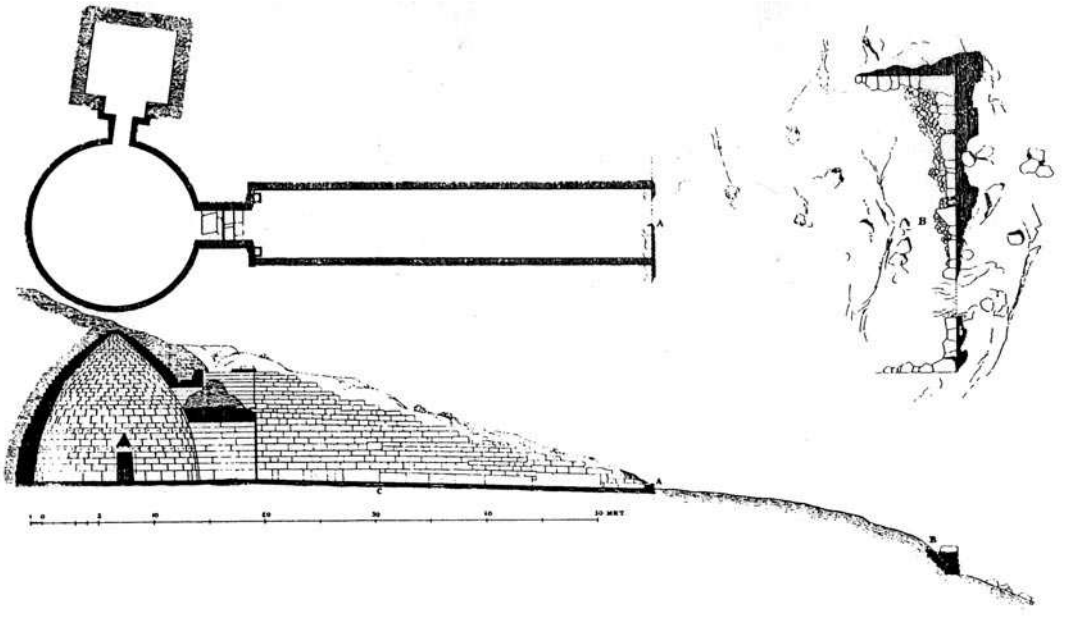
[43] Santillo - Santillo Frizell [1984, p. 45].

[44] Cremasco – Laffineur [1999, p. 139].



7.
Studi sul rapporto tra altezza dello scavo e volume del tumulo (da Cremasco - Laffineur [1999, Tav. XXIX]).





1.
Sezione longitudinale della camera rilevata da Donaldson in Stuart – Revett 1830
2.
Rilievo di Thiersch del 1879

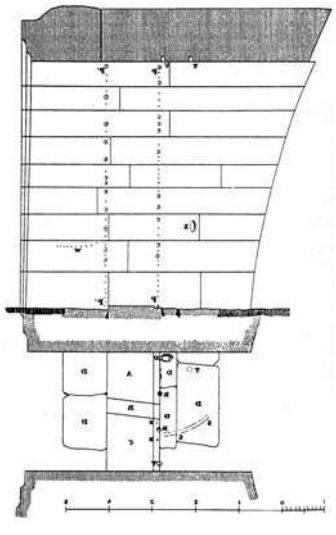
1.
Introduzione e oggetto dell'analisi

Allo scopo di analizzare compiutamente l'architettura della *tholos* micenea nelle sue parti costruttive si è approfondito lo studio di un caso concreto.

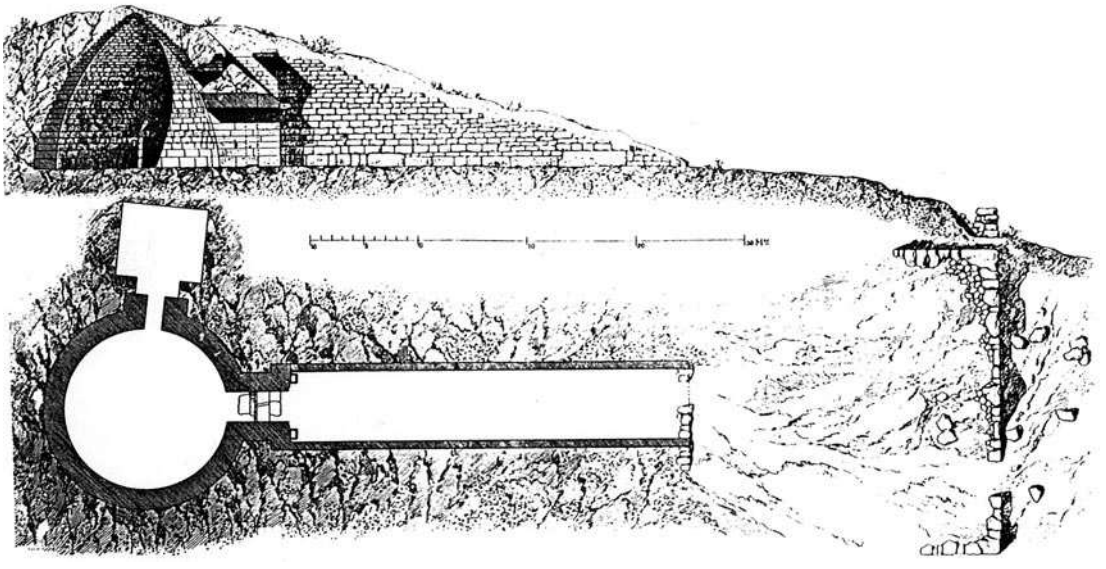
Ciò in particolare è divenuto necessario per l'esigenza di dover ipotizzare, sulla base di evidenze, la conformazione delle parti architettoniche generalmente non rilevate. La condizione ipogea della *tholos* non consente infatti il rilievo diretto di tutti gli elementi strutturali contenuti tra lo spazio interno della camera e l'estradosso del tumulo, rendendo complessa la misurazione dello spessore delle strutture murarie, la distinzione della parte costruita da quella ottenuta tramite lo scavo, e la definizione della natura del tumulo e dell'apparecchiatura interna delle murature. D'altra parte, la definizione della morfologia e della natura delle parti "nascoste" della struttura architettonica, escluse dall'accesso diretto, costituisce un passo necessario per lo studio integrale della costruzione e per elaborare un modello geometrico il più congruente possibile con un caso reale, sul quale affrontare l'analisi del comportamento statico degli elementi strutturali componenti il complesso architettonico della *tholo*s micenea.

La scelta del caso di approfondimento si è orientata verso una *tholos* ancora ben conservata nelle parti architettoniche e per la quale fossero presenti il maggior numero di dati possibili. Con tali presupposti si è scelto di analizzare il Tesoro di Atreo, che, costituendo tra le *tholoi* esistenti una delle più studiate e oggetto di un considerevole numero di pubblicazioni, presenta numerosi dati a disposizione.

Va inoltre sottolineato che il Tesoro di Atreo è in ottimo stato di conservazione in tutte le parti componenti e rappresenta, probabilmente, l'esempio esistente più evoluto dell'architettura della *tholos* micenea. Tuttavia, nonostante sul Tesoro di Atreo siano stati redatti rilievi ed effettuati sondaggi in più punti della struttura, i dati presenti non sono stati organizzati in maniera organica, ovvero in modo da sintetizzare le conoscenze presenti e ottenere una descrizione com-



3.
Pianta e sezione di Thiersch del 1879 del vano di accesso alla camera



4.
Rilievo di Thiersch del 1894 rivisto da Dörpfeld

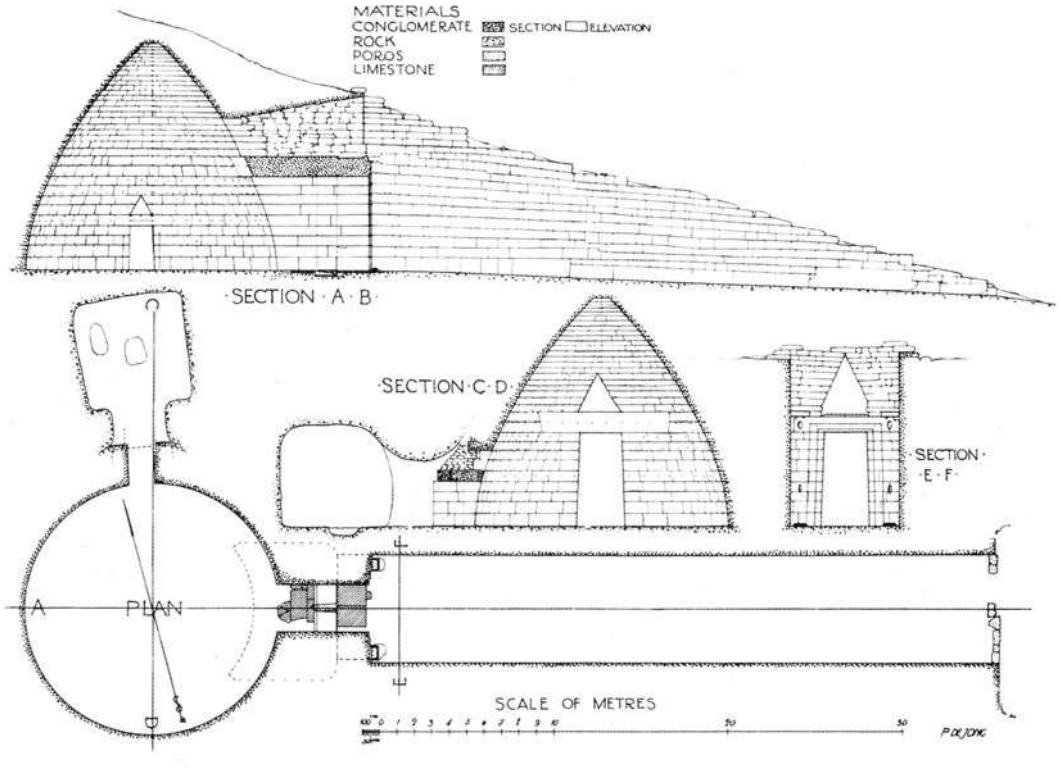
pleta degli elementi architettonici della costruzione. Inoltre, l'integrazione dei dati presenti, si è constatato, non risulta sufficiente a definire compiutamente la struttura di tutte le parti architettoniche, obbligando, a tale scopo, a procedere nella descrizione in base ad ipotesi fondate sui dati di fatto.

Allo stato attuale, dunque, la mancanza di completezza del rilievo delle parti costruttive, che riguarda principalmente le parti non visibili della struttura, quali la conformazione del pozzo di scavo, lo spessore e l'apparecchiatura della muratura della cupola e la consistenza del tumulo, impedisce una conoscenza completa della natura della costruzione.

Il primo passo per definire il più compiutamente possibile la struttura architettonica del Tesoro di Atreo è consistito nel tentativo di riorganizzare il vasto materiale presente in letteratura con lo scopo di reperire tutti i dati esistenti necessari a stabilire plausibilmente le dimensioni e la configurazione delle parti architettoniche e le caratteristiche costruttive. Dall'esame della letteratura sono stati raccolti i dati e le informazioni presenti e riordinati mediante una scheda ragionata, organizzata secondo gli elementi architettonici componenti. La scheda di analisi redatta, che è servita da strumento di lavoro nel corso dello studio, viene presentata in Appendice 1.

Parallelamente alla raccolta sistematica dei dati, si è proceduto all'analisi del materiale grafico di rilievo presente in letteratura. In primo luogo sono stati raccolti ed esaminati i rilievi architettonici della *tholos* e, già a una primo esame, si è constatata la necessità di dover ricercare indicazioni aggiuntive per completare il rilievo architettonico.

Come avviene per la totalità delle *tholoi*, a meno del caso emblematico della *tholos* di Thorikos [1], crollata e rico-



struita per gran parte della cupola muraria, i rilievi presenti del Tesoro di Atreo rappresentano unicamente le parti visibili dall'esterno della struttura architettonica [2] o indicano idealmente la sezione delle parti murarie [3]. I disegni metrici non contemplano infatti informazioni circa lo spessore della muratura della cupola muraria della camera, le dimensioni del pozzo scavato nella roccia in cui si impianta la *tholos*, nonché una stratigrafia di rilievo del tumulo sovrastante, che indichi i materiali impiegati e lo spessore degli strati.

Trattandosi, come si è detto, di un'architettura ipogea, i grafici di rilievo non distinguono in elementi di diversa natura le "parti nascoste", comprese tra il profilo architettonico interno e la superficie esterna del tumulo.

Il disegno di rilievo che si è ritenuto più completo tra quelli esistenti nella rappresentazione architettonica è costituito dal rilievo eseguito da P. De Jong nel 1921-23 [4], in quanto presenta nella stessa Tavola grafica un maggior numero di elaborati tra loro relazionati. Tale rilievo è stato ridisegnato integralmente su supporto informatico in modo da procedere ad un'analisi approfondita dei dati presenti e divenire strumento operativo nello studio.

Accanto ai disegni di rilievo generali dell'architettura del monumento, sono presenti in letteratura elaborati grafici

[1] Gasche – Servais, 1971.
[2] Wace, 1921 – 23, rilievo di P. de Jong.
[3] Thiersch [1879, Tav. XIII].
[4] Wace [1921 – 23, Tav. LVI].

5.
Rilievo di P. De Jong del 1921

di rilievo di zone parziali della *tholos*, che, realizzati in momenti distinti e per ragioni diverse, esaminano con attenzione punti specifici della struttura.

Si fa riferimento all'unico disegno metrico esistente, risalente ai primi decenni dell'800[5], che contempla lo spessore e l'apparecchiatura dell'ultimo corso orizzontale della cupola muraria, e alle dettagliate rappresentazioni degli elementi lapidei componenti lo *stomion*.

Tali rappresentazioni metriche, riportate alla configurazione generale del monumento, apportano rilevanti indicazioni aggiuntive alla comprensione della costruzione.

Allo scopo di definire integralmente le caratteristiche geometriche e costruttive della *tholos* del Tesoro di Atreo e la natura dei materiali costituenti, assumono particolare considerazione i grafici di rilievo redatti a seguito dei numerosi sondaggi condotti da Wace nel *dromos* e nel tumulo nel 1920-21 e tra il 1939 e il 1955. I grafici di rilievo delle strutture rinvenute riproducono la configurazione di alcune parti "nascoste" delle strutture, distinguendo le varie strutture componenti e i relativi materiali e forniscono pertanto rilevanti informazioni sulle caratteristiche costruttive e sulla consistenza di parti interne della struttura. Tra questi elaborati è presente, inoltre, una planimetria d'insieme, con indicazione delle curve di livello del tumulo in rapporto alla localizzazione della pianta interna della *tholos*, ove sono ubicati i saggi compiuti all'interno del tumulo tra il 1939 e il 1955.

La collazione dei dati presenti ha consentito la rielaborazione del materiale grafico di rilievo. Mediante l'integrazione ragionata del materiale è stato possibile visualizzare istantaneamente le informazioni esistenti e costruire gradualmente una più completa descrizione della configurazione architettonica del monumento.

L'elaborato grafico sintetico, che fornisce una rappresentazione integrata dei grafici di rilievo, ha fornito la base fondante di supporto per procedere alla supposizione della configurazione e della consistenza delle parti ancora incognite. Al termine, si è proceduto al "completamento" del rilievo architettonico indicando, sulla base di ipotesi plausibili, fondate sull'analisi di tutte le informazioni disponibili in letteratura, la conformazione delle parti non rilevate della struttura. In tal modo si è costruito dunque un rilievo "interpretativo" degli elementi architettonici componenti la struttura del Tesoro di Atreo. Nella fase sperimentale del lavoro, sulla base del rilievo "interpretativo" redatto, si è definito un modello geometrico di sintesi il più possibile congruente con il caso reale. Su tale modello geometrico sono state implementate le analisi sul comportamento statico esposte al capitolo V.

[5] Blouet [1833, Tav. 66, fig. 4].

2.
Principali fonti esaminate

Nel presente paragrafo si elencano i grafici di rilievo del Tesoro di Atreo disponibili in letteratura. Gli elaborati sono stati suddivisi in rilievi architettonici, rilievi di zone parziali e grafici di rilievo eseguiti a valle di sondaggi effettuati, secondo le tre categorie esposte nel precedente paragrafo.

I rilievi architettonici della *tholos* sono i seguenti:

1830. Sezione longitudinale della camera [6], fig. 1;

1879. Pianta e sezione longitudinale sul *dromos* della *tholos* [7], fig. 2;

1879. Pianta e sezione longitudinale del vano di accesso alla *tholos* [8], fig. 3;

1879. Prospetto sul *dromos* dello *stomion* [9];

1894. Pianta e sezione longitudinale sul *dromos* della *tholos* (revisione di Dörpfeld del rilievo redatto da Thiersch) [10], fig. 4;

1921. Pianta, sezione longitudinale sul *dromos*, sezione trasversale sulla camera secondaria e prospetto dello *stomion* sul *dromos* della *tholos* (redatto da P. De Jong) [11], fig. 5;

I rilievi metrici di zone parziali della *tholos* cui si è fatto riferimento nello studio sono i seguenti:

1833. Pianta dell'ultimo corso lapideo della cupola [12], fig. 6;

1879. Sezione parziale sul *triangolo di scarico* e particolari degli agganci degli elementi di decoro sul prospetto dello *stomion* sul *dromos* [13];

1921. Pianta e sezione longitudinale delle lastre componenti la soglia del vano di accesso (rilievo redatto da P. De Jong) [14];

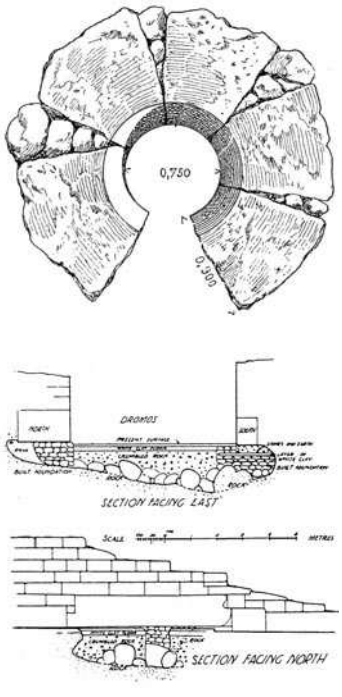
I rilievi metrici redatti a seguito di sondaggi effettuati nelle parti interne e nascoste della *tholos* sono i seguenti:

1921. Sezioni longitudinale e trasversale del terreno di sedime nel *dromos* (rilievo redatto da P. De Jong) [15], fig. 7;

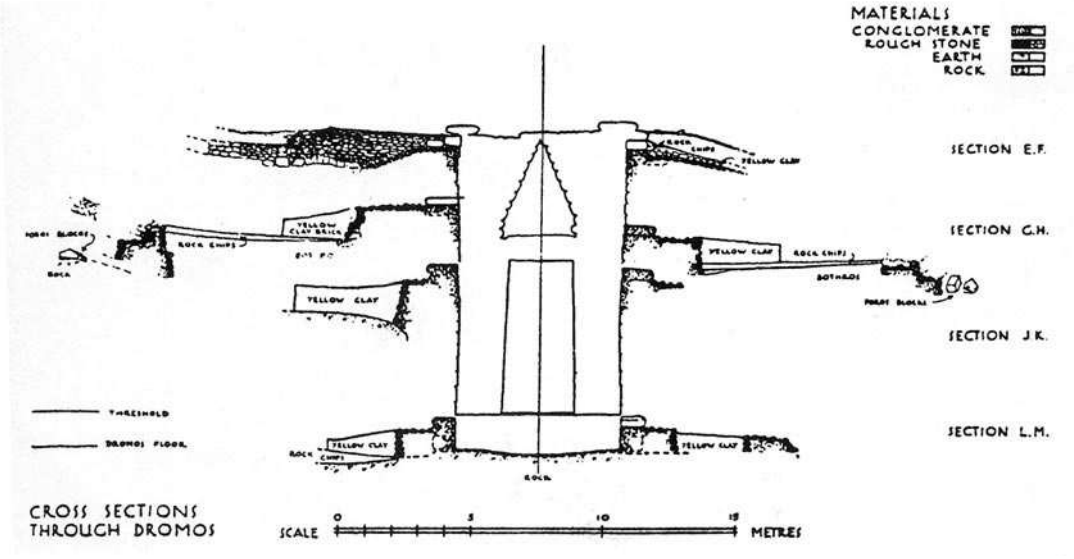
1939. N. 4 sezioni trasversali sul *dromos* e sul tumulo [16], figg. 8 e 9;

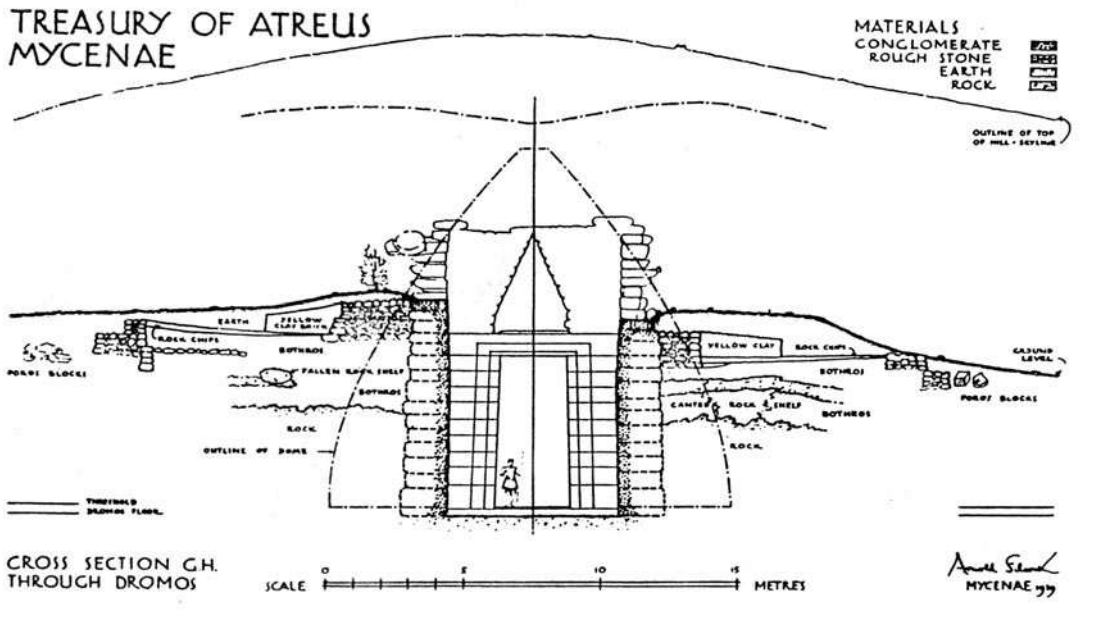
1939. Pianta delle trincee di scavo eseguite per i sondaggi delle murature di contenimento del *dromos* e del tumulo [17], fig. 10;

1956. Planimetria dei sondaggi effettuati intorno alla tomba [18], fig. 11.



6.
Pianta dell'ultimo corso lapideo della cupola del 1833
7.
Sezioni longitudinale e trasversale del terreno di sedime nel 'dromos' del 1921

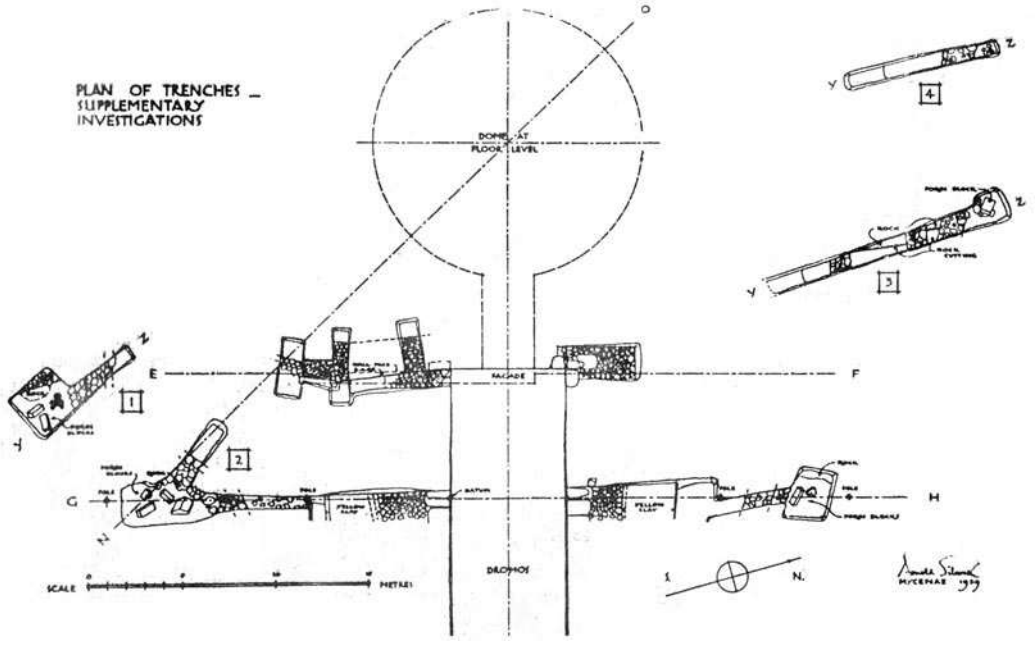


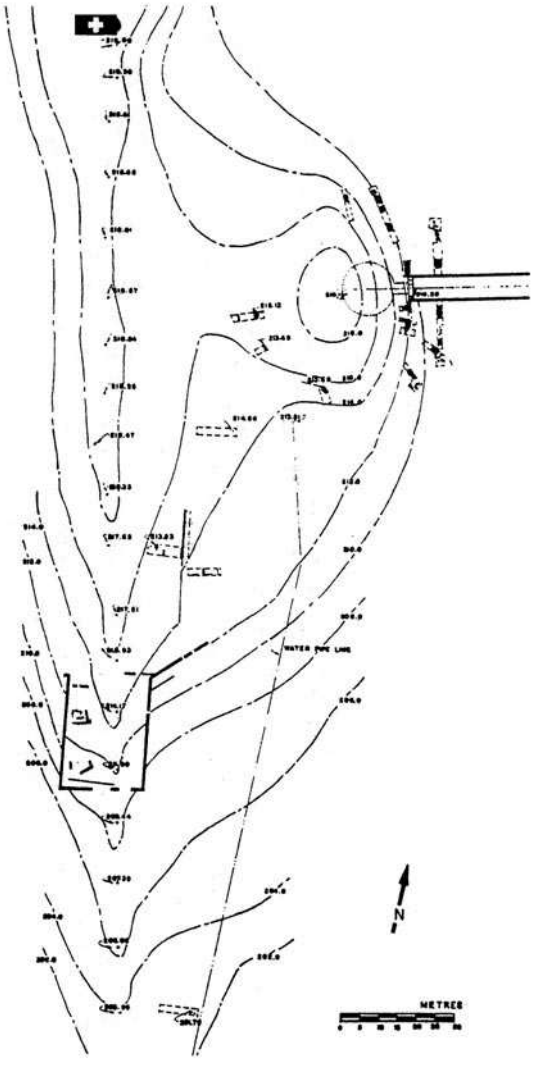


8.
Sezioni trasversali sul 'dromos' e sul tumulo eseguite a seguito dei sondaggi del 1939
9.
Sezione trasversale G-H sul 'dromos' e sul tumulo eseguita a seguito dei sondaggi del 1939

[6] Stuart – Revett, 1830.
[7] Thiersch [1879 Tav. XII e XIII]; Wace [1921 – 23, Tav. LVII].
[8] Thiersch [1879, Tav. XII].
[9] Thiersch [1879, Tav. XIII].
[10] Perrot – Chipiez [1894, tomo VI, Tav. III].
[11] Wace [1921 – 23, Tav. LVI].
[12] Blouet [1833, Tav. 66, fig. 4].
[13] Thiersch [1879, Tav. XIII].
[14] Wace [1921 – 23, Tav. LVII].
[15] Wace [1921 – 23, p. 341, fig. 70].
[16] Wace [1940, p. 239, fig. 1 e p. 241, fig. 2].
[17] Wace [1940, p. 249, fig. 8].
[18] Wace [1956, p. 120, fig. 7].

68





10.
Pianta delle trincee eseguite per i sondaggi nelle murature di contenimento del 'dromos' e nel tumulo nel 1939
11.
Planimetria dei sondaggi effettuati intorno alla tomba nel 1956

69

3.
Selezione dei dati presenti in letteratura

Nel presente paragrafo si espongono sinteticamente i dati di rilievo e di descrizione delle strutture architettoniche del Tesoro di Atreo acquisiti al fine di fondare le ipotesi sulle dimensioni e sulla natura delle "parti nascoste" della struttura architettonica.

1

Rilievi architettonici della tomba (Thiersch, 1879 e De Jong, 1921-23; figg. 2 e 5).

Gli elaborati rappresentano le parti visibili della *tholos* e, per la cupola muraria a copertura della camera, la curvatura interna della cupola e l'altezza e il numero dei corsi orizzontali in blocchi lapidei.

I due rilievi corrispondono per ciò che riguarda la rappresentazione del numero e dell'altezza dei corsi della cupola muraria. Benché nel rilievo di Thiersch si presti rilevante attenzione ai particolari, quale la lieve variazione della curvatura dell'intradosso della cupola in sezione [19], i tratti rettilinei che definiscono la pianta inducono a considerare l'elaborato più vicino ad una sintesi ideale delle forme.

Di contro, il rilievo di De Jong si mostra più realistico e, soprattutto, la presenza di un maggior numero di sezioni verticali in corrispondenza tra loro ha indotto a preferire tale rilievo come base per l'elaborazione del "completamento" del rilievo.

L'analisi dei rapporti dimensionali presenti nel rilievo di De Jong ha mostrato una corrispondenza delle misure globali con quelle ipotizzate da Mylonas [20]. Si è fatto dunque riferimento alle misure stimate da Mylonas, ovvero un diametro alla base di 14,6 m e un'altezza in chiave di 13,39 della cupola muraria.

2

Rilievo della pianta dell'ultimo corso orizzontale della cupola (Blouet, 1833; fig. 6).

L'eleborato descrive le dimensioni e le caratteristiche dell'apparecchiatura muraria del trentatreesimo corso lapideo orizzontale della cupola muraria, posto al di sotto della lastra di chiave. La pianta rappresenta la vista in proiezione dal basso dell'anello lapideo e indica, in corrispondenza dell'estradosso del corso, uno spessore dei blocchi di 0,9 m e la misura del diametro del cerchio interno alla quota corrispondente pari a 0,75 m. Dal rilievo si evince che i blocchi lapidei sono lavorati solo per la superficie

[19] Tale variazione della curvatura è presente nella rappresentazione della sezione verticale della camera in corrispondenza dell'accesso pubblicata nel 1830 nel supplemento delle *Antiquities of Athens* (fig. 1).

[20] Mylonas [1957, p. 86]. Successivamente Mylonas [1966, p. 120] indica un'altezza in chiave leggermente inferiore e pari a 13,30 m.

curva rivolta verso la camera interna e per circa otto centimetri di profondità nei giunti verticali di contatto tra pietra e pietra.

La parte restante dei giunti verticali, che non garantisce un diretto contatto dei blocchi, non essendo le pietre lavorate in tutta la profondità del giunto in modo da combaciare perfettamente seguendo la direzione dei raggi di cerchio, genera degli spazi tra le pietre. Tali spazi, di forma triangolare, sono riempiti con cura da pietre più piccole inserite in forza, come cunei, tra i giunti. La descrizione di Donaldson [21] nel supplemento alle *Antiquities of Athens* ben esprime l'accuratezza con cui sono rese solidali le pietre di ciascun corso orizzontale.

3

Sezioni trasversale e longitudinale sul *dromos* in prossimità dell'accesso, relative ai sondaggi effettuati nel 1920- 1921 [22], fig. 7.

Dalla misura dell'altezza del materiale di riporto indicata nei grafici relativi al saggio effettuato da Wace nel *dromos* a circa 5 m dall'ingresso (in corrispondenza del blocco lapideo di eccezionali dimensioni visibile sul prospetto della muratura di contenimento del *dromos* sulla sezione longitudinale) si è dedotto il profilo originario del suolo in prossimità dell'accesso al *dromos*. In tale zona la pendice della collina presentava un incremento di pendenza, scendendo rapidamente fino ad una profondità di 1,35 m dalla quota pavimentale del *dromos*.

Allo scopo di mantenere costante la pendenza del corridoio di accesso, le murature di contenimento del *dromos* della parte iniziale fondano su una terrazza artificiale, anziché direttamente sulla roccia tagliata, come avviene per la parte restante del *dromos*.

4

Sezioni nord sud sul *dromos* e il tumulo [23], realizzate in adiacenza allo *stomion* e rispettivamente a 6,2 m, 14,6 m e 33,3 m dallo *stomion*, a seguito dei sondaggi effettuati da Wace nel 1939, figg. 8 e 9.

Gli elaborati descrivono compiutamente la composizione delle parti interne non visibili delle murature di contenimento del *dromos* e del tumulo. Nelle sezioni, i paramenti murari in blocchi lapidei prospicienti il *dromos*, di circa 1,5 m di spessore e a una fila, sono addossati alla roccia tagliata dal corridoio del *dromos*; a tergo, al di sopra del terreno naturale, si imposta una muratura in grossi elementi di pietrame calcareo allettati con argilla giallastra, che, ammor-

[21] Stuart – Revett [1830, p. 30].
[22] Wace [1921-23, p. 341, fig. 70].
[23] Wace [1940, p. 239, fig. 1 e p. 241, fig. 2].

sata alle precedenti murature di contenimento, le rinforza per sostenere il volume del tumulo in adiacenza.

La quota di imposta della muratura in pietrame definisce pertanto la quota originaria del suolo prima della costruzione della *tholos*. Il pacchetto delle murature di contenimento del *dromos* termina controterra nel tumulo per mezzo di una struttura di protezione in mattoni di argilla cruda, di spessore variabile dai 2,5 ai 4 m, atta a proteggere il muro dalle infiltrazioni d'acqua. Al di sotto dei mattoni di argilla e della muratura in pietrame calcareo vi è uno strato di roccia frantumata, di spessore medio variabile dai 0,10 ai 0,30 m.

Wace sostiene che durante lo scavo del *dromos* i frammenti di roccia tagliata risultanti dallo scavo furono posti ai lati del *dromos* stesso, e su tutta l'estensione planimetrica del tumulo, fino a raggiungere la testa del muro di peribolo per il contenimento del tumulo, che si connette obliquamente ai terminali del *dromos*.

Dalla lettura della conformazione della parte interna delle strutture nelle sezioni è possibile risalire al profilo originario del suolo prima della costruzione della *tholos*. La linea congiungente le quote originarie riscontrate nelle quattro sezioni definisce in sintesi la pendenza del suolo originario lungo il *dromos* fino allo *stomion*. Ottenendo il profilo del suolo originario fino allo *stomion*, è stato possibile valutare approssimativamente l'altezza dello scavo circolare in cui è impiantata la *tholos* in adiacenza all'accesso. In tal modo, il bordo superiore del pozzo corrisponde alla quota di imposta delle lastre architrave del vano di accesso alla *tholos*, in accordo con le supposizioni di Holland [24] per l'architettura delle nove *tholoi* di Micene.

L'analisi della tecnologia costruttiva, utilizzata per la parte del tumulo a ridosso del *dromos* e per le murature di contenimento del *dromos*, ha condotto a ritenere ragionevole che simili soluzioni tecniche siano utilizzate anche per la parte del tumulo a ridosso della cupola muraria.

5

Planimetria dei sondaggi effettuati da Wace [25] dal 1939 al 1955 intorno alla tomba, fig. 11.

Nella planimetria sono riprodotte le trincee dei sondaggi effettuati intorno alla tomba in riferimento alle curve di livello dell'estradosso del tumulo e alla pianta della camera e del *dromos* ivi rappresentate.

I saggi hanno indagato la natura dei materiali e la geometria del muro di contenimento del tumulo.

Esso si sviluppa circolarmente a perimetro del tumulo, con un raggio di circa 25 m dall'apice e, verso l'accesso, si riallaccia obliquamente, mediante due rami rettilinei, alle

[24] Holland [1921-23, p. 396].
[25] Wace [1956, fig. 7, p. 120].

murature di contenimento del *dromos* in prossimità dell'accesso.

A seguito dei sondaggi Wace afferma che il tumulo risulta costituito da uno strato di argilla impermeabilizzante coperto da terra [26]; a tali considerazioni non sono però associate, per la parte relativa alla cupola, la misura dello spessore dello strato di argilla a ricoprimento della muratura e la natura del terreno costituente il tumulo.

Dalla connessione dei punti in cui sono ubicate le trincee che indicano la presenza del muro di contenimento del tumulo si è tracciato l'andamento di tale muro intorno alla tomba. Dall'indicazione delle curve di livello del tumulo è stato infine ricavato il profilo all'estradosso del tumulo nelle sezioni longitudinale e trasversale, non rappresentato completamente nel rilievo di P. De Jong.

Nella Tavola 8 in allegato viene tracciato il profilo originario del suolo ed indicate le dimensioni del pozzo di scavo supposte.

4.
Ipotesi sulla configurazione delle "parti nascoste" della struttura

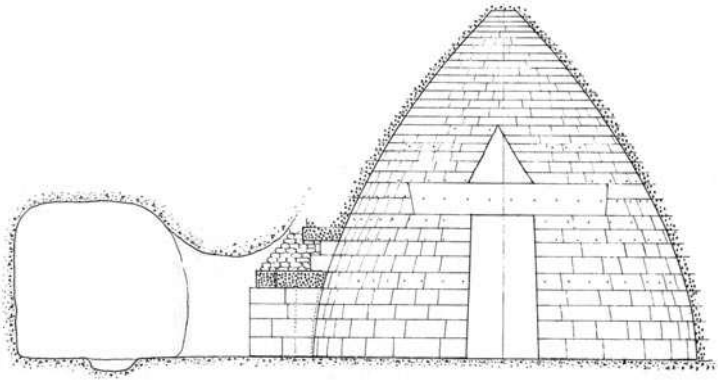
Nei seguenti paragrafi si espongono i ragionamenti e il procedimento logico seguiti per "completare" il rilievo architettonico della *tholos* al fine di pervenire ad un rilievo "interpretativo" completo.

4.1
Profilo originario del suolo e dimensioni del pozzo di scavo

Come si è detto le *tholoi* sono impiantate alle pendici di una collina; la costruzione di una *tholos* prevedeva lo scavo della pendice della collina per la realizzazione del pozzo circolare in cui è inserita la camera e del corridoio di accesso del *dromos*. Dai dati di rilievo presenti si è ipotizzato il volume della collina interessato dallo scavo del pozzo e del *dromos*, ricercando il profilo originario del suolo in cui è stata realizzata la *tholos*. La distinzione tra scavo e costruzione risulta basilare per comprendere la natura strutturale del manufatto.

In letteratura c'è accordo sull'ipotesi che nelle *tholoi* micenee l'altezza del pozzo di scavo corrisponda alla quota dell'architrave posto a copertura della porta di accesso. Ciò poteva permettere il trascinamento delle grandi e pesanti lastre lapidee lungo il pendio, ed evitare di sollevarle per la posa in opera. Tale ipotesi è stata per la prima volta esposta da Holland [27] nelle

[26] Wace [1956, p. 116].



note sull'architettura delle nove *tholoi* di Micene.

Dalle sezioni trasversali sul *dromos* eseguite a valle dei saggi effettuati da Wace a tergo delle murature di contenimento del *dromos* nel 1939 è stata ricavata la quota del suolo originario nei quattro punti in cui sono state tagliate le sezioni trasversali.

Dalle indicazioni a seguito del saggio effettuato da Wace nel 1920-21 in prossimità dell'accesso al *dromos* si è potuta definire la pendenza del profilo originario del suolo in prossimità dell'accesso al *dromos*.

Sulla sezione longitudinale della *tholos* sono stati tracciati gli assi delle sezioni trasversali con i punti indicanti le quote del suolo naturale e la quota del suolo naturale in prossimità dell'accesso al *dromos*. Si sono congiunti i punti noti con l'intradosso della lastra architrave di accesso in prossimità della facciata, e si è prolungata idealmente tale retta all'interno della camera, tracciando per approssimazione l'originario profilo del suolo nella sezione longitudinale.

L'ipotesi ottenuta dell'andamento del profilo originario del suolo è stata confrontata con l'altezza interna della camera secondaria. La camera secondaria è scavata nella roccia, e, pertanto, si è supposto che tra il soffitto della camera secondaria ed il profilo della roccia affiorante vi fosse necessariamente un'adeguata distanza. Si è ritenuta plausibile la misura minima ottenuta pari a circa 1 m.

Secondo il procedimento esposto, l'altezza del pozzo di scavo varia da un minimo a valle di circa 6,5 m ad un massimo a monte di 7,8 m. La quota a valle corrisponde approssimativamente alla quota dell'estradosso dell'architrave di accesso.

Da tali considerazioni si è ritenuto opportuno valutare in sintesi un'altezza costante del pozzo di scavo e pari alla quota dell'estradosso della lastra architrave di accesso dal suolo della camera, corrispondente a 6,70 m.

12.
Rilievo di P. De Jong. Sezione trasversale sulla camera secondaria

[27] Holland [1921-23, p. 396].

4.2
Spessore e apparecchiatura della muratura della camera

Per la camera interna si è fatto riferimento alle misure generali indicate da Mylonas (14,6 m di diametro a quota terra e 13,39 di altezza in chiave) che si è visto corrispondere alle dimensioni della camera nel rilievo di P. De Jong.

Nella pianta di rilievo della camera e nella sezione trasversale sulla camera secondaria del rilievo di De Jong, in corrispondenza del vano di passaggio alla camera laterale, è leggibile la sezione della muratura della camera, fig. 12. Pertanto, si è ricavato lo spessore della muratura della camera a quota terra dalla misura del vano di passaggio alla camera laterale, che si è stimato di 2,43 m.

Nella sezione trasversale sulla camera secondaria del rilievo di De Jong viene parzialmente tracciato, in continuità con lo scavo della camera secondaria, il profilo della roccia tagliata in cui è contenuta la muratura della cupola, fig. 12.

Tale profilo, per la parte a ridosso della muratura della camera, in prossimità del *triangolo di scarico* dell'architrave sulla porta di accesso alla camera laterale, si presenta inclinato verso la camera. Ciò conferma quanto descritto da Wace [28] e riportato da Pelon [29], ovvero che la camera è realizzata in una grande cavità tagliata nella roccia con pareti leggermente inclinate verso l'interno.

La muratura della cupola muraria a copertura della camera è composta dalla sovrapposizione di 33 corsi orizzontali di altezza generalmente decrescente verso l'alto: 9 al di sotto della quota dell'architrave di accesso, 2 in corrispondenza della lastra architrave, 22 al di sopra della lastra architrave. Al termine, un'unica pietra, lavorata all'intradosso come a seguire la curvatura interna della volta, chiudeva la costruzione della cupola.

La curvatura all'intradosso dell'apice ottenuta tramite la lavorazione della pietra di chiave viene riportata nel rilievo redatto da Thiersch e rivisto da Dörpfeld [30], fig. 4, nell'*Histoire de l'Art dans l'Antiquité* del 1894, e, in precedenza, nella rappresentazione della sezione longitudinale della camera del Tesoro di Atreo di Donaldson nelle *Antiquities of Athens* del 1830 [31], fig. 1. Nel primo rilevo di Thiersch del 1879, fig. 2, da cui è ricavato il successivo rivisto da Dörpfeld, la curvatura all'intradosso della pietra di chiave non risulta leggibile. La pietra di chiave doveva infatti mancare, come è evidente da documenti iconografici anteriori (stampa di Dodwell del 1808 (fig. 47 al cap. I) e rilievo di Blouet del 1833).

[28] Wace [1921-23, p. 349].
[29] Pelon [1976, p. 174].
[30] Perrot – Chipiez [1894, Tav. III].
[31] Stuart – Revett, 1830.

Entrambi i rilievi di Thiersch rappresentano idealmente in sezione lo spessore dei corsi lapidei orizzontali della muratura della cupola.

Nel rilievo di P. de Jong del 1921-23 la cupola all'intradosso si chiude in chiave orizzontalmente. Il numero dei corsi corrisponde a quello indicato da Thiersch e non viene rappresentato lo spessore non rilevabile dei corsi orizzontali, fig. 12.

L'unico documento in cui si ha indicazione dello spessore della muratura della cupola è costituito dal rilievo dell'ultimo corso orizzontale presente nell' *Histoire de l'Art dans l'Antiquité*, tomo VI p. 492, di Blouet [32], fig. 6. Tale disegno di rilievo rappresenta la pianta vista dal basso [33] del trentatreesimo corso orizzontale, e indica all'estradosso del corso lo spessore di 0,9 m ed il diametro del cerchio interno a tale quota di 0,75 m.

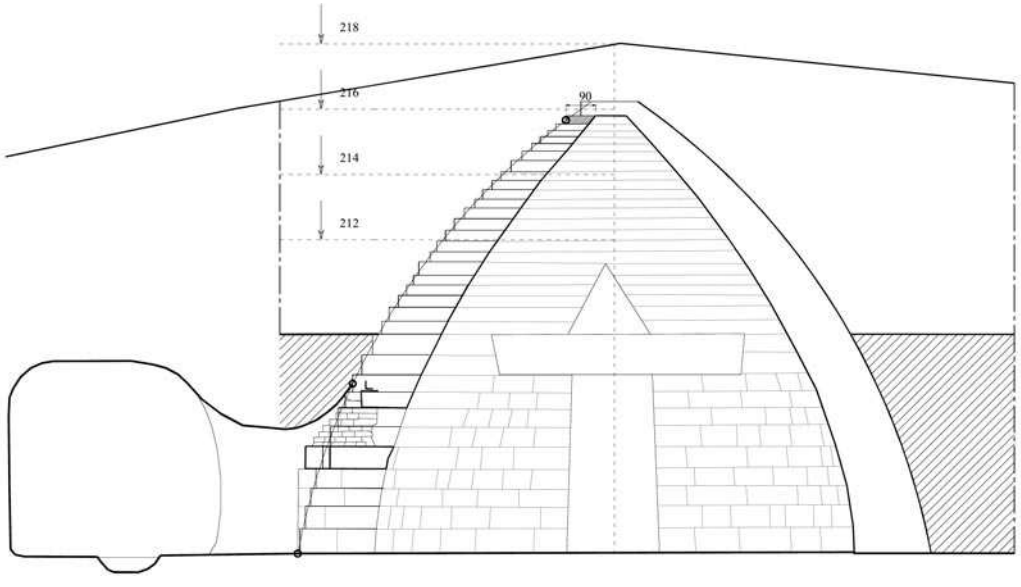
La scarsità dei dati a disposizione circa la muratura della cupola e la necessità di definirne la volumetria, fondamentale per lo studio del comportamento statico, ha comportato la definizione di un modello congruente con i dati reali. Per tale ragione, nel merito dell'apparecchiatura della muratura della cupola si è supposto ogni corso orizzontale, composto dalla giunzione di blocchi lapidei singoli, e la struttura muraria della cupola definita dalla sovrapposizione orizzontale di anelli lapidei concentrici, formati dalla giunzione di singoli blocchi lapidei lungo la circonferenza e di spessore progressivamente decrescente verso l'alto.

La definizione della volumetria della muratura della cupola è derivata dal tentativo di associare i dati del rilievo di P. de Jong con quelli derivanti da Blouet. La misura del raggio interno di 75 cm indicata in Blouet, fig. 6, corrisponde sul rilievo di P. de Jong al raggio interno del parallelo della cupola alla quota del letto di posa dell'ultimo corso e dunque non dell'estradosso come indicato in Blouet. Pertanto, si è considerato uno spessore di 90 cm in corrispondenza dell'asse medio dell'ultimo corso. In tal modo, sul rilievo di P. de Jong, in corrispondenza dell'asse mediano orizzontale dell'ultimo corso, si è tracciato dall'intersezione del profilo all'intradosso della cupola uno spessore murario di 90 cm. L'estremo di tale segmento è stato considerato un punto fisso, fig. 13.

Nella sezione trasversale della camera, tagliata sulla camera secondaria, viene indicato parte del profilo della roccia tagliata del pozzo di impianto in corrispondenza del passaggio con la camera secondaria. Come si è detto, è evidente l'inclinazione verso l'interno di tale profilo. L'estremità di tale profilo è stata considerata quale secondo punto fisso, fig. 13.

[32] Blouet [1833, pl. 66, fig. 4].

[33] Trovandosi il corso in sito, era possibile rilevarlo solo all'estradosso; presumibilmente, per indicare graficamente in un solo elaborato la proiezione della curvatura all'intradosso delle pietre, Blouet rappresenta l'ideale vista dal basso delle pietre componenti il corso.



Sulla base dei due punti dati si è cercata una semplice soluzione geometrica che potesse in modo plausibile tracciare una curva di inviluppo del profilo all'estradosso della cupola. Si è scelto dunque di tracciare un arco di circonferenza. Come è noto, tre punti individuano univocamente un arco di circonferenza. Si è considerato quale terzo punto fisso lo spessore a terra del primo blocco lapideo, che nella sezione trasversale indica la profondità del piedritto della porta di accesso alla camera secondaria e che è stato considerato, nell'analisi, corrispondente allo spessore della muratura della camera a quota terra, fig. 13.

Definito l'arco di circonferenza di inviluppo dell'estradosso della cupola muraria si sono tracciate delle rette orizzontali a metà altezza di ciascun corso orizzontale fino ad intersecare l'arco di cerchio; i segmenti, mediani a ciascun corso orizzontale, delimitati dalla curvatura interna della cupola e l'arco di cerchio tracciato, definiscono lo spessore ipotizzato di ciascun corso orizzontale della muratura della cupola, fig. 13.

Imponendo che le facce all'estradosso dei blocchi lapidei siano ortogonali ai letti di posa, si è tracciato in sezione, per ciascun corso lapideo, un segmento ortogonale al letto di posa passante per le estremità degli spessori individuati. In tal modo l'estradosso della cupola muraria presenta un profilo scalettato. Nelle Tavole 8 e 9 in allegato è rappresentato lo spessore e l'apparecchiatura della muratura della camera supposti.

4.3
Consistenza del tumulo

L'analisi delle sezioni trasversali sul *dromos* redatte a seguito dei sondaggi effettuati da Wace nel 1939, figg. 8 e 9, mostrano una sapiente composizione dell'interfaccia tra le

13.
Elaborazione del rilievo di P. De Jong.
Indicazione dei tre punti fissi del modello

murature di contenimento del *dromos* e il tumulo. A tergo delle murature in grandi blocchi lapidei squadrati di conglomerato è ammorsata, mediante l'inserimento di blocchi lapidei disposti di testa, una muratura in pietrame calcareo allettata con argilla che si fonda sull'originaria superficie del suolo naturale. Lo spessore in pianta della muratura in pietrame varia dai 3 metri in prossimità dello *stomion* ai 2 metri in prossimità dell'accesso al *dromos*. Proseguendo all'interno del tumulo, alle spalle della muratura in pietrame è posto un volume di mattoni di argilla dello spessore variabile dai 4 ai 2,5 m. La superficie dell'originario suolo naturale al di sotto del tumulo è ricoperta da uno strato di roccia frantumata che si estende dal taglio determinato dal *dromos* fino alla testa della muratura di peribolo a contenimento del tumulo. Pertanto la muratura in pietrame e il volume di mattoni di argilla poggiano sullo strato di frammenti di roccia.

Gli ulteriori saggi effettuati da Wace condotti intorno alla tomba in prossimità del muro di peribolo, indicati nella planimetria generale del 1956, hanno rilevato, su tutta la superficie del suolo naturale intorno alla tomba, la presenza di uno strato di frammenti di roccia di tipo omogeneo, in alcuni casi provvisto di inclusi di conglomerato provenienti dalla lavorazione dei blocchi per la costruzione delle murature della *tholos*.

L'ispezione dell'estradosso della parte superstite della cupola muraria della *tholos* di Nichoria ha permesso di individuare la presenza di un notevole volume di pietrame calcareo a ridosso della muratura della cupola, con la mediazione di un sottile strato di argilla [34].

Dai dati a disposizione e dal confronto con altre *tholoi* esaminate si è considerato ragionevole ritenere che la tecnologia costruttiva relativa alle parti interne del tumulo in prossimità del *dromos* corrisponda a quella utilizzata a ridosso della cupola muraria. Pertanto, nella valutazione del peso del tumulo gravante sulla muratura della cupola si è considerato un valore di 1,9 t/m^3, che costituisce un valore intermedio tra il peso specifico di un pietrame calcareo e quello dell'argilla.

5.
Tavole grafiche di sintesi

Nel presente paragrafo si espone per ciascuna delle Tavole grafiche presenti in allegato il tema del disegno e, in sintesi, il lavoro di elaborazione.

Tavola 1

Il Tesoro di Atreo nel contesto morfologico del territorio di Micene. Scala 1: 5000.

La Planimetria del 1955 [35] con l'ubicazione dei son-

[34] Wilkie [1992, pp. 238 – 239].

daggi eseguiti da Wace intorno alla tomba, indicante le curve di livello del tumulo e la pianta della *tholos*, è inserita nella Planimetria generale del territorio di Micene [36].

Tavola 2

Ubicazione delle trincee dei saggi eseguiti da Wace tra il 1939 e il 1955 nel contesto morfologico dell'area circostante. Scala 1:700.

La Planimetria del 1955 con l'ubicazione dei sondaggi eseguiti da Wace intorno alla tomba, indicante le curve di livello del tumulo e della zona a monte e la pianta della *tholos*, è stata sovrapposta alla pianta del 1939 [37] che rappresenta in scala più ravvicinata le trincee in quel momento eseguite.

Tavola 3

Ubicazione delle trincee dei saggi eseguiti da Wace tra il 1939 e il 1955 nel contesto morfologico del tumulo. Scala 1: 200.

Vista della precedente Tavola in scala idonea a rappresentare l'area interessata dal tumulo.

Tavola 4

Sezioni trasversali sul *dromos* e il tumulo. Scala 1:100.

Rappresentazione della trascrizione su supporto informatico delle sezioni trasversali sul *dromos* e sul tumulo redatte a seguito dei sondaggi del 1939 [38].

Tavola 5

Sezione G-H sul *dromos* e il tumulo. Scala 1:100.

Rappresentazione della trascrizione su supporto informatico della sezione G-H sul *dromos* e sul tumulo redatta a seguito dei sondaggi del 1939 [39].

Tavola 6

Pianta della *tholos* con ipotesi della conformazione e natura del tumulo.

Dall'ubicazione delle trincee di scavo dei sondaggi effettuati da Wace, in cui sono stati individuati resti del muro di contenimento a perimetro del tumulo, si è tracciato l'andamento del muro di contenimento del tumulo al perimetro.

Le indicazioni nelle sezioni dell'estensione delle fasce in muratura di pietrame calcareo e in mattoni di argilla a ridosso della muratura di contenimento del *dromos* sono state trasposte sulla pianta, ottenuta integrando la pianta dei sondaggi

[35] Wace [1956, p. 120, fig. 7].
[36] Wace [1949, fig. 2].
[37] Wace [1940, p. 249, fig. 8].
[38] Wace [1940, p. 241, fig. 2].
[39] Wace [1940, p. 239, fig. 1].

con la pianta di rilievo, intorno alla muratura della camera, indicando idealmente la superficie del suolo interessata.

Tavola 7

Pianta, sezione longitudinale sul *dromos*, sezione trasversale sulla camera secondaria e prospetto dello *stomion* sul *dromos*. Scala 1:200.

Rappresentazione della trascrizione su supporto informatico del rilievo redatto da P. De Jong [40].

Tavola 8

Sezione longitudinale della *tholos* con le ipotesi dell'andamento del profilo originario del suolo, dell'altezza del pozzo di scavo e della conformazione della muratura della camera. Scala 1:200.

Sulla sezione longitudinale del rilievo di De Jong sono indicati gli assi di tracciamento delle sezioni trasversali sul *dromos* effettuate a seguito dei sondaggi del 1939 e le quote dell'originario suolo naturale ivi riscontrate. La congiungente tali quote con le quote rilevate in prossimità dell'accesso al *dromos* nel 1921 e l'intradosso della lastra architrave della porta di accesso definisce il profilo originario del suolo naturale.

All'interno dello spazio della camera il tratteggio indica la proiezione del profilo dello spazio della camera secondaria.

Imponendo lo spessore dell'ultimo corso orizzontale pari a 90 cm (da Blouet) e tracciando un arco di circonferenza passante per i punti noti, come precedentemente descritto, viene definita la curva di inviluppo dell'estradosso della muratura della camera. La congiungente l'asse mediano orizzontale dei blocchi con la curva di inviluppo dell'estradosso definisce lo spessore dei corsi orizzontali. Con tale procedimento si è configurata la geometria della muratura della cupola.

Dalle curve di livello dell'estradosso del tumulo indicate nella planimetria del 1956 viene tracciato il profilo del tumulo per la parte non rappresentata nel rilievo architettonico.

Tavola 9

Sezione trasversale sulla camera secondaria con le ipotesi dell'altezza del pozzo di scavo e della conformazione della muratura della camera. Scala 1:100.

Nel grafico sono evidenziati i tre punti fissi che sono serviti per la definizione dello spessore della muratura della camera e i blocchi lapidei dell'ultimo corso orizzontale nelle dimensioni rilevate in Blouet.

Dalle curve di livello dell'estradosso del tumulo indicate nella planimetria del 1956 viene tracciato il profilo del tumulo in sezione non rappresentato nel rilievo di P. De Jong.

[40] Wace [1921 – 23, Tav. LVI].

6.
Considerazioni sulla geometria

Come si è detto, per le misure globali della camera interna si è fatto riferimento alle misure stimate da Mylonas[41] e pari a 14,6 m di diametro a quota terra e 13,39 di altezza in chiave. Lo spessore individuato della muratura della camera a quota terra di 2,43 m risulta proporzionale alla misura del diametro interno a quota terra. La misura di 2,43 corrisponde infatti a circa 1/6 del diametro della camera (1/6 di 14,60).

La larghezza dello scavo del *dromos*[42], equivalente alla larghezza dello *stomion* (comprensivo di apertura e piedritti su cui poggiano i paramenti laterali del *dromos*) sembra corrispondere a 4/6 del diametro della camera (4/6 di 14,60), pari a circa 9,73 m, ed è pertanto pari al raggio del cerchio del pozzo di scavo alla base (somma del raggio della camera con lo spessore della muratura della camera a quota terra).

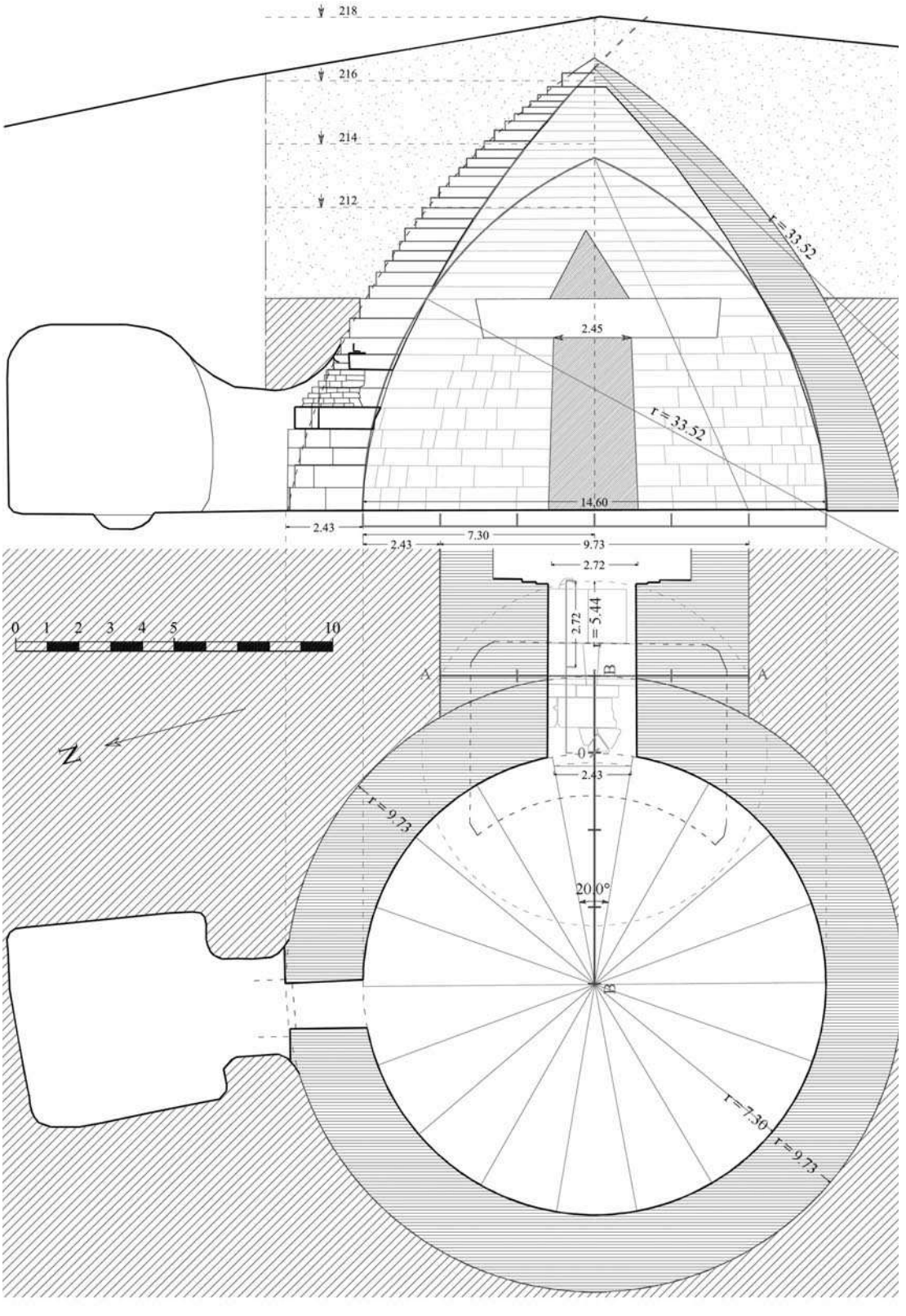
In figura 14, e nella Tavola 10 in allegato, la larghezza dello *stomion* è tracciata con il segmento modulare A-A (4 volte 2,43) tangente al cerchio di base del pozzo di scavo. Partendo dalla misura della larghezza dello *stomion* è stato possibile rileggere la geometria dello *stomion* e della camera attraverso delle semplici operazioni di tracciamento. Dal centro del segmento A-A, la geometria della base della camera e del pozzo è definita tracciando ortogonalmente un segmento modulare (4 volte 2,43) equivalente (B-B), che fornisce il diametro del pozzo di scavo e della camera alla base e lo spessore della muratura della camera alla base. Tracciando un cerchio con centro nell'intersezione tra il segmento B-B e la circonferenza perimetrale della camera (punto 0) con ampiezza pari alla larghezza dello *stomion* in A-A, si ottiene la profondità dello *stomion* pari a circa 5,44 m[43], che nel caso del Tesoro di Atreo corrisponde all'altezza interna del vano di accesso. La metà del raggio del cerchio (profondità dello *stomion*, e altezza del vano), che è pari a 2,72 m, corrisponde alla larghezza del vano di accesso alla base.

Dall'analisi della geometria del profilo della cupola all'intradosso si è ottenuto che esso si compone di due diverse curvature: la prima si estende da terra all'estradosso della lastra architrave a copertura dell'accesso, e la seconda da tale quota all'apice. La curvatura della camera, fino alla quota dell'estradosso dell'architrave, pari a m 6,7 da terra, segue la geometria di un arco di sesto acuto di diametro alle imposte di 14,60. Pertanto, diviso il diametro per 6 intervalli equivalenti (ciascuno del modulo 2,43 m), il centro dei due archi di circonferenza è posto a 5/6 del diametro. La parte superiore del

[41] Mylonas [1957, p. 86].

[42] Desumibile dai saggi effettuati da Wace nel '39 sul *dromos*.

[43] Wace [1921 – 23, p. 346] indica una profondità dello *stomion* di 5,4 m, Mylonas [1966, p. 121], invece, di 5,2 m.



14.
Elaborazione del rilievo di P. De Jong.
Principali rapporti geometrici e
dimensionali rinvenuti

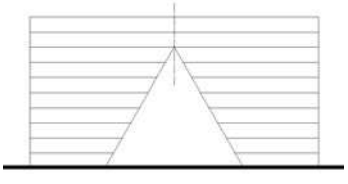
profilo all'intradosso della cupola presenta invece una curvatura meno accennata, simile ad un arco di circonferenza di 33,52 m di raggio come indicato nella figura 14 e nella Tavola 10 in allegato.

La misura della base del *triangolo di scarico* posto sull'architrave della porta di accesso è pari a circa 2,45 m, sia per il lato verso il *dromos* sia per il lato prospettante verso la camera interna, e corrisponde alla luce tra i piedritti alla testa dell'apertura. La misura rilevata si avvicina alla dimensione di 2,433, pari ad 1/6 del diametro interno della camera e allo spessore della muratura della camera a quota terra (modulo della camera). Infine, l'intervallo delle misure 2,43 – 2,5 è simile alla misura della corda di uno spicchio di 20° della circonferenza interna della camera, e dunque è presumibilmente in relazione con la suddivisione del cerchio della camera in 18 spicchi equivalenti.

IV
'falso arco' e 'vero arco'

1.
"Falso arco" e "vero arco"

Il così detto *falso arco* costituisce il modo primitivo, alternativo al sistema trilitico e anteriore alla conoscenza dell'arco, di chiudere in alto un'apertura praticata in una parete muraria. Esso si struttura mediante il progressivo aggetto di blocchi lapidei disposti a giacitura orizzontale, fig. 1. L'apertura nell'ammasso murario viene ottenuta disponendo corso dopo corso, su basi sufficientemente ampie ai lati del vano, blocchi lapidei in aggetto l'uno sull'altro, fino alla chiusura terminale del vuoto. La misura dell'aggetto di ciascun blocco è tale da impedire il ribaltamento del blocco verso l'interno.



1.
Modello strutturale del 'falso arco'

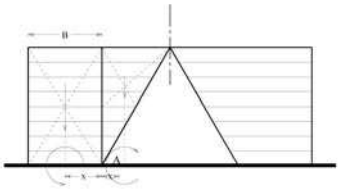
Il sistema costruttivo del *falso arco* si ritrova spesso nell'architettura preistorica mediterranea, e nella cultura tecnico - architettonica micenea si presenta in un'ampia varietà di espressioni a seconda del tipo di blocchi elementari componenti la muratura (grossi massi lapidei, grandi blocchi più o meno sbozzati o grandi pietre squadrate) e delle condizioni al contorno. In ogni modo, tutte le manifestazioni, per la grande mole di materiale lapideo impiegato nella costruzione, sono generalmente di aspetto tozzo e megalitico.

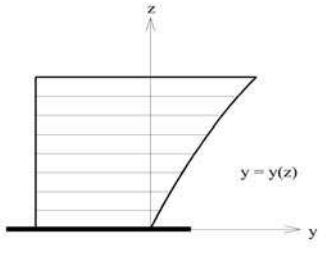
Nel modello strutturale del *falso arco* ognuno dei due piedritti risulta di per sé stabile, senza la possibilità di un'azione reciproca. L'apparecchiatura per corsi orizzontali e la scarsa pressione presente sui letti di posa non consentono lo sviluppo di una pressione laterale di sostegno.

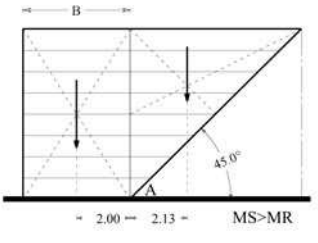
Si può dunque affermare che ogni piedritto è staticamente autonomo dal reciproco e costituisce l'unità strutturale del *falso arco*. Inoltre, la stabilità della struttura, e quindi di ciascun piedritto componente, viene assicurata anche durante la fasi di realizzazione, per tutte le altezze parziali della muratura, non richiedendo nella messa in opera l'ausilio di un sistema provvisorio di sostegni.

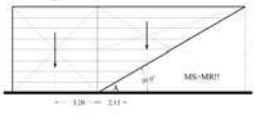
Il principio costruttivo è costituito dunque dalla realizzazione di un aggetto tale da non produrre ribaltamento.

Nel modello strutturale del *falso arco*, che non contempla quindi interazione tra i due piedritti, ogni piedritto (e ogni sua parte) si intende in equilibrio se per effetto dei cari-









2.
Valutazione dei momenti stabilizzante e ribaltante
3.
Modello di Benvenuto - Corradi
4.
Geometria di un piedritto in condizione di equilibrio possibile con il modello semplificato
5.
Geometria di un piedritto in condizione di equilibrio ancora possibile con il modello semplificato

chi verticali non può verificarsi il ribaltamento dello stesso (e di ogni sua parte) verso il lato su cui aggetta. In tal caso, il momento prodotto dal peso del volume murario in aggetto risulta inferiore a quello prodotto dal peso del volume in diretto contatto con il suolo, rispetto ad ogni cerniera intorno alla quale la muratura in aggetto è suscettibile di rotazione. Pertanto l'analisi della stabilità della struttura consiste nel valutare le condizioni di sicurezza di ciascun piedritto al ribaltamento verso il lato dell'aggetto, ed il grado di sicurezza al ribaltamento è dato dal rapporto tra momento stabilizzante e momento ribaltante per ogni possibile meccanismo di rotazione con cerniera disposta lungo il profilo dell'aggetto stesso, fig. 2.

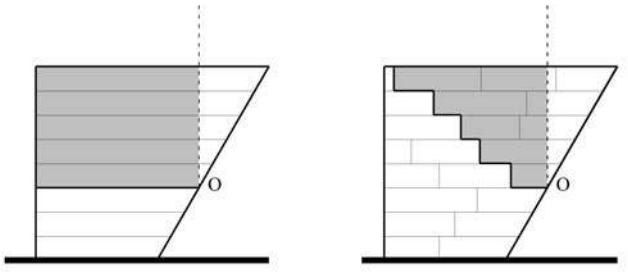
Nella trattazione sulla statica di strutture a *falso arco* affrontata da Benvenuto – Corradi [1987] viene adottato un modello semplificato che considera la parete muraria in aggetto costituita da corsi orizzontali monolitici di altezza infinitesima, fig. 3. Sulla base di tale modello viene ricercata analiticamente la funzione possibile della curva $y = y(z)$ dell'aggetto, ovvero quella curva capace di soddisfare, definiti la dimensione a terra del piedritto e il coefficiente di sicurezza, la condizione di equilibrio del piedritto singolo per ogni cerniera localizzata in qualunque punto della curva $y(z)$ in fig. 3.

È da osservare che, per tale modello, la condizione di equilibrio può essere soddisfatta anche per curvature dell'aggetto notevolmente maggiori di quelle rilevate su opere esistenti, in quanto è funzione della larghezza B del piedritto prefissata, fig. 4.

Inoltre, l'equilibrio è possibile per soluzioni che possono divenire inattuabili per l'impossibilità di reperimento di lastre murarie di tale lunghezza e addirittura incompatibili con la resistenza del materiale murario, fig. 5.

Va però osservato che, generalmente, le murature in blocchi lapidei, a causa della grande massa che le caratterizza e per ovvie ragioni pratiche, non presentano corsi orizzontali composti da un'unica pietra, ma sono costituite da una tessitura di blocchi lapidei, generalmente ben apparecchiati mediante lo sfalsamento dei giunti verticali. La presenza di elementi lapidei di dimensioni minori della larghezza complessiva del piedritto alle varie quote impone che il modello resistente tenga conto della presenza dei giunti verticali. Tale condizione implica infatti una notevole variazione delle masse murarie impegnate nell'equilibrio.

La figura 6 mostra come, per le discontinuità determinate dai giunti verticali, la massa muraria che realmente impedisce il ribaltamento della parte di muratura aggettante è molto minore di quella considerata nel modello per strati orizzontali monolitici. Il modello resistente per strati orizzontali monolitici costituisce pertanto una semplificazione non realistica delle condizioni reali.

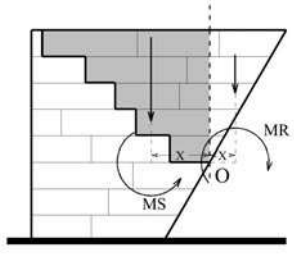


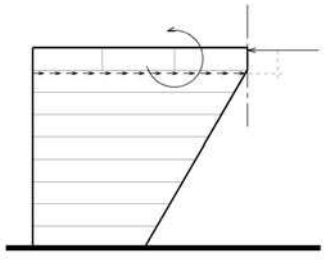
La valutazione dell'equilibrio alla rotazione sotto carichi verticali interessa perciò una sequenza di blocchi, delimitati da una giunzione ad andamento discontinuo, suscettibile di un cinematismo di collasso per ribaltamento verso il lato interno. Ciò implica la ricerca, per la specifica tessitura muraria, della parte di muratura in grado di svincolarsi nella rotazione dalla muratura restante.

Si comprende dunque che nella costruzione di strutture a *falso arco* le modalità di apparecchiatura dei blocchi svolgono un ruolo essenziale per garantire continuità ai corsi orizzontali ed estendere il più possibile i confini della massa muraria che contrasta, con il suo peso, il ribaltamento della parte in aggetto. Tale considerazione mette in luce la sapienza tecnica delle apparecchiature murarie dei *falsi archi*, ottenuta dalla scelta della dimensione dei massi murari da mettere in opera durante la progressiva elevazione delle pareti in aggetto.

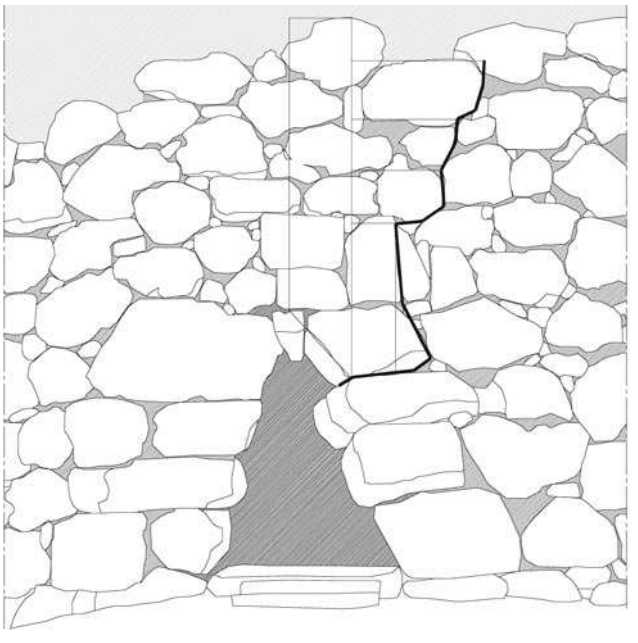
Il modello proposto nel presente studio valuta la condizione di equilibrio delle strutture a *falso arco* tenendo conto dei possibili meccanismi di collasso compatibili con la reale apparecchiatura muraria dei blocchi, fig. 7. La valutazione della condizione di sicurezza viene effettuata considerando un aumento fittizio del peso degli elementi dal lato del ribaltamento.

Nella valutazione dell'equilibrio di un *falso arco* potrebbe a prima vista considerarsi la presenza di un'azione di sostegno reciproca tra i due piedritti. Tale azione non è però affatto realistica, in quanto la giacitura orizzontale dei blocchi impone che, per l'equilibrio, la spinta orizzontale sia necessariamente inferiore alla debole resistenza di attrito presente tra i corsi orizzontali conseguente alla generalmente modesta compressione presente, in quanto i blocchi a contatto sono normalmente i terminali superiori. Tale osservazione evidenzia che la disposizione dei blocchi per corsi orizzontali ai vari livelli concede ai piedritti una scarsa capacità di sostenere spinte mutue. Anche l'attrito peraltro può assumere valori estremamente variabili a seconda della natura e dello stato delle superfici a contatto. È da sottolineare inoltre che l'eventuale azione mutua tra i piedritti, trasmessa dai corsi a contatto e contrastata dall'attrito presente tra i letti di posa orizzontali, comporta un'eccentricità che in partico-





6.
Differenza tra le masse coinvolte nel momento stabilizzante nel modello per strati orizzontali monolitici e nel modello sensibile alle discontinuità verticali
7.
Modello proposto
8.
Eccentricità presente nella risposta per attrito tra i corsi orizzontali all'azione mutua tra i piedritti



lari condizioni quale, ad esempio, il numero limitato di corsi a contatto, può causare lo sbandamento laterale dei blocchi lapidei, fig. 8.

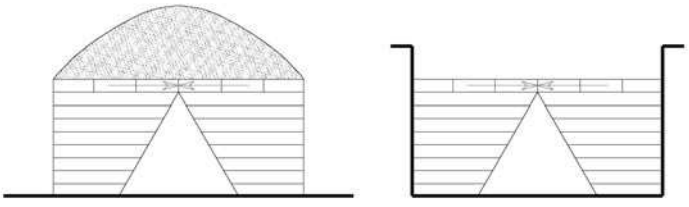
In strutture che funzionano a gravità è il peso che stabilizza l'insieme, impedendo per attrito, proporzionale al peso stesso, lo slittamento degli elementi.

Dalla sola osservazione della muratura in massi lapidei ciclopici in cui è ricavata la piccola porta ovest della murazione di Tirinto, fig. 9, si intuisce la notevole entità del peso dei massi lapidei impegnati a garantire la stabilità della muratura. I massi componenti i piedritti hanno dimensioni gigantesche rispetto alla misura dell'aggetto, e sono a loro volta tenuti serrati dal peso di quelli sovrastanti. In tale condizione, l'analisi dell'equilibrio applicata ad un unico blocco lapideo componente il *falso arco*, fig. 10, può apparire poco significativa rispetto ad una valutazione generale dello stato dell'insieme cui il blocco lapideo appartiene.

La presenza di un forte carico gravante su strutture a *falso arco*, qualora i blocchi in aggetto siano interni e ben ammorsati a imponenti murature, potrebbe far supporre che, in tali particolari condizioni, il modello di comportamento statico precedentemente descritto possa modificarsi nella sostanza. Infatti, se i due piedritti risultano sottoposti sul lato dell'aggetto ad un carico superiore al limite massimo per il quale si ha il ribaltamento e vengono costretti ad un'azione mutua che comporta la presenza di una spinta orizzontale, l'incremento di attrito dato dal peso sovrastante e le solide murature di contenimento laterale possono permettere il contrasto all'azione orizzontale.

Come precedentemente descritto, tale azione, trattandosi di una struttura in corsi a giacitura orizzontale, solle-

9.
Porta ovest della murazione di Tirinto
10.
Porta ovest della murazione di Tirinto. Analisi dell'equilibrio di un unico blocco lapideo componente il 'falso arco'



cita i blocchi a contatto a slittare orizzontalmente. In tal caso, la stabilità è garantita dall'attrito per il peso delle masse murarie sovrastanti, e dal contrasto delle solide murature laterali che possono contrastare la spinta orizzontale. Da tale considerazione, riferita alle particolari condizioni al contorno, potrebbe dunque apparire più appropriato intendere il *falso arco* come una tecnica costruttiva capace di consentire il mantenimento delle condizioni di equilibrio durante la costruzione e non, quindi, generalmente, uno specifico modello di comportamento.

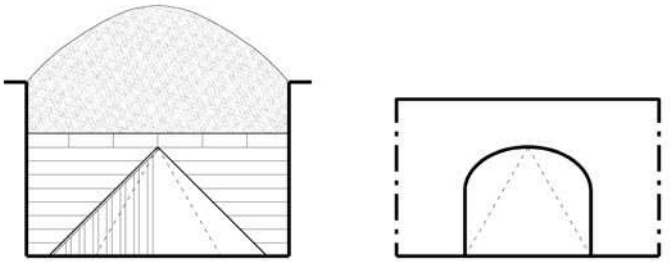
Frequentemente, nell'architettura micenea si assiste per strutture così dette a *falso arco*, alla presenza di un forte carico all'estradosso e spesso, in concomitanza, all'inserimento della struttura in uno scavo, come è il caso specifico nelle *tholoi* per il *triangolo di scarico* in corrispondenza dello *stomion*. In tale caso, il carico superiore è costituito dal tumulo in pietrame e terra e lo *stomion* si impianta tra i fronti di scavo ai bordi del *dromos*.

Le particolari condizioni date dalla presenza di forti carichi verticali e dal contenimento della struttura nel terrapieno aiutano, per la simmetria della struttura, a contrastare l'eventuale azione mutua tra i piedritti, fig. 11. In questo caso l'eventuale azione orizzontale di ribaltamento viene contrastata sia dall'attrito presente tra i letti di posa orizzontali dei blocchi sia dalle pareti di contenimento laterale, favorendo l'instaurarsi di un comportamento ad arco della struttura, nonostante la condizione impropria di letti di posa orizzontali dei corsi murari.

Nell'ipotesi che specifiche condizioni al contorno possano portare una modifica del comportamento statico, ovvero il passaggio dal trasferimento di soli carichi verticali alla trasmissione della spinta, è opportuno chiedersi quali eventuali benefici potevano essere apportati alla modalità costruttiva del *falso arco*. Dalle evidenze presenti non si riconosce l'intenzione di sfruttare adeguate condizioni al contorno, come impiantare la struttura in un pozzo di scavo e successivamente sottoporla ad un forte carico all'estradosso, allo scopo di ottenere un aggetto maggiore di quello possibile con il modello strutturale del *falso arco*.

Non si riscontrano infatti evidenze che sfruttino le suddette particolari condizioni al contorno per forzare un *falso arco* e indurre un sistema resistente ad arco. Se anche per assurdo si ipotizzasse una esplicita intenzione di voler

11.
Contributo di un carico sovrastante e del contenimento della struttura nella roccia all'azione mutua tra i due piedritti



indurre la struttura allo schema statico dell'arco, ciò sarebbe stato possibile solo garantendo la stabilità dei blocchi lapidei sovrapposti in aggetto anche durante le fasi di costruzione, prima quindi della disposizione di un forte carico soprastante.

Tale condizione ripropone, a meno di sofisticati sistemi provvisori di sostegno, la realizzazione di un comune *falso arco*, la cui stabilità non ha necessità delle suddette particolari condizioni al contorno. I costruttori micenei avrebbero dunque potuto incrementare l'aggetto solo realizzando un sistema di puntellamento provvisorio durante la fase di realizzazione. In tal caso, bisognava contemplare fasi costruttive complesse con schemi strutturali variabili, ovvero mediante l'utilizzo di puntelli provvisori da smontare solo a seguito della disposizione del terreno di ricoprimento. Tali artifici esulano dalla cultura tecnica presente e implicano un esteso consumo di risorse, senza addivenire sostanzialmente a grossi benefici (l'incremento di aggetto non ha grande utilità dal punto di vista della funzionalità dell'apertura). La diretta realizzazione dell'apertura mediante scavo a foro cieco, in un'analoga situazione al contorno, costituisce una condizione certamente più vantaggiosa rispetto alla sequenza di scavo a cielo aperto, costruzione dei piedritti in grande aggetto mediante puntellature, giustapposizione del tumulo e successivo smontaggio delle impalcature, fig. 12.

In conclusione, voler ricondurre la modalità costruttiva del *falso arco* alle specifiche dell'arco murario appare una forzatura; per i *falsi archi*, la possibilità di sfruttare il contenimento laterale nell'eventualità dell'insorgere della spinta prodotta per eccesso di carico costituisce un'eventuale risorsa di sicurezza, ma non una condizione prioritaria per la stabilità di tali strutture. Pertanto tale circostanza non rientra nell'idea progettuale originaria. A tali riflessioni si aggiunge il fatto sostanziale che sottoporre la struttura ad un incremento di carico comporta un accrescimento sia del momento ribaltante che del momento stabilizzante, e dunque non modifica la condizione di equilibrio, a meno che il carico sia puntuale ed applicato solo all'estremità dell'aggetto, fatto questo che costituisce una condizione ideale.

Come viene illustrato nelle verifiche ai successivi

12.
Modalità tecniche per incrementare l'aggetto e realizzazione dell'apertura a foro cieco

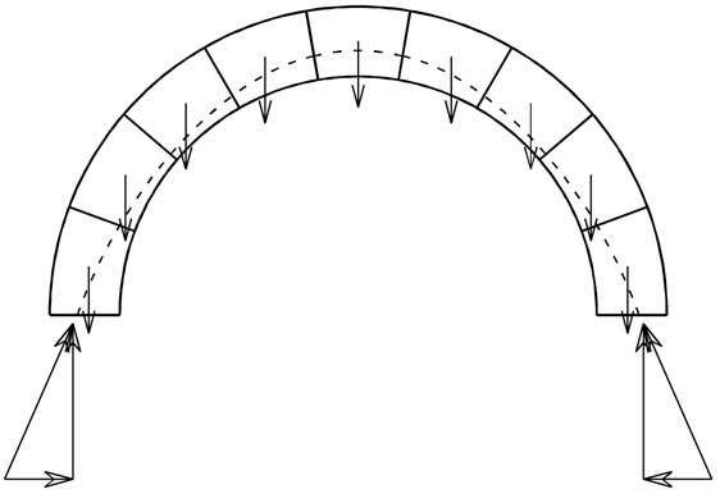
paragrafi, le valutazioni sulla stabilità ai carichi verticali dei piedritti del *falso arco* componenti la parte anteriore del *triangolo di scarico* del Tesoro di Atreo mostrano per tutti i casi esaminati un valore elevato del coefficiente di sicurezza al ribaltamento, verificando dunque la sostanziale autonomia statica dei due piedritti in condizione di soli carichi verticali. Le analisi rilevano inoltre una buona resistenza della struttura al ribaltamento anche in condizione sismica nell'individuare i valori dell'intensità sismica critici per la struttura. Nei successivi paragrafi si osserva che nella lunga esistenza del monumento è comunque probabile che eventi sismici di intensità prossima a quella critica siano avvenuti, e solo in tal caso i due piedritti sono stati impegnati in un'azione spingente reciproca. In tale particolare condizione, il carico superiore del tumulo può aver fornito un beneficio incrementando l'attrito tra i letti di posa dei corsi a contatto, mentre l'ubicazione dei piedritti a contenimento dei fronti del tumulo risulta ininfluente.

Le argomentazioni sviluppate, unitamente alle verifiche sulla stabilità esposte nei successivi paragrafi, rimarcano pertanto che la denominazione di *falso arco*, attribuita ad archi murari in blocchi lapidei a giacitura orizzontale, è appropriata e coerente con la natura statica della struttura.

In un *falso arco* l'equilibrio viene mantenuto in ogni fase costruttiva; corso dopo corso il blocco superiore è in equilibrio sul precedente e pertanto al termine della costruzione non si sviluppa un'azione mutua tra i piedritti.

Secondo il modello strutturale del *falso arco* il principio leonardesco di funzionamento dell'arco, che vede i due piedritti, ognuno "*una debolezza*" che, spingendosi reciprocamente nelle sezioni di chiave, per l'insorgere della reazione mutua spingente, diventano "*una fortezza*", non può avere luogo. Le pietre possono slittare su piani orizzontali e particolari condizioni al contorno non alterano nella sostanza il principio strutturale del *falso arco*. Pertanto, l'usuale denominazione di *falso arco* risulta appropriata: ognuno dei due piedritti è staticamente autonomo e la capacità di sostenere spinte mutue costituisce un'eventuale risorsa ma non il principio statico fondante.

La configurazione di tali strutture murarie lascia intendere la sostanziale lontananza dalla concezione dell'arco. Va infatti osservato che l'idea dell'arco potrà essere concepita ed attuata solo nel momento in cui comparirà la disposizione dei blocchi lapidei a giacitura radiale. In tal modo i conci, presentando i letti di posa tendenzialmente ortogonali alle successive risultanti dei carichi verticali, sono tenuti stretti l'uno con l'altro dalla stessa azione di trasferimento del peso, che si esplica attraverso una forza assiale di compressione a ciascun concio, e via via trasferisce alle imposte il carico totale.

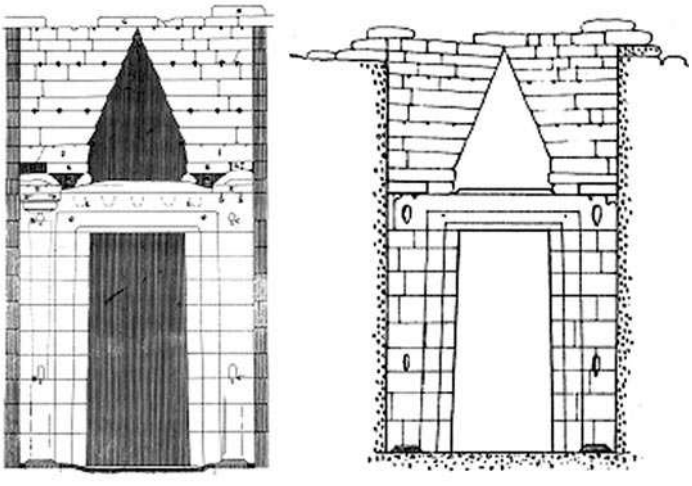


Nelle strutture in muratura, che funzionano a gravità, un arco in conci, per la disposizione radiale dei blocchi, è capace, formando il così detto sistema resistente ad arco, di trasferire alle imposte il peso proprio ed il peso su di esso gravante attraverso un'azione obliqua contenente la spinta orizzontale. Il peso proprio di un concio e del carico su di esso gravante si trasmettono al concio successivo con una forza inclinata, ortogonale al letto di posa. Tale forza è la risultante del peso verticale e di un'azione orizzontale, la spinta. Il poligono funicolare delle successive risultanti da concio a concio individua su ogni letto di posa il luogo dei centri di pressione, denominato curva delle pressioni, fig. 13.

In una struttura ad arco murario, definita nella geometria, peso proprio e carichi verticali agenti, l'andamento della curva delle pressioni è indeterminato e dipende dal valore attribuito alla spinta orizzontale. L'analisi della condizione statica si raggiunge sostituendo all'indeterminatezza della soluzione contingente la possibilità di analizzarne il comportamento a rottura con l'instaurarsi di un meccanismo di collasso congruente con la forma geometrica e i carichi in atto. Ciò viene ottenuto applicando alla muratura i metodi dell'analisi limite [1], che forniscono dei semplici strumenti in grado di mettere in luce gli aspetti essenziali del comportamento di una struttura muraria, di cui l'arco costituisce uno dei principali elementi strutturali.

13.
Trasmissione dei carichi in un arco murario

[1] Per maggiori approfondimenti si rimanda all'Appendice 2.



2.
Analisi della stabilità della parte anteriore del "triangolo di scarico" del Tesoro di Atreo

2.1.
Definizione del modello

Sulla base dei criteri per l'analisi della stabilità di strutture denominate a *falso arco* esposti al precedente paragrafo si analizza la condizione statica della parte anteriore del cosiddetto *triangolo di scarico*, sovrastante l'architrave del portale di accesso del Tesoro di Atreo.

La definizione del modello su cui applicare l'analisi deriva dalla lettura dello stato di fatto attraverso le fonti, componendo i dati provenienti dai rilievi esistenti con la documentazione fotografica. Il rilievo del prospetto dello *stomion* sul *dromos* di P. De Jong[2] 1921-23 è stato integrato con le indicazioni presenti nel rilievo di Thiersch[3] del 1879 e infine si è verificata l'attendibilità dei dati con la lettura della documentazione fotografica a disposizione.

Il confronto tra i due rilievi ha mostrato una parziale non corrispondenza dell'apparecchiatura muraria: il numero dei corsi orizzontali coincide, ed è pari a nove per la parte di muratura costituente i due piedritti in aggetto, ma sono evidenti alcune differenze nei giunti verticali. Si osserva che, in particolare riferimento all'apparecchiatura muraria del *triangolo di scarico*, il rilievo di Thiersch è più preciso nella trascrizione degli elementi architettonici e, al contrario, il rilievo del prospetto dello *stomion* in P. De Jong, che è parte del rilievo generale della *tholos*, risulta meno approfondito nei particolari del prospetto di facciata.

Nei casi in cui il rilievo di P. De Jong ha mostrato indicazioni aggiuntive rispetto al rilievo di Thiersch, queste

14.
Rilievi di Thiersch (1879) e di P. De Jong (1921) del prospetto di accesso al Tesoro di Atreo

[2] Wace [1921 – 23, Tav. LVI].
[3] Thiersch [1879, fig. 1 e fig. 2 della Tavola XIII].

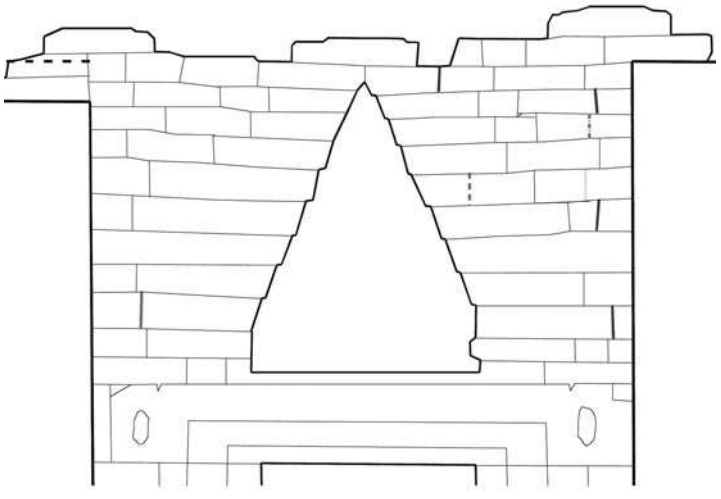
sono state verificate con la documentazione fotografica a disposizione. Nello specifico, la lettura della documentazione fotografica ha accertato la presenza di quattro giunti verticali presenti nel rilievo di P. De Jong e non in quello di Thiersch. L'analisi non ha tuttavia consentito di affermare con certezza se si tratti di fratture dei blocchi lapidei o di giunti verticali originari. Mentre infatti nel rilievo di Thiersch i giunti verticali sono differenziati graficamente dalle lesioni, ciò non avviene nel rilievo di P. De Jong, che rappresenta nei modi di un giunto verticale anche la lesione al corso base del piedritto sinistro leggibile con chiarezza come frattura nel rilievo di Thiersch. Va osservato che nel 1881, data posteriore alla redazione del rilievo di Thiersch, la Grecia fu colpita da un violento terremoto [4] cui potrebbero essere attribuite le fratture dei blocchi indicate da P. De Jong come giunti verticali. Ai fini dell'analisi statica la differenza tra giunto originario e frattura passante non è sostanziale, mentre è invece rilevante l'evidenza della frammentazione di un blocco lapideo; pertanto, il modello di analisi fa riferimento allo stato di fatto dell'apparecchiatura muraria.

La figura 15 mostra l'apparecchiatura muraria del modello: i giunti in blu indicano alcuni giunti presenti nel rilievo di P. De Jong, ma non nel rilievo di Thiersch, e riconosciuti nella documentazione fotografica; il giunto in giallo identifica un giunto leggibile nella documentazione fotografica, ma assente in entrambi i rilievi; i giunti in rosso indicano la partizione di blocchi lapidei originariamente interi per i quali è stato possibile verificare con certezza che si tratta di fattura, in particolare, la linea continua in rosso indica una lesione tracciata da Thiersch, individuata come giunto verticale in P. De Jong e verificata in fotografia, la linea rossa tratto punto indica una lesione segnata da Thiersch non rappresentata in P. De Jong, ma la cui presenza è stata verificata dalla documentazione fotografica, e la linea rossa tratteggiata, infine, indica una lesione passante ben evidente nella documentazione fotografica ma non rappresentata in entrambi i rilievi [5].

La muratura che conforma il *triangolo di scarico* si estende per tutto la profondità dello *stomion*, dal prospetto sul *dromos* alla camera interna. L'altezza del vuoto triangolare sul prospetto di facciata è di 2,6 m circa, e di 2,2 m circa sul prospetto interno alla camera. Il vuoto, ottenuto apparecchiando per giunti sfalsati i blocchi anche nel senso della profondità, è dunque costituito da un prisma di base triangolare avente uno spigolo obliquo, giacché l'altezza del triangolo decresce linearmente verso l'interno della camera.

[4] Kouskouna – Makropoulos [2004, p. 728].

[5] Tale frattura sembra leggibile anche nell'immagine fotografica del *triangolo di scarico* presente in Wace [1940, pl. 1, p. 240].



L'estensione in profondità dello *stomion* alla base è di circa 5,44 m. Procedendo verso l'interno della tomba lo *stomion* diviene parte integrante della muratura della camera, che alla base ha uno spessore di 2,43 m. L'analisi si riferisce esclusivamente alla parte anteriore del triangolo di scarico che prospetta sul *dromos*. Sulla base della forma architettonica del monumento il modello presuppone che la parte anteriore del *falso arco* sia strutturalmente autonoma dalla cupola muraria.

Nella definizione del modello si considera uno spessore di 1 m in profondità e l'estensione della stessa apparecchiatura di facciata per tutto lo spessore. Non si valuta pertanto la presenza di ammorsature dei blocchi lapidei nel senso della profondità, che garantirebbe ulteriori vincoli ai blocchi. Allo stesso modo, il modello analizzato non tiene in conto che taluni blocchi lapidei di facciata potrebbero avere una profondità minore di 1 m.

Le semplificazioni assunte sull'apparecchiatura definiscono un modello congruente con lo stato di fatto e la schematizzazione ad un problema piano consente di ottenere con un calcolo semplice una credibile valutazione della stabilità della struttura con un leggero margine di sicurezza.

I blocchi lapidei sono in conglomerato[6] cui è stato attribuito un peso specifico γ pari a 2,5 t/m^3.

La struttura muraria è inserita nella collina artificiale del tumulo. In particolare, con riferimento allo studio della configurazione architettonica del monumento esposto al capitolo III, la quota dell'architrave del portale di accesso

[6] Il conglomerato è una roccia sedimentaria composta da grani di grosse dimensioni immersi in una matrice fine e dotati di cementazione; il peso specifico è variabile in rapporto alla prevalenza dei materiali componenti. Non avendo una determinazione diretta del materiale in questione si è supposto un peso specifico corrispondente a quello di un calcare compatto che varia da 2,4 a 2,7 t/m^3 (G. Colombo, Manuale dell'Ingegnere, Milano, 1887, p. 435).

15.
Stato di fatto dell'apparecchiatura dei blocchi lapidei del 'triangolo di scarico' ottenuto dall'analisi delle fonti e dalla documentazione fotografica

viene posta in corrispondenza con quella del suolo originario. Pertanto, i piedritti componenti *il triangolo di scarico* sono contenuti lateralmente dal tumulo per tutto lo sviluppo in altezza. L'analisi statica prende in considerazione anche la spinta laterale esercitata dal tumulo sui piedritti.

Dati sulla consistenza del tumulo possono ricavarsi dai sondaggi effettuati da Wace negli anni dal 1939 al 55[7] a tergo delle murature di contenimento del *dromos*. I saggi mostrano un'eterogeneità di materiali, quali pietrame misto ad argilla e mattoni di argilla[8]. Tali strati eterogenei si presume fossero generalmente disposti per spessi strati concentrici intorno alla tomba come illustrato nelle Tavole di rielaborazione del rilievo presenti in allegato.

Per l'eterogeneità dei materiali del tumulo si considera un peso specifico dell'insieme pari a 1,9 t/m^3 e, nella prima fase di analisi, viene imposto un angolo di attrito del terreno ϕ pari a 35°. La seconda fase di analisi valuta l'effetto sulle condizioni statiche della struttura al variare dell'angolo ϕ, attribuendo i valori 20°, 25°, 30° e 35°.

Il tumulo doveva estendersi in origine, presumibilmente, anche sopra il portale di accesso[9], conferendo sulle teste dei piedritti un sovraccarico, che allo stato attuale è mancante. Nella prima fase di analisi non si considera il contributo di tale sovraccarico, ma al termine si espongono alcune osservazioni circa l'effetto sulla stabilità della struttura prodotto dal carico del tumulo all'estradosso.

2.2.
Analisi statica dei meccanismi di collasso

La struttura muraria in *falso arco* della parte anteriore del *triangolo di scarico* viene intesa composta dai due piedritti simmetrici in aggetto senza interazione reciproca. In accordo con quanto esposto al paragrafo 1 l'analisi della stabilità consiste nel valutare le condizioni di sicurezza di ciascun piedritto singolarmente al ribaltamento verso il lato su cui aggetta.

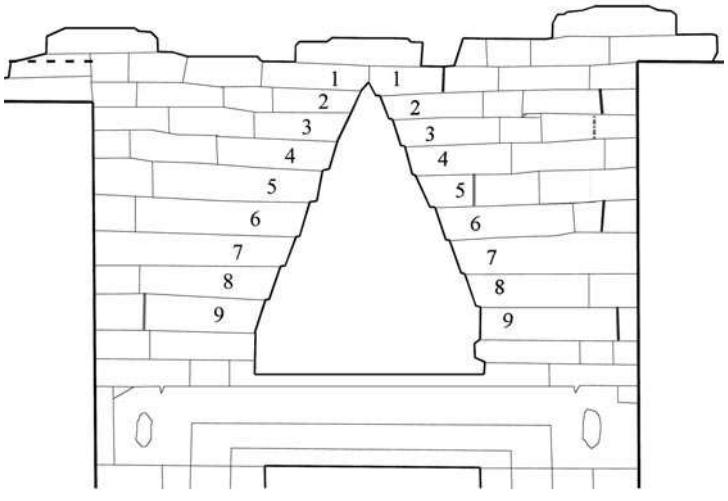
Attraverso la lettura dell'apparecchiatura muraria del modello si sono individuate per ogni piedritto le parti della muratura in grado, per le condizioni di vincolo, di ruotare intorno ad un punto posto lungo il profilo in aggetto; tali parti definiscono l'insieme dei possibili meccanismi di ribaltamento dei due piedritti.

Entrambi i piedritti sono costituiti dalla sovrapposizio-

[7] Wace [1940, p. 239, fig. 1 e p. 241, fig. 2] e [1956, p. 116].

[8] Wace [1940, fig. 1].

[9] Wace [1956, p. 117] legge la non corrispondenza della sommità del tumulo con l'apice della cupola, notando uno spostamento della sommità del tumulo verso ovest, in direzione opposta al *dromos*, che attribuisce a fenomeni di dilavamento.



16.
Numerazione dei corsi del 'falso arco' componente la parte anteriore del 'triangolo di scarico'

ne di 9 corsi orizzontali [10], fig. 16. Per ciascun piedritto ad ogni corso orizzontale si individua un possibile meccanismo di collasso. I corsi sono numerati dall'alto verso il basso; con lo stesso numero si indica il meccanismo di ribaltamento possibile del corso corrispondente. Sono stati individuati pertanto nove meccanismi di collasso al ribaltamento per ogni piedritto.

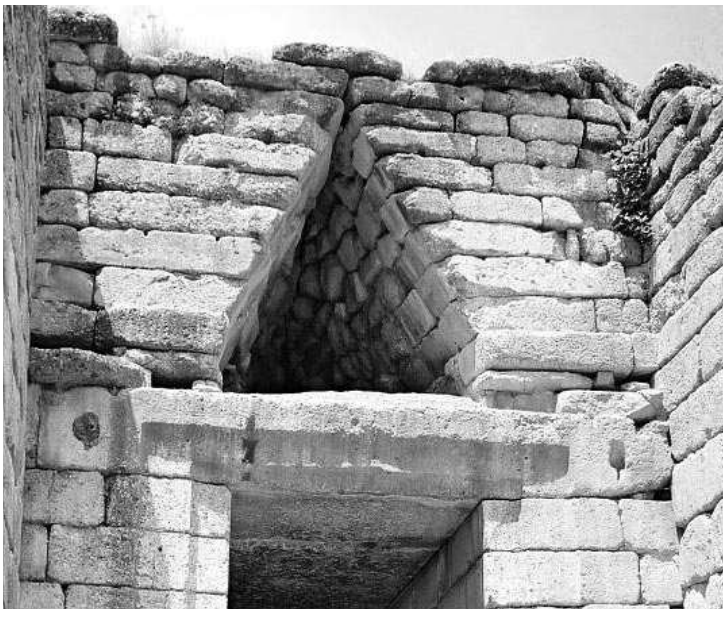
Avendo, inoltre, accertato nella definizione del modello che la separazione grafica di alcuni blocchi costituisce la frammentazione di un blocco originariamente unico, viene anche analizzata, per ogni piedritto, la condizione statica precedente alla rottura del blocco per valutare l'effetto che la frammentazione ha determinato sulla stabilità della struttura. Per il piedritto sinistro si esamina il caso relativo alla lesione già rivelata da Thiersch al corso 9, e per il piedritto destro il caso relativo alla lesione al corso 5, che è chiaramente leggibile nella documentazione fotografica ma non viene rilevata né da Thiersch né da P. De Jong [11].

La Tavola 1 mostra le parti murarie dei piedritti interessate nei meccanismi di collasso individuati, eccetto per il primo meccanismo di collasso di entrambi i piedritti che risulta poco significativo. La numerazione procede dall'alto verso il basso e coincide con quella dei corsi relativi. Le lettere d e s indicano rispettivamente il piedritto destro o sinistro e le diciture sL o L indicano rispettivamente il caso senza o con la lesione.

Per ogni meccanismo di collasso a ribaltamento l'analisi consiste nella valutazione del rapporto tra il momento stabilizzante e il momento ribaltante intorno al punto di

[10] I due piedritti presentano superiormente i resti di due corsi a formare una cornice terminale di coronamento e, alla base, un corso di livellamento, posto all'estradosso dell'architrave, allo scopo di rendere omogenee le quote con l'ausilio di pietre e riempimenti.

[11] La frattura sembra leggibile anche nell'immagine fotografica del *triangolo di scarico* presente in Wace [1940, pl. 1, p. 240].



rotazione relativo. Individuata la parte di muratura svincolabile dal tessuto murario per rotazione verso l'interno, il momento stabilizzante è costituito dal momento generato dalla risultante dei pesi propri dei blocchi lapidei posti a destra o a sinistra (a seconda si consideri il piedritto destro o il piedritto sinistro) della retta verticale passante per il centro di rotazione intorno al quale la parte di muratura individuata può ruotare. Il prodotto dell'intensità della risultante per la distanza orizzontale di tale forza dal centro di rotazione produce il momento stabilizzante. Il prodotto della risultante dei pesi dei blocchi lapidei posti dal lato opposto della suddetta retta verticale per la distanza dal centro di rotazione genera il momento ribaltante. Il rapporto tra momento stabilizzante e momento ribaltante definisce il coefficiente di sicurezza relativo al singolo meccanismo di collasso.

Poste le forze peso (considerando lo spessore di 1,0 m e un peso specifico di 2,5 t/m^3) nei baricentri dei blocchi lapidei si sono ricavate le risultanti, le rispettive rette di azione e l'intensità dei momenti, procedendo sia per via analitica che per via grafica.

Nella valutazione delle forze in gioco, nei casi in cui il meccanismo in esame comporti che la parte muraria in grado di ribaltarsi sia posta in adiacenza, anche solo parziale, con il terreno a tergo, si considera anche la spinta esercitata dallo stesso che viene calcolata trascurando l'attrito muratura - terreno con la semplice formula di Rankine [12], attribuendo al terreno un peso specifico γ di 1,9 t/m^3 ed angolo di attrito ϕ pari a 35°.

Le Tavole in allegato (Tavole 2-15) illustrano le ana-

17.
Al corso 5 del piedritto destro è leggibile la lesione non rilevata da Thiersch nè da De Jong

[12] $$S = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot tg^2\left(45° - \frac{\varphi}{2}\right)$$

Tavola 1.
Individuazione delle parti murarie interessate nei meccanismi di collasso

lisi svolte e il rapporto Ms/Mr, coefficiente di sicurezza nell'analisi statica, dei meccanismi di collasso esaminati (2d, 3d, 4d, 5d sL, 5d L, 6d, 7d, 8d, 9d, 3s, 4s, 8s, 9s sL, 9s L).

L'analisi evidenzia che la spinta del terreno a tergo incrementa fortemente il momento ribaltante: nel caso del meccanismo 8d la spinta del terreno decrementa infatti ben del 51,6% il rapporto Ms/Mr, corrispondente al coefficiente di sicurezza.

Dalle valutazioni è evidente che il valore Ms/Mr del coefficiente di sicurezza, per ogni meccanismo possibile, diminuisce progressivamente dall'alto verso il basso.

Nell'esame dei coefficienti di sicurezza dei meccanismi individuati il valore minimo riscontrato corrisponde a quello del corso di base per ciascuno dei due piedritti (9s L e 9d), ed è pari a 2,80 per il piedritto sinistro e 3,27 per il piedritto destro, che individuano i due meccanismi critici della struttura a *falso arco*, ovvero il primo meccanismo possibile per ciascun piedritto. Per il piedritto sinistro tale caso è relativo al meccanismo determinato dalla lesione passante descritta in precedenza, e al caso corrispondente con la pietra integra corrisponde un rapporto Ms/Mr pari a 2,82.

È evidente pertanto che la lesione passante determina una diminuzione del coefficiente di sicurezza della struttura. Il nuovo meccanismo di collasso prodotto dalla divisione del blocco presenta un valore del rapporto Ms/Mr inferiore al meccanismo al corso corrispondente senza lesione, manifestando l'acquisizione di una debolezza. L'analisi del quadro fessurativo è dunque rilevante per individuare ulteriori meccanismi di collasso che presentano condizioni di sicurezza più ridotte.

Nel caso del piedritto destro il meccanismo determinato dalla frattura presenta un coefficiente di sicurezza maggiore del coefficiente di sicurezza minimo presente, che è relativo al corso di base, e pertanto non induce a una sostanziale variazione delle condizioni di stabilità. Al contrario, al piedritto sinistro, la lesione passante interessa il corso più basso, cui già il meccanismo corrispondente senza lesione presentava il minore coefficiente di sicurezza. Pertanto, il nuovo meccanismo dato dalla frammentazione del blocco, di coefficiente di sicurezza ancora inferiore, individua il primo meccanismo possibile di collasso, e dunque quello reale.

2.3.
Effetto delle azioni sismiche sul primo meccanismo di collasso

Con l'individuazione del meccanismo critico di ciascun piedritto, ovvero il primo possibile nel caso di un incremento del momento ribaltante, che, come si è visto, corrisponde per entrambi al corso di base, si è valutata l'influen-

za del sisma alla stabilità della struttura.

Coerentemente con quanto previsto nell'applicazione corrente del metodo pseudostatico, le azioni sismiche vengono schematizzate come forze proporzionali alle masse, agenti in direzione orizzontale. Il termine di proporzionalità è dato dal coefficiente di intensità sismica c = (S - 2)/100, funzione del grado di sismicità dell'area. In quanto segue si assume S = 12 e pertanto c = 0,1.

Applicate ai baricentri dei blocchi le forze orizzontali cW proporzionali alle masse W, si determina l'intensità e la retta di azione della risultante. Dal prodotto della risultante per la distanza in verticale della sua retta di azione con il centro di rotazione del meccanismo di collasso si ricava il momento ribaltante della struttura sotto azione sismica.

L'incremento della spinta del terreno dovuto all'azione sismica viene valutato come $\Delta S = Ss - S$ con S pari alla spinta del terreno in condizioni statiche calcolata secondo la teoria di Coulomb e Ss pari alla spinta in presenza di sisma con la formula corrente:

$Ss = 1/2 \; \gamma \quad H^2 \quad Kae;$

ove $Kae = Ka\,(\phi', \delta, \beta^*, \varepsilon^*) \cos^2 \beta^{**}/\cos \theta \quad \cos^2 \beta';$

ϕ' = angolo di attrito del terreno;

δ = angolo di attrito terreno - opera di sostegno;

β^* = inclinazione della struttura rispetto alla verticale, modificata per la presenza dell'azione sismica;

ε^* = inclinazione della superficie limite del terrapieno rispetto all'orizzontale, modificata per la presenza dell'azione sismica; $\beta^{**} = \beta' + \theta$; β' = inclinazione del paramento interno dell'opera di sostegno rispetto alla verticale;

θ = arctg c.

Nel caso considerato si assumono i seguenti valori per i citati parametri:

$\phi' = 35$; $\delta = 0$; $\beta^* = 95{,}7°$; $\varepsilon^* = 5{,}7$; $\theta = 5{,}7$; $\gamma = 1{,}9$ t/m³.

Il coefficiente di sicurezza Ms/MrT, in cui MrT indica la somma dei momenti ribaltanti, è risultato pari a 1,606

			(°)	(rad)		
s =	23,481	ϕ =	35,00	0,61	M_s =	17,65
c =	**0,21**	_ =	12,12	0,21	M_r =	2,61
		_ =	0,00	0,00	M_{rs} =	2,78
		_ =	0,00	0,00	$M_{rs}i^*$ =	45,93
		i =	0,00	0,00	M_{rsi} =	9,87
					γ =	1,90
		k_a	0,271		H =	2,85
		k_{ae}	0,407		S =	2,09
		k_{ae}-k_a	0,136		S_e =	3,14
					ΔS =	1,05
					braccio =	0,38
					M_{rds} =	2,39
					FS =	**1,00**

18.
Piedritto destro. Valore dell'intensità sismica in grado di produrre il ribaltamento nel caso di $\phi' = 35$ e $\gamma = 1{,}9$ t/m³

			(°)	(rad)		
s =	21,467	ϕ =	35,00	0,61	M_s =	15,51
c =	**0,19**	_ =	11,02	0,19	M_r =	2,84
		_ =	0,00	0,00	M_{rs} =	2,58
		_ =	0,00	0,00	M_{rsi}^* =	39,99
		i =	0,00	0,00	M_{rsi} =	7,78
					γ =	1,90
		k_a	0,271		H =	3,11
		k_{ae}	0,392		S =	2,49
		k_{ae}-k_a	0,121		S_e =	3,60
					ΔS =	1,11
					braccio =	0,00
					M_{rds} =	2,30
					FS =	**1,00**

per il piedritto destro e 1,475 per il piedritto sinistro.

Le Tavole 16 e 17 in allegato illustrano per via grafica la posizione e l'intensità delle risultanti e la valutazione dei coefficienti Ms/MrT per i due piedritti.

Nella seconda valutazione si ricerca, procedendo per via analitica, il valore dell'intensità sismica critico ovvero in grado, rispetto ai parametri di base considerati, di indurre il collasso della struttura per ciascuno dei due piedritti, con riferimento per entrambi al primo meccanismo di collasso.

La Tabella in figura 18 indica per il piedritto destro il valore dell'intensità sismica che determina un coefficiente di sicurezza Ms/MrT (indicato con FS nella Tabella) pari a 1, e dunque il ribaltamento del piedritto stesso, nelle condizioni prestabilite di angolo di attrito ϕ' pari a 35 e peso specifico del terreno γ pari a 1,9 t/m³.

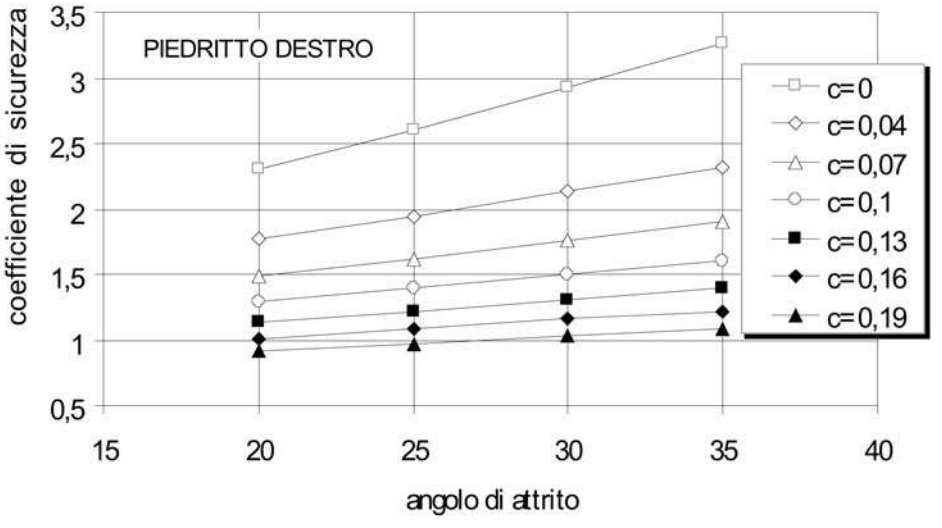
La Tabella in figura 19 indica per il piedritto sinistro l'intensità sismica in grado di comportare il collasso della struttura, sulla base delle stesse condizioni iniziali prestabilite di angolo di attrito ϕ'pari a 35 e peso specifico del terreno γ pari a 1,9 t/m³.

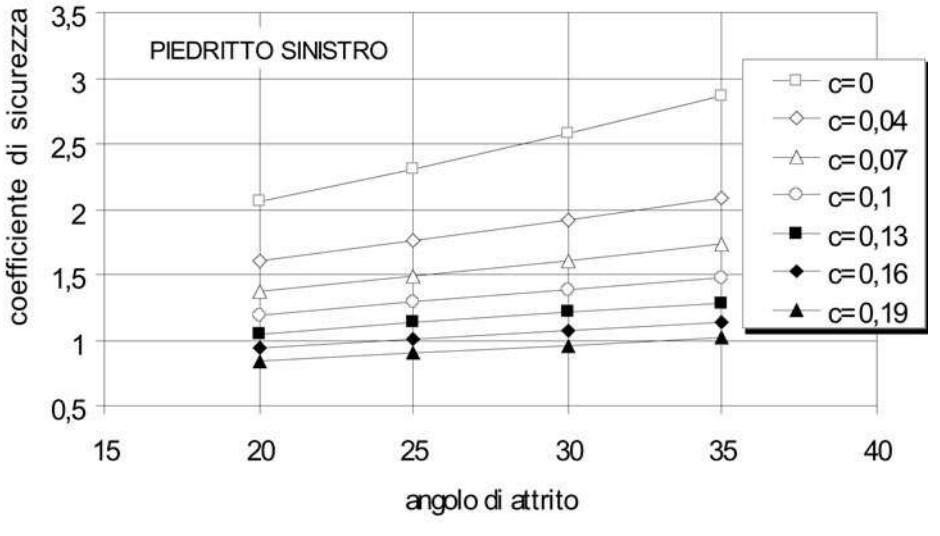
2.4.
Incidenza delle caratteristiche meccaniche del terreno e dell'intensità sismica sulla stabilità della struttura

Poiché l'angolo di attrito, arbitrariamente definito in relazione ai saggi presenti in letteratura, ha un ruolo determinante nella valutazione delle condizioni di sicurezza sia in campo statico sia nel caso di sisma, come, allo stesso modo l'intensità del sisma idealmente applicato alla struttura, si valuta l'incidenza che ciascuno di tali parametri assume per la stabilità mediante uno studio parametrico.

Dalle analisi esposte è infatti evidente che il valore della spinta del terreno, nonché il sisma, hanno un ruolo rile-

19.
Piedritto sinistro. Valore dell'intensità sismica in grado di produrre il ribaltamento nel caso di ϕ'= 35 e γ= 1,9 t/m³





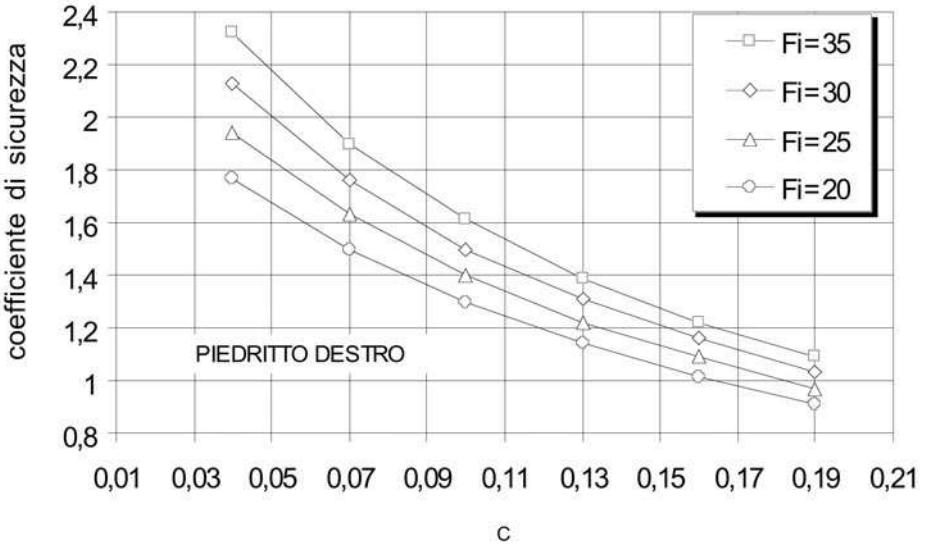
vante nella valutazione delle condizioni di sicurezza. La spinta esercitata dal terreno a tergo dipende dall'angolo di attrito e il sisma dall'intensità sismica c assunta nel calcolo; si esaminano pertanto le condizioni di stabilità dei due piedritti al variare dell'angolo di attrito ϕ' e dell'intensità sismica c.

Vengono ricercati per i meccanismi critici dei due piedritti i valori Ms/MrT al variare dell'angolo di attrito ϕ' nei valori di 20°, 25°, 30° e 35° e dell'intensità sismica c da 0,04 a 0,19.

L'ampio intervallo di valori considerato per l'angolo di attrito ϕ' deriva dall'incertezza della caratterizzazione meccanica dei terreni; tuttavia, dato che per un'argilla l'angolo di attrito varia fra 20° e 28°, per un limo con percentuali variabili di argille e sabbie l'angolo è compreso fra 28° e 32° e per le sabbie l'angolo è generalmente maggiore di 30°, la scelta di

20.
Piedritto destro. Valore del coefficiente di sicurezza al variare dell'angolo di attrito nei casi di intensità sismica c = 0 ; c = 0,04; c = 0,07; c = 0,1; c = 0,13; c = 0,16; c = 0,19

21.
Piedritto sinistro. Valore del coefficiente di sicurezza al variare dell'angolo di attrito nei casi di intensità sismica c = 0; c = 0,04; c = 0,07; c = 0,1; c = 0,13; c = 0,16; c = 0,19



tale intervallo consente di coprire le possibili situazioni reali.

In prima istanza si determinano i valori del coefficiente di sicurezza al variare dell'angolo di attrito del terreno mantenendo costante l'intensità sismica. Tale valutazione viene compiuta per il piedritto destro e per il piedritto sinistro per i diversi valori dell'intensità sismica, nell'ordine per le serie c = 0; c = 0,04; c = 0,07; c = 0,1; c = 0,13; c = 0,16; c = 0,19. I due grafici in figura 20 e 21 illustrano i valori ottenuti rispettivamente per il piedritto destro e sinistro.

Dall'analisi dei risultati è da sottolineare in primo luogo che in condizioni statiche, ovvero per c = 0, l'attribuzione del minimo valore ammissibile dell'angolo di attrito di 20° garantisce comunque la stabilità dei piedritti, e per di più per valori ancora elevati del coefficiente di sicurezza, pari a 2,31 e 2,06 per il piedritto destro e sinistro rispettivamente. Tale osservazione evidenzia che la struttura muraria ha una grande resistenza alle sollecitazioni indotte dalla spinta del terreno, quale che sia la sua natura.

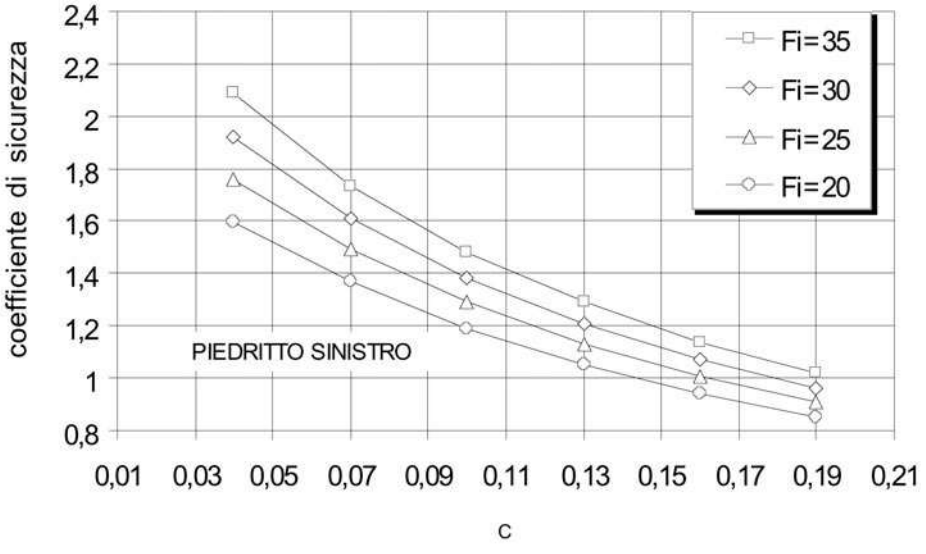
L'analisi dei grafici consente di desumere per quali valori dell'angolo di attrito si raggiunge l'instabilità a seconda dell'intensità sismica considerata.

Al piedritto destro l'instabilità, coefficiente di sicurezza pari a 1, si ottiene per la serie c = 0,19 con angolo di attrito ϕ' pari a 27,133°, per la serie c = 0,16 con angolo di attrito ϕ' pari a 19,007°, valore al di sotto rispetto alle condizioni reali.

Al piedritto sinistro l'instabilità si ottiene per la serie c = 0,19 con ϕ' pari a 33,467°, per la serie c = 0,16 con angolo di attrito ϕ' pari a 24,48°, per la serie c = 0,13 con angolo di attrito ϕ' pari a 16,755° risultando, già con c = 0,13 al di sotto di condizioni congruenti con quelle reali.

Con le stesse modalità si esaminano le variazioni del coefficiente di sicurezza al variare dell'intensità sismica man-

22.
Piedritto destro. Valore del coefficiente di sicurezza al variare dell'intensità sismica nei casi di angolo di attrito ϕ'= 20°; ϕ'= 25°; ϕ'= 30°; ϕ'= 35°



tenendo invariato l'angolo di attrito. L'analisi è stata condotta per le serie ϕ'= 20°, ϕ'= 25°, ϕ'= 30°, ϕ'= 35°, per il piedritto destro e per il piedritto sinistro, illustrate nei due grafici alle figure 22 e 23.

Dall'andamento delle curve nei grafici si evince che l'intensità sismica è notevolmente più incidente sulla stabilità della struttura rispetto alla scelta dell'angolo di attrito attribuito al terreno a tergo.

Dalla lettura dei grafici si desume per quale valore dell'intensità sismica si raggiunge l'instabilità per ogni angolo di attrito considerato.

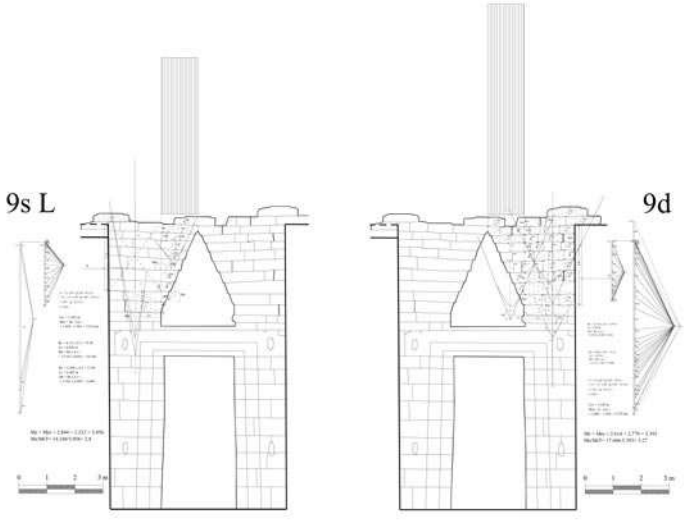
Al piedritto destro l'instabilità, ovvero il coefficiente di sicurezza pari all'unità, si ottiene per la serie ϕ' pari a 20° con un'intensità sismica c = 0,164, per la serie ϕ' pari a 25° con c = 0,183, per la serie ϕ' pari a 30° con c = 0,2.

Al piedritto sinistro l'instabilità si ottiene per la serie pari a 20° con intensità sismica c = 0,143, per la serie ϕ' pari a 25° con c = 0,161, per la serie ϕ' pari a 30° con c = 0,179, e infine per la serie ϕ' pari a 35° con c = 0,195.

2.5.
Considerazioni sull'influenza del tumulo sulla stabilità della struttura

L'analisi della condizione statica dei due piedritti costituenti la parte anteriore del triangolo di scarico allo *stomion* del Tesoro di Atreo ha mostrato, come d'altra parte prevedibile per la sua lunga esistenza, una grande stabilità della struttura. L'analisi, condotta considerando separatamente i due piedritti e valutando per ciascuno la condizione di stabilità al ribaltamento verso il lato dell'aggetto, ha individuato

23.
Piedritto sinistro. Valore del coefficiente di sicurezza al variare dell'intensità sismica nei casi di angolo di attrito ϕ'= 20°; ϕ' = 25°; ϕ'= 30°; ϕ'= 35°



un notevole valore del sovraccarico da imporre su ciascuno nella parte in aggetto per causarne il ribaltamento. La figura 25 illustra l'altezza che deve raggiungere un pilastro lapideo, di peso specifico γ= 2,5 t/m^3 e di 1 m di profondità, gravante uno sul piedritto destro e l'altro sul piedritto sinistro per provocare il collasso degli stessi.

Anche in condizioni sismiche le analisi hanno mostrato una buona resistenza della struttura, come, ancora ovviamente, l'esistenza della struttura dimostra, seppure il confronto tra la condizione di sicurezza in regime statico con quella in caso di sisma evidenzia che con maggiore probabilità è un eventuale elevato evento sismico che può indurre uno stato di pericolo per la struttura. La probabilità che negli anni di lunga vita del monumento sia comunque occorso un sisma di grandissima intensità, superiore alla valutata resistenza della struttura al ribaltamento, resta comunque possibile. Dagli studi sugli eventi sismici del passato e sulla loro intensità si potrebbe rilevare che azioni sismiche di intensità vicina a quella definita critica per la struttura si siano effettivamente manifestate. In tal caso, pertanto, c'è da chiedersi in che modo abbia resistito la struttura.

In condizioni di un notevole sisma in grado di produrre instabilità il piedritto sinistro del *falso arco* del modello analizzato, che presenta un minore coefficiente di sicurezza, trovandosi sul punto di ribaltarsi, ha trovato comunque di fronte, per simmetria, il piedritto opposto su cui trasmettere la spinta orizzontale.

Nella parte anteriore del *triangolo di scarico* del Tesoro di Atreo i terminali dei piedritti sono a contatto solo per l'altezza dell'ultimo corso orizzontale. La cornice di coronamento ha infatti una limitata estensione in profondità e attualmente sono presenti solo alcuni frammenti. Pertanto, poiché i letti di posa dei blocchi lapidei sono orizzontali, è l'attrito della superficie di contatto, tra il blocco lapideo del

24.
Dimensioni dei pilastri lapidei in grado di ribaltare i due piedritti

corso terminale, che riceve la spinta, e quello sottostante, che può aver contrastato la spinta orizzontale.

L'attrito τ è proporzionale alla pressione σ attraverso un coefficiente di attrito *f* secondo la relazione $\tau = \sigma \cdot f$.

Si evince pertanto che, se come è ragionevole supporre la massa del terreno investita dal sisma non trasmette azione orizzontale alla struttura sottostante, il carico del tumulo disposto all'estradosso della struttura fornisce una maggiore resistenza all'azione di una spinta orizzontale.

Essa, incrementando la pressione σ, incrementa la resistenza d'attrito, inducendo una maggiore resistenza allo slittamento delle pietre. Inoltre, verificando che il coefficiente di sicurezza in condizioni statiche è notevolmente maggiore di quello calcolato in presenza di sisma, un sovraccarico disposto omogeneamente su tutta la superficie terminale non comporta una diminuzione del coefficiente di sicurezza in condizioni statiche poiché l'aumento di carico interessa egualmente sia le masse che inducono ribaltamento che quelle stabilizzanti.

V
‘falsa cupola’ e ‘vera cupola’

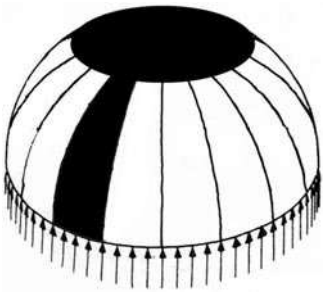
1.
“Falsa cupola” e “vera cupola”

La cupola muraria della *tholos* micenea, per l’apparecchiatura in corsi orizzontali, viene usualmente definita come una *pseudocupola* o *falsa cupola*, per indicarne l’appartenenza a una particolare categoria strutturale. Il termine [1] assimila tali strutture alle cupole murarie per la forma volumetrica ma le distingue sostanzialmente nel comportamento statico, che corrisponde nello spazio a quanto visto per il funzionamento del modello piano del *falso arco*.

1.
Modello di ‘pseudocupola’ in spicchi meridiani strutturalmente separati

Come per il *falso arco* la disposizione per corsi orizzontali non ammette la formazione del sistema resistente ad arco, così per la *falsa cupola* si considera che la composizione per giustapposizione di corsi lapidei a giacitura orizzontale progressivamente aggettanti verso l’interno non possa essere in grado di sviluppare nella struttura il sistema strutturale resistente a cupola. Nel modello strutturale a *falsa cupola* gli spicchi murari meridiani, in cui la cupola può essere idealmente suddivisa, sono intesi strutturalmente tra loro separati, e stabili autonomamente per trasmissione di sole azioni verticali, fig. 1. Pertanto, la condizione statica di una *falsa cupola* viene valutata esaminando, per il singolo spicchio meridiano, la condizione di equilibrio al ribaltamento verso l’interno: in modo analogo al *falso arco*, in uno spicchio meridiano isolato possono definirsi, attraverso la lettura dell’apparecchiatura muraria, gli eventuali meccanismi di collasso al ribaltamento e valutare i relativi momenti ribaltanti e stabilizzanti generati dalle masse, e dal loro rapporto il corrispondente coefficiente di sicurezza. Sulla base del modello della corrente accezione di *pseudocupola*, in letteratura si ritiene che l’equilibrio della cupola della *tholos* venga raggiunto mediante un’azione di bilanciamento del momento ribaltante esplicata dal peso

[1] “Copertura costituita da lastre aggettanti l’una sull’altra in modo da realizzare una copertura simile alla cupola nella forma, ma non nel principio del funzionamento statico” definizione di *psedocupola* tratta dall’Enciclopedia dell’Architettura Garzanti.



2.
Ogni spicchio incapace di sostenersi è per forma vincolato al ribaltamento impegnando con una compressione anulare gli anelli lapidei orizzontali

del tumulo sul lato opposto dell'aggetto, in modo da riportare dal generico blocco lapideo superiore la risultante del suo peso e del terreno su di esso gravante all'interno del blocco sottostante [2].

Contrariamente a tali ipotesi correnti, la verifica al ribaltamento di uno spicchio meridiano della cupola esistente del Tesoro di Atreo, che si espone nel paragrafo seguente, ha mostrato che secondo il modello di *pseudocupola* l'equilibrio non è soddisfatto, e che pertanto, di conseguenza, intervengono ulteriori fattori a garantire la stabilità della struttura. Come viene progressivamente argomentato e dimostrato nel seguente paragrafo, avviene infatti che il generico spicchio meridiano, incapace di sostenersi isolato, raggiunge la presente condizione di equilibrio impegnando nella trasmissione degli sforzi gli anelli lapidei dei corsi orizzontali attraverso un regime di compressione radiale.

Nell'approfondire il modello generico di *falsa cupola* si osserva che la forma geometrica a cupola, in corsi orizzontali circolari e concentrici, induce una sostanziale differenza di comportamento rispetto al modello strutturale del *falso arco*. Se nel caso di un'azione mutua tra i due piedritti in aggetto di un *falso arco*, per la disposizione orizzontale dei blocchi, la spinta orizzontale può essere contrastata solo dall'attrito presente tra i letti di posa dei blocchi lapidei, di contro, una cosiddetta *falsa cupola*, per la forma geometrica chiusa, custodisce in sé una sua propria risorsa di resistenza. Qualora infatti gli spicchi meridiani componenti non risultino in grado di sostenersi autonomamente, l'eventuale azione mutua induce ciascuno spicchio ad appoggiarsi sull'altro, mobilitando, per ciascun corso lapideo orizzontale, la resistenza a compressione del singolo anello orizzontale, fig. 2. Tale considerazione individua la differenza sostanziale di comportamento tra il *falso arco* e la cosiddetta *pseudocupola*. In realtà, come viene progressivamente argomentato e dimostrato nei seguenti paragrafi per il caso specifico del Tesoro di Atreo, la cupola della *tholos* micenea presenta l'effettivo comportamento di una cupola vera e propria, più precisamente di una cupola cerchiata, e non quello, del tutto diverso, che viene attribuito alla *falsa cupola*.

L'impossibilità, facilmente riscontrata, dell'equilibrio dei singoli spicchi secondo il modello di *pseudocupola* obbliga ad una riflessione più approfondita sull'effettivo comportamento statico di tali strutture in confronto con quello delle cupole murarie. La capacità di coinvolgere nella trasmissione dei carichi gli anelli paralleli con un'azione di contrasto costituisce infatti il principio base a costituzione del sistema resistente a cupola.

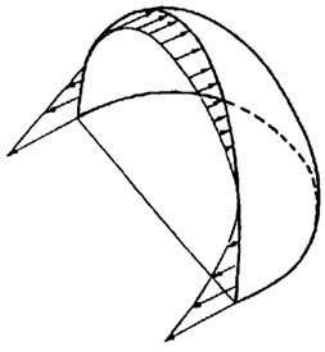
[2] Sparacio [1999, p. 67].

La cupola muraria, come l'arco per un sistema bidimensionale, è caratterizzata dal concorso di tutti gli elementi lapidei al fine della formazione di un sistema spaziale resistente. Essa può essere intesa strutturalmente come costituita dall'insieme di spicchi meridiani e anelli murari orizzontali che compartecipano nella trasmissione dei carichi.

Per comprenderne il comportamento statico è opportuno riferirsi in prima istanza al comportamento denominato membranale, ovvero a quello relativo alle strutture a guscio, costituite da materiale in grado di resistere sia a sforzi di compressione che a trazione [3], caratteristica del materiale notevolmente differente da quella della muratura. Il comportamento strutturale di tali strutture soggette a carichi assialsimmetrici è condizionato dalla forma geometrica. La struttura può essere schematizzata con la sua superficie media, composta da archi meridiani e cerchi paralleli, che concorrono nella trasmissione degli sforzi. Nei gusci soggetti a carico assialsimmetrico, come è il caso del peso proprio, i meridiani sono vincolati lateralmente dai paralleli e pertanto la loro deformazione viene in tutti i punti frenata dall'azione cerchiante dei cerchi paralleli. I cerchi paralleli possono restringersi o allargarsi a seconda di quanto gli archi meridiani richiedono. La partecipazione degli anelli paralleli al trasferimento dei carichi permette così che i meridiani trasferiscano quella parte di carico che può essere contrastata solo da sforzi normali, mediante un poligono funicolare delle forze corrispondente proprio alla geometria della curva meridiana stessa. In tal modo, ogni cerchio parallelo trasferisce radialmente la parte di carico che il poligono delle forze corrispondente alla geometria della curva meridiana non può per geometria trasmettere [4]. Gli anelli paralleli sono dunque in grado di funzionare come funicolari di un carico radiale di intensità pari alla parte di carico non assorbibile dai meridiani, e sono anelli compressi o tesi a seconda della distribuzione degli sforzi. Di conseguenza la curva delle pressioni corrisponde proprio alla superficie media del guscio. In tali condizioni si mobilita una grande resistenza, che viene comunemente chiamata "resistenza di forma".

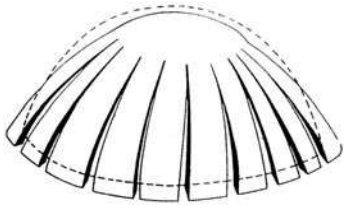
In un generico guscio assialsimmetrico soggetto solo al peso proprio si verifica che gli sforzi dei meridiani N_ϕ risultano sempre di compressione, progressivamente crescente dall'apice alle imposte, mentre gli sforzi dei paralleli N_θ, procedendo dall'apice alle imposte, da sforzi di compressione passano gradualmente a sforzi di trazione.

La specifica geometria della curva generatrice del guscio assialsimmetrico gioca un ruolo essenziale nella valu-



3.
Azione laterale dei paralleli sugli archi meridiani per l'equilibrio di una cupola sferica (da Heyman [1995, p. 35, fig. 3.6])

[3] Per un approfondimento si rimanda all'Appendice 3.
[4] Belluzzi [1980, vol. 3, p. 250].
[5] Heyman [1995, p. 34].
[6] Salvadori – Heller [1983, p. 147].



4.
Illustrazione schematica ingigantita delle fessurazioni meridiane di una cupola muraria (da Heyman [1995, p. 36, fig. 3.7])

tazione della localizzazione della parte di guscio avente anelli paralleli compressi e di quella caratterizzata da anelli paralleli tesi. In un guscio emisferico si dimostra che il passaggio dalla parte compressa a quella tesa avviene al parallelo di 51,82° di colatitudine [5], corrispondente al parallelo scarico, al di sotto del quale gli anelli paralleli sono soggetti a trazione.

Con la medesima luce, aumentando la freccia, o monta, dell'arco, generante il guscio per rivoluzione intorno all'asse centrale, si verifica che le fasce dei paralleli tesi si spostano progressivamente più in basso verso le imposte [6].

Pertanto, si verifica che tanto più il guscio è ogivale tanto maggiore risulta l'ampiezza della fascia dei paralleli compressi rispetto a quelli tesi [7]. Infine, nel caso estremo in cui la curva meridiana si schiaccia e diviene segmento rettilineo e pertanto si riduce ad un cono, gli anelli paralleli risultano sempre compressi, dall'apice alle imposte [8].

Nelle cupole in muratura, a differenza dei gusci, per le differenti caratteristiche del materiale (la muratura presenta un'elevata resistenza a compressione e una limitata, se non nulla, resistenza a trazione), gli anelli paralleli che avrebbero dovuto rispondere con uno sforzo di trazione per riportare l'equilibrio non sono generalmente in grado di esplicare questo sforzo. Pertanto, nella zona inferiore della cupola, ove gli anelli paralleli avrebbero dovuto essere tesi, appena le sollecitazioni di trazione superano la piccola resistenza a trazione del materiale murario si manifestano delle fessurazioni [9]. Avviene pertanto che la cupola muraria, a differenza del guscio, si frattura lungo i meridiani dividendosi in spicchi, connessi agli altri nella parte alta (in cui i paralleli sono compressi), tradizionalmente denominata "cervello", fig. 4. E gli spicchi meridiani, liberi nella parte inferiore dalle fessurazioni meridiane, esplicano una spinta orizzontale verso l'esterno, pari all'opposto della mancata cerchiatura dei paralleli [10].

Anche la presenza di una sola fessurazione meridiana, annullando l'azione cerchiante dei paralleli, fa sì che gli spicchi meridiani della cupola muraria si inflettano e, in tali zone, le sezioni della cupola ortogonali alla direzione degli sforzi meridiani vengono sollecitate a sforzo normale eccentrico. La superficie delle pressioni si sposta pertanto dalla superficie media all'interno della sezione della cupola [11], e in un generico spicchio meridiano la curva delle pressioni si

[7] Nart [2001, p. 27].

[8] Per un approfondimento si rimanda all'Appendice 3.

[9] Como [2000, p. 160].

[10] In realtà si verifica che la parte fessurata della cupola è più ampia della parte che avrebbe dovuto essere tesa. Ciò avviene in quanto non essendo più lo spicchio meridiano soggetto solo a compressione ma anche a momento, che lo costringe a flettersi, le fratture meridiane tendono a propagarsi verso l'alto. Como [1997, p. 256].

[11] Como [2000, p. 160].

sposta dunque all'interno della sezione trasversale nella ricerca di una possibile condizione di equilibrio. All'imposta della cupola, la cui superficie media presenti il piano tangente alla verticale, la curva delle pressioni, spostandosi, si inclina rispetto alla verticale e produce la spinta. In accordo con il verificarsi di tale condizione, gli spicchi meridiani di una cupola muraria sono assimilabili nel comportamento statico ad archi murari, più precisamente a semiarchi murari tra loro connessi all'apice, esplicanti un'azione spingente alle imposte.

Da tali presupposti l'analisi statica di una cupola muraria che sia in condizione di stabilità può essere ottenuta richiamando il *safe theorem* [12]: preso in considerazione uno spicchio meridiano di piccola ampiezza radiale di una cupola muraria di cui sono definiti la geometria, il peso proprio ed i carichi agenti, se è possibile trovare una curva delle pressioni tutta interna allo spicchio la cupola è stabile.

Alla luce di quanto premesso sulla verifica dell'incapacità degli spicchi meridiani della cupola del Tesoro di Atreo di sostenersi secondo il modello di comportamento a *pseudocupola*, l'effettivo comportamento della cupola muraria del Tesoro di Atreo realizzata in blocchi lapidei disposti con letti di posa orizzontali va analizzato alla luce del comportamento statico di una *vera* cupola muraria, allo scopo di esaminare puntualmente se in accordo con la sua specifica configurazione possa comunque instaurarsi un sistema resistente a cupola.

Contrariamente a quanto generalmente inteso, si richiama in primo luogo, come anticipato, che la forma spaziale a geometria chiusa della cupola, a differenza del *falso arco*, viene in aiuto nel caso di incapacità a sostenersi del singolo spicchio meridiano: il ribaltamento di una parte muraria viene infatti, per ciascun corso lapideo instabile, contrastato dai blocchi lapidei degli spicchi meridiani adiacenti, richiamando la resistenza a compressione anulare dei corsi corrispondenti. Tale comportamento, che si determina naturalmente per la forma, corrisponde a quello di una *vera* cupola nelle parti superiori compresse, e come si è visto anche di una struttura a cono, in cui la curvatura meridiana non è presente. Non richiamare tale comportamento sarebbe possibile solo se gli spicchi meridiani risultassero in equilibrio e effettivamente isolati uno dall'altro in tutto il loro sviluppo.

La resistenza a compressione dei corsi lapidei paralleli è data ovviamente non dalla resistenza del materiale, ma dalla garanzia di un esteso e opportuno contatto tra blocchi adiacenti lungo i paralleli. La costruzione della cupola in

[12] Per maggiori approfondimenti si rimanda all'Appendice 2.
[13] Blouet [1833, pl. 66 fig. 4].

corsi orizzontali, e soprattutto un'accurata apparecchiatura che assicuri estese superfici di contrasto tra i blocchi, rispondono all'esigenza di garantire l'esercizio di un regime di compressione anulare nella cupola. Un'azione di contrasto concentrata in pochi punti potrebbe infatti indurre invece l'instaurarsi di fenomeni di espulsione determinando la rottura della continuità degli anelli per slittamento locale delle pietre. La disposizione per corsi orizzontali dei blocchi raggiunta nello sviluppo della tipologia della *tholos*, come evidente nell'analisi morfologica del monumento, e soprattutto la perizia tecnica nell'inserire in forza pietre più piccole miste ad argilla nei giunti verticali di contatto, come riscontrato nel Tesoro di Atreo [13] e nella Tomba di Clitennestra [14], evidenziano l'intenzione di assicurare un esteso contrasto tra i blocchi componenti ciascun corso orizzontale.

La capacità dei corsi lapidei orizzontali di resistere per opportuna apparecchiatura all'esercizio di una compressione anulare non è però sufficiente a giustificare l'equilibrio raggiunto nella cupola della *tholos* micenea. Va infatti aggiunto che nel momento in cui viene ad innescarsi un regime di compressione anulare nella parte superiore della cupola, le azioni di compressione che i blocchi lapidei trasmettono ai sottostanti assumono una direttrice non ortogonale ai letti di posa, che va a coincidere, in analogia con l'equilibrio dei gusci, con la curvatura media della cupola. Tale condizione può rilevarsi senza dubbio critica, per la configurazione orizzontale dei letti di posa dei corsi.

Lo sforzo meridiano N_φ che ciascun blocco lapideo dello spicchio meridiano trasmette al sottostante, inclinato secondo la curvatura media dello spicchio, contempla un'azione orizzontale che sollecita ciascun blocco a slittare verso l'esterno lungo il suo letto di posa, ed è la resistenza d'attrito radente presente nei giunti orizzontali di contatto tra i blocchi ad impedire lo slittamento dei blocchi verso l'esterno.

Va detto anzitutto che la forma ad ogiva stirata della cupola delle *tholoi* gioca un importantissimo ruolo a contenimento di tale problematica, poiché è proprio la geometria della cupola a determinare l'intensità dell'azione orizzontale di slittamento. Si verifica infatti che ove è più acuta l'ogiva minore è l'intensità della forza orizzontale che induce lo slittamento dei blocchi. Nella *tholos* micenea, inoltre, il cosiddetto profilo "a collo di bottiglia", evidente nella *tholos* di Tirinto e rilevato nella Tomba di Clitennestra da Stikas, dall'esame della curvatura dei blocchi caduti della parte superiore della cupola, può costituire una soluzione di forma alla problematica dello slittamento dei blocchi in prossimità dell'apice della cupola. Tale profilo infatti determina per

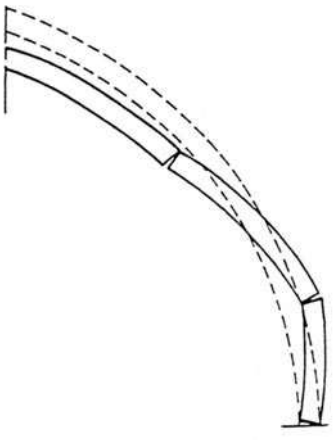
[14] Wace [1921-23, p. 362].

geometria, riportando quasi a 90° l'ampiezza dell'angolo di colatitudine dei letti di posa dei corsi in adiacenza all'apice, un'intensità irrilevante della componente orizzontale degli sforzi meridiani, evitando dunque la manifestazione di tale condizione critica.

Un rilevante contributo a contenere il pericolo di slittamento dei blocchi, che si pone per l'apparecchiatura in corsi orizzontali, è dato inoltre dalla presenza del tumulo all'estradosso, che esplica un importante contributo alla stabilità della parte superiore della cupola. Il beneficio dato dal tumulo non è dovuto al fatto che la sua presenza aumenta il carico verticale; un incremento di carico verticale aumenta infatti proporzionalmente sia la resistenza d'attrito che la forza orizzontale di slittamento. L'efficace contributo alla stabilità esercitato del tumulo all'estradosso è dato invece dalla pressione laterale che esso esercita al perimetro degli anelli lapidei paralleli della cupola a contrastare le forze orizzontali di slittamento.

Nella parte emergente della cupola della *tholos*, quindi, un'apparecchiatura muraria dei corsi orizzontali che assicuri un esteso contatto tra blocchi adiacenti, un'appropriata geometria della cupola e la presenza del tumulo all'estradosso costituiscono quegli espedienti, in mancanza di letti di posa ortogonali alla direttrice degli sforzi meridiani, in grado di fornire la capacità di trasferire gli sforzi secondo il regime statico di una *vera* cupola e di garantirne la stabilità.

Procedendo nel trasporre il comportamento di una cupola muraria in una struttura che si configura come una *falsa cupola*, si osserva che la disposizione dei blocchi per corsi orizzontali può apparire problematica per le parti inferiori. In tale zona una cupola muraria, avendo scarsa (se non nulla) capacità di rispondere con un'azione di trazione dei paralleli che il mantenimento dell'equilibrio richiederebbe, si comporta dividendosi in spicchi meridiani spingenti alle imposte, assimilabili nel comportamento ad archi murari e pertanto la giacitura radiale dei corsi degli spicchi meridiani assicura il manifestarsi del sistema resistente ad arco. La giacitura orizzontale dei letti di posa di una *psedudocupola*, impone invece che, al manifestarsi di tale spinta orizzontale, il necessario contrasto possa essere esplicato solo dall'attrito presente tra i letti di posa, impedendo pertanto effettivamente l'esercizio di un comportamento a cupola muraria in condizioni di sicurezza. Esaminando la morfologia della *tholos* micenea, si comprende che anche questa problematica viene però efficacemente risolta: l'inserimento della parte inferiore della cupola nel pozzo di scavo garantisce infatti la necessaria cerchiatura a livello delle reni. Pertanto, verso le imposte, dove scompare l'effetto cerchiante dei paralleli, a differenza della cupola muraria ordinaria in cui la curva delle pressioni si sposta per consentire il mantenimento del-



v5.
Meccanismo di collasso assialsimmetrico di una cupola muraria (da Como [1997, p. 246, fig. 2.3 b])

l'equilibrio, nella *tholos* la parte inferiore viene intelligentemente inserita nel pozzo di scavo contrastandone l'apertura radiale. Oltre a ciò, la presenza di un riempimento compattato in piccole pietre e argilla, a riempire in forza gli eventuali vuoti tra muratura e pozzo di scavo, come descritto in alcune evidenze [15], messo in opera con la progressiva elevazione della cupola, e la possente struttura dei piedritti ai lati del vano di accesso, impediscono alla cupola di aprirsi alle imposte secondo i meridiani, e consentono dunque che possa conservarsi intatto per tutta l'estensione della cupola un comportamento a guscio. Pertanto, come viene di seguito via via argomentato, la cupola della *tholos* micenea presenta, per tutta la sua estensione, l'effettivo comportamento di una cupola vera e propria, e più precisamente di una cupola cerchiata ai fianchi, che è analogo a quello di un rigido guscio, e non quello del tutto diverso che viene attribuito alla *falsa cupola*.

La particolare tipologia architettonica delle *tholoi* trova quindi ragione nella resistenza strutturale acquisita ottenendo, per la parte emergente della cupola, grazie alla sapiente apparecchiatura degli anelli lapidei, alla geometria della cupola e alla presenza del tumulo all'estradosso, un regime di compressione uniforme sia degli spicchi meridiani che degli anelli paralleli, e imponendo per la zona delle reni che la spinta venga assorbita dalle pareti del pozzo in cui è inserita la struttura, attraverso un'intelligente ed originale soluzione per la cerchiatura.

A differenza, e in modo più efficace, della cupola muraria, in cui, per l'incapacità di assorbire sforzi di trazione negli anelli, e dunque con lo sviluppo delle fessurazioni meridiane, la curva delle pressioni deve abbandonare la linea media degli spicchi, nella *tholos* la curva delle pressioni resta ancora corrispondente alla superficie media della cupola. Sembra dunque che i costruttori micenei avessero compreso la grande resistenza di forma acquisita da una struttura a cupola contenuta alle reni.

Una cupola muraria cerchiata ai fianchi, come nella tipologia della *tholos* micenea il pozzo di scavo induce, è peraltro ben più solida di una generica cupola muraria. Il meccanismo di collasso di una cupola generica prevedrebbe infatti che il crollo avvenga per un lavoro positivo delle forze capace di provocare il sollevamento delle parti murarie inferiori che si aprono radialmente, fig. 5; l'inserimento della cupola della *tholos* nel pozzo di scavo si oppone a tale spostamento, impedendo l'instaurarsi di tale meccanismo di collasso.

Nella maggior parte delle *tholoi* crollate la parte superstite è costituita dalla parte inferiore della cupola interna al pozzo di scavo, che si estende fino all'altezza termina-

[15] Cfr. capitolo I, paragrafo 4.

le della porta di accesso. Tale evidenza suggerisce, in accordo con quanto esposto sui punti critici per la stabilità della cupola della *tholos*, che il crollo della parte superiore sia stato determinato, mettendo da parte l'azione di eventi sismici, da fenomeni di instabilità locale nella compressione anulare dei paralleli superiori a causa di un'inefficace apparecchiatura muraria degli anelli lapidei orizzontali, incapace di assicurare ampie superfici di contrasto tra blocchi adiacenti, o, soprattutto dal dilavamento dei tumuli all'estradosso che può fare mancare alla parte emergente della cupola il necessario contenimento allo slittamento dei blocchi verso l'esterno.

In sintesi, dall'esame dei modelli di comportamento di una *falsa* e di una *vera* cupola si desume che l'identificazione corrente di *falsa cupola* della cupola muraria della *tholos* non tiene conto della configurazione architettonica del monumento che è capace comunque di richiamare una risposta unitaria della struttura. La fattura degli anelli murari orizzontali, la specifica geometria della cupola, la messa in opera del tumulo, l'inserimento della cupola in un pozzo di scavo per buona parte dell'altezza, costituiscono gli espedienti, in mancanza di un'appropriata stereotomia dei blocchi lapidei componenti, per contrastare le azioni orizzontali, e consentire una trasmissione degli sforzi secondo il sistema resistente a cupola, e l'eventuale precarietà di tali espedienti (apparecchiatura muraria inefficace, dilavamento del tumulo, pozzo di impianto imperfetto) incide fortemente sulla stabilità della cupola della *tholos*.

Alla luce di quanto emerge per la *tholos* micenea, la corrente denominazione di *falsa cupola* utilizzata genericamente per le cupole realizzate in corsi lapidei a giacitura orizzontale appare approssimativa. La disposizione per corsi orizzontali propria della *falsa cupola* richiama infatti comunque per forma l'instaurarsi di una compressione anulare nei paralleli e quindi la loro partecipazione al trasferimento dei carichi, obbligando ad una lettura spaziale della struttura. Va invece esaminato come nelle evidenze definite *pseudocupole* possano essere ingegnosamente risolti o evitati i due aspetti critici alla stabilità: lo slittamento dei corsi nella parte superiore e l'assorbimento della spinta alle imposte. Le evidenze di *pseudocupole* non ipogee presentano un profilo molto pendente delle sezioni meridiane, se non conico, come avviene nei nuraghi. Ciò determina nelle parti alte la presenza di una poco significativa componente orizzontale di slittamento, facilmente contenuta dall'attrito presente tra i letti di posa, e il tentativo di mantenere la compressione nei paralleli per tutta l'estensione della struttura. Come si è detto, infatti, in una cupola tanto maggiore è la corda rispetto alla luce dell'arco generatore, tanto più in basso, verso le imposte, è situata la fascia dei paralleli che per l'equilibrio dovrebbe essere tesa, e nel caso estremo di struttura conica

tale zona si estingue, comportando la presenza di sola compressione ai paralleli, progressivamente crescente verso le imposte. Si evidenzia pertanto la distinzione strutturale tra *tholoi* micenee e nuraghi. Per le prime il tumulo superiore e il pozzo di impianto consentono la realizzazione dell'ampia curvatura della cupola. Per i nuraghi, invece, come per i trulli, il profilo molto pendente delle sezioni meridiane rende possibile la condizione di costruzioni fuori terra.

Se pertanto le cosiddette *false cupole* esistenti sono stabili, e dunque esistono, hanno una forma tale da risolvere secondo un regime statico di una *vera* cupola le problematiche che si svilupperebbero per la giacitura orizzontale dei corsi, come è il caso mirabile della *tholos* micenea.

Da tali riflessioni sembrerebbe pertanto che il termine *falsa cupola* o *pseudocupola* è di per sé improprio, e che ogni struttura a cupola va analizzata nello specifico in rapporto all'apparecchiatura muraria e alle condizioni di impianto per valutare in che modo viene ingegnosamente raggiunta una condizione di stabilità.

2.
Analisi del comportamento della cupola muraria del Tesoro di Atreo

L'analisi del comportamento della cupola muraria del Tesoro di Atreo, viene condotta partendo dalla verifica che il modello di comportamento a *pseudocupola* risulta incongruente con la disposizione delle masse del monumento. Da ciò si deduce che gli spicchi meridiani in cui può essere scomposta, incapaci di essere autonomamente stabili, trovano una condizione di stabilità grazie alla partecipazione, nella statica dell'insieme, degli anelli lapidei orizzontali. Tale condizione implica l'instaurarsi di un comportamento unitario della struttura nella sua estensione tridimensionale. L'esame dell'equilibrio di uno spicchio meridiano della cupola del Tesoro di Atreo con il trasferimento ai corsi orizzontali degli sforzi paralleli, in accordo con l'equilibrio dei gusci, fornisce tutti gli elementi per valutare intensità e direzione delle forze necessarie all'equilibrio. Il confronto tra queste e la fattura specifica del monumento induce gradualmente a verificare che, nonostante l'apparecchiatura in corsi orizzontali, le soluzioni tecniche adottate nella *tholos*, relative all'apparecchiatura muraria dei corsi orizzontali, alla presenza del tumulo all'estradosso, alla curvatura della cupola, e all'inserimento della cupola nel pozzo di scavo, rendono possibile l'esplicarsi di un regime statico di una *vera* cupola cerchiata ai fianchi.

2.1.
Verifica dell'impossibilità dell'equilibrio secondo il modello di comportamento a falsa cupola

Lo studio del comportamento statico della cupola muraria, a copertura della camera interna, ha inizio con la verifica su di un caso reale dell'ipotesi di comportamento a *falsa cupola* generalmente attribuito.

Come si è detto, in base a tale ipotesi, la cupola muraria si intende costituita dalla successione di spicchi meridiani affiancati, individuabili dalle sezioni trasversali alla camera passanti per il centro, in grado di sostenersi autonomamente alla maniera dei piedritti in aggetto dei *falsi archi*. La stabilità della struttura è dunque verificata quando per lo spicchio meridiano singolo in aggetto, considerando il peso proprio dei blocchi lapidei e il carico del tumulo all'estradosso, è soddisfatta la condizione di equilibrio al ribaltamento verso il centro della camera per ogni possibile meccanismo di collasso dello spicchio.

Pertanto si esamina la condizione di stabilità al ribaltamento di un singolo spicchio meridiano della cupola di estensione angolare di 11,25° sottoposto al carico della porzione relativa di tumulo. L'analisi viene effettuata sul modello geometrico della cupola del Tesoro di Atreo definito in base allo studio esposto al capitolo III, che viene denominato modello geometrico A. L'analisi viene poi ripetuta sul modello geometrico denominato B, che presenta una forma all'estradosso della cupola coerente con le ipotesi di configurazione generale proposte da Cavanagh e Laxton [1981] applicate alle condizioni specifiche del Tesoro di Atreo.

2.1.1.
Modello geometrico A

La conformazione della struttura analizzata deriva dagli studi esposti al capitolo III, in cui, sulla base dei rilievi esistenti, delle indagini condotte e delle caratteristiche proprie delle *tholoi* scaturite dall'analisi della letteratura esistente, si è ipotizzata la configurazione delle "parti nascoste" e non rilevate della struttura, necessarie ai fini dello studio. Tali parti riguardano lo spessore della muratura della camera in corrispondenza di ogni corso orizzontale, la profondità del pozzo di scavo in cui è impiantata la cupola e la morfologia e consistenza del tumulo all'estradosso. Sulla base del "rilievo" interpretativo redatto (Tavola 9 del Capitolo III in allegato), che completa i rilievi tecnici esistenti del Tesoro di Atreo, viene definito il modello geometrico su cui si fonda l'analisi statica secondo l'ipotesi corrente di comportamento a *falsa cupola*.

Nell'analisi statica, avendo supposto che l'altezza del pozzo di scavo corrisponda alla quota estradosso della lastra

architrave della porta di accesso, si è presa in considerazione solo la parte dello spicchio meridiano della cupola muraria emergente dal pozzo [16]; le pareti rocciose del pozzo, cerchiando la parte inferiore della muratura della cupola al perimetro, ne impediscono il ribaltamento.

La parte emergente dal pozzo della cupola muraria è stata suddivisa in 32 spicchi meridiani e viene preso in analisi un singolo spicchio di estensione angolare di 11,25°.

Nell'ipotesi che la struttura possa ribaltarsi verso il lato interno si sono ricercati i meccanismi di collasso congruenti con l'apparecchiatura muraria dei blocchi lapidei. Come è noto, dai rilievi metrici si ha conoscenza solo dell'altezza dei corsi orizzontali, e pertanto l'eventuale apparecchiatura interna della cupola non è stata presa in considerazione nella definizione del modello di muratura. Lo spicchio murario meridiano viene inteso composto dalla sovrapposizione orizzontale di singoli blocchi lapidei. In base a tale ipotesi, il numero dei possibili meccanismi di collasso a ribaltamento coincide con quello dei corsi orizzontali emergenti dal pozzo e, a meno della lastra di "chiave", è pari a 22.

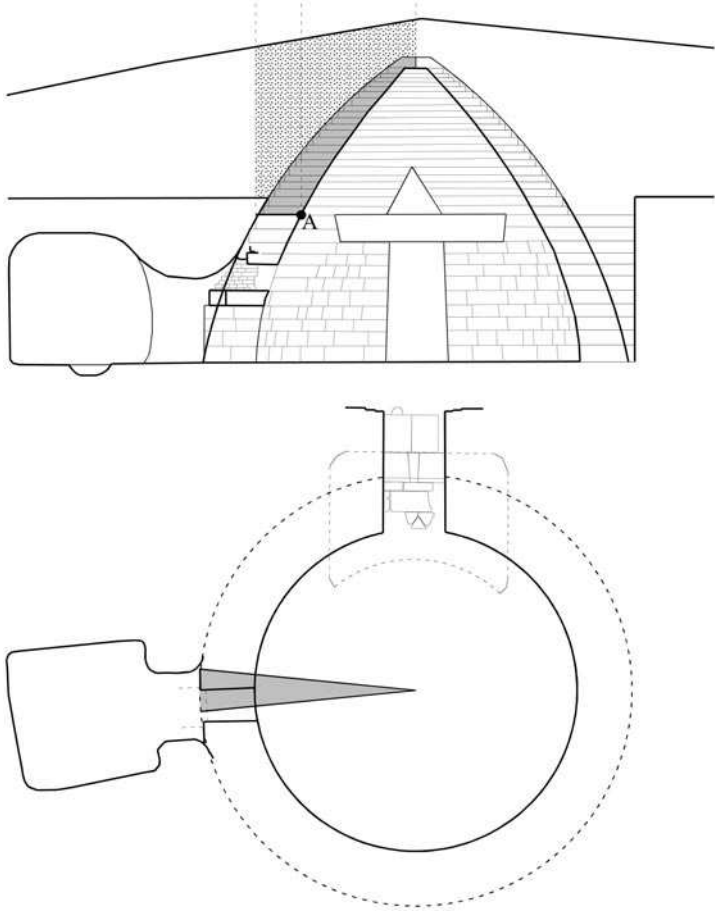
Nella definizione dei meccanismi di collasso, la singola lastra di chiave non è presa in conto in quanto, trattandosi di un unico elemento lapideo comune a tutti gli spicchi meridiani componenti la cupola, non è ragionevole considerare la porzione di lastra dello spicchio meridiano capace di ribaltarsi singolarmente. L'asse centrale della camera individua la parte della lastra che interessa, in forma di carico, il singolo spicchio.

I punti posti all'intersezione del profilo interno della cupola con i letti di posa dei corsi orizzontali costituiscono le cerniere dei possibili meccanismi di collasso a ribaltamento dello spicchio verso l'interno della camera.

La condizione di equilibrio al ribaltamento viene esaminata per tutti i possibili meccanismi di collasso calcolando, in relazione alle masse, le forze peso, collocate geometricamente nei rispettivi baricentri, i valori dei momenti stabilizzanti e ribaltanti ed il rapporto tra di essi, che definisce il relativo coefficiente di sicurezza.

La figura 6 mostra in sezione trasversale e in pianta lo spicchio meridiano della cupola cui si fa riferimento nell'analisi. In figura viene indicato il punto A, posto all'intersezione tra la curvatura all'intradosso della cupola e il piano di

[16] Il Tesoro di Atreo presenta la condizione particolare, come rilevabile nella sezione trasversale di rilievo (De Jong, 1921-23), in corrispondenza del *triangolo di scarico* sull'architrave di accesso alla camera secondaria, e sottolineato da Pelon [1976, p. 174], di pozzo di scavo con pareti inclinate verso l'interno. Nei casi di pozzo di scavo cilindrico la muratura della camera si eleva verticalmente a ridosso del cilindro di scavo e, a perimetro della camera, si inclina verso l'interno della stessa, determinando un incremento graduale dello spessore.

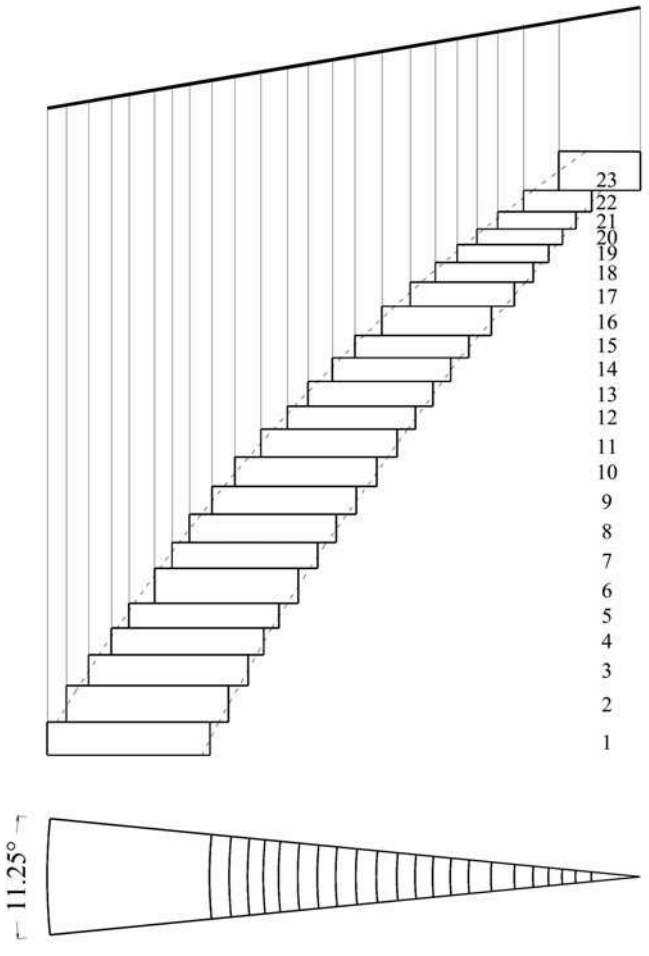


posa del primo corso lapideo emergente dal pozzo di impianto, che costituisce la cerniera del primo possibile meccanismo di collasso a ribaltamento verso il centro della camera dello spicchio meridiano in analisi. Le linee tratteggiate individuano nella sezione trasversale le due aree delle masse, comprendenti la muratura della cupola e il tumulo, che rispettivamente inducono momento stabilizzante e momento ribaltante rispetto alla prescelta cerniera A, fulcro alla rotazione della massa in aggetto nell'eventuale meccanismo di collasso esaminato.

Come anticipato, ciascun corso lapideo orizzontale dello spicchio viene schematizzato in volume con un unico blocco lapideo, di base conforme a un settore di corona circolare, e altezza ortogonale alla base [17], corrispondente all'altezza dei corsi lapidei di rilievo. Per il profilo della cupola all'intradosso, la configurazione di superficie a doppia curvatura prospiciente la camera dei blocchi lapidei è pertanto trascurata, e per il profilo della cupola all'estradosso, che vede, procedendo in altezza, una graduale diminuzione dello spes-

6.
Sezione trasversale e pianta del Tesoro di Atreo con indicazione dello spicchio meridiano della cupola in esame

[17] L'asse medio di ciascun blocco in sezione individua la dimensione R-r dello spessore del settore di corona circolare.



sore murario, la sovrapposizione di blocchi lapidei di base a settore di corona circolare e altezza ortogonale alla base comporta, nella sezione trasversale, un profilo "scalettato".

Come esposto al capitolo III, tracciata una curva di cerchio passante per i punti noti di rilievo, gli spessori dei blocchi lapidei sono definiti considerando le distanze orizzontali da tale curva al profilo di rilievo dell'intradosso, in corrispondenza di metà altezza di ciascun corso lapideo.

Il tumulo sovrastante lo spicchio meridiano viene scomposto in 23 volumi, in relazione al profilo a scaletta dell'estradosso del modello; ogni elemento interessa la coda libera dei 23 corsi lapidei, e in volume è di base un settore di corona circolare e in altezza pari all'altezza media della fascia di tumulo in sezione. La figura 7 illustra il modello della struttura cui si fa riferimento nell'analisi.

In base alla geometria del modello vengono quantificate le forze peso di ciascun blocco lapideo e del volume parziale di tumulo. Per la pietra di conglomerato si considera un peso specifico di 2,5 t/m^3, e per il tumulo, data l'eterogeneità del terreno di ricoprimento, un peso specifico di 1,9 t/m^3.

Per ciascun blocco lapideo e volume parziale del

7.
Sezione e pianta del modello dello spicchio meridiano, indicante la geometria dei blocchi lapidei e i volumi in cui viene suddiviso il tumulo gravante sullo spicchio

tumulo le distanze in orizzontale dei relativi baricentri dall'asse centrale della cupola sono misurate con la formula corrente riferita all'ampiezza angolare dello spicchio:

$$x_o = \frac{2}{3} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \cdot \frac{sen\,11{,}25°}{11{,}25°}$$

I risultati ottenuti per via analitica sono trasposti e verificati anche per via grafica.

Individuati sul modello geometrico dello spicchio meridiano i baricentri dei blocchi lapidei e dei volumi del tumulo, si rappresentano le intensità delle forze peso, in opportuna scala di lunghezza, come illustrato nella Tavola 1a. Nella Tavola 1a sono indicate inoltre le distanze orizzontali delle cerniere dei 22 possibili meccanismi di collasso dall'asse centrale della cupola.

Per ogni meccanismo di collasso i bracci dei momenti delle forze agenti sono determinati dalle differenze tra le distanze in orizzontale dei baricentri dei blocchi dall'asse centrale della cupola e la distanza in orizzontale del punto di cerniera alla rotazione con l'asse centrale.

Con l'ausilio di un foglio di calcolo si procede per via analitica alla valutazione dei momenti stabilizzante e ribaltante e del relativo coefficiente di sicurezza, che viene effettuata per ogni possibile meccanismo di ribaltamento, individuabile in corrispondenza di ogni corso orizzontale, variando via via la posizione della cerniera.

Ad ognuno dei 22 meccanismi di collasso corrisponde un foglio di calcolo impostato sui 23 blocchi lapidei componenti lo spicchio meridiano, in cui sono indicate, dalla lettura dei rilievi metrici, le componenti geometriche e vengono calcolati analiticamente i valori ricercati [18]. La Tabella 1a si riferisce all'analisi del primo meccanismo di collasso con cerniera posta all'intradosso in corrispondenza del letto di posa del primo corso emergente dal pozzo.

Nella Tabella 1a, le colonne indicano per ciascuno dei 23 blocchi componenti:

1. L'area della pianta;
2. L'altezza;
3. Il volume;
4. Il peso;
5. La distanza in orizzontale del baricentro dall'asse centrale della camera;
6. Il braccio del momento che il peso del blocco determina rispetto alla cerniera;
7. L'area della pianta del settore del tumulo su di esso gravante;

[18] Per la consultazione delle 22 Tabelle di calcolo si rimanda a Como M.T [2005 (2), p. 131ss].

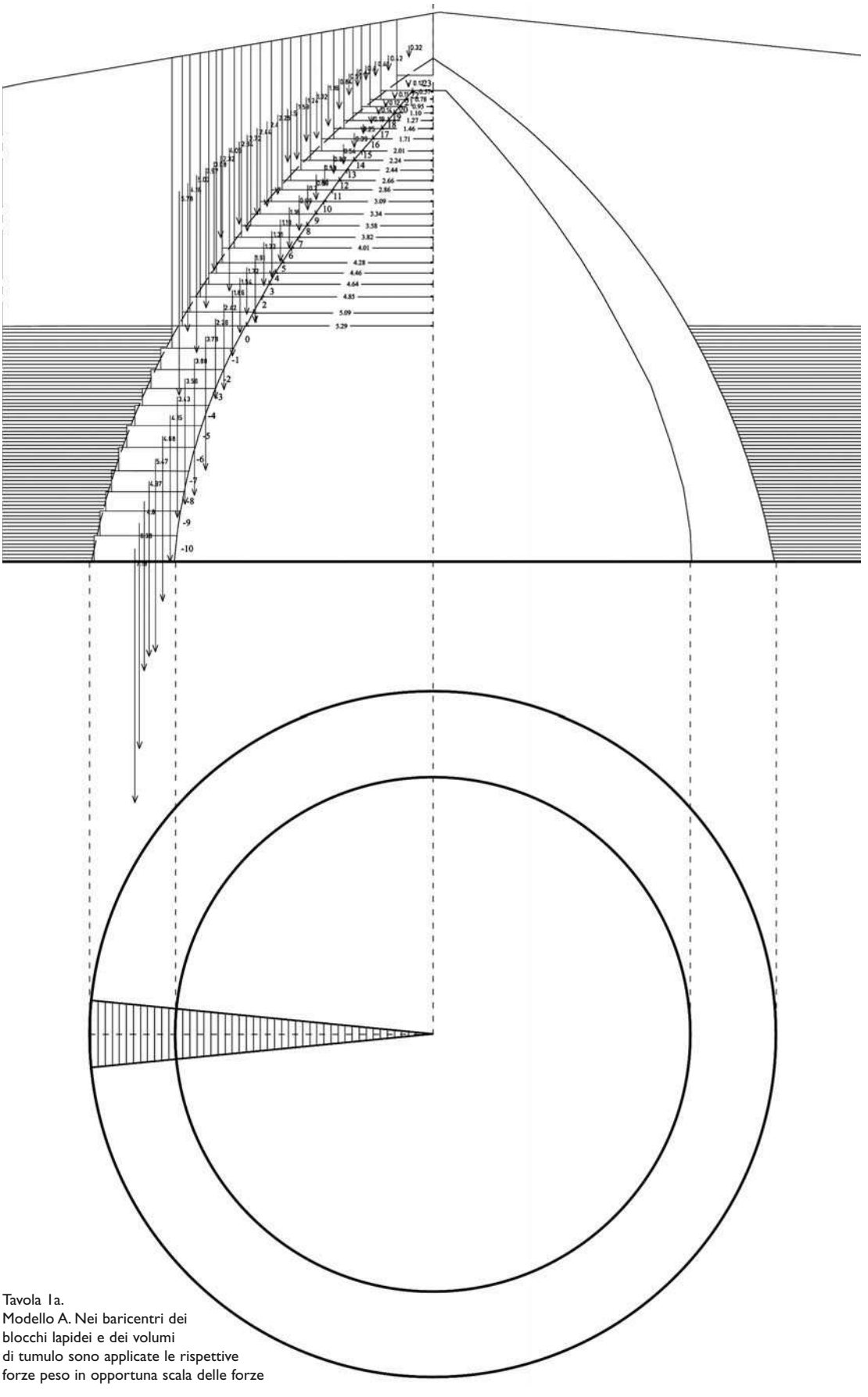


Tavola 1a.
Modello A. Nei baricentri dei blocchi lapidei e dei volumi di tumulo sono applicate le rispettive forze peso in opportuna scala delle forze

N.	AREA PIANTA CORSO		H	Volume	PESO G bl.	Xo	braccio	AREA PIANTA TUMULO (sett.		Volume TUM.	PESO G	Xo	braccio	Mbl.=Gi . bi	MTu.=Gi . bi	Mbl.+MTu.
	R	r	Mq	M	Mc	T	M	M	R	r	Mq	M	Mc	T	M	M	TM	TM	TM
1	7,11	5,19	2,31732	0,39	0,9037548	2,259387	6,160271532	0,870271532	7,11	6,89	0,302225	7,28	2,200198	4,1803762	6,955772503	1,665772503	1,966280185	6,963555726	8,929835911
2	6,89	4,95	2,253892	0,43	0,96917356	2,4229339	5,934751541	0,644751541	6,89	6,6	0,383874813	6,9	2,648736206	5,032598792	6,702864391	1,412864391	1,562190365	7,110379629	8,672569994
3	6,6	4,74	2,06969175	0,36	0,74508903	1,862722575	5,684233143	0,394233143	6,6	6,35	0,317679688	6,58	2,090332344	3,971631453	6,434359228	1,144359228	0,734346975	4,544973103	5,279320078
4	6,35	4,55	1,9252125	0,32	0,616068	1,54017	5,46434422	0,17434422	6,35	6,14	0,257372063	6,3	1,621443994	3,080743588	6,205616705	0,915616705	0,268519738	2,820780292	3,089300029
5	6,14	4,37	1,825389938	0,29	0,52936082	1,323407705	5,270731296	-0,019268704	6,14	5,97	0,202009938	6,04	1,220140023	2,318266043	6,016643197	0,726643197	-0,025500351	1,684552225	1,659051898
6	5,97	4,14	1,815440063	0,42	0,76248482	1,906212066	5,077502386	-0,212497614	5,97	5,64	0,375946313	5,67	2,131615592	4,050069625	5,769401302	0,479401302	-0,405065516	1,941608653	1,536543136
7	5,64	3,91	1,621172188	0,3	0,48635165	1,215879141	4,796337826	-0,493662174	5,64	5,43	0,228111188	5,41	1,234081524	2,344754896	5,500235707	0,210235707	-0,600233354	0,492951204	-0,107282336
8	5,42	3,7	1,539228	0,34	0,52333752	1,3083438	4,584534316	-0,705465684	5,43	5,16	0,280568812	5,11	1,433706632	2,72404260	5,262251966	-0,027748034	-0,922991654	-0,075586827	-0,998578481
9	5,16	3,46	1,43792375	0,33	0,47451483	1,186287094	4,337936186	-0,952063814	5,16	4,89	0,266262188	4,83	1,286046366	2,443488095	4,994041218	-0,295958782	-1,129421015	-0,723171761	-1,852592776
10	4,89	3,22	1,328975563	0,35	0,46514144	1,162853617	4,085995206	-1,204004794	4,89	4,59	0,2790675	4,53	1,264175775	2,401933973	4,711236152	-0,578763848	-1,400081333	-1,390152549	-2,790233879
11	4,59	2,97	1,2017565	0,33	0,39657964	0,991449113	3,813294857	-1,476705143	4,59	4,27	0,278204	4,25	1,182367	2,2464973	4,403561932	-0,886438068	-1,464078003	-1,991380726	-3,455458729
12	4,27	2,76	1,041626313	0,27	0,28123910	0,703097761	3,546214464	-1,743785536	4,27	4,03	0,195465	4,03	0,78772395	1,496675505	4,124589224	-1,165410776	-1,226051706	-1,744241762	-2,970293468
13	4,03	2,55	0,9555805	0,29	0,27711834	0,692795863	3,324070176	-1,965929824	4,03	3,74	0,221105063	3,78	0,835777136	1,587976559	3,861928402	-1,428071598	-1,361988048	-2,267744223	-3,629732271
14	3,74	2,34	0,83524	0,28	0,2336872	0,584668	3,073928211	-2,216071789	3,74	3,48	0,18420025	3,55	0,653910888	1,242430686	3,588446493	-1,701553507	-1,295666261	-2,114062291	-3,409728552
15	3,48	2,13	0,743149688	0,27	0,20655041	0,501626039	2,840845861	-2,449154139	3,48	3,16	0,208496	3,33	0,694291688	1,319154192	3,301305831	-1,988694169	-1,22855949	-2,623394249	-3,851953739
16	3,16	1,86	0,64036375	0,34	0,21772367	0,544309188	2,549685801	-2,740314199	3,16	2,82	0,19950775	3,05	0,608498638	1,156147411	2,974065231	-2,315934769	-1,491578195	-2,677561988	-4,169140183
17	2,82	1,59	0,532259438	0,29	0,15435523	0,385888092	2,247698939	-3,042301061	2,82	2,52	0,15719625	2,81	0,441721463	0,839270779	2,655703011	-2,634296989	-1,173987752	-2,210888485	-3,384876238
18	2,52	1,36	0,441641	0,23	0,10157743	0,253943575	1,985014763	-3,304985237	2,52	2,27	0,117504688	2,63	0,309037328	0,587170923	2,381832752	-2,908167248	-0,839279766	-1,707591249	-2,546871015
19	2,27	1,18	0,368999063	0,21	0,07748980	0,193724508	1,7709888	-3,51901112	2,27	2,03	0,101265	2,46	0,2491119	0,47331261	2,13845827	-3,15154173	-0,681718713	-1,491664442	-2,173383155
20	2,03	1,02	0,302274063	0,18	0,05440933	0,136023328	1,570626413	-3,719373587	2,03	1,79	0,089961	2,32	0,208709052	0,396548088	1,900273005	-3,389726995	-0,505921574	-1,344189759	-1,850111332
21	1,79	0,86	0,241829063	0,2	0,04836581	0,120914531	1,370568091	-3,919431909	1,79	1,48	0,099469313	2,16	0,214853715	0,408222059	1,629402716	-3,660597284	-0,473916272	-1,494336559	-1,968252831
22	1,48	0,68	0,16956	0,25	0,04239	0,105975	1,122154667	-4,167845333	1,48	1,02	0,11284375	1,97	0,222302188	0,422374156	1,256016384	-4,033983616	-0,441687409	-1,703850426	-2,145537835
23	1,02	0	0,10208925	0,46	0,04696105	0,117402638	0,675648	-4,614352	1,02	0	0,10208925	1,67	0,170489048	0,32392919	0,675648	-4,614352	-0,541737095	-1,494723307	-2,036460402
																	-12,67812643	-1,495739745	-14,17386617

MS	MR	MS/MR
TM	TM	
29,16662105	43,34048722	0,672964771

Tabella 1a.
Modello A. Valori dei momenti ottenuti per il meccanismo di ribaltamento 1

8. L'altezza media del settore del tumulo su di esso gravante;
9. Il volume della porzione di tumulo su di esso gravante;
10. Il peso della porzione di tumulo su di esso gravante;
11. La distanza in orizzontale del baricentro del settore del tumulo su di esso gravante dall'asse centrale della camera;
12. Il braccio del momento che la porzione di tumulo su di esso gravante determina rispetto alla cerniera;
13. Il momento che il peso del blocco induce rispetto alla cerniera;
14. Il momento che la porzione di tumulo su di esso gravante induce rispetto alla cerniera;
15. La somma tra il momento indotto dal peso del blocco e il momento indotto dalla porzione di tumulo su di esso gravante rispetto alla cerniera.

Alla base delle ultime tre colonne sono indicate le somme dei valori dei momenti concorrenti nel meccanismo di ribaltamento in esame, relativi rispettivamente alla somma dei momenti indotti dai blocchi lapidei, alla somma dei momenti indotti dalle porzioni di tumulo e alla somma totale dei momenti.

Il segno positivo dei momenti individua i momenti stabilizzanti e quello negativo i momenti ribaltanti.

Nei tre riquadri in basso sono indicati, per il meccanismo di collasso in esame, la sommatoria dei momenti positivi che identifica il valore del momento stabilizzante, la sommatoria dei momenti negativi, che identifica il momento ribaltante, ed il rapporto tra di essi, che definisce il coefficiente di sicurezza della struttura.

Pertanto, mediante 22 Tabelle si sono ottenuti i valori dei momenti stabilizzanti e ribaltanti ed il rapporto Ms/Mr per ogni singolo meccanismo di ribaltamento dello spicchio meridiano di estensione angolare di 11,25° della cupola del Tesoro di Atreo, secondo il modello geometrico conseguito in base agli studi esposti al capitolo III, denominato modello A.

La Tabella 2a riassume i valori ottenuti dei momenti stabilizzante e ribaltante ed il rapporto tra essi, che esprime la condizione di sicurezza al ribaltamento, di ciascuno dei 22 meccanismi di collasso.

I risultati esposti mostrano valori del coefficiente di sicurezza al di sotto dell'unità per i meccanismi di collasso aventi la cerniera lungo l'intradosso della cupola in corrispondenza dei letti di posa dei corsi 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. Ciò indica pertanto che secondo tale modello lo spicchio meridiano in esame non è in grado di sostenersi autonomamente; la struttura della cupola, schematizzata come composta da spicchi meridiani affiancati senza alcuna interazione tra

N. mecc.	MS	MR	MS/MR
1	29,166621	43,3404872	0,67296477
2	26,3433808	37,4215096	0,7039636
3	22,6227015	31,2231469	0,72454905
4	19,8635235	26,4744291	0,75029091
5	17,6869046	22,7916323	0,77602624
6	16,7391592	19,5819574	0,85482564
7	13,8685317	15,4565578	0,89725875
8	12,4299059	12,9471507	0,96004953
9	10,8030127	10,2430254	1,0546701
10	9,30979093	7,96901093	1,16824924
11	7,68884948	6,05128962	1,27061337
12	5,89036376	4,56430373	1,29052844
13	5,00399913	3,57433318	1,39998116
14	3,91876029	2,63292584	1,48836713
15	3,08906493	1,94354593	1,58939642
16	2,26848545	1,33740651	1,69618245
17	1,73661547	0,78448415	2,2137037
18	1,30394402	0,46812007	2,78549053
19	0,95780808	0,28388068	3,37398119
20	0,69843751	0,18728004	3,72937499
21	0,47569747	0,12108027	3,92877777
22	0,23731686	0,04605386	5,15302876
23	-	-	-

Tabella 2a.
Modello A. Valori del momento stabilizzante, del momento ribaltante e del coefficiente di sicurezza per i 22 meccanismi di collasso esaminati. Sono in evidenza i valori del coefficiente di sicurezza inferiori all'unità

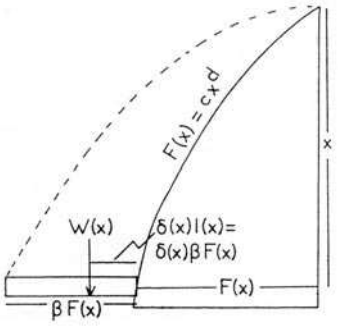
di essi, non è in condizione di equilibrio e si ribalta verso il centro della camera seguendo il meccanismo di collasso che mostra il valore inferiore del rapporto Ms/Mr.

È inoltre da sottolineare che il coefficiente di sicurezza presenta valori bassi per tutti i possibili meccanismi, e generalmente intorno al valore 1.

Se dunque la configurazione geometrica della struttura muraria della cupola proposta può essere considerata ragionevolmente conforme a quella reale, la verifica che gli spicchi meridiani componenti la cupola muraria non sono in condizione di equilibrio sotto carico verticale ognuno per proprio conto, nei modi dei *falsi archi*, impone che il modello di comportamento a *pseudocupola* generalmente attribuito non è coerente con quanto si verifica nella realtà: la cupola è infatti stabile.

2.1.2.
Modello geometrico B (Cavanagh - Laxton)

Poiché la configurazione del modello geometrico della *tholos*, su cui è stata condotta l'analisi di stabilità secondo il principio della *falsa cupola*, deriva dalle ipotesi esposte al capitolo III, per completezza si applica la stessa analisi su un ulteriore modello geometrico della struttura muraria della cupola, che è presente in letteratura. Cavanagh e Laxton [1981], riferendosi alla sezione di rilievo della cupola crollata della *tholos* circolare di Thorikos, ipo-



8.
Modello della struttura muraria della cupola di Cavanagh e Laxton. Funzioni e costanti applicate al modello

tizzano che lo spessore dei blocchi lapidei della cupola di una *tholos* generica, identificata, in accordo con quanto proposto nel presente studio, nella parte della struttura emergente dal pozzo di impianto [19], corrisponda per ogni corso orizzontale ad 1/2 della misura del raggio della camera alla quota del corso in oggetto [20], fig. 8.

Tale configurazione, associata a un'altezza costante del tumulo dai fianchi all'apice, definisce il modello di *tholos* il cui esame induce gli autori a sostenere la validità del modello a *falsa cupola* e a intenderlo quale principio statico fondante del comportamento strutturale delle cupole murarie delle *tholoi* micenee.

Va sottolineato che lo schema geometrico della cupola muraria delle *tholoi* proposto da Cavanagh – Laxton [1981] applicato allo specifico del Tesoro di Atreo prevede che lo spessore dell'ultimo corso sia di circa 38 cm, condizione che entra in contraddizione con la misura di 90 cm indicata nel rilievo dell'ultimo corso in Blouet [1833] [21].

Prendendo in considerazione la parte emergente dal pozzo di uno spicchio meridiano di estensione angolare 11,25° del modello geometrico di Cavanagh – Laxton [1981] applicato alle misure geometriche del Tesoro di Atreo, si procede, con le stesse modalità della precedente analisi, alla valutazione delle forze peso dei blocchi lapidei e del tumulo gravante sui blocchi. Come per il modello geometrico precedente, per la pietra di conglomerato si adotta un peso specifico di 2,5 t/m³, e per il tumulo un peso specifico di 1,9 t/m³.

La Tavola 1b mostra la geometria del profilo all'estradosso del nuovo modello dello spicchio meridiano, denominato B, e indica, nei baricentri dei blocchi lapidei e delle porzioni di tumulo, l'intensità delle forze peso.

Considerando i corsi orizzontali dello spicchio composti da un unico blocco lapideo, la definizione dei possibili meccanismi di collasso è individuata, come per il modello A,

[19] Cavanagh – Laxton [1981, p. 120, punto (i)].

[20] Cavanagh – Laxton [1981, p. 120, punto (v)].
L'espressione $l\,(\Delta_n) = \beta F(\Delta_n)$ definisce la misura dello spessore della muratura della camera ($l\,(\Delta_n)$ valutata alla profondità Δ_n dall'apice della cupola) funzione della misura del raggio della camera ($F(\Delta_n)$) per una costante β. La costante positiva β viene supposta pari ad 1/2 in base ai valori dimensionali riscontrati nella *tholos* circolare di Thorikos.

[21] Si espone inoltre quanto segue per un esame critico delle ipotesi sulla geometria della cupola proposta da Cavanagh – Laxton [1981]. Gli autori portano a sostegno della ragionevolezza delle ipotesi geometriche adottate la figura e lo spessore della porzione di muratura della cupola della *tholos* circolare di Thorikos rilevato nella sezione di rilievo denominata A. Tale sezione rileva la parte della cupola a ridosso della zona ove l'altezza del pozzo di impianto si presenta eccezionalmente esigua rispetto all'ipotesi corrente di altezza coincidente con quella dell'architrave del vano di accesso. Per la particolare morfologia dei luoghi, infatti, la *tholos* circolare di Thorikos ha un'altezza delle pareti del pozzo di impianto estremamente variabile. La condizione specifica rilevata nella sezione A costituisce in realtà dunque una condizione speciale, e pertanto, si ritiene, non appropriata a definire la configurazione della cupola in una condizione normale.

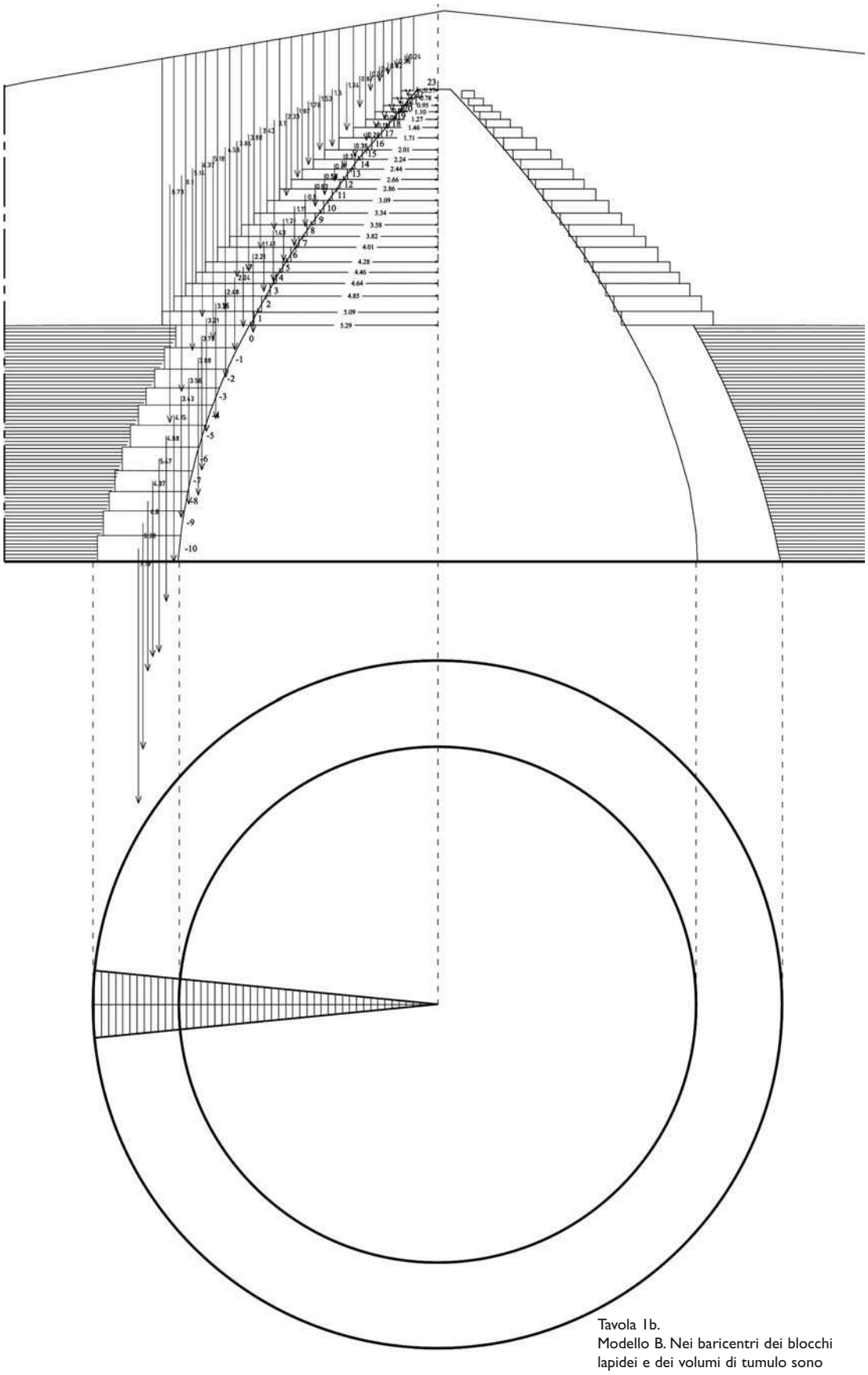


Tavola 1b.
Modello B. Nei baricentri dei blocchi lapidei e dei volumi di tumulo sono applicate le rispettive forze peso in opportuna scala delle forze

N.	AREA PIANTA CORSO (setti			cateno	circ/ohlveren.	PESO G bl.	Xo		braccio	AREA PIANTA TUMULO (sett.			ditro	PESO G		Xo		braccio	Mbl.=Gi . bi	MTu.=Gi . bi	Mbl.+MTu.
	R	r	Mq	M	Mc	T	M	R	M	r	Mq	M	Mc	T	M	T	M	TM	TM	TM	TM
1	7,78	5,19	3,296244438	0,39	1,28535331	3,213838327	6,529144524	7,78	1,239144524	7,45	0,493166438	7,18	3,540935021	6,72777654	7,5674481	2,2774481	3,982410164	15,3221619	19,30457206
2	7,45	4,97	3,022407	0,43	1,29963501	3,249087525	6,252261333	7,45	0,962261333	7,12	0,471794813	6,8	3,208204725	6,095588978	7,239613738	1,949613738	3,126471294	11,88404401	15,0105153
3	7,12	4,75	2,760442688	0,36	0,99375936	2,484398419	5,975378143	7,12	0,685378143	6,83	0,396964688	6,81	2,703329522	5,136326092	6,931358348	1,641358348	1,702752375	8,43055171	10,13330409
4	6,83	4,55	2,5459905	0,32	0,81471696	2,0367924	5,729230313	6,83	0,439230313	6,56	0,354751313	6,49	2,302336018	4,374438434	6,653053586	1,363053586	0,894620963	5,962593996	6,857214959
5	6,56	4,37	2,348788688	0,29	0,68114871	1,702871798	5,502689522	6,56	0,212689522	6,21	0,438569688	6,22	2,727903456	5,183016567	6,345724567	1,055724567	0,36218299	5,471837921	5,83402091
6	6,21	4,14	2,102279063	0,42	0,88295720	2,207393016	5,2104384	-0,0795616	6,21	5,87	0,403019	5,98	2,41005362	4,579101878	6,002928715	0,712928715	-0,17562372	3,264573219	3,08894499
7	5,87	3,91	1,88009385	0,3	0,56428155	1,410703875	4,923751951	-0,366248049	5,87	5,55	0,358588	5,63	2,01885044	3,835815836	5,67494089	0,38494089	-0,51666754	1,476562361	0,95989481
8	5,55	3,7	1,679164063	0,34	0,57091578	1,427289453	4,656672	-0,633328	5,55	5,19	0,3793905	5,38	2,04112089	3,878129691	5,337630302	0,047630302	-0,90394237	0,184716487	-0,71922588
9	5,19	3,46	1,468391563	0,33	0,48456921	1,211423039	4,3546176	-0,9353824	5,19	4,83	0,3539565	5,1	1,80517815	3,429838485	4,980077892	-0,309922108	-1,13314379	-1,062982773	-2,19612656
10	4,83	3,22	1,271749063	0,35	0,44511217	1,11278043	4,0525632	-1,2374368	4,83	4,46	0,337285063	4,83	1,629086852	3,095265019	4,617712327	-0,672287673	-1,37699545	-2,080908516	-3,45790397
11	4,46	2,97	1,086312438	0,33	0,35848310	0,896207761	3,740705637	-1,549294363	4,46	4,14	0,27004	4,55	1,226682	2,3344958	4,274451795	-1,015548205	-1,38848963	-2,370793018	-3,75928265
12	4,14	2,76	0,93434625	0,27	0,25227348	0,630683719	3,4736256	-1,8163744	4,14	3,83	0,242437438	4,28	1,037632233	1,971501242	3,961492758	-1,328507242	-1,14555776	-2,619153678	-3,76471143
13	3,83	2,55	0,801328	0,29	0,23238512	0,5809628	3,212110495	-2,077889505	3,83	3,51	0,230476	4,06	0,93573256	1,777891864	3,648822278	-1,641177722	-1,20717650	-2,917836519	-4,12501302
14	3,51	2,34	0,671616563	0,28	0,18805263	0,470131594	2,9450304	-2,3449696	3,51	3,19	0,21038	3,82	0,8036516	1,52693804	3,331090961	-1,958909039	-1,10244429	-2,991132728	-4,09357702
15	3,19	2,13	0,5533465	0,27	0,14940355	0,373508888	2,677951218	-2,612048782	3,19	2,79	0,234715	3,59	0,84262685	1,600991015	2,975294769	-2,314705231	-0,97562343	-3,705822277	-4,68144571
16	2,79	1,86	0,424341563	0,34	0,14427613	0,360690328	2,3409216	-2,9490784	2,79	2,38	0,207995563	3,39	0,705104957	1,339899418	2,573840402	-2,716159598	-1,06370405	-3,638837432	-4,70254148
17	2,38	1,59	0,307749438	0,29	0,08924733	0,223118342	1,998328987	-3,291671013	2,38	2,04	0,14746225	3,11	0,458607598	0,871354435	2,200187077	-3,089812923	-0,73443217	-2,692322195	-3,42675437
18	2,04	1,36	0,226865	0,23	0,05217895	0,130447375	1,7116416	-3,5783584	2,04	1,77	0,100941188	2,89	0,291720032	0,554268061	1,895976567	-3,394023433	-0,46678746	-1,881198786	-2,34798624
19	1,77	1,18	0,170786563	0,21	0,03586517	0,089662945	1,4851008	-3,8048992	1,77	1,53	0,077715	2,71	0,210607655	0,400154535	1,642330473	-3,647669527	-0,34115846	-1,459631504	-1,80078997
20	1,53	1,02	0,127611563	0,18	0,02297008	0,057425203	1,2837312	-4,0062688	1,53	1,29	0,066411	2,54	0,168683947	0,320499486	1,404358468	-3,885641532	-0,2300608	-1,245346114	-1,47540691
21	1,29	0,86	0,090716563	0,2	0,01814331	0,045358281	1,0823616	-4,2076384	1,29	1,04	0,057157813	2,4	0,137178755	0,260639625	1,16198606	-4,12801394	-0,19085124	-1,075924005	-1,26677525
22	1,04	0,69	0,059414688	0,25	0,01485367	0,03713418	0,871190012	-4,418809988	1,04	0,68	0,060759	2,08	0,126378724	0,240119568	0,866973767	-4,423026233	-0,16408888	-1,062055148	-1,22614403
																	-3,048309817	21,19309691	18,14478709

MS	MR	MS/MR
TM	TM	
61,18847164	43,04368455	1,421543538

Tabella 1b.
Modello B. Valori dei momenti ottenuti per il meccanismo di ribaltamento 1

N. mecc.	MS	MR	MS/MR
1	61,1884716	43,0436845	1,42154354
2	50,6848645	37,1358204	1,36485108
3	42,9869205	30,9094544	1,39073695
4	36,7546571	26,2820776	1,39846848
5	30,9607209	22,482504	1,37710288
6	24,125206	19,4056048	1,24320815
7	19,796251	15,1662739	1,30528112
8	15,484543	12,5927699	1,22963757
9	11,9285297	9,89013091	1,20610433
10	9,07267675	7,66224544	1,18407545
11	6,67280406	5,73668628	1,16318093
12	5,04149306	4,26510885	1,18203151
13	3,74897989	3,27899449	1,14333217
14	2,68751973	2,33783799	1,14957484
15	1,82442623	1,69180158	1,07839256
16	1,03785322	1,11197605	0,93334134
17	0,59475318	0,57455828	1,03514857
18	0,34968485	0,2870208	1,2183258
19	0,21212664	0,14824763	1,43089389
20	0,12345351	0,06445083	1,91546813
21	0,06125566	0,02286277	2,67927591
22	-	-	-

dai letti di posa dei corsi. Pertanto, con l'ausilio del foglio di calcolo aggiornato con i nuovi dati geometrici della nuova sezione della cupola muraria, si procede per via analitica alla valutazione dei momenti stabilizzante e ribaltante e del relativo coefficiente di sicurezza per i 22 possibili meccanismi di ribaltamento.

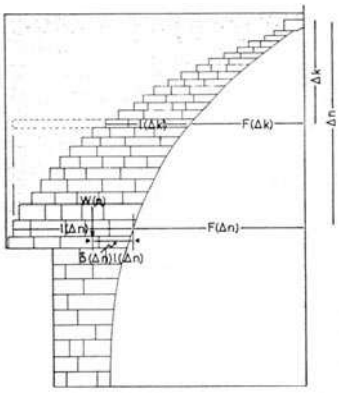
Come per il modello A, mediante 22 Tabelle di calcolo, ciascuna riferita ad uno dei possibili 22 meccanismi di collasso al ribaltamento dello spicchio meridiano di estensione angolare di 11,25° del modello B, si sono ottenuti i valori del momento stabilizzante, ribaltante e del rapporto Ms/Mr[22]. La Tabella 1b si riferisce al primo meccanismo di collasso che presenta l'incernieramento posto all'intradosso in corrispondenza del letto di posa del primo corso emergente dal pozzo.

La schematizzazione della struttura muraria della cupola costruita sulle ipotesi di Cavanagh – Laxton [1981], fornisce, nell'analoga analisi dell'equilibrio di uno spicchio meridiano di estensione angolare di 11,25° secondo i 22 possibili meccanismi di collasso per ribaltamento individuati, i valori dei momenti stabilizzante e ribaltante ed il rapporto tra di essi riportati nella Tabella 2b.

L'esame della condizione di equilibrio al ribaltamento degli spicchi meridiani della cupola muraria del Tesoro di Atreo, anche secondo la configurazione delle parti nascoste della struttura proposta da Cavanagh – Laxton [1981], mostra una condizione di mancanza di equilibrio. In tal caso, la struttura è instabile per il meccanismo di ribaltamento con cerniera in corrispondenza del letto di posa del corso 16: il rapporto

Tabella 2b.
Modello B. Valori del momento stabilizzante, del momento ribaltante e del coefficiente di sicurezza per i 22 meccanismi di collasso esaminati. Il valore del coefficiente di sicurezza evidenziato è inferiore all'unità

[22] Per la consultazione delle 22 Tabelle di calcolo si rimanda a Como M.T [2005 (2), p. 134ss].



9.
Modello della struttura muraria della cupola di Cavanagh-Laxton con la schematizzazione del tumulo superiore

tra il momento stabilizzante e il momento ribaltante è inferiore ad 1, inducendo il ribaltamento verso il centro della camera della porzione di muratura dello spicchio al di sopra del corso 15 e della parte di tumulo all'estradosso.

Secondo la geometria del nuovo modello, il crollo interessa la parte alta della struttura, mentre per il precedente la totalità, essendo la condizione di instabilità relativa ai meccanismi con cerniera in corrispondenza dei primi corsi. D'altra parte, anche per tale geometria dell'estradosso, come sottolineato per la precedente, generalmente il coefficiente di sicurezza, per tutti i meccanismi è di poco superiore all'unità, implicando dunque, trascurando la presenza del valore del coefficiente di sicurezza inferiore ad 1, una condizione di generale precarietà dell'equilibrio.

2.2.
Analisi critica dei risultati

Dall'esame delle Tabelle 1a e 1b (con riferimento particolare ai dati dei momenti) si osserva che, per entrambi i modelli geometrici, i valori dei momenti indotti dai blocchi lapidei della struttura dello spicchio meridiano sono prevalentemente negativi (momenti ribaltanti), mentre quelli prodotti dal carico del tumulo risultano preminentemente positivi (momenti stabilizzanti). Inoltre, nello specifico del tumulo, sono positivi i valori dei momenti forniti dalle porzioni di tumulo gravanti sulla coda dei primi corsi, mentre, proseguendo dai fianchi all'apice il carico di tumulo relativo tende, per i tutti i possibili meccanismi considerati, a produrre momenti negativi.

Tale condizione evidenzia, supponendo di aver trovato tra le possibili geometrie dell'estradosso della cupola quella capace di ottenere una sommatoria positiva dei momenti e dunque una condizione di equilibrio, che, generalmente, secondo il modello a *falsa cupola* applicato alle *tholoi* le porzioni di tumulo gravanti sulle imposte della cupola esercitano un'influenza benefica alla stabilità.

La condizione di mancanza di equilibrio rilevata anche per il modello geometrico B basato sulle ipotesi di Cavanagh – Laxton [1981] contrasta con evidenza i risultati ottenuti dagli studiosi.

Trascurando il diverso approccio alle operazioni di calcolo delle analisi, nel confrontare il modello ideale di *tholos* cui fanno riferimento nello studio con il modello geometrico B, che adatta lo spessore della cupola muraria proposto dagli studiosi ai dati di rilievo del Tesoro di Atreo, la differenza maggiormente rilevante nella valutazione delle forze peso in gioco è relativa al tumulo. Gli autori schematizzano il tumulo come avente quota superiore costante, rappresentata geometricamente in sezione con una linea retta, e coincidente con la quota dell'apice della cupola, fig. 9.

Nel modello B, in base alle sezioni di rilievo e dei saggi effettuati da Wace intorno alla *tholos* [23], il volume del tumulo non corrisponde alla schematizzazione degli studiosi ma presenta una potenza dello strato in corrispondenza dell'apice di circa 2 m e un graduale abbassamento della quota all'estradosso procedendo dall'apice ai fianchi della cupola nella sezione trasversale esaminata.

Alla luce delle osservazioni relative al beneficio alla stabilità apportato dal tumulo, e in particolare tanto maggiore risulta la potenza dello strato ai fianchi dello spicchio della cupola, è evidente che il profilo dell'estradosso del tumulo, come ricavato dall'esame del caso reale, induce una condizione più critica rispetto allo schema di superficie orizzontale con quota coincidente con l'apice della cupola, tanto che, a sostanziale equivalenza del modello geometrico, l'equilibrio non risulta più possibile.

Una così netta dipendenza delle condizioni di sicurezza a seconda del cambiamento del profilo del tumulo superiore non solo induce a dubitare del coefficiente di sicurezza valido per il modello esaminato da Cavanagh e Laxton, coefficiente che consente di stabilire se il *corbelling* [24] sia realmente il principio statico di tali architetture, ma denota una forte dipendenza del sistema in relazione alle eventuali possibili variazioni delle condizioni al contorno.

Tali considerazioni, pertanto, anziché condurre ad un ulteriore affinamento del modello geometrico della cupola, con particolare riferimento alla configurazione del profilo dell'estradosso della cupola, in modo da ritrovare un modello rispondente ad una condizione di equilibrio, inducono invece dubbi sostanziali sulla validità dello stesso approccio alla statica della costruzione basato sul modello statico della *falsa cupola*.

Inoltre, le osservazioni sulla definizione dei possibili meccanismi di collasso di un *falso arco*, esposte al capitolo IV, che mostrano la necessità di individuare, all'interno della reale apparecchiatura muraria del caso esaminato, l'insieme dei blocchi che per le discontinuità determinate dai giunti verticali è capace di svincolarsi nella rotazione, pongono ulteriori interrogativi generali sul modello statico da adottare nell'analisi. I casi infatti di considerevole spessore dei corsi orizzontali dello spicchio meridiano, superiore ai 2,5 m per il modello B e che raggiunge 1,90 m per il modello A, determinano una reale difficoltà nel supporre che ogni corso sia composto da un'unica pietra. Tale osservazione evidenzia quindi, nella ricerca dei possibili meccanismi di collasso, la necessità di individuare la parte di muratura svincolabile per

[23] Wace [1956, 120, fig. 7].

[24] Utilizzando il termine inglese per la disposizione in progressivo aggetto degli elementi lapidei capace di rispondere ad una condizione di equilibrio.

la presenza dei giunti verticali. Pertanto, ciò imporrebbe per entrambi i modelli analizzati la diminuzione della parte di muratura e di tumulo concorrente all'esercizio del momento stabilizzante, precisando quindi per difetto, rispetto alla muratura della cupola, il volume murario che con il suo peso realmente si oppone al ribaltamento.

L'osservazione esposta induce a riflettere circa la reale influenza che assume la definizione della configurazione della cupola all'estradosso nella ricerca dei principi statici sulla stabilità delle *tholoi* micenee. Qualunque sia infatti il perfezionamento della geometria del profilo all'estradosso da adottare, per ricercare quello specifico, il cui spicchio meridiano sia in equilibrio come un *falso arco* con un certo grado di sicurezza, la condizione reale di frammentazione per blocchi lapidei della muratura dei corsi orizzontali imporrebbe in ogni caso di diminuire l'estensione del volume che si oppone al ribaltamento, rendendo quindi, nella sostanza, poco significativa la definizione del profilo della cupola muraria all'estradosso.

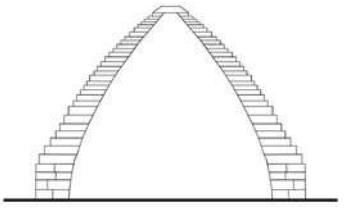
A tali osservazioni va peraltro aggiunto che, confrontando i valori del rapporto Ms/Mr, coefficienti di sicurezza ottenuti per i due modelli geometrici, con i risultati conseguiti dall'analisi dell'equilibrio al ribaltamento dei piedritti in aggetto componenti il *falso arco* della parte anteriore del *triangolo di scarico* esposti al capitolo IV, è evidente il diverso ordine di grandezza dei valori ottenuti. Per il *falso arco* esaminato tali valori variano, per i possibili meccanismi di collasso, da un massimo di 95,8 ad un minimo di 2,8, mentre per gli spicchi meridiani di entrambi i due modelli geometrici assumono un valore medio di poco superiore all'unità.

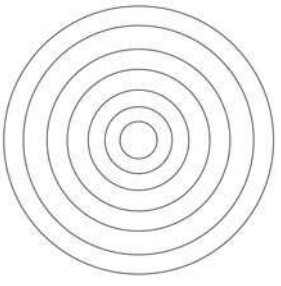
D'altra parte, confrontando la geometria dei profili dei falsi archi con l'intradosso della cupola della *tholos*, è evidente che il profilo interno degli spicchi meridiani acquista maggiore aggetto rispetto ai comuni piedritti dei *falsi archi*.

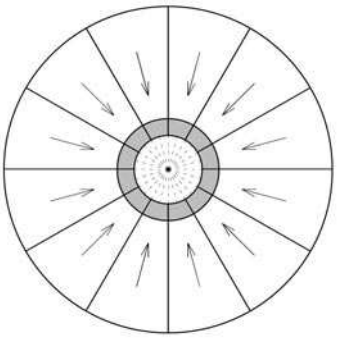
Alla luce delle osservazioni critiche esposte, l'affermazione che, se per entrambi i modelli geometrici non è verificato l'equilibrio, nessuna delle due corrisponde alla reale configurazione della cupola muraria, e occorre dunque ricercare la configurazione dell'estradosso della cupola in condizione di equilibrio secondo il modello di *falsa cupola*, perde concretezza e si accrescono invece elementi che invalidano l'attribuzione del modello di *falsa cupola*.

Dalla verificata incapacità dello spicchio meridiano di sostenersi autonomamente e dalle riflessioni esposte si evince per tanto che l'ipotesi di comportamento a *pseudocupola*, generalmente attribuito, non corrisponde al comportamento reale della struttura. Ferme restando le ipotesi formulate sulla configurazione geometrica della cupola all'estradosso, si prendono di conseguenza in esame, per il caso specifico del Tesoro di Atreo, gli ulteriori fattori, in riferimento

alle osservazioni esposte al paragrafo 1, che possano consentire la stabilità della cupola, rimuovendo quindi l'ipotesi iniziale di comportamento a *falsa cupola*.







10.
Nella 'tholos' il 'falso arco' si sviluppa spazialmente intorno ad un asse di rivoluzione
11.
Azione di compressione radiale degli anelli paralleli indotta dagli spicchi meridiani della 'tholos'

2.3.
Esistenza di equilibrio ammmissibile secondo il modello a cupola

L'esame dell'equilibrio della cupola muraria del Tesoro di Atreo secondo il modello di comportamento a *falsa cupola* ha mostrato che lo spicchio meridiano singolo della *tholos* non è in grado di sostenersi autonomamente mediante il trasferimento di sole azioni verticali. Pertanto le osservazioni esposte al paragrafo 1 sulle potenzialità di innescare un comportamento unitario della cupola muraria di una struttura cosiddetta a *falsa cupola*, determinate dalla sua forma geometrica, trovano una concreta verifica. Se infatti la struttura è comunque in equilibrio, in congruenza con la condizione reale, il trasferimento dei carichi verticali può avvenire solo mediante l'esistenza di azioni orizzontali che inducono la compartecipazione di tutti gli spicchi meridiani alla statica della costruzione.

L'attribuzione di un comportamento a *falsa cupola* si dimostra pertanto improprio e la struttura si sostiene grazie alla possibilità di trasferire azioni orizzontali attraverso gli anelli lapidei costituenti i corsi orizzontali della struttura muraria della cupola, implicando un comportamento unitario della struttura.

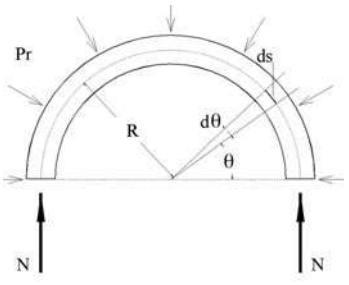
Come anticipato al paragrafo 1, da un'analisi della geometria si riconosce che la cupola muraria della *tholos* costituisce un sistema strutturale molto più avanzato del *falso arco*: nella *tholos* la tecnica dell'aggetto si estende ad un sistema spaziale chiuso costruito intorno ad un asse di rivoluzione.

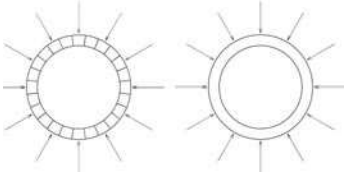
Tale condizione di forma induce, nel caso di perdita di equilibrio e ribaltamento del singolo spicchio verso il centro della camera, una risposta diversa rispetto a quella esaminata per il sistema piano del *falso arco*.

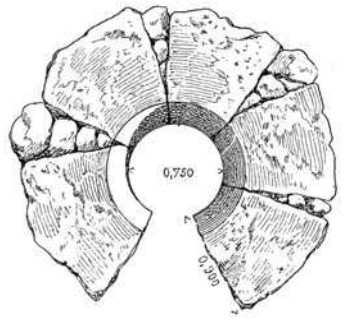
Se per i *falsi archi* l'eventuale contrasto al ribaltamento esercitato dalla metà opposta è dato unicamente dalla resistenza allo slittamento del corso lapideo sul giunto orizzontale, nella *tholos*, invece, il sistema spaziale chiuso induce gli spicchi meridiani componenti a contrastare insieme il ribaltamento di un singolo spicchio.

Nel momento in cui ogni spicchio è impossibilitato a sostenersi autonomamente, ciascuno di essi tende ad appoggiarsi al centro sugli altri impegnando i cerchi paralleli dei corsi orizzontali ad anello, fig. 11. Tale condizione sottopone i paralleli della struttura muraria della cupola ad un'azione di compressione radiale.

Come è noto, la compressione radiale su di una







12.
Equilibrio di un semianello sottoposto a compressione radiale
13.
Nella condizione di un'adeguata fattura dei corsi orizzontali la compressione radiale indotta dagli spicchi meridiani conforma un anello lapideo orizzontale resistente
14.
Sistema di "inzeppatura" dei giunti verticali tra i blocchi componenti gli anelli lapidei orizzontali. (Da Blouet [1833, pl. 66, fig. 4]). Le quote sono indicate in metri

forma circolare ad anello induce uno sforzo normale circumferenziale facilmente ricavabile dal valore dell'intensità della pressione e dalla misura del raggio di circonferenza dell'anello. Se infatti R è il raggio medio dell'anello e p_r il carico radiale esercitato dagli spicchi, si produce una forza di compressione nell'anello pari a

$$N = P_r.R \qquad (1)$$

Dall'equilibrio alla traslazione verticale di un generico semianello, si ha infatti

$$2\int_0^{\pi/2} p_r.\sin\theta.ds = 2N$$

pertanto,

$$P_r = N/R \qquad (2)$$

La capacità dell'anello orizzontale lapideo ad assorbire la compressione radiale è data da un'adeguata apparecchiatura muraria dei blocchi componenti il corso orizzontale, in grado di assicurare il contrasto reciproco tra i blocchi adiacenti e conferire unità all'anello lapideo orizzontale, fig. 13.

La buona fattura dei corsi anulari, costituenti i paralleli della cupola, risulta quindi di estrema importanza per realizzare un anello orizzontale resistente alla compressione radiale esercitata dagli spicchi meridiani.

Tale accurata fattura abilita i paralleli della struttura della cupola ad assorbire la compressione radiale esercitata su di essi dagli spicchi meridiani.

La fattura raffinata dei corsi orizzontali della cupola, è stata nel passato esaminata con interesse, inducendo Donaldson [25] a commentare: *in its horizontal position at least, the arch was clearly understood by the architect who designed these chambers, and was depended upon as the essential principle of construction… Each stone was found to be worked fair and concentric to a depth of three inches from the inner face of the dome; the remaining part of the joint was less accurate and often rough, but the deficiency was always supplied by small wedge-like stones, driven into the interstices with great force*. Tali considerazioni unitamente all'analisi del disegno di rilievo dell'ultimo corso orizzontale del Tesoro di Atreo [26], fig. 14, sottolineano l'attenzione posta dai costruttori nella realizzazione degli anelli murari orizzontali in modo da conferire ad essi la resistenza radiale richiesta.

Il rilievo dell'ultimo corso del Tesoro di Atreo mostra efficacemente la cura posta nell'apparecchiare i blocchi lapidei dell'anello orizzontale e chiarifica le osservazioni di Donaldson.

Nel caso del Tesoro di Atreo, dunque, nelle sezioni orizzontali della cupola sono presenti ad ogni quota degli anelli murari che costituiscono vincolo al ribaltamento di ogni

[25] Stuart – Revett, 1830.
[26] Blouet [1833, pl. 66, fig. 4].

spicchio. Pertanto, per la forma chiusa della *tholos*, ognuno degli spicchi è stabile per mutua azione con gli altri spicchi, chiamando in causa la resistenza a compressione degli anelli. La disposizione delle pietre e la cura nell'inzeppare i giunti verticali rendono il sistema strutturale in grado di assorbire le azioni spingenti esercitate dagli spicchi meridiani della *tholos*. La verifica della manifestazione di tale comportamento mette in evidenza come per la cupola della *tholos* micenea non abbia senso il modello di funzionamento della struttura in aggetto: nelle sezioni orizzontali gli anelli murari ad ogni quota costituiscono vincolo al ribaltamento di ogni spicchio.

Se quindi l'equilibrio della struttura non è possibile nel contesto del modello di comportamento a *falsa cupola*, secondo il sistema del progressivo aggetto, la compartecipazione degli anelli murari orizzontali alla statica dell'insieme conforma un sistema resistente spaziale unico capace, nell'impedire per forma la perdita di equilibrio della struttura, di trovare una migliore condizione di equilibrio. Si mobilita per tanto l'effettivo comportamento statico di una *vera* cupola.

2.3.1.
Verifica dello stato di sollecitazione secondo il modello cupola/guscio

Secondo il comportamento di una *vera* cupola gli anelli orizzontali, compressi in ogni sezione orizzontale esercitano delle azioni orizzontali tali da riportare la risultante delle azioni soprastanti alla generica sezione dello spicchio, lungo l'asse mediano dello spicchio stesso. Ogni blocco lapideo, componente lo spicchio meridiano, trasmette al blocco sottostante una risultante obliqua, somma del carico verticale e di una forza orizzontale. Pertanto, il sistema statico dello spicchio meridiano è equilibrato attraverso la trasmissione di spinte orizzontali agenti su ogni parallelo della struttura muraria della cupola.

La compartecipazione degli anelli orizzontali alla statica della struttura implica infatti che le deformazioni di contrazione, di carattere assialsimmetrico, data la simmetria assiale della *tholos*, che necessariamente devono subire i vari anelli sotto i carichi radiali compressivi (spinte trasmesse dai singoli spicchi ad ogni quota), risultano molto piccole e quindi, di conseguenza, molto piccole sono le variazioni di curvatura che subiscono gli spicchi meridiani. Le sollecitazioni flessionali che pertanto si instaurano negli spicchi sono piccolissime e dunque trascurabili [27]. Pertanto, l'azione assiale che si sviluppa lungo gli spicchi e che via via trasferisce all'imposta il peso degli elementi sovrastanti deve necessariamente essere disposta lungo l'asse del meridiano della superficie media della *tholos*, condizione che definisce un equilibrio membranale della struttura. Uno scostamento infatti del-

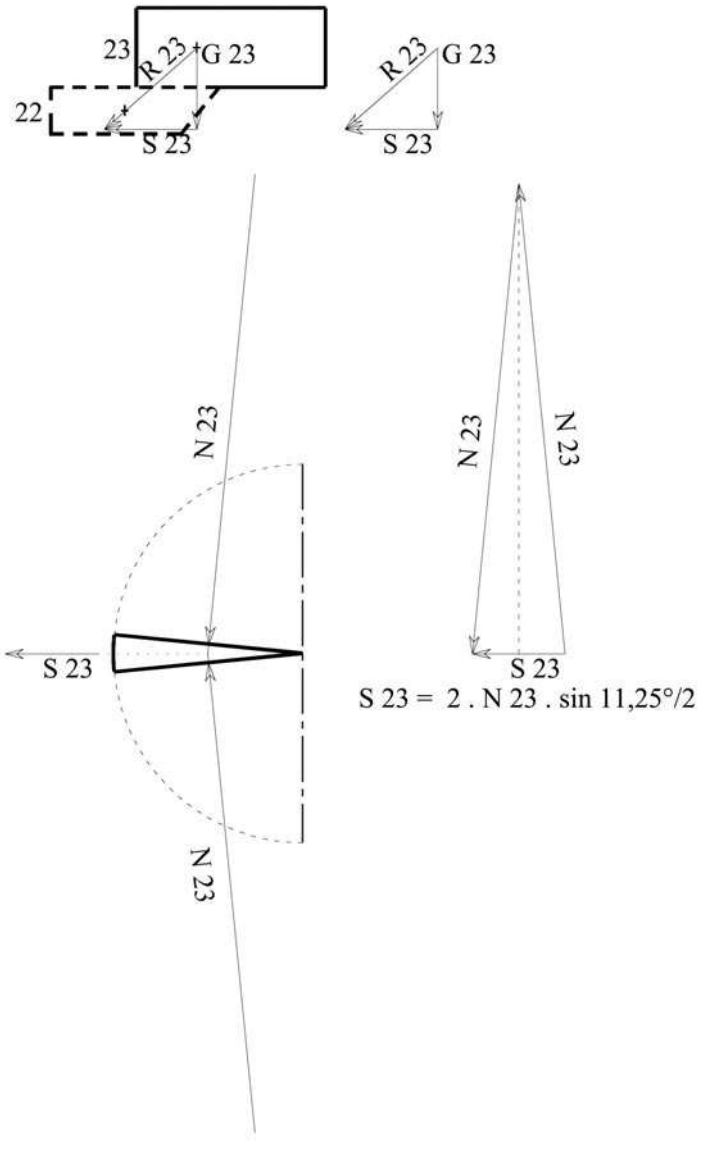
lo sforzo assiale agente dal baricentro della sezione meridiana implica necessariamente la presenza di un'azione flettente che, come si è detto, risulta del tutto trascurabile[28]. Ciò implica che, procedendo dall'apice via via a scendere, le azioni di compressione presenti nei paralleli comportano la presenza di un'azione orizzontale che combinata con il peso del singolo concio produce una risultante tangente alla linea meridiana passante per i baricentri dei blocchi lapidei dello spicchio. Pertanto, per l'equilibrio, è possibile determinare graficamente, per lo spicchio meridiano di estensione angolare di 11,25° del modello geometrico proposto, l'intensità delle azioni che ciascun blocco lapideo dello spicchio meridiano trasmette rispettivamente al blocco sottostante e al corso orizzontale cui appartiene, e di conseguenza il carico di compressione radiale esercitato sul corrispondente corso anulare secondo la (2).

Se infatti le successive risultanti del peso dei blocchi e del carico relativo del tumulo devono passare per i baricentri dei blocchi stessi, ciò comporta la presenza di un'azione orizzontale di intensità tale che, combinata con il peso del generico blocco e con il peso su di esso gravante, produce una risultante passante sia per il baricentro del blocco considerato sia per quello sottostante, ed è dunque univocamente determinata.

Le figure 15 e 16 mostrano il procedimento di statica grafica utilizzato per la determinazione delle risultanti oblique (N_φ) e delle azioni orizzontali (N_ϑ) esercitate rispettivamente da ogni blocco lapideo componente lo spicchio meridiano in esame sul blocco sottostante e dal relativo corso lapideo. La condizione di equilibrio globale deve infatti essere verificata anche per il blocco singolo, e dunque il poligono funicolare delle forze agenti sul singolo blocco, composto dall'azione indotta su di esso dal blocco superiore, dal peso proprio del blocco e dall'azione che il blocco stesso trasmette al sottostante, deve essere chiuso. Tale condizione associata al vincolo, su esposto, che impone il passaggio delle successive risultanti per i baricentri dei blocchi, definisce geometricamente intensità e direzione di tutte le forze agenti.

Partendo dall'ultimo blocco dello spicchio meridiano in esame, costituente parte della lastra di chiave, viene posta nel baricentro l'azione verticale data dalla somma della forza peso del blocco e della porzione del tumulo su di esso gravante, indicata in figura 15 con la lettera G. Imponendo all'azione che tale blocco trasmette al sottostante di passare necessariamente per il baricentro del blocco stesso e per quello del blocco sottostante, la direzione di tale azione risulta univocamente determinata. Chiudendo, per l'equilibrio del singolo blocco, il poligono funicolare alla base della forza

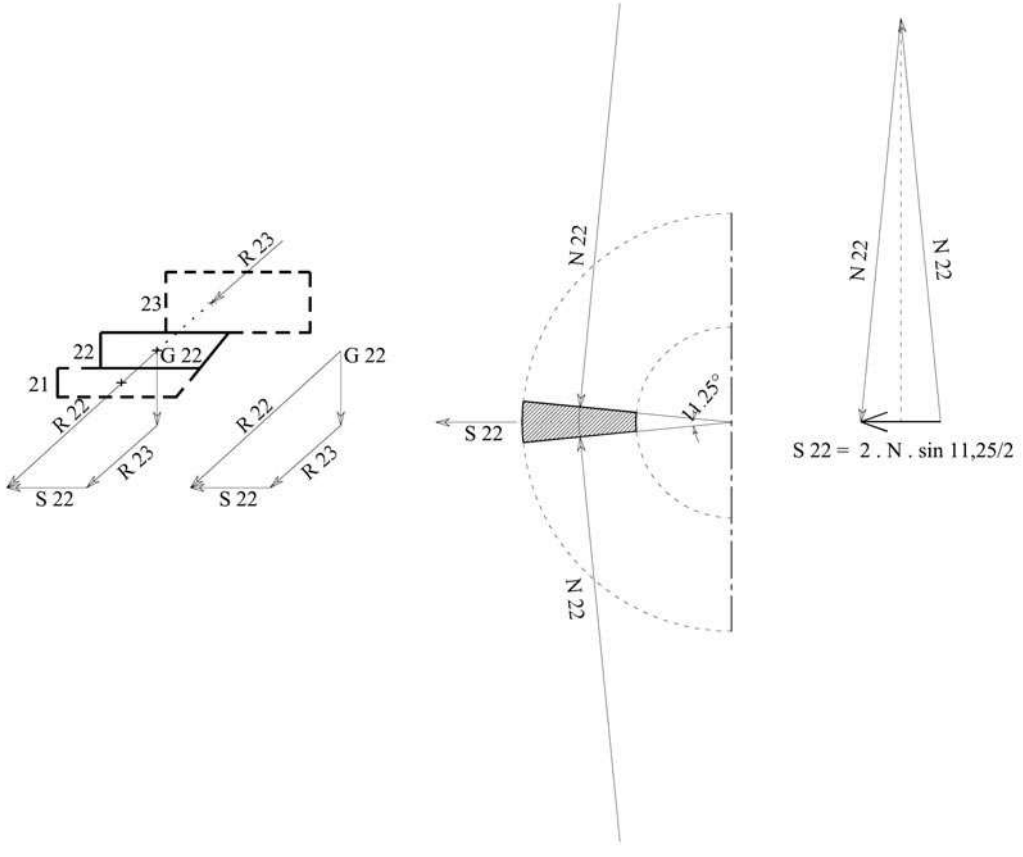
[27] Belluzzi [1955, vol. 3, p. 250].
[28] Belluzzi [1955, vol. 3, p. 250].



peso di intensità conosciuta, con una retta orizzontale, si determina l'intensità dell'azione orizzontale trasmessa al blocco 23 dal corso orizzontale cui appartiene.

Procedendo con le stesse modalità al corso successivo sottostante, accade che le forze da rappresentare nel baricentro del blocco sono due: la risultante delle azioni del blocco sovrastante e la forza peso del blocco stesso. Imponendo che l'azione che il blocco trasmette al sottostante passi per il baricentro del blocco stesso e per il baricentro del blocco sottostante, la direzione viene univocamente determinata. Tracciando una retta orizzontale dal vettore somma del peso del blocco con la risultante proveniente dal corso superiore si determinano le intensità della risultante che il blocco in esame induce al blocco sottostante e dell'azione orizzontale del corso cui appartiene sul blocco lapideo, come descritto in figura 16.

15.
Tesoro di Atreo, corso orizzontale 23, corrispondente al blocco di chiave. Modalità di determinazione grafica dell'azione orizzontale che il corso 23 induce al blocco lapideo del corso corrispondente dello spicchio meridiano di 11,25° di estensione angolare



16.
Tesoro di Atreo, corso orizzontale 22, corrispondente all'ultimo corso sottoposto al blocco di chiave. Modalità di determinazione grafica dell'azione orizzontale che il corso 22 induce sul blocco lapideo del corso corrispondente dello spicchio meridiano di 11,25° di estensione angolare

Procedendo via via, dall'apice alla base, vengono in tal modo determinate, con i modi della statica grafica, le azioni che ciascun blocco lapideo, componente lo spicchio meridiano di estensione angolare 11,25° del modello geometrico A impone al corso sottostante e al corso orizzontale cui appartiene.

Nell'analisi sono presi in considerazione tutti i 34 corsi orizzontali che strutturano la cupola muraria (33 corsi più il blocco di chiave), dunque anche i corsi orizzontali inseriti nel pozzo di impianto, che nella valutazione dell'equilibrio secondo il modello di comportamento a *falsa cupola* non erano stati valutati, perché non significativi per il precedente modello di comportamento esaminato.

La verifica che la cupola muraria della *tholos* mobilita il sistema resistente proprio di una *vera* cupola impone di valutare l'intensità delle azioni orizzontali necessariamente presenti per l'equilibrio secondo il modello a cupola/guscio e di verificare nella fattura del monumento la capacità di un efficace contenimento, individuando pertanto gli espedienti tecnico costruttivi per garantire la stabilità della cupola sebbene realizzata in letti di posa orizzontali.

L'accurata apparecchiatura dei corsi orizzontali garantisce una resistenza alle azioni orizzontali spingenti verso l'interno, che tendono a serrare gli anelli lapidei orizzontali, ma non esplica alcun contrasto alle azioni orizzontali spingenti verso l'esterno. Per la disposizione orizzontale

dei corsi, infatti, le azioni spingenti verso l'esterno non serrano la struttura ma sollecitano i blocchi a slittare l'uno sull'altro, come avviene per il *falso arco*, e l'instabilità si ottiene superando la resistenza d'attrito presente tra i letti di posa.

Le azioni orizzontali presenti per l'equilibrio sono costituite dalle componenti orizzontali degli sforzi meridiani N_φ e dalle azioni orizzontali sui paralleli N_ϑ.

La presenza di una condizione di equilibrio secondo il modello cupola/guscio impone infatti che le azioni meridiane N_φ siano inclinate e agiscano lungo la curvatura media dello spicchio meridiano. Esse implicano pertanto la presenza di componenti orizzontali spingenti verso l'esterno di cui occorre valutare, in base alla geometria, l'intensità e verificare in che modo venga assicurata la resistenza allo slittamento dei blocchi, come l'attuale stabilità della cupola del Tesoro di Atreo impone.

Riguardo alle azioni orizzontali sui paralleli N_ϑ occorre valutare se e dove, in base alla propria geometria, le azioni orizzontali agenti sui corsi paralleli, procedendo dall'apice alle imposte, cambiano di segno, condizione che, come esposto al paragrafo I, diviene critica in una cupola in muratura e ancor più critica per una cupola muraria costituita da blocchi lapidei disposti per corsi orizzontali. Se in una cupola in muratura, in materiale di limitata resistenza a trazione, le fessurazioni meridiane prodotte inducono a considerare che la struttura si comporti come costituita dall'insieme di spicchi meridiani, connessi nella zona superiore interessata ad un'azione di compressione degli anelli paralleli, spingenti alle imposte, viceversa l'apparecchiatura in corsi orizzontali di una *pseudocupola* impedisce la formazione di un sistema resistente ad arco per la parte dello spicchio meridiano libero.

Nell'analisi, la verifica che l'equilibrio della struttura richieda l'esercizio di azioni orizzontali spingenti verso l'esterno impone di comprendere come nella cupola del Tesoro di Atreo l'equilibrio venga comunque mantenuto.

Le Tavole in allegato illustrano le successive fasi di analisi condotte per via grafica e i valori ottenuti delle azioni meridiane N_φ e orizzontali N_ϑ.

La Tavola A indica in pianta la proiezione della base dei blocchi lapidei a settore circolare componenti lo spicchio meridiano di estensione angolare di 11,25°, e nella sezione trasversale, in corrispondenza dei baricentri, l'intensità delle forze peso, indicate numericamente in tonnellate e rappresentate nel grafico in opportuna scala di lunghezza.

Nella Tavola B sono indicate in pianta le proiezioni orizzontali delle porzioni di tumulo gravanti sullo spicchio meridiano in esame, e nella sezione trasversale, nei relativi baricentri, le forze peso di ciascuna porzione, espresse numericamente in tonnellate e rappresentate in opportuna scala di lunghezza.

Nella Tavola C vengono rappresentate nella sezione

trasversale contemporaneamente tutte le forze peso agenti, e viene tracciata la curva mediana dello spicchio passante per i baricentri dei blocchi che in presenza di regime membranale costituisce il poligono funicolare delle successive risultanti e dunque la curva delle pressioni.

Nella Tavola D le forze peso delle porzioni di tumulo sono sommate alla forza peso del blocco lapideo su cui rispettivamente ricadono, e le risultanti vengono rappresentate nei rispettivi baricentri dei blocchi lapidei. Tale rappresentazione costituisce la base grafica per calcolare, nel modo illustrato nelle figure 15 e 16, con il poligono funicolare di equilibrio dei singoli conci i valori delle azioni meridiane N_{φ} e orizzontali N_{ϑ} che interessano ciascun blocco.

Procedendo dall'apice alla quota terra della camera, e imponendo, concio dopo concio, il passaggio della risultante del carico del concio superiore nel baricentro del corso inferiore e la chiusura del poligono delle forze per il concio singolo, vengono progressivamente valutate graficamente tutte le azioni agenti sullo spicchio meridiano, che per l'equilibrio impongono una curva delle pressioni passante per i baricentri dei conci. La Tavola E illustra la costruzione grafica generale, realizzata in opportuna scala di lunghezze, dei successivi poligoni funicolari di equilibrio per ogni blocco lapideo proseguendo dall'apice alla base della cupola.

Nella Tavola F, nel baricentro dei blocchi sono rappresentate, in opportuna scala di lunghezze e indicate in tonnellate, le azioni orizzontali N_{ϑ} trasmesse dal corso lapideo orizzontale corrispondente a ciascuno dei blocchi dello spicchio meridiano di estensione angolare di 11,25°, determinate con il precedente metodo grafico. A causa delle variazioni degli spessori dei conci tali azioni orizzontali si presentano discontinue per le discontinue variazioni di spessore dei corsi lapidei.

Nella Tavola G, nei baricentri dei blocchi sono rappresentate in opportuna scala di lunghezza (dieci volte più piccola della scala delle Tavole precedenti, per consentire una più agevole lettura dei valori), e indicate in tonnellate, le azioni inclinate N_{φ} che ciascuno dei blocchi dello spicchio meridiano di estensione angolare di 11,25° trasmette al sottostante determinate con il precedente metodo grafico.

2.3.2.
Verifica allo slittamento orizzontale dei blocchi

Ricavati i valori e le direzioni di tutte le azioni che per l'equilibrio secondo il modello di comportamento a cupola interessano lo spicchio meridiano in esame, occorre mettere a confronto tali risultati con la fattura della cupola del Tesoro di Atreo per verificare puntualmente la compatibilità di tale regime statico con la costruzione, e in particolare per comprendere in che modo nella morfologia della *tho-*

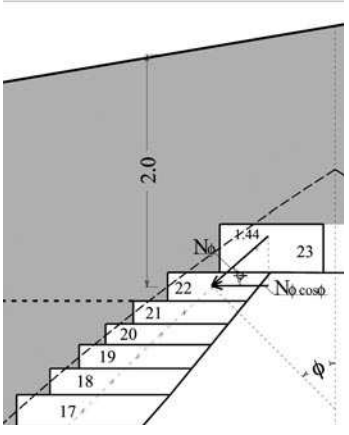
los, nonostante l'apparecchiatura in corsi orizzontali della cupola, possano essere contrastate le azioni orizzontali spingenti verso l'esterno consentendo il mantenimento di una condizione di equilibrio secondo il modello di comportamento a cupola.

In primo luogo, va osservato che nella cupola in corsi orizzontali del Tesoro di Atreo l'andamento della curva delle pressioni corrispondente alla superficie media della cupola (che si richiede per l'equilibrio nel momento in cui sia verificata l'esistenza delle azioni di compressione radiale dei paralleli) implica direttrici delle azioni meridiane N_{φ}, trasmesse da ogni blocco dello spicchio meridiano al sottostante, non ortogonali ai letti di posa dei blocchi. L'azione meridiana N_{φ} contempla una forza orizzontale che per l'apparecchiatura in corsi orizzontali sollecita ciascun blocco a slittare lungo il letto di posa, e pertanto induce una condizione certamente critica per il mantenimento dell'equilibrio, condizione particolarmente critica nella parte della cupola in prossimità dell'apice ove per geometria la componente orizzontale è maggiore.

La sapiente apparecchiatura dei corsi orizzontali, che abilita la struttura all'esercizio di una compressione radiale, non può quindi considerarsi sufficiente per comprendere come viene raggiunta una condizione di equilibrio nella parte superiore della cupola. Va pertanto analizzato quanto incide l'orizzontalità dei corsi sulla stabilità della cupola del Tesoro di Atreo, e ricercati gli espedienti che evitano l'instaurarsi di una condizione critica come l'attuale condizione di equilibrio della cupola manifesta.

Se in una cupola realizzata in blocchi lapidei disposti secondo letti di posa inclinati gli sforzi meridiani tengono serrati i blocchi tra loro, al contrario la condizione di letti di posa orizzontali fa sì che gli sforzi meridiani contengano una forza che sollecita i blocchi lapidei a slittare verso l'esterno. L'attrito presente tra i letti di posa dei blocchi agisce a contrastare tale slittamento e per l'equilibrio deve verificarsi che il carico verticale per il coefficiente d'attrito *f*, che compone la resistenza d'attrito, sia maggiore della forza di slittamento.

In linee generali, va sottolineato che, poiché la curva delle pressioni corrisponde alla curvatura media della cupola, la geometria della cupola incide fortemente sull'intensità delle forze orizzontali di slittamento. Infatti, tanto più le direttrici degli sforzi meridiani sono inclinate, tanto minore è ovviamente l'intensità delle azioni di slittamento: se φ è l'angolo che la direttrice dello sforzo meridiano N_{φ} forma con la retta orizzontale passante per il letto di posa (che corrisponde alla colatitudine del parallelo corrispondente, angolo compreso tra l'asse di rivoluzione e la normale alla superficie sul piano meridiano) $N_{\varphi} \cos\varphi$ costituisce la componente orizzontale di slittamento, fig. 17.



17.
Componente orizzontale di slittamento di N_φ

La forma della cupola della *tholos* ad ogiva stirata verso l'alto trova corrispondenza nel tentativo di ridurre alla minore intensità possibile la componente orizzontale di slittamento $N_\varphi \cos\varphi$ proprio nei punti in cui per la forma a cupola (che deve chiudersi verso l'apice) tale componente orizzontale è maggiore.

Allo scopo di diminuire in prossimità dell'apice la componente di slittamento degli sforzi meridiani, nella cupola delle *tholoi* micenee interviene ancora più efficacemente la forma "a collo di bottiglia" del terminale superiore, attribuita al modello geometrico della *tholos* micenea, e che si riconosce nella *tholos* di Tirinto e nella cupola della Tomba di Clitennestra dagli studi di Stikas. Il flesso terminale del profilo all'intradosso in adiacenza all'apice riporta gli anelli orizzontali della cupola in prossimità dell'apice ad un angolo di colatitudine φ prossimo a 90° e determina dunque l'annullamento della forza di slittamento proprio nella zona critica.

La disequazione *forza di slittamento < resistenza d'attrito*, richiesta per l'equilibrio a ciascun concio dello spicchio meridiano, espressa in funzione dell'angolo di colatitudine del letto di posa relativo, diviene $N_\varphi \cos\varphi < f\, N_\varphi \sin\varphi$, da cui si ottiene $\cot\varphi < f$, che individua la relazione esistente tra la geometria della cupola e il coefficiente d'attrito necessari all'esistenza di una condizione di equilibrio. Si comprende pertanto che è solo la geometria della cupola (angolo φ) che può intervenire a minimizzare tale condizione critica, nel decrementare con una geometria adeguata l'intensità delle azioni orizzontali di slittamento, mentre un incremento del carico superiore fa crescere egualmente sia la resistenza d'attrito che la forza slittante.

Se per un verso, pertanto, l'incremento di carico verticale determinato dal tumulo superiore non interviene a contrastare lo slittamento dei blocchi in funzione di un accrescimento della resistenza d'attrito, dall'altro esso assume un importante ruolo nel contenere lateralmente i blocchi componenti i corsi orizzontali al perimetro.

La disposizione a mantello del tumulo sull'estradosso della cupola, che riporta ad una condizione ipogea la parte della cupola emergente dal pozzo, comporta che lo slittamento dei blocchi venga impedito dalle azioni orizzontali del terreno del tumulo disposto in adiacenza ai blocchi, che esercitano un azione di contenimento allo slittamento dei blocchi al perimetro. Dai valori ottenuti delle forze di slittamento e dall'evidenza della stabilità della cupola del Tesoro di Atreo si evince, pertanto, che il terreno del tumulo assume un ruolo fondamentale per garantire la stabilità della parte superiore della cupola, inducendo sull'estradosso della muratura della cupola una benefica azione orizzontale di contenimento al perimetro. Tale azione orizzontale di con-

tenimento è proporzionale alla natura del terreno e alle sue caratteristiche fisiche - meccaniche (peso dell'unità di volume, angolo di attrito interno), dipende fortemente dalla storia tensionale che ha caratterizzato la posa in opera dello stesso terreno (in particolare l'eventuale compattamento avvenuto nella posa in opera) e dipende infine dalla profondità del corso lapideo considerato. Se una reale analisi quantitativa di tale azione risulta di difficile valutazione in assenza di specifica sperimentazione, può comunque valutarsi a vantaggio di sicurezza l'intensità dell'azione orizzontale di contenimento del terreno ipotizzando un valore della spinta a riposo, valutata mediante il coefficiente di spinta K_o, per un valore dell'angolo di attrito interno del terreno φ pari a 35°.

Come si è detto la forza di slittamento sui letti di posa dei corsi dello spicchio meridiano esaminato della cupola del Tesoro di Atreo risulta pari a $N_\varphi \cos\varphi$, se N_φ è lo sforzo lungo il meridiano all'estradosso del blocco e φ l'ampiezza dell'angolo di colatitudine del letto di posa del corso in esame. Nella cupola del Tesoro di Atreo in corrispondenza del letto di posa del primo corso al di sotto della lastra di chiave l'angolo φ è minimo e vale circa 45°.

Il contrasto allo slittamento del blocco del primo corso al di sotto della lastra di chiave dello spicchio meridiano analizzato è dato da due effetti agenti contemporaneamente: la resistenza d'attrito allo slittamento del blocco lungo il letto di posa e la risultante *Rp* delle pressioni laterali del terreno del tumulo agenti sulla faccia verticale del blocco all'estradosso della cupola.

La resistenza d'attrito è data dalla forza di compressione verticale, corrispondente alla componente verticale di N_φ all'estradosso del blocco, e pertanto vale N_φ *sin* φ_{min}, sommata al peso del blocco in esame, per il coefficiente di attrito di primo distacco *f*. Il peso G_{bl} del blocco in esame risulta pari a G_{bl} = 0,11 t.

Sia P_o la pressione laterale esplicata dal terreno alla profondità h rispetto al corso considerato; il valore di P_o è dato da $P_o = K_o \gamma_t$ h; con γ_t pari al peso dell'unità di volume del terreno; h pari alla profondità dell'asse medio del corso dal piano di campagna; K_o corrispondente al coefficiente di spinta a riposo valutato mediante la relazione proposta da Jaky (1936) K_o = 1- *sin* φ_{terr}, che, per φ_{terr} = 35°, K_o = 0,43.

Detta A_l l'area della faccia verticale del blocco all'estradosso della cupola, data da A_l = l s; con l pari alla lunghezza dello spicchio di apertura 11,25° e s pari all'altezza del corso considerato, la forza di contenimento del terreno è $Rp = P_o A_l$.

In corrispondenza dell'asse medio del corso considerato l'altezza h del tumulo fino al piano di campagna è pari a 2,00 m, la lunghezza l del blocco pari a 0,21 m e lo spessore in altezza s del blocco 0,25 m.

Assumendo, come per le precedenti analisi, il peso specifico del tumulo γ_t = 1,9 t/m^3, risulta

$Rp = P_o\ A_l = K_o\ \gamma_t\ h\ l\ s$ = 0,43 . 1,9 . 2,00 . 0,21 . 0,25 = 0,086 t

Lo sforzo meridiano N_φ in corrispondenza dell'estradosso del blocco in oggetto risulta come precedentemente calcolato per lo spicchio meridiano di estensione angolare 11,25° pari a 0,67 t.

La verifica allo slittamento sul letto di posa del primo corso al di sotto della lastra di chiave è soddisfatta se

$N_\varphi\ cos\ \varphi_{min} < [\ f\ (N_\varphi\ sin\ \varphi_{min} + G_{bl})] + Rp$;

ovvero 0,67 *cos* $\varphi_{min} < [\ f\ (0{,}67\ sin\ \varphi_{min} + 0{,}11) + 0{,}086$;

Poiché φ_{min} è pari a 45° deve risultare

$0{,}47 < f\ (0{,}47 + 0{,}11\ ) + 0{,}086$; ovvero $0{,}47 < (\ f\ 0{,}58\ ) + 0{,}086$

Dalla reale condizione di stabilità della cupola, la disequazione deve essere soddisfatta, e pertanto deve risultare $f > 0{,}66$.

Il coefficiente *f* di attrito di primo distacco viene considerato pari a 1,5-3 volte il coefficiente di attrito durante il moto, che per materiali da muro tra loro varia da un minimo di 0,65 e un massimo di 0,78 (Colombo [1955, p.882]). Pertanto, il valore del coefficiente *f* di primo distacco si ritiene compreso tra un minimo di 0,975 e un massimo di 2,34, da cui, considerando che le analisi sono state svolte a vantaggio di sicurezza, può dirsi che la verifica allo slittamento dei blocchi è soddisfatta.

Nonostante il risultato positivo ottenuto per la cupola del Tesoro di Atreo, tale verifica è parcolarmente insidiosa per la cupola della *tholos*. Nel pericolo di slittamento dei blocchi dei corsi orizzontali si individua infatti il punto debole della *tholos* micenea.

La presenza del tumulo si fa sentire favorevolmente non per la maggiore intensità del carico superiore (un aumento di carico accresce egualmente la capacità slittante e quella stabilizzante) ma per l'azione di contenimento esplicata dal tumulo attraverso la pressione laterale, che si traduce in forze orizzontali di contrasto allo slittamento dei blocchi. Dalla verifica allo slittamento si evince che tale contributo è rilevante ai fini della stabilità; il venire meno nel tempo del tumulo determina una graduale riduzione di sicurezza della cupola della *tholos*, e pertanto può considerarsi come una delle cause del crollo di numerose evidenze.

Si riconosce quindi che accanto a una sapiente apparecchiatura dei corsi lapidei orizzontali, la messa in opera del tumulo all'estradosso e la scelta di una curvatura adeguata della cupola costituiscono gli espedienti utilizzati dai costruttori per garantire stabilità alla struttura in corsi orizzontali della parte della cupola emergente dal pozzo, e che si esplica secondo il regime statico di una *vera* cupola.

Va ora esaminata la compatibilità del modello con la

fattura della parte inferiore della cupola. Nella Tavola E in allegato, i poligoni che vedono l'intersezione tra le linee oblique, costituenti, per il blocco cui appartengono, la risultante proveniente dal blocco immediatamente superiore e la risultante che il blocco in oggetto trasferisce a quello immediatamente sottoposto, indicano che l'azione orizzontale, che il corso lapideo orizzontale deve per equilibrio trasferire al blocco lapideo dello spicchio meridiano, induce uno sforzo di trazione e, nella sezione trasversale della Tavola F in allegato, ha pertanto direzione rivolta verso l'interno della camera. Spostandosi dall'apice della cupola progressivamente verso il basso avviene infatti che a un certo punto, e precisamente in corrispondenza del corso architrave inferiore, l'azione orizzontale, necessaria a riportare la risultante delle compressioni sulla tangente baricentrica dei conci, deve invertirsi e agire non più dall'interno verso l'esterno ma al contrario dall'esterno all'interno. Tale situazione comporterebbe lo sviluppo di sollecitazioni di trazione negli anelli lapidei orizzontali, che risultano del tutto incompatibili con le caratteristiche resistenti del tessuto costitutivo della muratura degli anelli stessi. Tale circostanza, che è caratteristica del comportamento delle cupole in muratura ove, a causa del prodursi di trazione negli anelli nella zona inferiore, si sviluppano profonde fessurazioni lungo i meridiani [29], che mettono in crisi il modello resistente su descritto, trova nella cupola della *tholos* micenea un'efficace risoluzione per la condizione ipogea (interna al pozzo di scavo) della parte inferiore della cupola.

Nel modello geometrico proposto della cupola muraria della *tholos* del Tesoro di Atreo l'inversione di segno dell'azione orizzontale esercitata dagli anelli inizia a presentarsi in corrispondenza del corso lapideo immediatamente al di sotto del corso posto a filo con il bordo del pozzo di scavo. L'inversione di segno si verifica pertanto unicamente nelle zone inferiori della *tholos* realizzate all'interno del pozzo di scavo, con le pareti murarie della cupola a stretto contatto con esso.

In tal modo, per tutti gli anelli lapidei orizzontali che per l'esistenza dell'equilibrio membranale richiedono la presenza di spinte agenti dall'esterno verso l'interno, è la roccia esterna stessa, e non la trazione negli anelli, a produrre tali spinte. Pertanto, l'equilibrio membranale resta intatto lungo tutta la sezione meridiana della *tholos*.

La realizzazione all'interno del pozzo di scavo, e quindi entro terra o roccia, di tutta la fascia inferiore della *tholos*, costituisce una soluzione costruttiva di estrema saggezza, che mostra, inoltre, come avviene con la presenza del tumulo superiore a contrastare le azioni orizzontali di slittamento, la connessione esistente tra tipologia architettonica e identità statica della costruzione.

[29] Como, 1997.

Soddisfatte le verifiche allo slittamento orizzontale dei blocchi, in sintesi, nella cupola muraria del Tesoro di Atreo si presenta compressione in tutti i corsi lapidei orizzontali superiori, relativi alla parte emergente della *tholos* dal pozzo di scavo (grazie all'efficacia dell'apparecchiatura dei corsi orizzontali, alla geometria della cupola e al contenimento laterale del tumulo) e per i corsi inferiori, inseriti nel pozzo, sono le azioni di contenimento del pozzo di scavo contro gli anelli murari stessi ad esplicare un cerchiaggio tale da contrastare la trazione radiale degli anelli.

2.4.
Meccanismo di collasso della cupola della tholos *e di una cupola generica*

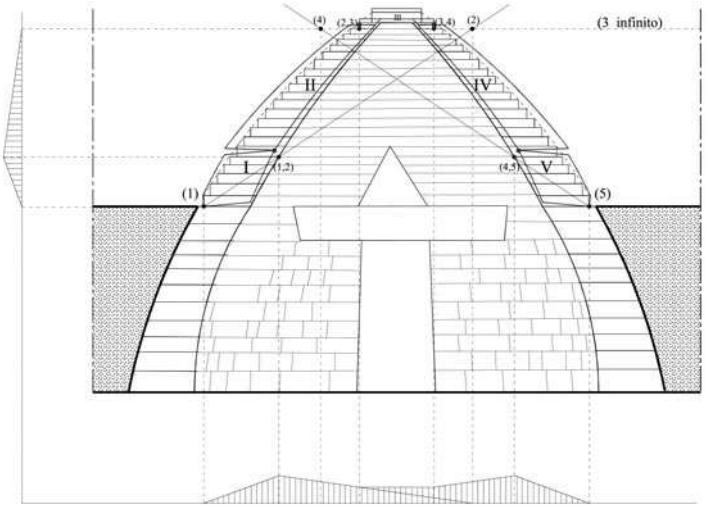
L'analisi cinematica costituisce l'approccio duale all'analisi statica, pertanto, l'aspetto specifico del comportamento statico della cupola muraria della *tholos* può essere ulteriormente chiarito dallo studio dei suoi possibili meccanismi di collasso.

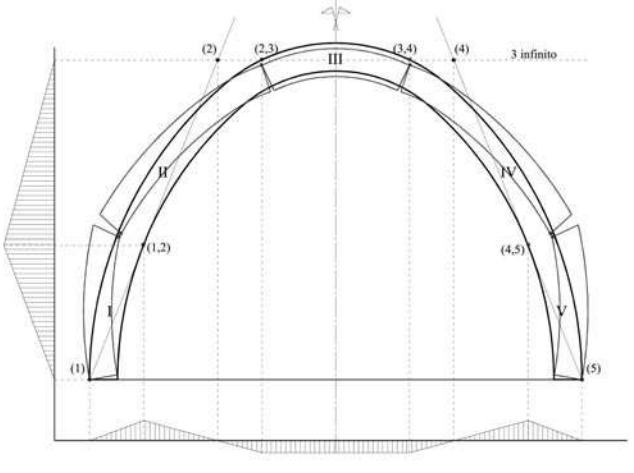
Per la geometria delle cupole, sia nel caso della *tholos* sia per le cupole ordinarie, i meccanismi possibili sono solo assialsimmetrici. Inoltre, l'inserimento nel pozzo di scavo della parte inferiore della cupola, che vede uno stretto contatto tra muratura e pareti del pozzo, impedisce che la parte inferiore degli spicchi meridiani della cupola possa aprirsi verso l'esterno. Di conseguenza, nella ricerca dei possibili meccanismi di collasso compatibili con le caratteristiche della struttura si considerano solo meccanismi assialsimmetrici che coinvolgono la deformazione del generico spicchio meridiano emergente dal pozzo.

A causa dell'inclinazione del profilo dello spicchio meridiano, e dunque per la geometria della struttura, i meccanismi di collasso possibili presentano delle particolarità rispetto ai meccanismi propri delle cupole murarie. Infatti, i meccanismi simmetrici compatibili dal punto di vista cinematico, che prevedono una posizione delle cerniere alternata lungo l'estradosso e l'intradosso in corrispondenza dei letti di posa dei blocchi, comportano la presenza di un centro assoluto (2) a destra del centro relativo (2, 3). Tale condizione impone che gli spostamenti verticali dello spicchio risultino tutti di sollevamento, fig. 18, condizione in contrasto con i carichi agenti.

In una cupola tradizionale, per la quale le sezioni meridiane partono di regola verticali alle imposte, per un generico meccanismo di collasso, il centro assoluto (2) è posto a sinistra del centro relativo (2, 3). Avviene pertanto che la zona di cupola verso l'imposta si solleva, mentre quella centrale si abbassa, fig. 19.

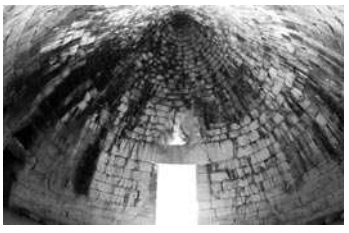
La condizione particolare della cupola della *tholos*





comporta pertanto che qualunque distribuzione simmetrica di forze compirà sempre lavoro negativo per il meccanismo, e pertanto non potrà mai produrre il collasso. Sia la distribuzione dei pesi della muratura della *tholos* che quella del tumulo soprastante, distribuzioni entrambe simmetriche, compiranno lavoro sempre negativo per qualunque meccanismo. Pertanto, tutte le forze agenti, che sono di peso e dunque rivolte verso il basso, si oppongono sempre alla deformazione della cupola della *tholos*. Tale circostanza impone che comunque si incrementi il volume del tumulo all'estradosso, sempre in condizioni assilasimmetriche, la struttura muraria della cupola della *tholos* è sempre in condizioni di stabilità, mostrando una grande resistenza della struttura a sovraccarichi assialsimmetrici. Come si è visto nell'analisi del comportamento statico della cupola della *tholos*, è infatti, al contrario, la sottrazione del tumulo all'estradosso che può determinare il manifestarsi di una condizione critica per la stabilità della struttura.

18.
Sezione trasversale della cupola del Tesoro di Atreo.
Catena cinematica di un meccanismo di collasso della parte superiore della cupola
19.
Sezione trasversale di una cupola ordinaria.
Catena cinematica di un meccanismo di collasso della cupola



20.
Foro della parte superiore della cupola muraria dovuto dal 'triangolo di scarico'

2.5.
Incidenza del foro del "triangolo di scarico" sulla statica della cupola muraria

L'analisi del comportamento statico della cupola muraria del Tesoro di Atreo richiede un'ulteriore riflessione in relazione alla presenza nella parte emergente della muratura della cupola del foro triangolare appartenente al complesso del *triangolo di scarico* sulla porta di accesso. Il foro triangolare taglia i primi sei corsi orizzontali ad anello della cupola emergente dal pozzo. La mancanza di continuità degli anelli per i sei corsi suddetti genera delle perturbazioni nel campo delle compressioni radiali degli anelli orizzontali necessario all'esistenza di una superficie di pressione mediana nello spessore della muratura della *tholos*.

Per l'azione della compressione anulare i sei anelli lapidei, interrotti dal foro del *triangolo di scarico*, tenderebbero a contrarsi per chiudere il foro esistente. Tale condizione determina nella struttura muraria della cupola una turbativa nella trasmissione degli sforzi. D'altra parte lo stato della struttura attesta che per tale condizione la struttura è stata in grado di ritrovare una risposta in termini di equilibrio al regime delle forze in gioco. Avviene dunque che nell'intorno del foro triangolare, la forza peso dello spicchio meridiano che viene tagliato alla base dall'apertura, componendosi con le azioni di compressione radiale relative ai sei corsi, riesce a trasferire ai lati del vano le azioni in gioco. Tale soluzione è tipica del comportamento delle strutture murarie, ove per "deficienza" di una parte della muratura gli sforzi di compressione presenti scavalcano la parte mancante strutturando un sistema resistente ad arco che trasferisce ai lati gli sforzi, come accade di regola intorno ad un'apertura in una massa muraria.

La soluzione di equilibrio ritrovata dalla muratura viene esposta in Appendice 4 ove sono state valutate le intensità e le direzioni degli sforzi trasmessi dai due archi ideali formatisi ai lati del foro.

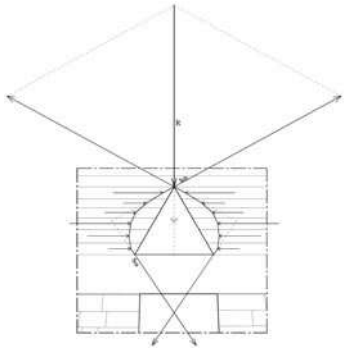
Dall'analisi si è ottenuto che le azioni simmetriche dei due archi ideali inducono alla base del triangolo uno sforzo di compressione all'architrave lapideo lungo l'asse orizzontale. Tale azione incrementa la compressione anulare già presente al corso lapideo superiore in corrispondenza dell'architrave, mantenendo un regime di compressione gli anelli lapidei della parte superiore della cupola, dal corso terminale al corso superiore dell'architrave.

In base a tale verifica si evince che il *triangolo di scarico* e il grande architrave lapideo costituiscono un'unità strutturale all'interno della cupola muraria. Il foro, determinato dal *triangolo di scarico*, nella parte della cupola in regime di compressione necessita alla base di un efficace anello lapideo continuo soggetto a compressione anulare per ristabilire l'e-

quilibrio. Pertanto, l'ipotesi che la ragione della messa in opera del *triangolo di scarico* sull'architrave di accesso sia determinata dalla necessità di decrementare in mezzeria l'architrave del carico verticale sembra perdere priorità.

Va ribadito che nell'analisi del comportamento strutturale la mancanza di continuità degli anelli lapidei orizzontali costituisce indubbiamente una condizione di debolezza alla statica della copertura a cupola della *tholos*. Pertanto, mentre può apparire ammissibile per la statica supporre la mancanza del *triangolo di scarico* sull'architrave, la presenza del vuoto richiede che vi sia necessariamente un massiccio architrave a chiusura del sistema strutturale. Tale condizione giustifica la scelta dei costruttori nella messa in opera della grande lastra lapidea costituente l'architrave interno del Tesoro di Atreo il cui peso supera le 120 tonnellate.

Inoltre, se il foro praticato nella cupola muraria costituisce un elemento di debolezza alla statica della struttura, andrebbero indagate le ragioni della sua esistenza rispetto a questioni distinte dalla statica, ragioni che potrebbero essere legate ai riti funerari nell'uso di tali strutture architettoniche. Sotto questo punto di vista le osservazioni sulla geometria della costruzione possono rivestire particolare interesse. Dalle considerazioni sulla geometria del Tesoro di Atreo al capitolo III, la luce del *triangolo di scarico* alla base ha ampiezza radiale di circa 20°, occupando dunque uno spicchio pari ad 1/18 della circonferenza. Tale caratteristica geometrica della costruzione, benché l'orientamento delle *tholoi* risulti variabile e correlato principalmente alla morfologia dei luoghi, potrebbe stimolare riflessioni legate ai campi dell'astronomia e dell'orientamento in funzione delle modalità di ingresso della luce solare all'interno della tomba.



21.
Archi ideali simmetrici che trasferiscono gli sforzi ai lati del foro

L'analisi della letteratura ha confermato per *tholoi* integre la mancanza di dati certi relativi alla configurazione delle parti "nascoste" della struttura per la condizione ipogea del monumento, relativi in particolare al complesso muratura, pozzo di scavo e tumulo, all'analisi tecnica della tessitura muraria, al rilievo della forma della cupola all'estradosso, agli spessori della muratura alle diverse quote e al rapporto che intercorre tra questa e il tumulo all'estradosso, e infine alla consistenza del tumulo stesso. Si è rilevato pertanto che generalmente sono incogniti proprio quei dati necessari all'analisi della natura della costruzione e del comportamento statico, condizione che ha indubbiamente contribuito ad un'incertezza nella definizione dell'identità statica della costruzione. Tale incertezza è stata superata attraverso l'analisi morfologica del monumento e l'approfondimento del caso specifico del Tesoro di Atreo.

L'analisi morfologica della *tholos* micenea, condotta attraverso la raccolta critica dei dati architettonici esistenti, ha infatti consentito di descriverne la tipologia architettonica e i caratteri salienti degli elementi architettonico – costruttivi componenti, e ha evidenziato che la condizione ipogea, data dall'inserimento della struttura in un pozzo di scavo e dalla presenza del tumulo all'estradosso, costituisce il carattere distintivo della tipologia architettonica.

Con l'approfondimento del caso specifico del Tesoro di Atreo, sviluppato attraverso l'esame delle descrizioni compiute a valle di saggi e l'elaborazione dei rilievi esistenti, si sono potute formulare delle ipotesi realistiche in merito alla reale configurazione geometrica del monumento, è si è potuto quindi costruire un modello congruente con l'evidenza su cui analizzare la statica degli elementi costruttivi.

L'approfondimento del comportamento strutturale del *falso arco* e della cosiddetta falsa *cupola*, elementi costruttivi della *tholos*, ottenuti mediante la messa in opera di blocchi lapidei in corsi orizzontali in progressivo aggetto, che si è sviluppato attraverso il confronto con il comportamento statico dell'arco e della cupola muraria, ha fondato la base metodologica per l'analisi statica. Sulla base del modello geometrico del Tesoro di Atreo è stata condotta l'analisi

statica della parte anteriore del *triangolo di scarico* allo *stomion*, secondo il modello di *falso arco*, e della cupola a copertura della camera, secondo il modello di *pseudocupola*.

L'analisi della condizione di sicurezza al ribaltamento dei piedritti costituenti la struttura a *falso arco* della parte anteriore del *triangolo di scarico* ha evidenziato elevati valori del coefficiente di sicurezza, constatando la mancanza di un'azione reciproca tra i piedritti. Tale condizione, unitamente alla presenza di letti di posa orizzontali dei blocchi lapidei, ha confermato la validità del modello di *falso arco* e dunque la sostanziale lontananza di tale struttura dal sistema strutturale resistente dell'arco murario.

Di contro, l'analisi dell'equilibrio della cupola muraria secondo il modello di comportamento a *pseudocupola* ha mostrato la mancanza di stabilità della struttura, condizione naturalmente in contrasto con quella reale. Tale analisi è stata condotta sia sul modello architettonico proposto nello studio, sia sulle ipotesi della conformazione delle *tholoi* all'estradosso proposte da Cavanagh e Laxton [1], raggiungendo gli stessi risultati.

Tali verifiche, unitamente alle riflessioni condotte sul cosiddetto modello a *pseudocupola*, hanno fondato la revisione del modello di comportamento a *falsa cupola* generalmente attribuito a tali strutture. Si è infatti osservato che nella *tholos*, l'estensione del *falso arco* per corsi lapidei orizzontali in progressivo aggetto ad una forma spaziale chiusa conferisce alla struttura un'ulteriore capacità di resistenza al ribaltamento verso l'interno. Se per il generico *falso arco* il contrasto ad un'azione orizzontale reciproca dei due piedritti può essere dato unicamente dall'attrito presente tra i letti di posa orizzontali, nella cupola a *tholos* l'eventuale ribaltamento di uno spicchio meridiano della cupola è impedito dalla presenza dei restanti spicchi meridiani.

Tale condizione induce i blocchi lapidei di ogni corso orizzontale a spingersi reciprocamente, inducendo un'azione di compressione radiale dei corsi orizzontali ad anello. Il rilievo dell'ultimo corso orizzontale della cupola muraria del Tesoro di Atreo [2], che mostra l'inserimento in forza di pietre nei giunti verticali, mette in luce la particolare cura posta dai costruttori per ottenere un'unità strutturale degli anelli paralleli della cupola, rispondendo pertanto nella costruzione alle necessità statiche suddette. Un'opportuna apparecchiatura muraria di ciascun corso orizzontale è in grado infatti di contenere la compressione radiale, evitando la rottura per slittamento locale delle pietre. La condizione di mancanza di stabilità del singolo spicchio meridiano, ottenuta dall'analisi secondo il modello di *pseudocupola*, ha

[1] Cavanagh – Laxton [1981, p. 120].
[2] Blouet [1833, pl. 66, fig. 4].

dimostrato pertanto che l'equilibrio è assicurato dall'esistenza di azioni orizzontali che, coinvolgendo tutta l'estensione spaziale della struttura, inducono l'instaurarsi di un sistema resistente a cupola muraria.

La compartecipazione degli anelli paralleli alla trasmissione delle forze peso determina l'instaurarsi di un regime statico di tipo membranale. L'azione di compressione radiale, e dunque l'azione orizzontale esercitata da ogni corso dello spicchio meridiano, risulta di entità tale da indurre che la superficie delle pressioni sia costituita proprio dalla superficie media della cupola muraria. Pertanto, si è potuta ottenere con i metodi della statica grafica l'intensità delle azioni meridiane e orizzontali competenti ogni blocco dello uno spicchio meridiano di 11,25° di estensione angolare del Tesoro di Atreo.

Il regime di compressione anulare presente nella cupola implica che le azioni di compressione che i blocchi lapidei trasmettono ai sottostanti assumono una direttrice non ortogonale ai letti di posa, che va a coincidere, in analogia con l'equilibrio dei gusci, con la curvatura media della cupola. Tale condizione può rilevarsi critica per la configurazione orizzontale dei letti di posa dei corsi, e particolarmente nella zona superiore della cupola, ove per geometria il rapporto tra la componente orizzontale e quella verticale delle azioni meridiane è maggiore.

Nonostante ciò, la cupola della *tholos* micenea mostra di tentare i tutti i modi di sfuggire alle problematiche connesse con la disposizione orizzontale dei corsi.

Nella parte superiore della cupola l'instaurarsi di una condizione critica viene evitata riducendo l'intensità delle azioni di slittamento con un'adeguata geometria della cupola, come la curvatura ad ogiva stirata verso l'alto della cupola della *tholos* manifesta, e grazie all'azione di contenimento al perimetro esercitata dal tumulo. La verifica allo slittamento orizzontale dei blocchi, in corrispondenza del letto di posa più critico, ha mostrato che, grazie all'attrito presente al letto di posa del blocco e alla pressione laterale esercitata dal terreno del tumulo, la cupola del Tesoro di Atreo permane in una condizione di stabilità secondo un regime statico di una *vera* cupola.

Nella zona alle imposte della cupola, ove l'azione orizzontale N_ϑ si inverte di segno, richiedendo per l'equilibrio membranale l'esercizio di sforzi di trazione negli anelli orizzontali, l'inserimento della parte bassa della cupola nel pozzo di scavo risolve brillantemente il problema dell'incapacità del tessuto costitutivo della muratura della cupola di esercitare tale sforzo. Le pareti del pozzo esercitano il necessario contenimento degli anelli murari alle imposte, e inducono pertanto alla permanenza del regime statico membranale in tutti i paralleli della cupola.

L'equilibrio della cupola del Tesoro di Atreo valutato secondo il modello di comportamento a cupola è risultato pertanto compatibile con la struttura della *tholos* e l'identità statica del monumento è stata individuata in quella di una *vera* cupola muraria cerchiata ai fianchi. Tale condizione viene raggiunta attraverso diversi espedienti tecnico costruttivi e di forma che consentono l'esplicarsi di un regime statico a cupola muraria nonostante l'orizzontalità dei letti di posa dei blocchi.

L'esame dell'equilibrio della cupola muraria è stato condotto anche ricercando, secondo la duale modalità cinematica di analisi dell'equilibrio delle strutture murarie, i possibili meccanismi di collasso della cupola. Per la geometria della *tholos* gli spostamenti possibili risultano tutti di sollevamento, condizione che impone che qualsiasi disposizione assialsimmetrica dei carchi indotti (tumulo all'estradosso) compirà sempre lavoro negativo per il meccanismo e pertanto non potrà mai produrre il collasso dello spicchio meridiano, mostrando una grande capacità di resistenza della struttura a sovraccarichi assialsimmetrici. Il punto critico per la stabilità della cupola della *tholos* è invece costituito dal venir meno degli espedienti, quali l'appropriata apparecchiatura dei corsi orizzontali, la presenza del tumulo e l'inserimento nel pozzo di scavo, che capacitano la struttura in corsi orizzontali a conformare un sistema resistente a cupola. In particolare, la presenza del tumulo costituisce certamente il fattore che può aver facilmente subito alterazioni nel tempo vita del monumento, grazie a naturali fenomeni di dilavamento del terreno. Il crollo di numerose *tholoi* in cui la parte superstite è generalmente costituita dalla parte interna al pozzo di scavo, esaminato in rapporto al comportamento statico della struttura, suggerisce che generalmente la causa del crollo possa essere attribuita al venir meno del contenimento perimetrale alla parte della cupola emergente dal pozzo di scavo esercitato dal tumulo all'estradosso.

Si è al termine esaminata la turbativa al regime statico della cupola muraria determinata dalla foratura del *triangolo di scarico* posta in corrispondenza della parte compressa della cupola. Come accade in una generica struttura muraria attraversata da una foratura, gli sforzi vengono deviati lateralmente all'apertura grazie alla formazione di archi di scarico. Nella cupola muraria della *tholos* la formazione di due archi di scarico ai lati del vuoto devia la compressione radiale degli anelli orizzontali e il carico verticale dello spicchio meridiano tagliato alla base dalla foratura. Le spinte alle imposte prodotte da tali archi inducono una sollecitazione di compressione lungo l'asse dell'architrave lapideo sottostante. Tale condizione chiarifica la ragione della grande mole dell'architrave lapidea interna e induce a considerare l'insieme *triangolo di scarico* e architrave come

un'unica unità strutturale all'interno del sistema resistente a cupola muraria.

Lo studio mette in luce gli espedienti tecnici sapientemente utilizzati dai costruttori micenei nella cupola muraria della *tholos* per garantire stabilità alla struttura, che si esplica nei modi di una vera cupola.

Dall'analisi statica della *tholos* micenea sembrerebbe pertanto che nella storia dello sviluppo delle tecniche costruttive si sia sviluppata prima l'esperienza della costruzione a cupola di quella dell'arco murario, che richiede invece, necessariamente, la presenza di letti di posa inclinati per la formazione del sistema strutturale resistente ad arco. Tale affermazione è supportata dall'osservazione che, nei casi in cui il pozzo di scavo in cui si impiantano le *tholoi* possa essere "difettoso", ovvero non garantire la necessaria cerchiatura di cui si è detto, il comportamento deve necessariamente corrispondere a quello di una cupola muraria corrente, ove gli spicchi meridiani senza il contenimento alle imposte si comportano come dei semiarchi spingenti. In tal caso, affinché il sistema sia stabile e dunque si instauri un comportamento ad arco murario è necessario che i letti di posa dei conci lapidei siano inclinati.

La presenza di letti di posa inclinati è stata individuata proprio in *tholoi* che presentano una difettosa condizione del pozzo di impianto o nei casi in cui la curvatura della cupola non parte da terra ma ha inizio al di sopra di una prima zona con pareti perimetrali della camera ortogonali al suolo. Nella *tholos* circolare di Thorikos [3] l'altezza del pozzo di scavo varia da un minimo di 1,25 m a valle ad un massimo di 6 m a monte, rispetto ad un altezza da terra dell'architrave di circa 3 m. Nella *tholos* di Nichoria [4] la presenza della cavità del piccolo circolo alle spalle della muratura della camera a nordest impediva l'effetto di contenimento del pozzo di scavo e si è potuto verificare che l'aggetto verso l'interno doveva risultare notevole solo al di sopra della quota dell'architrave, ove si è constatata la presenza di letti di posa inclinati. Anche nella *tholos* I di Malti la curvatura interna della cupola è notevole solo dopo la quota dell'architrave ove le pietre sono di altezza minore e disposte inclinate verso l'interno della camera [5].

Lo studio ha consentito di definire l'identità strutturale della *tholos* micenea che si è rivelata strettamente connessa con la specifica tipologia e forma architettonica.

Un'appropriata conservazione richiede il rispetto dell'identità statica del monumento.

[3] Gasche – Servais, 1971.
[4] Wilkie, 1992.
[5] Valmin, 1926-27.

appendice 1
Scheda di analisi del Tesoro di Atreo

1. *Descrizione della* tholos *e degli elementi della composizione architettonica*

1.1 IL COMPLESSO DELLA 'THOLOS' E GLI ELEMENTI COMPONENTI

Il Tesoro di Atreo costituisce uno degli esempi più rilevanti della tipologia architettonica della *tholos* micenea.

È una camera sepolcrale sotterranea di impianto circolare dalla copertura voltata secondo il sistema del progressivo aggetto e superiormente sormontata da un tumulo in pietrame e terra.

La tomba è collocata alle pendici di una collina, e l'ambiente della camera, che si sviluppa in piano, è ottenuto attraverso lo scavo di un pozzo circolare [1] nella pendice per una profondità pari alla quota della architrave della porta di accesso [2]. In tal modo le pareti perimetrali verticali sono controterra, e sono realizzate tramite la sovrapposizione di anelli murari concentrici progressivamente aggettanti verso l'interno. La parte della cupola al di sopra del pozzo, analogamente realizzata tramite la sovrapposizione di anelli murari concentrici progressivamente aggettanti verso l'interno, è ricoperta superiormente da un tumulo pietrame e terra [3] e costituisce pertanto un volume emergente dal profilo del declivio della collina.

L'accesso avviene tramite un lungo corridoio (*dromos*) costruito come prolungamento di uno dei raggi della camera sepolcrale. Il *dromos* è in leggera pendenza fino a raggiungere la quota del pavimento della camera ed è contenuto lateralmente da pareti murarie di contenimento progressivamente più alte procedendo verso l'ingresso alla camera.

L'intersezione del *dromos* con il perimetro murario circolare della camera è il luogo dell'apertura di accesso e si

[1] Nel Tesoro di Atreo il pozzo di scavo ha le pareti perimetrali inclinate verso l'interno.

[2] L'altezza del pozzo di scavo delle *tholoi* è stata supposta da Holland [1921-23, p. 396].

[3] Il tumulo del Tesoro di Atreo è pressoché intatto, benché risulti non perfettamente in asse con la cupola presentando un lieve spostamento verso ovest [Wace 1956, p. 117].

conforma come la facciata principale della tomba sul *dromos*. Il vano di accesso, denominato *stomion*, interrompe la circonferenza muraria perimetrale e i terminali di rinforzo dell'arco di circonferenza muraria formano i piedritti dell'apertura sormontati superiormente da due grandi architravi in pietra.

1.2 FORMA DEL 'DROMOS'

Il corridoio di accesso del *dromos* è costituito da un piano inclinato di pianta rettangolare di lunghezza 36 m e larghezza 6 m, in leggera salita verso lo *stomion*. È delimitato lateralmente da muri di contenimento di altezza progressivamente crescente verso lo *stomion*, pari a 0,5 m all'ingresso e leggermente al di sopra dei 10 m di altezza nella connessione con lo *stomion*.

1.3 FORMA DEL VOLUME DELLO 'STOMION'

Con il termine *stomion* si intende l'apertura di accesso alla camera sepolcrale; alla struttura globale dello *stomion* appartiene la facciata monumentale di ingresso sul *dromos*.

Lo spessore dello *stomion* è pari alla distanza tra la muratura della camera e l'inizio del *dromos*. La parete muraria di facciata sul *dromos* raggiunge 10,5 m di altezza. L'altezza dell'apertura di accesso è di 5,4 m, la profondità di 5,4 m, e l'ampiezza è di 2,70 a livello terra e 2,45 m all'architrave. Al di sopra dell'architrave è presente il sistema del *triangolo di scarico*; la muratura sovrastante viene privata del volume di muratura delimitato dai triangoli di prospetto sul *dromos* e sulla camera, gravante sulla parte centrale dell'architrave.

La parte dello *stomion* che prospetta all'interno della camera segue la curvatura della camera stessa, raccordandosi con continuità con le murature laterali e di copertura della camera. La parte prospettante sul *dromos* è invece piana e ortogonale alla base.

1.4 FORMA DELLA CAMERA

La camera ha pianta circolare di circa 14,5 m di diametro alla base secondo Wace 0, di circa 14,60 m secondo Mylonas. Essa si inserisce all'interno di un pozzo circolare scavato nella roccia che ha un'altezza pari alla distanza dal suolo all'intradosso dell'architrave.

Le pareti perimetrali della camera sono in adiacenza con le pareti del pozzo fino alla quota dell'architrave dello *stomion*.

[4] Secondo Cavanagh e Laxton [1987] la parete circolare di perimetro si inclina verso l'alto con continuità, secondo una funzione parabolica $f_{(x)} = c\ x^d$; ove $f_{(x)}$ è la misura del raggio della camera alla profondità x dalla chiave al piano di campagna. Nel caso specifico del Tesoro di Atreo le costanti c e d sono pari a c = 2,7 e d = 0,69.

La copertura dello spazio viene ottenuta curvando verso l'interno le pareti perimetrali tramite la messa in opera dei corsi orizzontali con blocchi lapidei in progressivo aggetto. L'inclinazione delle pareti perimetrali ha inizio già alla quota del pavimento della camera [4].

La curvatura interna forma una copertura conoide che raggiunge in chiave 13,2 m di altezza secondo Wace e 13,39 m secondo Mylonas.

1.5 TUMULO

La struttura muraria a copertura della camera, nella sua parte emergente dal pozzo di scavo, è ricoperta, previa la messa in opera di uno strato di argilla sull'estradosso della struttura muraria della cupola [5] da un tumulo in terra. Il tumulo si estende su tutto il complesso della tomba occupando in pianta anche l'estensione del *dromos*.

Al perimetro, il tumulo è impedito al dilavamento da un muro di sostegno costituito da pietrame e argilla nella parte interna e da un paramento di blocchi di *poros* sulla parte esterna, tra di essi connessi. Tale muro si sviluppa circolarmente intorno alla camera con una distanza dalla sommità della cupola di circa 25 m, e si connette mediante due rami obliqui al principio delle strutture laterali di contenimento del *dromos* [6].

La planimetria del 1956 [7] presenta uno spostamento verso ovest della sommità del tumulo in rapporto all'asse centrale della cupola a copertura della camera.

1.6 CAMERA LATERALE

Dalla camera interna si accede sul lato nord ad una camera laterale di pianta pressoché quadrata di 6 m di lato e altezza interna 5,8 m. Il vano di accesso è alto 2,5 m, largo 1,4 m e profondo 2,43 m.

1.7 RAPPORTI DIMENSIONALI TRA GLI ELEMENTI

Il vano di accesso alla camera secondaria è proporzionale al vano dello *stomion*.

1.8 RAPPORTO CON IL SITO/ LOCALIZZAZIONE/ RAPPORTO CON IL SUOLO

Scelta del sito in rapporto con la morfologia dei luoghi
La tomba è tagliata nel versante est della collina.
Scelta del sito in rapporto con l'insediamento abitativo
a 500 m a sud est della porta dei Leoni.

[5] Wace [1956, p. 117].

[6] Lo sviluppo planimetrico del muro di contenimento del tumulo è rappresentato nella ricostruzione grafica in assonometria redatta da Hood (in Marinatos - Hirmer [1960, p. 160, fig. 24]).

[7] Wace [1957, p. 120, fig. 7].

Scelta del sito in rapporto con la rete viaria

La tomba è rivolta verso la valle di accesso alla cittadella.

Orientamento del dromos

ovest – est (dallo *stomion*). L'acceso al percorso è orientato verso ovest e di conseguenza l'uscita è orientata verso est. Il *dromos* è ortogonale alla valle di accesso alla cittadella.

Visibilità

Il rivestimento in blocchi squadrati di *poros* del muro di contenimento a perimetro del tumulo suggerisce l'intenzionale visibilità dell'emergenza.

Un muro di contenimento in muratura ciclopica crea una terrazza antistante l'accesso al *dromos*. L'entrata al *dromos* era chiusa da un muro basso di *poros* in blocchi lavorati, di cui rimane solo parte del primo corso[8].

2. *Descrizione degli elementi della costruzione e delle tecniche costruttive*

2.1 'DROMOS'

Caratteristiche generali degli elementi costitutivi

La parte del *dromos* prospiciente l'accesso alla camera (lato ovest) è realizzata tramite scavo della roccia esistente; la parte opposta, relativa all'accesso del *dromos* stesso, (lato est), è realizzata artificialmente, con il sostegno di un muro di contenimento in muratura ciclopica che, posto a circa 25 m di distanza dallo *stomion*, crea una terrazza antistante.

Le murature di contenimento laterali del *dromos* sono costituite da un doppio paramento formato da una muratura in corsi orizzontali di blocchi di conglomerato ad una fila, dello spessore di circa 1,5 m, visibile dall'esterno, e da una retrostante muratura in grossi blocchi di pietrame calcareo allettati con argilla giallastra[9]. Le prime risultano addossate alla roccia tagliata. Le seconde si impostano al di sopra del terreno originario. I due paramenti sono tra loro ammorsati in quanto blocchi, disposti di testa, del paramento murario in blocchi di conglomerato, si inseriscono all'interno della muratura in pietrame, contribuendo insieme al sostegno del tumulo per la parte adiacente il *dromos* a sud e a nord.

Pavimentazione dromos

Nella zona prospiciente l'accesso alla camera la pavimentazione è costituita da uno strato battuto di argilla bianca posto direttamente sulla roccia tagliata; nella zona di ter-

[8] Simile condizione presentano le *tholoi* di Clitennestra e dei Genii.

[9] L'argilla giallastra proviene da letti a Plesia, a venti minuti di cammino a sud di Micene, a sinistra del sentiero per Prosymna.

razza artificiale, invece, lo strato di argilla bianca battuto è steso su pietrame di varia pezzatura, presumibilmente ricavato dallo scavo del *dromos* e della camera, ricoperto da terreno di scavo fino al livello necessario.

Dimensioni, conformazione, lavorazione e materiale dei blocchi murari

I paramenti murari ai lati del *dromos* sono costituiti da grandi blocchi di conglomerato pressoché squadrati mediante lavorazione a martello e sono disposti in corsi orizzontali con giunti verticali sfalsati.

Il primo corso è costituito da blocchi più grandi; tra questi spicca un blocco di eccezionali dimensioni: 6 m di lunghezza, 1 m di altezza e 2 m di profondità. Il lato inferiore di tale blocco presenta impronte che rimandano alla lavorazione con la sega. Il blocco è molto levigato e presenta gli spigoli superiori convessi [10]. Si presume che il blocco avrebbe dovuto essere utilizzato come architrave e venne poi scartato.

I blocchi hanno altezza media intorno ai 50 cm, a meno di quelli del primo corso di altezza media pari ad 1 m. I blocchi hanno dimensioni variabili, tanto che ciascuno si differenzia dagli altri; sembra quindi siano stati lavorati in sito in modo da adattarsi alle condizioni di forma in cui furono collocati. Sono presenti blocchi aventi geometria del prospetto ad L, lavorati in tale forma per ristabilire la regolarità dei corsi, o connettere corsi sfalsati a causa della diversa altezza dei blocchi lapidei.

I blocchi della parte superiore sono di minore larghezza e taluni corrispondono ai blocchi inseriti di testa per agganciarsi alla muratura retrostante in pietrame calcareo.

I blocchi dell'ultimo corso hanno la faccia superiore tagliata obliquamente per favorire, con una pendenza dall'interno verso l'esterno del *dromos*, il deflusso delle acque.

Elementi leganti e di interstizio

Presumibilmente uno strato sottile di argilla era posto al di sopra di ogni corso orizzontale della muratura in di conglomerato per favorire un uniforme contatto tra i blocchi.

La muratura retrostante il paramento in pietra squadrata è costituita da grossi blocchi di pietrame calcareo allettati con argilla giallastra.

Descrizione della tessitura muraria e fondazione

Il paramento murario di prospetto è ad una testa, con uno spessore medio di circa 1,5 m. I blocchi sono disposti in corsi pressoché regolari, il numero dei corsi varia da 1 (ad altezza 50 cm) a 20 (ad altezza 10 m) in prossimità dell'acces-

[10] Tale condizione è presente anche all'architrave della Tomba Panagia.

so, e i giunti verticali sono sfalsati.

Dai saggi del 1939 si è constatato che i blocchi di conglomerato sono collegati a una muratura retrostante di pietrame calcareo e argilla giallastra tramite blocchi inseriti di testa e tali da penetrare nel sacco murario retrostante.

Le parti superiori dei paramenti sul *dromos*, corrispondenti alla zona in cui è presente la muratura retrostante in pietrame e argilla, al di sopra dello scavo, hanno dunque tessitura diversa per la presenza di blocchi lapidei posti di coltello, atti ad agganciarsi alla parte muraria retrostante.

Il primo corso è costituito da blocchi più grandi che poggiano direttamente sulla roccia tagliata tramite uno strato molto pigiato di argilla giallastra. Dal punto dove si trova il blocco di eccezionali dimensioni (a circa 5 m dall'ingresso) ed un altro grande adiacente, fino all'accesso del *dromos*, le murature non poggiano direttamente sulla roccia tagliata, ma sulla terrazza artificiale, sostenuta al termine da un muro di contenimento. In tale zona, realizzata sulla terrazza artificiale, la muratura in blocchi di conglomerato poggia su una fondazione in piccole pietre calcaree frammiste ad argilla.

Spessore e forma del muro di contenimento

L'altezza del muro varia dai 0,5 m all'ingresso a più di 10 m di altezza allo *stomion*. Il muro non è ammorsato alla facciata dello *stomion* tranne che in due punti.

L'insieme del paramento in blocchi pressoché squadrati con la retrostante muratura di pietrame ha uno spessore totale variabile in funzione della distanza con l'accesso alla tomba. È maggiore verso l'ingresso (3 m e più) e minore all'entrata (a 15 m dalla facciata è pari a 2 m).

Rapporto della muratura con il terreno o la roccia retrostante

La muratura retrostante in pietrame e argilla termina controterra su di un'ampia struttura in mattoni crudi di argilla giallastra, di spessore variabile dai 2,5 ai 4 m, atta a proteggere il muro dalle infiltrazioni d'acqua. Al di sotto dei mattoni di argilla vi è uno strato di roccia frantumata, di tipo simile a quella ritrovata nella tasca al di sotto del pavimento del *dromos* nel 1921, di spessore variabile dai 0,10 ai 0,30 m.

Tale strato si estende anche al di sotto del sacco in pietrame calcareo e argilla relativo al retro delle murature di contenimento del *dromos*. Si presume che il materiale di tale strato sia proveniente dallo scavo del *dromos* e che i frammenti di roccia tagliata risultanti dallo scavo furono posti sul suolo naturale ai lati del *dromos*, e sui retri dei paramenti in blocchi pressoché squadrati (se già parzialmente realizzati) per tutta l'estensione planimetrica del tumulo, fino alla testa del muro di perimetro del tumulo che si connette obliquamente ai lati terminali del *dromos*.

La muratura in blocchi di conglomerato è costruita direttamente in adiacenza con la roccia tagliata dal *dromos*, dalla quota del pavimento del *dromos* fino al bordo superiore del taglio pressoché verticale della roccia [11].

La muratura in pietrame e i mattoni di argilla poggiano invece sulla superficie del suolo originario, per tutta la loro estensione dal bordo superiore del taglio del *dromos*.

I blocchi di conglomerato della zona più alta dei muri sono per la maggior parte posti di testa, a differenza dei blocchi posti di lungo delle parti basse, in modo da inserirsi all'interno della muratura retrostante [12].

Tutti i saggi realizzati scavando a tergo delle murature del *dromos*, sia nel lato sud che in quello nord, hanno constatato gli stessi principi costruttivi con alcune variazioni determinate da particolari situazioni al contorno [13].

Tracce di rivestimento di malta di calce

Non sono state ritrovate tracce di rivestimento in malta di calce.

Rifinitura superiore del muro

I blocchi dell'ultimo corso hanno la faccia superiore tagliata obliquamente in modo da creare una pendenza dall'interno verso l'esterno che favorisse il deflusso delle acque all'esterno del *dromos*.

2.2 'STOMION'

Dimensione, conformazione, lavorazione e materiale dei blocchi murari

La struttura muraria dello *stomion* è costituita da muratura piena in blocchi di conglomerato squadrati mediante taglio con la sega [14]. I piedritti sono costituiti da 9 corsi orizzontali; il primo corso è il più alto ed è pari a circa 90 cm, gli altri variano dai 70 ai 55 cm di altezza.

Il *triangolo di scarico* è costituito da 9 corsi di altezza variabile compresa tra 30 e 45 cm. Il blocco del primo corso del lato destro misura circa 2 x 1,5 x 0,9 m.

All'estradosso dell'architrave è presente un corso di

[11] Ciò prova che il *dromos* non poteva essere stato originariamente più ampio come ipotizzato da Evans.

[12] Tale condizione conferma la simultaneità della costruzione degli elementi, inoltre, dai saggi di Wace, non si individua alcun segno di rifacimento o spostamento delle murature.

[13] Nella sezione G-H lo strato di roccia fratturata al di sotto della muratura in pietrame e dei mattoni è posto su di un deposito di materiali quali frammenti ceramici, ossa, conchiglie, stucco dipinto e figurine in terracotta, indicanti presenze di tipo domestico. Wace ha ipotizzato che sulla cima della collina vi fossero una serie di abitazioni, e che il luogo ove fu costruito il *dromos* costituisse lo scarico dei rifiuti dell'abitato; lo scavo del corridoio del *dromos* ha pertanto attraversato tale deposito.

[14] secondo Küpper [1996] si tratta di sega a pendolo.

livellamento (allo scopo di rendere omogenea la quota di spiccato dei piedritti del *triangolo di scarico*) che si esclude dalla precedente numerazione. Al di sopra dei 9 corsi componenti il *triangolo di scarico* è presente una cornice in leggera sporgenza verso l'esterno costituita da una fila di blocchi di minore profondità.

Tessitura della muratura

I blocchi sono disposti per corsi orizzontali quasi isodomi, a meno del primo corso che risulta di maggiore altezza. I giunti verticali risultano sfalsati.

Elementi di decoro

Sul prospetto esterno, intorno alla porta di accesso, i blocchi di conglomerato sono lavorati in modo da realizzare una doppia cornice con riseghe. Tale lavorazione è ottenuta mediante il taglio con la sega. Le fasce della cornice sull'architrave sono più strette di quelle lungo i piedritti.

La porta era ornata ai lati da semicolonne in marmo verde poggianti su basi rettangolari di conglomerato, ammorsate mediante perni di connessione inseriti in alloggi scavati nella roccia pavimentale. Tali basi sono solo sbozzate per la faccia di contatto con il piano fondale, le facce esposte sono invece lavorate con cura mediante la sega. Il piano superiore delle basi mostra due fori per l'inserimento di perni di connessione con le colonne. Lungo il fronte e dietro i plinti vi è un leggero taglio con tre fori per perni che servivano per la tenuta di lastre di rivestimento dei piedritti. I frammenti delle lastre relative alla decorazione di rivestimento mostrano l'uso di strumenti quali la sega, il trapano tubolare e il cesello. Diverse sono state le ipotesi ricostruttive del decoro della facciata [15], che partono tutte dal rilievo metrico di Thiersch [16] e si riferiscono ai vari frammenti ritrovati attribuibili al decoro di facciata.

Analisi dei fori e delle cavità presenti

Sulle pareti dello *stomion* sono presenti diversi tipi di cavità e fori, non tutti risalenti ad epoca micenea. Sulle pareti interne al vano di accesso, in corrispondenza dei bordi della soglia in conglomerato sono presenti fori allineati in verticale. Tali fori servivano per l'alloggiamento di chiodi di bronzo per fissare il telaio della porta alla muratura dello *stomion*.

Al secondo corso sono presenti una serie di fori che seguono il profilo di una curva che non trovano interpretazione in letteratura. Verso l'interno, è presente una coppia di

[15] Perrot – Chipiez [1894, Tav. V e VI]; Wace [1949, fig. 51]; Marinatos [1953-4, Tav. I]; Mylonas [1957, fig. 26]; Younger [1987, fig. 3].

[16] Thiersch [1879, Tav. XIII].

[17] Perrot – Chipiez [1894, Tav. V e VI]; Wace [1949, fig. 51]; Marinatos [1953-4, Tav. I]; Mylonas [1957, fig. 26].

fori più grandi posti ad 1,7 m dal suolo che si è ipotizzato servissero per accogliere due puntoni a sicurezza della porta.

Elementi leganti e di interstizio

I blocchi sono apparecchiati senza l'ausilio di materiale legante. Presumibilmente, uno strato sottile di argilla era posto al di sopra di ogni corso orizzontale della muratura in conglomerato per favorire un uniforme contatto tra i blocchi.

Tracce di rivestimento interno di malta di calce

Non sono state rilevate tracce di rivestimento di malta di calce.

Rapporto stomion/*terreno a tergo*

I saggi effettuati non chiariscono il rapporto tra lo *stomion* e il terreno a tergo interessato allo scavo. La parte di contatto è comunque costituita solo da circa metà dello spessore in quanto la prima parte, pari a circa metà dello spessore totale, è in continuità con lo spessore della muratura perimetrale della camera.

Rapporto con la muratura adiacente della camera

Le murature dello *stomion* sono ammorsate alle murature perimetrali della camera tramite apparecchiatura dei blocchi lapidei a giunti sfalsati.

Rapporto con le murature adiacenti del dromos

Il muro di contenimento del *dromos* è in connessione con lo *stomion* solo in due punti. Ciò evidenzia la successiva realizzazione delle murature del *dromos* rispetto allo *stomion*.

Dimensione, conformazione, lavorazione e materiale dell'architrave

L'architrave al di sopra della porta di accesso è costituito da due grandi lastre di conglomerato tagliate con la sega. Il blocco interno è più grande e ha dimensioni di circa 8 m di lunghezza, 5 m di larghezza e 1,2 m di spessore, raggiungendo un peso pari a circa 120 tonnellate. Il lato del blocco interno prospettante sulla camera è lavorato in modo da seguire la curvatura all'intradosso della cupola.

All'intradosso dell'architrave sono presenti due fori per contenere gli attacchi di una porta a doppio battente.

Modalità di appoggio ed incastro delle lastre architrave nella muratura dello stomion

Gli architravi sono unicamente poggiati sui piedritti e sulla muratura perimetrale della camera per un'estensione di circa 1 metro.

Dimensione, conformazione, lavorazione, materiale e

tessitura della muratura relativa al "triangolo di scarico"

Al di sopra degli architravi è realizzato il sistema del *triangolo di scarico*, foratura della muratura realizzata mediante la giustapposizione dei corsi in progressivo aggetto ai lati del vuoto, allo scopo di alleggerire il carico gravante nella mezzeria degli architravi.

Considerando tutto lo spessore dello *stomion*, dalla facciata esterna alla camera, l'altezza del *triangolo di scarico* è maggiore all'esterno che all'interno, il triangolo è di forma allungata e appuntita sul prospetto esterno ed equilatera su quello interno.

La muratura dei piedritti del *triangolo di scarico* verso il *dromos* è costituita dalla sovrapposizione di 9 corsi orizzontali di blocchi di conglomerato di altezza minore rispetto ai blocchi formanti i piedritti della porta di accesso; l'altezza media è circa 40 cm. La forma di tali blocchi, data dalle dimensioni di base, altezza e profondità, risulta dal prospetto rettangolare allungata, per la prevalenza della misura di base sulle altre. Nell'ordine base > profondità > altezza. I giunti verticali sono di norma sfalsati. I blocchi sono tagliati con la sega.

All'interno della camera il vuoto del *triangolo di scarico* è ottenuto con il taglio di sei corsi orizzontali ad anello per uno spazio via via decrescente fino alla chiusura del vuoto in corrispondenza del letto di posa del corso superiore.

Lastre decorative nascondevano il vuoto risultante dal *triangolo di scarico*. Diverse sono state le ipotesi ricostruttive del decoro della facciata [17], di cui l'ultimo contributo si riferisce proprio alla chiusura del vuoto del *triangolo di scarico* [18].

L'esame di due frammenti di lastre in gesso decorate a bassorilievo, l'uno rappresentante le zampe anteriori di un toro in posizione eretta e l'altro il dorso di un toro al galoppo, presenti al British Museum, appartenenti all'acquisizione Elgin, ha condotto a nuove ipotesi circa le lastre decorative a chiusura del vuoto del *triangolo di scarico* [19].

L'evidenza di incassi a coda di rondine praticati in specifici punti delle lastre per il sostegno, unitamente all'analisi delle tracce incise, quali quelle figurative, di rientranze geometriche e degli strumenti di lavoro, hanno fatto supporre che tali due frammenti appartenessero a due lastre di provenienza minoica che chiudevano la base del vuoto triangolare giusto all'estradosso dell'architrave [20].

I frammenti delle lastre decorative per la parte retrostante sono lavorate a martello e punta.

Pavimentazione dello stomion

[18] Younger [1987, fig. 3].
[19] Younger 1987.
[20] Younger [1987, pp. 144-145].

La pavimentazione del vano di accesso dello *stomion* è costituita da lastre di pietra formanti una soglia. Questa è costituita nelle parti prospicienti il *dromos* e la camera interna da lastre in pietra calcarea collocate direttamente sulla roccia e, nella parte centrale, costituente la soglia vera e propria (in quanto relativa allo spazio di apertura della porta a doppio battente), da un elemento rettangolare, di ampiezza 1,2 m, inserito ad incastro in una cavità poco profonda nella roccia. Tale elemento è formato da due piastre di conglomerato, dai bordi bisellati, adiacenti agli stipiti del vano e, al centro del vano, da due piccoli blocchi in *poros*, tagliati a forma di cuneo. Tale conformazione consentiva di porre in stretta adiacenza le lastre ai piedritti laterali, nonostante queste venissero inserite solo in seguito alla costruzione dello *stomion*. La soglia è infatti interna ai piedritti. A causa dell'inclinazione verso l'alto dell'apertura una soglia costituita da un unico blocco non poteva infatti essere inserita dall'alto verso il basso [21]. I giunti tra le lastre pavimentali sono riempiti di argilla giallastra e le lastre centrali poggiano su di uno strato pressato di piccole pietre e terra. La piastra di conglomerato sud presenta quattro chiodi di bronzo destinati a fissare alla soglia di pietra un rivestimento in bronzo, o in lamina di bronzo fissato su una lastra di legno. Per tale ragione la soglia lapidea sottostante non risultava a vista. La soglia presenta lungo il lato verso la stanza un piccolo gradino che serviva per la battita della porta. Benché al di sotto della soglia non vi sia un sistema di drenaggio delle acque, come presente nella Tomba di Clitennestra, il sistema delle pendenze impedisce all'acqua piovana di entrare nella camera interna.

2.3 Muratura perimetrale della camera e della cupola in aggetto

Dimensioni, conformazione, lavorazione e materiale dei blocchi murari

La volta è costituita di 33 corsi orizzontali di blocchi in conglomerato pressoché squadrati mediante lavorazione a martello e posti in opera senza legante. I corsi sono 9 al di sotto della quota dell'architrave di accesso, 2 in corrispondenza dell'architrave e 22 al di sopra di essa. Al termine un'unica pietra chiude all'apice la costruzione.

I blocchi del primo corso sono di grandezza maggiore rispetto ai restanti e sono alti circa 0,9 m. L'altezza dei blocchi diminuisce progressivamente verso l'alto. I giunti verticali sono sfalsati.

L'analisi dell'ultimo corso orizzontale [22] prima della lastra di chiave ha accertato che i conci non sono lavorati in tutta la profondità. I conci sono di forma trapezoidale in pianta e si toccano solo nei loro angoli interni per circa 3 pol-

[21] Lo stesso sistema costruttivo è presente ad Orchomenos.
[22] Blouet, 1833 e Perrot-Chipiez [1894, p. 492, fig. 184].

lici in profondità (circa 8 cm), i vuoti generati tra i blocchi sono colmati da piccole pietre inserite in forza che ne impediscono lo spostamento.

Elementi leganti e di interstizio

Non si riscontra l'uso di malta legante tra i blocchi, anche se Thiersch notò l'uso di una malta di argilla per dissimulare i giunti [23]; Perrot ha ripreso questo dettaglio aggiungendo che la malta di argilla poteva contenere della calce [24].

Descrizione dell'apparecchio murario

La muratura è apparecchiata in corsi orizzontali di altezza decrescente verso l'alto e ammorsata tramite lo sfalsamento dei giunti verticali.

I corsi murari orizzontali sono realizzati come anelli lapidei concentrici in progressivo aggetto verso l'interno fino a chiudere lo spazio all'apice.

Non esiste evidenza che illustri se la muratura nelle parti basse sia internamente composta a più file di blocchi.

In letteratura si parla della messa in opera a tergo della struttura della cupola di una pesante massa di pietrame con funzione di contrappeso [25].

Spessore e forma della cupola

Lo spessore alla base di tale muratura può ricavarsi dalla profondità del vano di accesso alla camera secondaria.

Dal rilievo dei blocchi costituenti l'ultimo corso della volta si rileva che questi hanno uno spessore di 90 cm [26].

Tracce di rivestimento interno

A partire dal terzo corso sono presenti fori che servivano per l'alloggiamento di chiodi a sostegno di un rivestimento decorativo interno.

Rapporto muratura della cupola/pozzo di scavo

La muratura della camera si inserisce in un pozzo scavato nella roccia le cui pareti sono inclinate verso l'interno [27]. Tale parte della cupola è in stretto contatto con la roccia perimetrale, ad eccezione del vano di accesso alla camera.

La parte superiore, emergente dal pozzo scavato è rivestita all'estradosso da uno strato di argilla. A tergo, presumibilmente, pietrame allettato con argilla e terreno al di sopra definisce la consistenza materiale dell'emergenza del

[23] Thiersch, 1879.

[24] Perrot-Chipiez, 1894.

[25] Pelon [1976, p. 175].

[26] Blouet, 1833 e Perrot-Chipiez [1894, p. 492].

[27] Detto da Wace e riportato da Pelon [1976, p. 174], comunque parzialmente evidente nella sezione trasversale sulla camera secondaria del rilievo di De Jong.

tumulo. Tale ammasso secondo Pelon [28] funge staticamente da contrappeso.

Individuazione di fasce murarie/fasi costruttive

I saggi di Wace non si sono svolti in prossimità della cupola e non hanno messo in luce evidenze circa tale tema.

La muratura perimetrale della camera e della cupola in aggetto, per le modalità di apparecchiatura visibili, sembra realizzata procedendo per anelli completi sovrapposti [29] e non per fasce verticali come supposto per la *tholos* di Nichoria [30].

Funzione della curvatura interna della volta

L'inclinazione delle pareti perimetrali ha inizio già alla quota del pavimento della camera.

In letteratura la geometria della curvatura interna della camera viene descritta dalla funzione $f_{(x)} = c\ x^d$; ove $f_{(x)}$ è la misura del raggio della camera alla profondità x dalla chiave al corso considerato; nel caso del Tesoro di Atreo le costanti c e d sono rispettivamente 2,7 e 0,69[31].

Inclinazione dei letti di posa

Non si rileva alcuna evidenza in rapporto alle indicazioni di Dörpfeld su Kakovatos [32].

Ipotesi sulla modalità di messa in opera dell'apparecchio murario della cupola

In letteratura sono presenti alcune considerazioni sulla successione delle fasi costruttive [33]. Si ipotizzano due principali fasi costruttive: la prima relativa alla costruzione della cupola fino alla quota architrave dello *stomion* e la seconda relativa alla costruzione della parte della cupola superiore a tale quota. Un palo disposto al centro della camera interna, opportunamente tenuto fisso, si suppone servisse per controllare la geometria della costruzione durante l'elevazione della cupola. Si ipotizza inoltre l'uso di rampe di lavoro disposte all'estradosso della cupola e progressivamente disposte a quote superiori man mano che procedeva la costruzione.

Tali considerazioni scaturiscono da un'analisi della statica della costruzione affrontata a livello qualitativo.

2.4 MURATURA PERIMETRALE DELLA CAMERA

[28] Pelon [1976, p. 175].

[29] Tale modalità di prosecuzione della costruzione è stata rilevata nella *tholos* circolare di Thorikos da Gasche – Servais, 1971.

[30] Wilkie [1992, p. 239].

[31] Cavanagh e Laxton, 1987.

[32] Dörpfeld [1908, p. 303] legge nelle murature superstiti della tholos A di Kakovatos la presenza di letti di posa inclinati nei modi della disposizione radiale dei corsi propria di un arco murario.

[33] Santillo Frizell – Santillo, 1984.

SECONDARIA

Dimensioni, conformazione, lavorazione e materiale dei blocchi murari

La camera è scavata nella roccia, ed è pressoché quadrata di circa 6 m di lato ed è alta circa 5,8 m.

Tessitura della muratura dell'accesso

La geometria del vano di accesso alla camera secondaria segue le proporzioni dell'entrata principale. Il vano è largo 1,4 m, profondo 2,43 m e alto 2,5 m. L'altezza dei piedritti è ottenuta dalla sovrapposizione di quattro corsi orizzontali della muratura della camera. La muratura dell'accesso alla camera secondaria è in continuità con la muratura della camera.

I piedritti interni presentano al lato della stanza delle fasce murarie che misurano 0,10 m circa che potrebbero segnare gli elementi iniziali di un muro attualmente mancante. Aldilà del vano murario di passaggio è presente in continuità un secondo vano in adiacenza unicamente tagliato nella roccia, di dimensioni pari a circa 3 m di larghezza e 2,5 m di profondità, in connessione alla camera.

Analisi dei fori e delle cavità presenti

Intorno al vano di accesso sono presenti una serie di fori che servivano per il sostenimento di un decoro oggi scomparso.

Ai lati dei piedritti sono presenti fori per l'inserimento del telaio di una porta a due battenti. Vi è un'altra serie di fori sul cantonale esterno del piedritto.

Architrave

L'architrave è costituita dalla successione di due blocchi lapidei. Il primo blocco presenta all'intradosso i fori per l'inserimento di una porta a doppia anta.

Dimensione, conformazione, lavorazione, materiale e tessitura della muratura relativa al "triangolo di scarico"

Al di sopra dell'architrave è presente il *triangolo di scarico* che ha la geometria di un triangolo equilatero. Il paramento del *triangolo di scarico* prospiciente la camera è realizzato mediante due corsi progressivamente aggettanti, all'interno, è composto dalla sovrapposizione di otto corsi in blocchi lapidei di minore dimensione, quattro in corrispondenza di ciascuno dei corsi relativi il paramento prospettante sulla camera interna.

Soglia

la soglia è mancante e non è presente la cavità per l'inserimento.

Rapporto muratura della camera/terreno a tergo

La stanza interna è unicamente tagliata nella roccia senza presenza di muratura di rivestimento.

Ipotesi sulla modalità di messa in opera della muratura

Al centro della stanza vi è una piccola fossa tagliata nella roccia, scavata da Schliemann, a lato di questa sono situate due basi in conglomerato. Tale fossa poteva presumibilmente contenere un pilastro rettangolare a sostegno di un cassettonato lapideo di copertura oggi mancante.

2.5 CONSISTENZA DEL TUMULO

Materiali componenti il tumulo

Uno strato di argilla impermeabilizzante è posto a copertura della muratura della cupola all'estradosso; si ipotizza la presenza di pietrame e di un successivo strato di terra a copertura [34].

Tecniche della messa in opera

I saggi effettuati da Wace non hanno indagato gli strati componenti il tumulo, non consentendo di identificare delle fasi nella messa in opera in rapporto con quanto riscontrato nella *tholos* circolare di Thorikos [35]

Sistemi di deflusso delle acque

Uno strato di piccoli frammenti di roccia tagliata è stato ritrovato in tutte le trincee di saggio effettuate intorno al tumulo. Tale strato è disposto sull'originaria superficie del suolo per tutta l'estensione del tumulo, fino alla testa del muro di contenimento del tumulo a perimetro.

Le acque meteoriche che filtrano attraverso lo strato di terra e di pietrame del tumulo trovano il mantello di argilla impermeabilizzante posto in diretto contatto con la muratura ad impedire all'acqua di entrare all'interno della camera. Le acque, grazie alla pendenza del suolo, defluiscono verso l'esterno e, per la presenza dello strato sottostante di piccoli frammenti di roccia, vengono drenate verso l'esterno.

Lo spesso pacchetto di mattoni di argilla ritrovato a tergo della muratura di pietrame connessa alla muratura di contenimento del *dromos* potrebbe costituire anche per la cupola muraria il sistema adottato per migliorare l'impermeabilizzazione delle murature a contatto con il tumulo, in analogia con la tecnologia costruttiva presente nel contatto murature del *dromos*/ tumulo.

Dimensione, conformazione, lavorazione e materiale

[34] Secondo Pelon, la funzione statica del tumulo è quella di contrappeso ai blocchi lapidei in aggetto e di garantire il carico necessario per mantenere l'apice e i corsi superiori della cupola nella loro corretta posizione. Il tumulo inoltre, assieme al mantello di argilla posto in diretto contatto con la muratura, impedisce alle acque meteoriche di entrare all'interno della camera.

[35] Gasche – Servais, 1971.

dei blocchi murari costituenti il muro a perimetro del tumulo, sua tessitura ed eventuale rivestimento

Alla base del tumulo è presente un muro a perimetro. Il muro superstite è incompleto e, dai saggi del '39, si è dedotto si sviluppasse circolarmente intorno alla camera ad una distanza di circa 25 m dalla sommità della cupola. I muri di contenimento del tumulo vanno dalla collina a congiungersi con il terminale del *dromos* ai lati sud e nord obliquamente.

Il muro di perimetro, dello spessore di poco superiore a 1 m e di 1,5 m di altezza è più ampio alla base che in sommità. Tale muro è fondato sulla roccia emergente ed è costituito da blocchi di pietrame calcareo e argilla, rivestiti da un paramento di blocchi squadrati di *poros* di forma trapezoidale in pianta. In tali blocchi erano inseriti sul retro dei perni in legno a coda di rondine atti a connettere le due parti distinte di muratura.

Il muro di perimetro sostiene alla base il tumulo che copre l'estradosso della cupola e ne impedisce il dilavamento.

I saggi di Wace hanno ritrovato in tutto l'intorno della tomba e del *dromos* uno strato di ciottoli di calcare, fino alla testa del muro di contenimento, in alcuni casi nello strato di ciottoli erano inclusi frammenti di conglomerato provenienti dalla lavorazione dei blocchi per la tomba. Tale condizione fa presupporre che la messa in opera dello strato di ciottoli sia avvenuta contemporaneamente alla costruzione della tomba. Poiché sia lo strato di ciottoli posto a nord dell'ingresso sia quello sul lato opposto del *dromos* sono omogenei Wace deduce che il *dromos* e la cupola furono costruiti contemporaneamente, come progetto unitario.

Il comportamento delle strutture in muratura può

essere analizzato attraverso l'analisi limite attribuendo alla muratura il modello di materiale non resistente a trazione [1,2,3].

In tale modello la cella resistente elementare è costituita da due conci murari soggetti a pressione eccentrica e taglio e si assumono come ipotesi di base quattro condizioni del materiale muratura:

1 resistenza nulla a trazione;
2 infinita resistenza a compressione;
3 impossibilità di rottura per slittamento;
4 la deformazione elastica può essere trascurata.

Tali condizioni estreme sono adeguate a descrivere i caratteri sostanziali del materiale muratura [4] e permettono di trattare l'analisi della stabilità di tali strutture con i metodi dell'analisi limite inizialmente istituiti per lo studio del comportamento plastico delle strutture in acciaio [5].

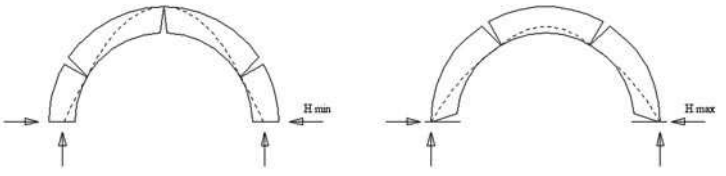
In tal modo si prescinde dall'individuazione dello stato contingente di sollecitazione, che si riconosce poco significativo nell'esame della stabilità della struttura [6] e si valuta invece la condizione di stabilità della struttura individuandone i margini di sicurezza in rapporto agli eventuali meccanismi di collasso della struttura congruenti con la forma geometrica, il peso proprio e i carichi indotti.

In base alle condizioni con cui si schematizza il materiale murario, in riferimento all'arco murario si richiamano i comportamenti primari indotti.

In base all'incapacità della struttura di rispondere a trazione deve necessariamente verificarsi che in un esistente arco murario (che può sostenersi) in conci (anche solo idealmente tracciati), definito nella geometria, peso proprio e carichi, la curva delle pressioni (il poligono funicolare delle successive risultanti da concio a concio) sia interna alla struttura.

Poiché il poligono funicolare delle successive risul-

[1] Heyman, 1982.
[2] Como, 1992.
[3] Heyman, 1999.
[4] Heyman [1982, pp. 28-30].
[5] Kooharian [1952, p. 317]; Heyman [1966, p. 250].
[6] Heyman [1995, p. 9].



tanti da concio a concio non varia, se le forze peso (peso proprio e carichi) aumentano proporzionalmente, e ciò può essere ammissibile per l'infinita resistenza a compressione attribuita al materiale, si può affermare che se in un arco murario, definito nella geometria, peso proprio e carichi, è possibile trovare almeno una curva delle pressioni tutta interna all'arco, l'arco è in equilibrio. Tale assunto definisce il *teorema statico* o *safe theorem*[7].

Se la curva delle pressioni passa per il bordo all'estradosso o all'intradosso dei conci dell'arco, e dunque una delle successive risultanti è applicata all'estremo del letto di posa di un concio, con la massima eccentricità possibile, si forma una cerniera ed è consentita la rotazione relativa dei conci.

Se la curva delle pressioni tocca il bordo dell'arco in tre punti le cerniere formatesi sono in numero di tre, e dunque tante da poter determinare il poligono funicolare delle successive risultanti; la struttura è in equilibrio, ed essendo isostatica è capace di assecondare le eventuali variazioni delle condizioni al contorno, quali, ad esempio, piccoli cedimenti agli appoggi. La conoscenza di almeno tre punti in cui passa la curva delle pressioni implica, per la proprietà dei poligoni funicolari, che la curva delle pressioni sia univocamente determinata, e pertanto è possibile conoscere l'entità della spinta. Tale condizione, per un arco a tutto sesto caricato solo dal peso proprio, corrisponde a due particolari situazioni costituenti lo stato di minima e di massima spinta[8], fig. 1, e che definiscono i due estremi dell'intervallo comprensivo delle infinite possibili curve delle pressioni di un dato arco con i relativi carichi dati.

In una struttura muraria la possibilità di poter variare al suo interno la curva delle pressioni implica una grande adattabilità della struttura alla variazione delle condizioni al contorno, quali piccoli cedimenti, variazioni sul posizionamento dei carichi ecc.. La condizione di spinta minima corrisponde spesso alle condizioni reali. Ad esempio, nel momento del disarmo delle centine l'arco per assestarsi può non aver subito trovato il contrasto dei piedritti per l'assorbimento della spinta, o, invece, in un arco esistente da lungo tempo è naturale che le imposte possano aver subito dei piccoli cedimenti e si siano leggermente allontanate.

Per analizzare le condizioni dello stato di fatto di un

1.
Curva delle pressioni nelle condizioni di minima e massima spinta

[7] Heyman [1982, p. 34].
[8] Heyman [1982, p. 71].

arco murario è importante valutare gli eventuali condizionamenti che la struttura può aver subito per variazioni delle condizioni al contorno. I suggerimenti ottenuti dall'osservazione della condizione ambientale trovano riscontro nell'analisi del quadro fessurativo. Le fessure presenti all'intradosso, o all'estradosso, manifestano infatti sul lato opposto della sezione corrispondente la presenza di una cerniera e dunque il passaggio della curva delle pressioni al bordo sella sezione dell'arco. Dalla lettura del quadro fessurativo, quale può essere ad esempio lo stato di spinta minima, può determinarsi, attraverso il rilievo della struttura e la valutazione dei pesi e i metodi della statica grafica, la reale entità della spinta e valutare pertanto, nell'esame delle strutture a contenimento, il coefficiente di sicurezza della struttura.

Secondo il modello di materiale non resistente a trazione la rottura della struttura si verifica solo se si formano almeno quattro cerniere e dunque, divenendo il sistema labile, si produce un meccanismo di collasso che determina il crollo della struttura[9]. Come si è detto, le cerniere si formano in quei punti in cui la curva delle pressioni tocca il bordo all'intradosso o all'estradosso dell'arco, abilitando i conci dell'arco a ruotare separandosi nei giunti di contatto. Una volta formatosi un numero di cerniere tale da produrre un meccanismo, il crollo avviene per il valore più piccolo del coefficiente di carico che dia un lavoro positivo delle forze esterne.

Tale condizione definisce il *teorema cinematico*, che costituisce l'assioma duale al *teorema statico* per la valutazione della condizione di sicurezza di una struttura muraria. Ad esempio, attraverso il *teorema cinematico* è possibile ritrovare il valore che un carico applicato all'estradosso di un arco deve raggiungere affinché l'arco collassi mediante un meccanismo cinematico[10].

In una cupola muraria la presenza delle sole lesioni meridiane costituisce la condizione fisiologica di minima spinta, che denunzia un lieve allargamento dell'appoggio, come avviene per l'arco quando un leggero allargamento delle imposte, frequente di norma già al disarmo delle centine, manifesta le fisiologiche lesioni in chiave all'intradosso e ai reni all'estradosso. Se la curva delle pressioni nel ricercare una nuova configurazione tocca la superficie interna o esterna della cupola (e questo può accadere per una geometria errata della cupola - spessore troppo sottile della sezione; eccessivo peso dei carichi in chiave-), si formano delle cerniere di possibili movimenti delle parti in cui la struttura si è divisa, sviluppando delle pericolose lesioni lungo i paralleli all'estradosso e all'intradosso. Se il numero delle cerniere formatesi è tale da rendere labile la struttura avviene che, con il

[9] Heyman [1982, p. 40].
[10] Como [2005, p. 44].

valore più piccolo del coefficiente di carico che dia un lavoro positivo delle forze esterne, ha luogo il crollo della cupola.

Per una cupola muraria esistente la valutazione della condizione fisiologica di minima spinta costituisce uno strumento essenziale, da attuarsi in stretto riferimento con la lettura del quadro fessurativo, per valutare la condizione di sicurezza della struttura. In tal caso, considerando uno spicchio meridiano di piccola ampiezza radiale della cupola in esame e il peso di ciascun concio applicato nei relativi baricentri, l'analisi consiste nella valutazione della curva delle pressioni, tra quelle staticamente ammissibili (tutta interna alla struttura), corrispondente alla condizione di spinta minima, ovvero tangente all'estradosso nella zona di chiave e all'intradosso in prossimità dei reni, che, con la formazione delle cerniere nei punti in cui tocca l'estradosso o l'intradosso, sia capace di descrivere un meccanismo di deformazione della struttura che assecondi un lieve allargamento alle imposte [11]. In tale condizione il valore della spinta è univocamente determinato e lo si confronta con la capacità delle strutture alle imposte (generalmente il tamburo) di compiere il necessario contrasto, verificando la condizione di sicurezza della struttura.

[11] Como [2000, p. 164].

appendice III

Richiami sull'analisi membranale applicata alle cupole

Una cupola in materiale resistente sia a compressione che a trazione viene schematizzata dalla sua superficie media ed è definibile come una superficie di rivoluzione ottenuta dalla rotazione di una curva piana intorno ad un asse giacente sul piano della curva stessa. Tale superficie di rivoluzione è composta dall'insieme di curve meridiane e anelli paralleli.

La posizione di un meridiano è dato dalla longitudine ϑ, angolo che una curva meridiana forma rispetto al meridiano di riferimento su un piano parallelo. La posizione di un cerchio parallelo è dato dalla colatitudine φ, angolo compreso tra l'asse di rivoluzione e la normale alla superficie su di un piano meridiano.

I carichi esterni determinano lungo i meridiani delle tensioni σ_φ dirette lungo la tangente al meridiano. Poiché si considera una deformazione assialsimmetrica della struttura, in risposta alle tensioni presenti nei meridiani i cerchi paralleli possono esclusivamente allargarsi o restringersi.

La presenza dei paralleli determina una notevole azione frenante alla deformazione dei meridiani. Pertanto il momento flettente presente nei meridiani risulta trascurabile e può dirsi che la tensione lungo i meridiani è costante ed essi sono soggetti a solo sforzo normale; per unità di lunghezza, l'espressione dello sforzo normale è pari a

$$N_\varphi = \sigma_\varphi t$$

ove t corrisponde allo spessore della cupola.

Allo stesso modo i cerchi paralleli sono soggetti ad uno sforzo normale per unità di lunghezza pari a

$$N_\vartheta = \sigma_\vartheta t$$

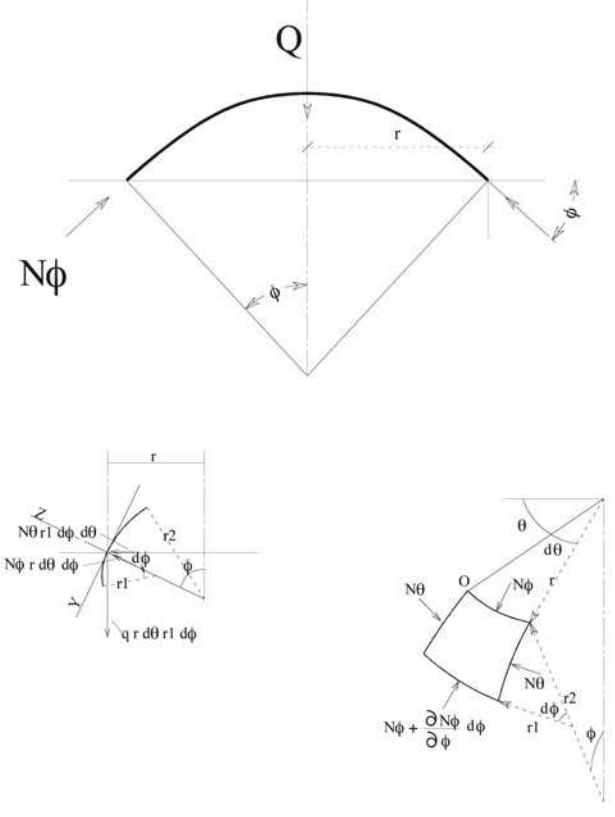
Immaginando di tagliare il guscio con un piano parallelo e schematizzando bidimensionalmente su un piano meridiano la calotta considerata, fig. 1, può scriversi l'equazione di equilibrio alla traslazione verticale

$$2 \pi r N_\varphi \sin\varphi = Q$$

ove r è il raggio del parallelo alla latitudine φ e Q il peso della calotta, ovvero della parte della cupola tagliata dal piano parallelo considerato.

In tal modo è possibile ricavare N_φ come

$$N_\varphi = Q / 2 \pi r \sin\varphi \qquad (1)$$



Per determinare gli sforzi N_ϑ occorre considerare l'equilibrio di un singolo elementino di superficie *dA* della cupola, fig. 2.

Un elemento infinitesimo della curva meridiana di estensione $d\varphi$ sulla superficie di rivoluzione è definito da due piani principali di curvatura: il piano meridiano e il piano ad esso ortogonale passanti per il punto medio sulla superficie e dai raggi di curvatura r_1 ed r_2 degli estremi della curva meridiana infinitesima sul piano meridiano e dal raggio *r* del punto medio sul piano parallelo.

Pertanto, la lunghezza dei lati di un elementino infinitesimo *dA* della superficie del guscio, fig. 2, è pari rispettivamente a

$r_1\, d\varphi, \quad r\, d\vartheta = r_2\, sin\varphi\, d\vartheta$

Definendo *q* quale peso dell'unità di superficie del guscio, il peso di *dA* è pari a

$dQ = q\, dA = q\, r_1\, d\varphi\, r\, d\vartheta$

Il carico verticale per unità di superficie può essere scomposto in una componente lungo la tangente al meridiano Y e in una componente normale Z, tali forze per unità di superficie sono funzione di φ che individua la posizione del parallelo. Per determinare gli sforzi N_ϑ si consideri l'equilibrio nella direzione normale alla superficie Z del singolo elementino di superficie *dA*, fig. 2.

1.
Equilibrio di una calotta
2.
Equilibrio dell'elementino infinitesimo

Per dA gli sforzi lungo i meridiani sono:
alla colatitudine φ, $N_\varphi \, r \, d\vartheta$;
alla colatitudine $\varphi + d\varphi$,

$$(N_\varphi + \frac{\partial N_\varphi}{\partial \varphi} d\varphi) \cdot (r + \frac{\partial r}{\partial \varphi} d\varphi) d\vartheta$$

lungo il parallelo, $N_\vartheta \, r_1 \, d\varphi$

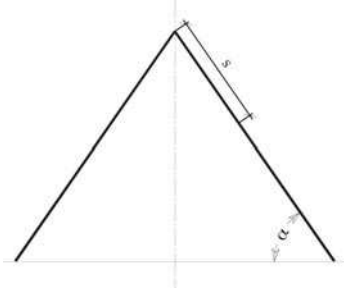
Trascurando gli incrementi infinitesimi delle sollecitazioni, l'equilibrio nella direzione normale alla superficie Z del singolo elementino di superficie dA può scriversi
$dQ \, cos\varphi = N_\varphi \, r \, d\vartheta \, d\varphi + N_\vartheta \, r_1 \, d\varphi \, d\vartheta \, sin\varphi$
ovvero
$- N_\varphi \, r \, d\vartheta \, d\varphi - N_\vartheta \, r_1 \, d\varphi \, d\vartheta \, sin\varphi + q \, r_1 \, d\varphi \, r_2 \, sin\varphi \, d\vartheta \, cos\varphi = 0$
poiché $r = r_2$ l'equazione diventa
$- N_\varphi \, r_2 \, sin\varphi \, d\vartheta \, d\varphi - N_\vartheta \, r_1 \, d\varphi \, d\vartheta \, sin\varphi + q \, r_1 \, d\varphi \, r_2 \, sin\varphi \, d\vartheta \, cos\varphi = 0$
e dunque
$- N_\varphi \, r_2 - N_\vartheta \, r_1 + q \, r_1 \, r_2 \, cos\varphi = 0$
ovvero
$- N_\varphi / r_1 - N_\vartheta / r_2 + q \, cos\varphi = 0$ (2)

Da cui, per qualsiasi geometria della curva meridiana della cupola, è possibile ricavare gli sforzi N_φ e N_ϑ in ogni punto, ricavando N_φ dalla (1) e di seguito N_ϑ dalla (2).

Nel caso di cupola sferica di raggio R, avviene che $r_1 = r_2 = R$ per cui le equazioni (1) e (2) diventano
$N_\varphi = Q / 2 \, \pi \, R \, sin\varphi$; $N_\varphi + N_\vartheta = R \, q \, cos\varphi$

Nel caso di un guscio conico, fig. 3, le equazioni di equilibrio che conducono alla valutazione degli sforzi N_φ e N_ϑ divengono (Flügge [1962, p. 37])
$N_\varphi = - p \, s / 2 \, sin\alpha$ $N_\vartheta = - p \, s \, cos\alpha \, cot\alpha$
ove per un cono l'angolo φ è costante e lo si pone pari a $\varphi = \alpha$, s è la distanza sulla generatrice del cono dall'apice al parallelo considerato, $r_2 = s \, cos\alpha$, $r_1 = \infty$, e p è il peso del cono per unità di superficie.

In tal caso va osservato che gli sforzi meridiani presenti lungo le direttrici del cono risultano progressivamente maggiori procedendo dall'alto verso il basso, per l'incremento di carico e di inclinazione corrispondente alla direttrice.



3.
Sforzi lungo i meridiani e lungo i paralleli in un guscio conico

appendice IV

Valutazione della condizione di ecquilibrio della cupola all'intorno del foro del "triangolo di scarico"

Il foro triangolare del *triangolo di scarico* taglia i primi sei corsi orizzontali ad anello della cupola emergente dal pozzo. Pertanto si esaminano le perturbazioni, provocate dalla mancanza di continuità degli anelli per i sei corsi suddetti, nel campo di compressioni radiali degli anelli orizzontali.

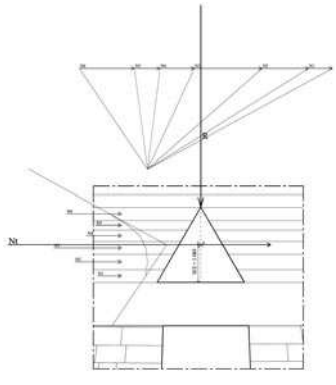
Il mantenimento dell'equilibrio si raggiunge con la formazione di due archi di scarico ai lati del foro che trasferiscono le forze ai lati. Nell'intorno del foro triangolare la forza peso dello spicchio meridiano tagliato alla base dall'apertura si compone con le azioni di compressione radiale relative ai sei corsi e trasferisce ai lati del vano le azioni in gioco mediante due archi ideali simmetrici ai lati. La risultante delle forze peso dello spicchio meridiano tagliato alla base dal foro agisce verticalmente in corrispondenza del vertice del foro triangolare, e la risultante delle azioni di compressione dei sei corsi agisce orizzontalmente a metà dell'altezza del triangolo, fig. 1.

Conoscere la curvatura dell'arco ideale capace di ricostituire localmente una condizione di equilibrio è cosa complessa, d'altra parte una semplice schematizzazione riesce efficacemente a chiarire la soluzione di equilibrio ritrovata dalla muratura. La muratura trasferisce le azioni per compressione, pertanto, conoscendo la retta orizzontale della direzione della risultante degli sforzi di compressione *N*, la direzione della risultante ai carichi verticali che corrisponde all'asse verticale di simmetria del triangolo e le estremità del vuoto triangolare, possiamo immaginare che due segmenti passanti per tre punti, come due pendoli compressi, costituiscano l'asse di due fasce murarie compresse che, in equilibrio con i suddetti carichi, schematizzano l'arco murario in grado di trasferire le azioni alle imposte, fig. 2.

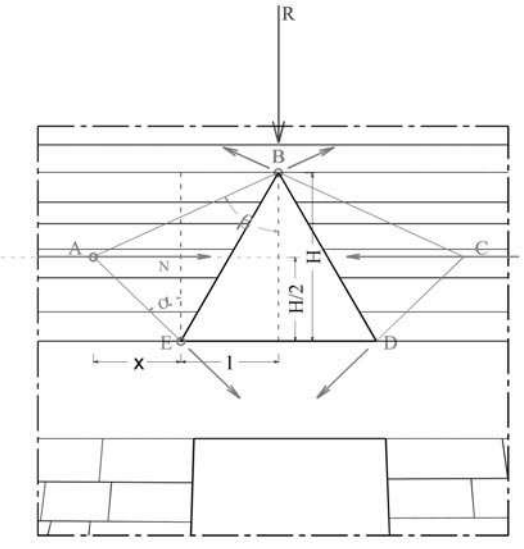
Si ricavano qui di seguito i valori della risultante *R* dei carichi verticali e della risultante *N*, sforzo di compressione totale dei sei anelli tagliati agente simmetricamente in orizzontale a metà altezza del triangolo.

Le estremità interrotte degli anelli sono interessate al trasferimento dei carichi relativi allo spicchio di cupola muraria posto al di sopra dell'apertura.

La risultante dei carichi dello spicchio sezionato al



1.
Posizioni della risultante degli sforzi di compressione e della risultante del peso dello spicchio meridiano tagliato alla base dal foro



2.
Schematizzazione dei due archi murari simmetrici ai lati del foro

di sopra del vuoto *R* agisce sulla direzione di una retta verticale passante per l'apice del triangolo.

Il valore di *R* è ricavabile dall'analisi del peso dello spicchio di cupola e di tumulo che interessa la luce del foro triangolare.

L'analisi statica condotta sulla cupola della *tholos* ha preso in considerazione uno spicchio di estensione angolare sul parallelo di 11,25° e ha valutato al corso 7, ultimo anello intero prima del foro, determinato dal *triangolo di scarico*, una risultante dei carichi verticali relativi alla cupola muraria pari a 10,21 t e una risultante dei carichi verticali relativi al tumulo pari a 22,41 t, e dunque un valore totale della risultante dei carichi al corso 7 pari a

$R = 32{,}62\ t$

Lo spicchio della cupola che interessa il vuoto ha un'estensione angolare sul parallelo corrispondente a 20°; in proporzione, il carico *R*, esercitato dallo spicchio della cupola e dal tumulo in testa al foro triangolare è pari a

$R = 32{,}62\ \ 20° / 11{,}25 = 58\ t$ (1)

Lo sforzo di compressione *N* presente nei sei corsi orizzontali ad arco di circonferenza tagliati dal foro è pari alla sommatoria della pressione radiale di ciascun corso per il suo raggio medio, ovvero

$$N = \sum_{i=1}^{n} p_{ri} \cdot R_{mi} = \sum_{i=1}^{n} \frac{S_{0i}}{S_i} \cdot R_{mi} \qquad (2)$$

ove R_{mi} è la misura del raggio di circonferenza media di ciascuno dei sei corsi e dunque corrispondente a $R_i - (R_i - r_i)/2$, differenza del raggio della circonferenza esterna con lo spessore orizzontale della cupola, e dunque per i rispettivi sei corsi pari a

corso 1: $7{,}11 - (7{,}11 - 5{,}19)/2 = 6{,}15\ m$;

corso 2: $6{,}89 - (6{,}89 - 4{,}95)/2 = 5{,}92\ m$;

corso 3: $6{,}60 - (6{,}60 - 4{,}74)/2 = 5{,}67\ m$;

corso 4: $6{,}35 - (6{,}35 - 4{,}55)/2 = 5{,}45\ m$;

corso 5: $6{,}14 - (6{,}14 - 4{,}37)/2 = 5{,}25\ m$;

corso 6: $5{,}97 - (5{,}97 - 4{,}14)/2 = 5{,}05\ m$;

S_i è la dimensione dell'arco di 11,25° della circonferenza media per ciascuno dei sei corsi ed è pari a

corso 1 $S_1 = 2\,\pi\,6{,}15\,(11{,}25 / 360) = 1{,}21\ m$;

corso 2: $S_2 = 2\,\pi\,5{,}92\,(11{,}25 / 360) = 1{,}16\ m$;

corso 3: $S_3 = 2\,\pi\,5{,}67\,(11{,}25 / 360) = 1{,}11\ m$;

corso 4: $S_4 = 2\,\pi\,5{,}45\,(11{,}25 / 360) = 1{,}07\ m$;

corso 5: $S_5 = 2\,\pi\,5{,}25\,(11{,}25 / 360) = 1{,}03\ m$;

corso 6: $S_6 = 2\,\pi\,5{,}05\,(11{,}25 / 360) = 0{,}99\ m$;

e S_{oi} costituisce l'azione orizzontale calcolata graficamente per ciascuno dei sei corsi ed è pari a

corso 1: $S_{o1} = 1{,}35\ t$;

corso 2: $S_{o2} = 2{,}61\ t$;

corso 3: $S_{o3} = 3{,}80\ t$;

corso 4: $S_{o4} = 1{,}93\ t$;

corso 5: $S_{o5} = 1{,}44\ t$;

corso 6: $S_{o6} = 3{,}09\ t$;

Lo sforzo normale N totale, che tende a chiudere gli anelli lapidei orizzontali tagliati dalla presenza del foro, risulta dalla (2) pari a

$$N = 72{,}52\ t \qquad (3)$$

L'incognita del problema, descritto in fig. 2, è la direzione dei segmenti che identificano i pendoli compressi, ovvero l'ampiezza che gli angoli α e β indicati in figura devono avere per l'equilibrio delle forze.

La misura x, distanza orizzontale tra il limite del vuoto e l'intersezione dei due pendoli, costituisce la reale incognita in quanto α e β sono tra loro in relazione. Infatti

$$\mathrm{Tg}\,\alpha = 2\,x / H;\ \text{e} \qquad (4)$$

$$\mathrm{Tg}\,\beta = (l + x)\,2 / H; \qquad (5)$$

ove H, altezza del *triangolo di scarico* è $H = L\ cos30$, con $L = 2{,}5\ m$; ad $H / 2$ è posta la retta orizzontale di azione della risultante degli sforzi di compressione N; ed $l = L / 2$ è metà della base del triangolo equilatero costituente il *triangolo di scarico*.

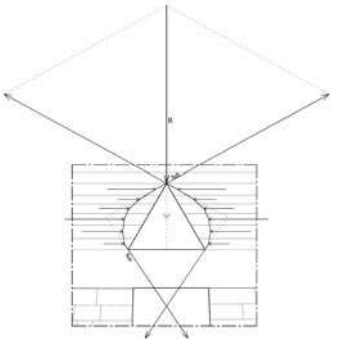
Esaminando l'equilibrio alla traslazione orizzontale del nodo A, su cui agisce N, si ha:

$$S_{BA}\,cos(90 - \beta) + S_{EA}\,cos(90 - \alpha) = N$$

Ovvero

$$S_{BA}\,sin\beta + S_{EA}\,sin\alpha = N \qquad (6)$$

Ed esaminando, ancora al nodo A su cui agisce N, l'equilibrio alla traslazione verticale, si ha:



$S_{BA}\, sin(90 - \beta) = S_{EA}\, sin(90 - \alpha)$
ovvero
$S_{BA}\, cos\beta = S_{EA}\, cos\alpha$
E dunque
$S_{EA} = S_{BA}\, cos\beta \,/\, cos\alpha$ (7)

Sostituendo la (7) nella (6) si ottiene:
$S_{BA}\, sin\beta + S_{BA}\, cos\beta\, Tg\alpha = N$; ovvero $S_{BA}\,(sin\beta + cos\beta\, Tg\alpha) = N$
e dunque
$S_{BA} = N \,/\, (sin\beta + cos\beta\, Tg\alpha)$ (8)

Ricavata l'espressione della reazione del pendolo AB, si esamina l'equilibrio alla traslazione verticale al nodo B, ove passa la risultante dei carichi verticali R e intercorrono le azioni simmetriche S_{BA} e S_{BC} di eguale intensità.
E si ha:
$2\, S_{BA}\, cos\beta = R$ (9)

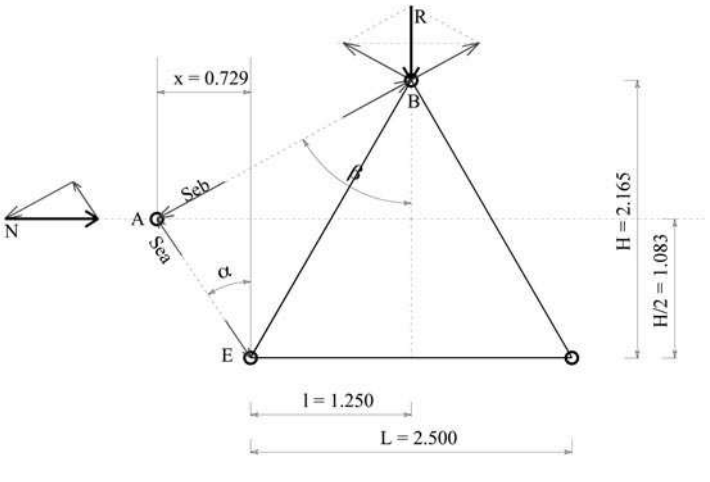
Sostituendo la (8) nella (9) si ottiene:
$2\, cos\beta \,/\, (sin\beta + cos\beta\, Tg\alpha)\, N = R$

Ovvero la relazione:
$2 \,/\, (Tg\beta + Tg\alpha) = R \,/\, N$ (10)

Sostituendo $Tg\alpha$ e $Tg\beta$ con le relazioni geometriche (4) e (5)

$$\frac{2}{\frac{l+x}{H/2}+\frac{x}{H/2}}=\frac{R}{N} \qquad (11)$$

e introducendo i valori reali della (1) e della (3) si ottiene
$x = 0{,}729\ m$; $\alpha = 33{,}94°$; $\beta = 61{,}31°$; $S_{BA} = 60{,}42\ t$;
$S_{EA} = 34{,}95\ t$
La soluzione del problema definisce intensità e direzione delle azioni terminali trasmesse alle imposte dall'ideale arco murario che si forma all'intorno di ciascuno dei due lati obliqui del triangolo, fig. 3.
Come si evince dalla figura 4 le azioni simmetriche dei due archi ideali inducono alla base del triangolo uno sforzo di compressione all'architrave lapideo lungo l'asse orizzontale.



3.
Azioni terminali trasmesse alle imposte
4.
Rappresentazione grafica della condizione di equilibrio raggiunta con la formazione dei due archi di scarico

Aa.vv. 1988
Aa.vv., *Domes from Antiquity to the Present*, Proceedings of the Iass-msu International Symposium, Istanbul, Turkey, May 30 - June 3, 1988, Mimar Sinan Üniversitesi, Istanbul 1988.

Adam 1977
J.P. Adam, *Les voûtes et arcs claves, aux origines de la voûte*, Dossier de l'archéologie 25, 1977, pp. 84ss.

Adam 1988
J.P. Adam, *L'arte di costruire presso i romani*, Milano 1988.

Adler 1886
F. Adler, *Preface* di Schliemann 1886.

Becchi – Foce 2002
A. Becchi – F. Foce, *Degli archi e delle volte. Arte del costruire tra meccanica e stereotomia*, Venezia 2002.

Bell 1926
E. Bell, *Prehellenic Architecture in Aegean*, London 1926.

Belli 1984
P. Belli, *Nuovi documenti per lo studio delle tombe circolari cretesi*, smea 25, Roma 1984, pp. 91ss.

Belli 1991
P. Belli, *Tholoi nell'Egeo dal II al I millennio*, in D. Musti (et al.) edd., *La transizione dal miceneo all'alto arcaismo. Dal palazzo alla città*, Atti del Convegno Internazionale, Roma 14-19 marzo 1988, ismea, Roma 1991, pp. 425ss.

Belli 1995
P. Belli, *L'architettura della tholos*, in M. Tsipopoulou - L. Vagnetti edd., *Achladia. Scavi e*

ricerche della Missione Greco-Italiana in Creta Orientale (1991-1993), Roma 1995, pp. 89ss.

Belli 1997

P. Belli, *Architecture as Craftsmanship: LM III Tholoi and Their Builders*, in R. Laffineur - P.P. Betancourt edd., *TECHNI. Craftsmen, Craftswomen and Craftsmanship in the Aegean Bronze Age*, Proceedings of the 6th International Aegean Conference, Philadelphia, Temple University, 18-21 April 1996, Aegaeum 16, 1997, pp. 251ss.

Belli 2003 (1)

P. Belli, *Aspects of Monumental Funerary Architecture in LBA Crete*, in N.C. Stampolidis - V. Karageorghis edd., *Ploes... Sea Routes… Interconnections in the Mediterranean 16th – 6th c. BC*, Proceedings of the International Symposium, Rethymnon 2002, Athens 2003, pp. 325ss.

Belli 2003 (2)

P. Belli, *On Measuring Tholoi in the Aegean Bronze Age*, in K.P. Foster - R. Laffineur edd., *Metron. Measuring the Aegean Bronze Age*, Proceedings of the 9th International Aegean Conference, New Haven, Yale University, 18-21 April 2002, Aegaeum 24, 2003, pp. 403ss.

Belluzzi 1980

O. Belluzzi, *Scienza delle costruzioni*, vol. 3, Bologna 1980.

Benvenuto 1991

E. Benvenuto, *An Introduction to the History of Structural Mechanics*, New York 1991.

Benvenuto – Corradi 1990

E. Benvenuto – M. Corradi, *La statica delle false volte*, in A. Ambrosi (et al.) edd., *Architettura in pietra a secco*, Atti del 1° Seminario internazionale, Noci – Alberobello, 27 – 30 settembre 1987, Fasano (BR) 1990, pp. 93ss.

Besenval 1984

R. Besenval, *Technologie de la voûte dans l'orient ancien*, vol. I e II, Paris 1984.

Biancofiore 1973

F. Biancofiore, *Per la storia dell'architettura minoica: sulla tombe a tholos della Mesarà*, in *Antichità Cretesi*. Studi in onore di Doro Levi 1. CronCatania 12, 1973, pp. 41ss.

Blegen 1937

C.W. Blegen, *Prosymna, the Helladic Settlement Preceding the Hargive Heraeum*, Cambridge 1937.

Blegen 1954

C.W. Blegen, *An Early Tholos Tomb in Western Messenia*, Hesperia 23, 1954, pp. 158ss.

Blegen 1973

C.W. Blegen, *The Palace of Nestor at Pylos in Western Messenia*, vol. 3, Princeton 1973.

Blouet 1833

G.A. Blouet, *Expédition scientifique de Morée. Architecture et sculptures*, vol. 2, Paris 1833.

Bohn 1880

R. Bohn, *Über die technische Herstellung der Tholos bei Menidi*, in Lolling et al. 1880, pp. 45ss.

Boyd 2002

M.J. Boyd, *Middle Helladic and Early Mycenaean Mortuary Practices in the Southern and Western Peloponnese*, bar - is 1009, 2002.

Boyd 1978

T. D. *Boyd, The Arch and the Vault in Greek Architecture*, aja 82, 1978, pp. 83ss.

Branigan 1970

K. Branigan, *The Tombs of Mesara*, London 1970.

Breymann 1885

G.A. Breymann, *Allgemeine Bau-Constructions-Lehre, mit besonderer Beziehung auf das Hochbauwesen, ein Leitfaden zu Vorlesungen und zum Selbstunterricht*, Stuttgart 1860, nell'ed. ital. *Trattato generale di costruzioni civili, con cenni speciali intorno alle costruzioni grandiose*, Vallardi, Milano 1885.

Bulle 1907

H. Bulle, *Orchomenos I. Die älteren Ansiedlungsschichten*, München 1907.

Burford 1960

A. Burford, *Heavy Transport in Classical Antiquity*, ec.hr 2nd Series 13, 1960/61, p. 1ss.

Burford 1969

A. Burford, *The Greek Temple Builders at Epidauros*, Liverpool 1969.

Cavanagh – Laxton 1981

W.G. Cavanagh – R.R. Laxton, *The Structural Mechanics of the Mycenaean Tholos Tomb*, bsa 76, 1981, pp. 109ss.

Cavanagh – Laxton 1982

W.G. Cavanagh – R.R. Laxton, *Corbelled Vaulting in the Late Minoan Tholos Tombs of Crete*, bsa 77, 1982, pp. 65ss.

Cavanagh – Laxton 1985

W.G. Cavanagh – R.R. Laxton, *Vaulting in Mycenaean Tholos Tombs and Sardinian Nuraghi*, in C. Malone – S. Stoddart edd., Papers in Italian Archaeology 4, Part 3, *Patterns in Protohistory*, bar-is 245, 1985, pp. 413ss.

Cavanagh – Laxton 1987

W.G. Cavanagh – R.R. Laxton, *The Mechanics of Prehistoric Corbelled Buildings*, in M.S. Balmuth ed., *Nuragic Sardinia and the Mycenaean World*, Studies in Sardinian Archaeology 3, bar 387, 1987, pp. 39ss.

Cavanagh – Laxton 1988

W.G. Cavanagh – R.R. Laxton, *Problem Solving and the Architecture of Tholos Tombs*, in E.B. French - K.A. Wardle edd., *Problems in Greek Prehistory*, Papers Presented at the Centenary Conference of the British School of Archaeology at Athens, Manchester, April 1986, Bristol 1988, pp. 385ss.

Cavanagh – Laxton 1990

W.G. Cavanagh – R.R. Laxton, *Vaulted Construction in French Megalithic Tombs*, oja 9, 1990, pp. 141ss.

Cavanagh – Mee 1998

W.G. Cavanagh – C. Mee, *A Private Place: Death in Prehistoric Greece*, sima 125, 1998.

Cavanagh – Mee 1999

W.G. Cavanagh – C. Mee, *Building the Treasury of Atreus*, in P.P. Betancourt (et al.) edd., *Meletemata*, Studies in Aegean Archaeology Presented to Malcolm H. Wiener as He Enters His 65th Year, Aegeum 20, 1999, vol. I, pp. 93ss.

Choisy 1899

A. Choisy, *Histoire de l'Architecture*, Paris 1899.

Clarke – Engelbach 1930

S. Clarke – R. Engelbach, *Ancient Egyptian Masonry. The Building Craft*, London 1930.

Colombo 1955

G. Colombo, *Manuale dell'ingegnere*, Milano 1955.

Como 1992

M. Como, *Equilibrium and Collapse Analysis of Masonry Bodies*, in Meccanica 27, 1992, pp. 185ss.

Como 1996

M. Como, *Multiparameter Loadings and Settlements in Statics of Masonry Structures*, in Atti del Convegno Nazionale *La meccanica delle murature tra teoria e progetto*, Bologna 1996, pp.197ss.

Como 1997

M. Como, *Un antico restauro statico della cupola di S. Pietro a Roma*, in C. Conforti ed., *Lo specchio del cielo: forme significati tecniche e funzioni della cupola, dal Pantheon al Novecento*, Milano 1997, pp. 245ss.

Como 1998 (1)

M. Como, *Minimum and Maximum Thrust States in Statics of Ancient Masonry Bridges*, in Proc. 2nd Int. Arch Bridge Conf., Rotterdam 1998, pp. 133ss.

Como 1998 (2)

M. Como, *On the Statics of Ancient Masonry Bridges*, in *Civil Infrastructure Systems: Intelligent Renewal*, London 1998, pp. 73ss.

Como 2000

M. Como, *Costruzione e forma statica del Pantheon*, in Restauro 151, 2000, pp. 149ss.

Como 2005

M. Como, *Problematiche connesse agli interventi di riparazione e di rinforzo statico dei beni architettonici*, in A. Aveta (et al.) edd., *Restauro e consolidamento*, Atti del Convegno Restauro e Consolidamento dei beni architettonici e ambientali. Problematiche attuali, Napoli 31 marzo - 1 aprile 2003, Roma 2005, pp. 43ss.

Como M.T. 2004

M.T. Como, *Aspetti costruttivi e statici delle tholoi micenee*, in M. Marazzi ed., *Centro Mediterraneo Preclassico. Studi e ricerche I*, Napoli 2004, pp. 13ss.

Como M.T. 2005 (1)

M.T. Como, *Aspetti costruttivi e statici delle tholoi micenee*, in Proceedings of Conference *Theory and Practice of Construction: Knowledge, Means, Models*, Ravenna 27 - 29 ottobre 2005, vol. 4, pp. 1433ss.

Como M.T. 2005 (2)

M.T. Como, *L'architettura delle tholoi micenee: analisi degli aspetti compositivi, costruttivi e statici*, Tesi di dottorato, Università degli Studî Suor Orsola Benincasa, Napoli 2005.

Como M.T. 2006

M.T. Como, *Analysis of the Statics of the Mycenaean Tholoi*, in Proceedings of The *Second International Congress on Construction History*, Cambridge 2006, vol. 1, pp. 777ss.

Coppa 1968

M. Coppa, *Storia dell'urbanistica dalle origini all'ellenismo*, Torino 1968.

Coulton 1977

J.J. Coulton, *Greek Architects at Work, Problems of Structure and Design*, London 1977.

Cremasco – Laffineur 1999

V. Cremasco – R. Laffineur, *The Engineering of Mycenaean Tholoi - The Circular Tomb at Thorikos Revisited*, in P.P. Betancourt (et al.) edd., *Meletemata*, Studies in Aegean Archaeology Presented to Malcolm H. Wiener as He Enters His 65th Year, Aegeum 20, 1999, vol. 1, pp. 139ss.

Cummer 1980

W. W. Cummer, *Itinerant Aegean Builders*, TUAS 5, 1980, p. 3ss.

Darcque 1987

P. Darcque, *Les tholoi et l'organisation socio - politique du monde mycénienne*, in in R. Laffineur ed., *Thanatos: Les Coutumes Funéraires en Egée a l'Age du Bronze*, Actes du colloque de Liège 21-23 avril 1986, Aegeum 1, 1987, pp. 185ss.

Di Barbro Frizell 1987

S. Di Barbro Frizell, *The True Domes in Mycenaean and Nuragic Architecture*, in M. S. Balmuth ed., *Nuragic Sardinia and the Mycenaean World*, Studies in Sardinian Archaeology 3, BAR 387, 1987, pp. 56ss.

Dobiat 1982

C. Dobiat, *Zu den Maßverhältnissen in mykenischen Tholosgräbern*, in Beiträge zur ägäischen Bronzezeit 11, 1982, pp. 1ss.

Dörpfeld 1908

W. Dörpfeld, *Alt – Pylos. I. Die Kuppelgräber von Kakovatos*, AM 33, 1908, pp. 295ss.

El-Naggar 1999

S. El-Naggar, *Les Voûte dans l'architecture de l'Egypte ancienne*, vol. 1 e 2, Le Caire 1999.

Flügge 1962

W. Flügge, *Stresses in Shells*, Berlin 1962.

French 2002

E. French, *Mycenae, Agamemnon's Capital*, Charleston 2002.

Gasche – Servais 1971

H. Gasche – J. Servais, *La Tholos Circulaire*, in H.F. Mussche (et al.) edd., *Thorikos 1968: rapport préliminaire sur la cinquième campagne de fouilles*, Bruxelles 1971, pp. 21ss.

Giedion 2002

S. Giedion, *Architektur und das Phänomen des Wandels. Die drei Raumkonzeptionen in der Architektur*, Tübingen 1969, nell'ed. ital. L. Bica ed., *Architettura e il fenomeno del cambiamento. Periodi di transizione*, Dario Flaccovio Editore, Palermo 2002.

Ginouvès – Martin 1985

R. Ginouvès – R. Martin, *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romain. Matériaux, techniques de construction, techniques et formes du décor*, Roma 1985.

Ginouvès 1992

R. Ginouvès, *Dictionnaire méthodique de l'Architecture grecque et romain. Eléments constructifs: supports, couvertures, aménagements intérieurs*, Atene 1992.

Giovannoni 1925

G. Giovannoni, *La tecnica della costruzione presso i romani, materiali e tecniche*, Roma 1925.

Giuffrè 1988

A. Giuffrè, *Monumenti e terremoti. Aspetti statici del restauro*, Roma 1990.

Giuffrè 1990

A. Giuffrè, *Letture sulla meccanica delle murature storiche*, Roma 1990.

Gordon Childe 1966

V. Gordon Childe, *The Prehistory of European Society*, London 1958, nell'ed. ital., *Preistoria della società europea*, Sansone editore, Firenze 1966.

Goodison 2001

L. Goodison, *From Tholos Tomb to Throne Room: Perceptions of the Sun in Minoan Ritual*, in R. Laffineur – R. Hägg edd., *Potnia: Deities and Religion in the Aegean Bronze Age*, Aegeum 22, 2001, pp. 77ss.

Graham 1962

J.W. Graham, *The Palace of Crete*, Princeton 1962.

Graham 1968

J.W. Graham, *Further Notes on the Minoan Foot*, *Pepragmena tu B' Diethnus Kritologhiku Sinedriu 1*, Filologhikos Sillogos 'O Chrisostomos', Athens 1968, pp. 157ss.

Graham 1979

J.W. Graham, *Further Notes on Minoan Palace Architecture*, AJA 83, 1979, pp. 49ss.

Heyman 1966

J. Heyman, *The Stone Skeleton*, I.J.Sol. Str. 2, 1966, pp. 249ss.

Heyman 1967

J. Heyman, *On Shell Solution for Masonry Domes*, I.J.Sol.Str. 3, 1967, pp. 227ss.

Heyman 1972

J. Heyman, *"Gothic" Construction in Ancient Greece*, JSAH 31, 1972, pp. 3ss.

Heyman 1982

J. Heyman, *The Masonry Arch*, Chichester 1982.

Heyman 1995

J. Heyman, *The Stone Skeleton. Structural Engineering of Masonry Architecture*, Cambridge 1995.

Holland 1921-23

L.B. Holland, *Architectural Notes*, BSA 25, 1921-23, pp.396ss.

Hood 1960

M.S.F. Hood, *Tholos Tombs of Aegean*, Antiquity 34, 1960, pp. 166ss.

Hult 1983

G. Hult, *Bronze Age Ashlar Masonry in the Eastern Mediterranean: Cyprus, Ugarit, and Neighboring Regions*, SIMA 66, Göteborg 1983.

Jaky 1936

J. Jaky, *Stability of Earth Slopes*, in Proceedings of the 1st ICSMFE, Cambridge, Mass., vol. 2, 1936, pp. 125ss.

Kamm 1997

W. Kamm, *The "Kuppelgrab von Tyrins" as a Paradigm for the Usage of Measuring Rods and Ropes in Prehistoric Greece*, in *Archea Elliniki Technologhia*, Proceedings of the 1st International Conference, Thessaloniki 4 – 7 September 1997, pp. 135ss.

Kamm 2000

W. Kamm, *Mykenische Kuppelgräber. Die Entschlüsselung der Bauentwürfe*, AM 115, 2000, pp. 19ss.

Kanta 1997

A. Kanta, *Late Bronze Age Tholos Tombs, Origins and Evolution. The Missing Links*, in J. Driessen – A. Farnoux edd., *La Crète mycénienne*, Actes de la Table Ronde Internationale, École française d'Athènes 26-28 Mars 1991, BCH Supplément 30, 1997, pp. 233ss.

Kooharian 1952

A. Kooharian, *Limit Analysis of Voussoir (Segmental) and Concrete Arches*, in J.P. Aci 49, 12, 1952, pp. 317ss.

Korrés 1976 (1)

G.S. Korrés, *Timbi, tholi ke taphiki kikli tis Messinias*, PAE 1976, pp. 22ss.

Korrés 1976 (2)

G.S. Korrés, *Anaskaphi Pilu*, PAE 1976, pp. 139ss.

Korrés 1976 (3)

G.S. Korrés, *Erevne ana tin Pilian*, PAE 1976, pp. 253ss.

Korrés 1976 (4)

G.S. Korrés, *Anaskaphi en Peristeria, Pilo*, PAE 1976, pp. 47oss.

Korrés 1978

G.S. Korrés, *Erevni ke Anaskaphe ana tin Pilian*, PAE 1978, pp. 323ss.

Korrés 1979

G.S. Korrés, *To chronikon ton anaskaphon tis Voidoikilias* in *Archeologhiche Diatrive epi thematon tis epochis tou chalkou*, Atene 1979.

Korrés 1980

G.S. Korrés, *Anaskaphe ana tin Pilian*, PAE 1980, pp. 12oss.

Korrés 1983 (1)

G.S. Korrés, *Anaskaphi Voidoikilias Pilias*, PAE 1983, pp. 147ss.

Korrés 1983 (2)

G.S. Korrés, *The Relations between Crete and Messenia in the Late Middle Helladic and Early Late Helladic Period*, in R. Hägg – N. Marinatos edd., *The Minoan Thalassocracy: Myth and Reality*, Proceedings of the Third International Symposium at the Swedish Institute in Athens, 31 May - 5 June, 1982, SkrAth 4, 32, 1983, pp. 141ss.

Kouskouna – Makropoulos 2004

V. Kouskouna, K. Makropoulos, *Historical Earthquake Investigations in Greece*, AnnG 47, 2004, pp. 723ss.

Küpper 1996

M. Küpper, *Mykenische Architektur. Material, Bearbeitungstechnik, Konstruktion und Erscheinungsbild*, Espelkamp 1996.

Lancellotta 2004

R. Lancellotta, *Geotecnica*, Bologna 2004.

Loader 1998

C.N. Loader, *Building in Cyclopean Masonry, with Special Reference to Mycaean Fortifications on Mainland Greece*, sima-pb, Göteborg 1998.

Lolling et al. 1880

H.G. Lolling (et al.), *Das Kuppelgrab bei Menidi*, Athen 1880.

Marinatos 1953-4

Sp. Marinatos, ae 1, 1953-4, p. 11ss.

Marinatos – Hirmer 1960

S. Marinatos - M. Hirmer, *Crete and Mycenae*, London 1960.

Martin 1965

R. Martin, *Manuel d'architecture grecque. Matériaux et techniques*, Paris 1965.

Martin – Lloyd – Müller 1972

R. Martin - S. Lloyd - H.W. Müller, *Ancient architecture. Mesopotamia, Egypt, Crete, Greece*, nell'ed. ital., *Architettura Mediterranea Preromana*, Electa, Milano 1972.

Martin 1979

R. Martin, *L'architecture mégalithique de Malte*, Kokalos 22-23, 1979, pp. 111ss.

McDonald – Hope Simpson 1961

W.A. McDonald - R. Hope Simpson, *Prehistoric Habitation in South-Western Peloponnese*, aja 65, 1961, pp. 221ss.

McDonald – Hope Simpson 1964

W.A. McDonald - R. Hope Simpson, *Further Exploration in South-Western Peloponnese*: 1962-63, aja 68, 1964, pp. 229ss.

McDonald – Hope Simpson 1969

W.A. McDonald - R. Hope Simpson, *Further Exploration in South-Western Peloponnese*: 1964-68, aja 73, 1969, pp. 123ss.

Mylonas 1957

G.E. Mylonas, *Ancient Mycenae, the Capital City of Agamemnon*, Princeton 1957.

Mylonas 1966

G.E. Mylonas, *Mycenae and the Mycenaean Age*, Princeton 1966.

Merkouri 1999

C. Merkouri, *Evidenze sepolcrali fra la fine del M.E. e gli inizi del TE: tumuli e tholoi della Messenia*, in C. Giardino ed., *Culture Marinare nel Mediterraneo centrale e occidentale fra il XVII e il XV secolo a.C.*, Roma 1999.

Müller 1975

K. Müller, *Das Kuppelgrab von Tyrins*, in *Tyrins Forschungen und Berichte*, vol. 8, pp. 1ss, Mainz 1975.

Müller–Wiener 1988

W. Müller-Wiener, *Griechisches Bauwesen in der Antike*, München 1988.

Nart 2001

M. Nart, *L'influenza della tecnica delle costruzioni storica sul comportamento meccanico delle cupole in muratura*, Tesi di dottorato, Università degli Studi G. D'Annunzio, Chieti 2001.

Naumann 1971

R. Naumann, *Architektur Kleinasiens*, Tübingen 1971.

Nelson 2001

M.C. Nelson, *The Architecture of Epano Englianos*, University of Toronto, PhD, 2001.

Nörling, 1995

T. Nörling, *Altägäische Architekturbilder*, Mainz 1995.

Orlandos 1966

A.K. Orlandos, *Les matériaux de construction et la technique architecturale des anciens grecs*, vol. 1 e 2, Paris 1966.

Pelon 1974

O. Pelon, *Sur deux tholoi de Messénie*, BCH 98, 1974.

Pelon 1976

O. Pelon, *Tholoi, tumuli et cercles funéraires. Recherches sur les monuments funéraires de plan circulaire dans l'Égée de l'âge du Bronze (IIIe et IIe millénaires av. J.–C.)*, BÉFAR 229, Paris-Athènes 1976.

Pelon 1990

O. Pelon, *Les tombes à tholos d'Argolide: architecture et rituel funéraire*, in R. Hägg – G.C. Nordquist edd., *Celebrations of Death and Divinity in the Bronze Age Argolid*, Proceedings of the Six[th] International Synposium at the Swedish Institute at Athens, 11 – 13 June 1988, SkrAth 4, 15, Stockholm, 1990, pp. 107ss.

Pelon 1998

O. Pelon, *Les tombes circulaires dans l'Égée de l'âge du Bronze: état des recherches sur les tombes à tholos*, Topoi 8/1, 1998, pp. 95ss.

Perrot – Chipiez 1894

G. Perrot – C. Chipiez, *La Grèce primitive, l'art mycénien*, tomo 6 di *Histoire de l'Art dans l'Antiquité*, Paris 1894.

Persson 1931

A.W. Persson, *The Royal Tombs at Dendra Near Midea*, Lund 1931.

Piccarreta 2000

F. Piccarreta, *I meccanismi dell'equilibrio delle strutture murarie*, Roma 2000.

Pini 1968

I. Pini, *Beiträge zur minoischen Gräberkunde*, Wiesbaden 1968.

Pozzi 1991

R. Pozzi, *La statica grafica nell'architettura, equilibrio e forma degli archi*, Bologna 1991.

Preziosi 1983

D. Preziosi, *Minoan Architectural Design. Formation and Signification*, Berlin 1983.

Rhomaios 1954

K. Rhomaios, *Analipsis Tholos A*, PAE 1954, pp. 270ss.

Rondelet 1840

J. Rondelet, *Traite théorique et pratique de l'art de bâtir*, Paris 1830-32, nell'ed. it. *Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare*, Francesco Del Vecchio, Napoli 1840.

Rohlfs 1963

G. Rohlfs, *Primitive Kuppelbauten in Europa*, Munchen 1957, nell'ed. it. *Primitive costruzioni a cupola in Europa*, L.S. Olschki, Firenze 1963.

Russu 1998

A.G. Russu, *Cronologia relativa al paramento murario dei vani interni di alcuni complessi nuragici. Osservazioni preliminari*, in M.S. Balmuth – R.H. Tykot edd., *Sardinian and Aegean Chronology. Towards the Resolution of Relative and Absolute Dating in the Mediterranean*, Proceedings of the International Colloquium "Sardinian Stratigraphy and Mediterranean Chronology" Tufts University, Medford, Massachusetts, March 17 - 19, 1995, Studies in Sardinian Archaeology 5, Exeter 1998, pp. 195ss.

Salvadori – Heller 1983

M.G. Salvadori – R. Heller, *Structure in Architecture. The Building of Buildings*, Englewood Cliffs 1963, nell'ed. it. *Le strutture in architettura*, Etas libri, Milano 1983.

Santillo Frizell – Santillo 1984

R. Santillo – B. Santillo Frizell, *The Construction and Structural Behaviour of the Mycenaean Tholos Tomb*, OpAth 15, 1984, pp. 45ss.

Santillo Frizell 1984

B. Santillo Frizell, *The Tholos Tomb at Berbati*, OpAth 15, 1984, pp. 25ss.

Santillo Frizell 1997

B. Santillo Frizell, *Monumental Building and Propaganda at Mycenae*, in *Archea Elliniki Technologhia*, Proceedings of the 1st International Conference, Thessaloniki 4 – 7 September 1997, pp. 625ss.

Santillo 1986

R. Santillo, *Le cupole a secco. Contributo per una diversa conoscenza delle tombe a tholos, dei trulli e dei nuraghi*, Edilizia militare 17-18, 1986, pp. 17ss.

Santillo 1997

R. Santillo, *Mycenaean Lessons of Descriptive Geometry Showing Cam Mechanisms to Move Huge Blocks*, in *Archea Elliniki Technologhia*, Proceedings of the 1st International Conference, Thessaloniki 4 – 7 September 1997, pp. 439ss.

Santillo 1990

R. Santillo, *Il blocco da 120 tonnellate a Micene*, Archeologia 1, 1990, pp. 1ss.

Schachermeyr 1962

F. Schachermeyr, *Forschungsbericht über die Ausgrabungen und Neufunde zur ägäischen Frühzeit 1957-1960*, AA 1962, pp. 105ss.

Schliemann 1881

H. Schliemann, *Orchomenos, Bericht über meine Ausgrabungen im Böotischen Orchomenos*, Leipzig 1881.

Schliemann 1886

H. Schliemann, *Tiryns: der prähistorische Palast der Könige von Tiryns, Ergebnisse der neuesten Ausgrabungen*, Leipzig 1886, nell'ed. ingl. *Tiryns: the Prehistoric Palace of the Kings of Tiryns*, London 1886.

Servais-Soyez 1984

J. Servais - B. Soyez, *La tholos 'oblongue' (Tombe IV) et le tumulus (Tombe V) sur le Vélatouri*, in H.F Mussche (et al.) edd., *Thorikos VIII, 1972-1976, rapport préliminaire sur les 9e, 10e, 11e et 12e campagnes de fouilles*, Gent 1984, pp. 14ss.

Shaw 1970

J.W. Shaw, *Minoan Building and Materials and their Uses*, University of Pennsylvania, PhD, 1970.

Shaw 1973

J.W. Shaw, *Minoan Architecture: Materials and Techniques*, ASAtene 49, Roma 1973.

Sparacio 1999

R. Sparacio, *La scienza e i tempi del costruire*, Torino 1999.

Stierlin 1997

H. Stierlin, *Greece, from Mycenae to the Parthenon*, Köln 1997.

Stuart – Revett 1830

J. Stuart – N. Revett, *Antiquities of Athens and other Places in Greece Sicily etc.*, Supplementary to the Antiquities of Athens 5, vol. 4, *The Temple of Apollo Epicurius at Bassae, near Phigalia, and Other Antiquities in the Peloponnesus*, illustrated by T.L. Donaldson, London 1830.

Taylor 1955

W.D. Taylor, *The Perseia Area*, BSA 50, 1955, pp. 207ss.

Tampone 1997

G. Tampone, *Interventi etruschi di consolidamento di strutture nella tomba etrusca di Montagnola a Sesto Fiorentino*, Bollettino di Ingegneria 11, 1997.

Thiersch 1879

F. Thiersch, *Die Tholos des Atreus zu Mykenae*, AM 4, 1879, pp. 177ss.

Valmin 1926-27

N.S. Valmin, *Two Tholos Tombs at Bodià in the Eastern Part of Triphylia*, BLund, 1926-27, pp. 54ss.

Valmin 1927-28

N.S. Valmin, *Continued Exploration in Eastern Triphylia*, BLund, 1927-28, pp. 171ss.

Valmin 1932

N.S. Valmin, *Tholos Tombs and Tumuli. Some Remarks on the Question of the Homeric Tombs Form*, in Corolla Archaeologica principi ereditario Regni Sueciae Gustavo Adolpho dedicata, Lund 1932.

Van Beek 1987

G.W. Van Beek, *Archi e volte nell'antico Vicino Oriente*, Le Scienze 229, 1987.

Varene 1977

P. Varene, *Le voûtes. Voûtes en encorbellement, voûtes clavée, voûtes d'arête et voûtes concretes: le passionnant problème de l'équilibre des forces*, Dossier de l'archéologie 25, 1977, pp. 72ss.

Wace 1921-23

A.J.B. Wace, *The Tholos Tombs*, BSA 25, 1921-23, pp. 283ss.

Wace 1931

A.J.B. Wace, *The Tholos Tombs at Mycenae: Structural Analysis*, in Persson 1931, pp. 140ss.

Wace 1940

A.J.B. Wace, *The Treasury of Atreus*, Antiquity 14, 1940, pp. 233ss.

Wace 1949

A.J.B. Wace, *Mycenae. An Archaeological History and Guide*, Princeton 1949.

Wace 1954

A.J.B. Wace, *Mycenae, 1939-54* Parte III. *Notes on the Construction of the Tomb of Clytemnestra*, BSA 50, pp. 194ss.

Wace 1956

A.J.B. Wace, *Mycenae, 1939-55* Parte I, 5. *The Treasury of Atreus*, BSA 51, 1956, pp. 116ss.

Wace 1964

A.J.B. Wace, *Mycenae an Archaeological Guide*, New York 1964.

Wright 1987

J.C. Wright, *Death and Power al Mycenae: Changing Symbols in Mortuary Practice*, in R. Laffineur ed., *Thanatos: Les Coutumes Funéraires en Egée a l'Age du Bronze*, Actes du colloque de Liège 21-23 avril 1986, Aegeum 1, 1987, pp. 171ss.

Wilkie 1992

N.C. Wilkie, *The MME Tholos Tomb*, in W.A. McDonald – N.C. Wilkie edd., *Excavations at Nichoria in Southwest Greece*, vol. 2, Minneapolis 1992, pp. 231ss.

Xanthoudides 1924

St. Xanthoudides, *The Vaulted Tombs of Messarà*, London 1924.

Younger 1987

J.G. Younger, *The Elgin Plaques from the Treasury of Atreus: Evidence for a New Reconstruction of the Facade*, in W. Schiering ed., Referate vom *Kolloquium zur Ägäischen Vorgeschichte*, Mannheim 20-22.2.1986, Schrift DArV 9, Mannheim 1987, pp. 138ss.

Finito di stampare nel dicembre 2007 per conto della Imago sas
di Elisabetta Prozzillo presso la Cangiano Grafica.