

Sul posizionamento degli obelischi e delle travi a contrasto in Egitto antico

Nota di Riccardo MANZINI
presentata dal Socio nazionale residente Franco LEVI
nell'adunanza del 7 marzo 2001

Riassunto. *Il lavoro, che fa seguito ai precedenti pubblicati nelle Memorie di codesta Accademia (Sc. Fis. 19-20, 1995-1996 e 22, 1998, 1-27), affronta il problema irrisolto della posa in opera de'le grandi travi a contrasto che costituiscono la copertura delle cripte di molte piramidi. Appurato infatti che non esistono a riguardo teorie soddisfacenti, l'autore ha ritenuto che tale metodica avrebbe potuto costituire un adattamento della tecnica, ben più conosciuta, della messa in opera degli obelischi, gli altri grandi monoliti dell'architettura egizia. Dopo aver quindi illustrato le caratteristiche di questi monumenti, e le relative metodiche più accreditate, l'autore suggerisce alcuni adattamenti da applicare a tali procedure per meglio rispondere allo scopo prefisso. Nel corso di questa illustrazione presenta due diagrammi che evidenziano rispettivamente la possibilità di stabilire la probabile altezza di un obelisco di cui si sia trovata una intera sezione, e la lunghezza massima ottenibile, senza incorrere in rotture, per un obelisco sottoposto alle tensioni che si svilupperebbero durante l'innalzamento con tali metodiche. Successivamente affronta il problema delle travi a contrasto, premettendo il caso specifico della piramide di Cheope, sia in quanto è l'unica a presentare la camera sepolcrale interamente nella sovrastruttura, sia perché costituisce il primo monumento in cui si sia utilizzata tale copertura. In ultimo affronta la questione relativamente a tutte le altre piramidi, adattando le metodiche precedentemente illustrate, le quali prevedono, secondo la prassi egizia, accorgimenti e mezzi elementari per ottenere gli eccezionali risultati constatabili da qualunque osservatore.*

Abstract. *The work following the previous ones published in the "Memorials of this Academy" (Memorie - Sc.Fis.19-20,1995-1996 and 22, 1998, 1-27) deals with the unsolved problem connected to the laying of the great contrast beams which form the covering of many pyramids.*

Having realised that there aren't any satisfactory theories about the matter, the author thinks such methodology could have been a kind of adjustment of the better known technique of using obelisks, the other great monoliths of the Egyptian architecture.

After illustrating the features of these monuments and the most reliable related methodologies, the author indicates some adjustments which should be made to these procedures in order to reach the appointed aim in a better way.

In his explanation he produces two diagrams which respectively underline the possibility to define the probable height of an obelisk, a whole section of which has been found, and the maximum length achievable, without incurring in breakages, by an obelisk submitted to the tensions generated when raising it using the above mentioned methodologies.

Later on, the author deals with the problem of the contrast beams, starting off by the particular case of the Pyramid of Cheops both as it is the only one showing the entire sepulchral chapel in its superstructure and because it is the first monument in which such covering has been used.

Finally he deals with the question with regard to all the other pyramids, adapting the previously illustrated methodologies which, according to the Egyptian procedure, request elementary devices and means to obtain the extraordinary results any observer can verify.

Pur presentando molte analogie, come le grandi dimensioni e la necessità di variare l'inclinazione dei monoliti, questi due problemi dell'architettura egizia presentano aspetti piuttosto differenti quali i diversi spazi in cui vennero realizzati, per cui ritengo necessario affrontarli separatamente.

L'innalzamento di un obelisco avveniva infatti sempre in spazi con limiti molto ampi, ma richiedeva un'estrema precisione, in quanto vi erano pochi margini per intervenire sulla verticalità, e nessuna possibilità di correggerne l'eventuale rotazione (molti obelischi infatti manifestano un disassamento o un mancato parallelismo con il piedistallo).

Non è da sottovalutare inoltre la difficoltà ad affrontare una leva molto instabile (e fragile), costituita dalla rotazione longitudinale del monumento nella fase di innalzamento.

Al contrario le travi di copertura, e specificamente quelle a contrasto, dovevano essere posizionate in spazi relativamente limitati, ma vi era per queste ultime la possibilità di scegliere l'inclinazione più adatta¹.

¹ Questa inclinazione varia infatti dai circa 33° della cripta di Cheope ai 40° di quella di Niuserra.

È comunque da segnalare che tutte le coperture a travi contrapposte presentano delle irregolarità di affrontamento, a conferma della difficoltà ad effettuare tale operazione.

Nell'ambito poi delle travi a contrasto, è evidente che la loro posa in opera nella piramide di Cheope sia da valutare in modo particolare, sia per collocazione cronologica (è il primo esempio conosciuto) che architettonica (poiché è l'unica cripta collocata interamente nella sovrastruttura).

In conseguenza di queste considerazioni ho quindi affrontato il problema dividendolo in due aspetti particolari:

1) Obelischi

2) Travi delle camere sepolcrali

Quest'ultimo è stato poi ulteriormente suddiviso in

2a) Travi della camera di Cheope

2b) Travi delle camere sepolcrali delle piramidi successive a Cheope

1) Obelischi

Prima di procedere ad esaminare dettagliatamente le ipotesi relative ai metodi di innalzamento di questi monumenti, ritengo indispensabile una breve puntualizzazione delle loro caratteristiche.

Generalità. Gli obelischi erano sempre disposti a coppie, collocate davanti ai piloni del tempio. Alcuni piccoli obelischi erano realizzati in quarzite, scisto, o calcare, ma generalmente il materiale impiegato fu sempre il granito delle cave di Aswan. La loro altezza variò da pochi metri ad un massimo di oltre 40 (dell'eccezionale obelisco incompiuto tuttora giacente nella cava di Aswan).

Estrazione dell'obelisco. Dopo aver scelto il banco più adatto ed omogeneo, l'obelisco era dapprima isolato dalla roccia madre, liberandone tutti i lati ma lasciandolo sostenuto da un sottile sepimento inferiore, quindi veniva totalmente asportata l'adiacente roccia a valle, forzato per mezzo di leve a rompere il sepimento, ed infine fatto scivolare fino al luogo di imbarco.

Quivi giunto, si scavava sotto di esso un canale in cui veniva fatta arrivare una imbarcazione, la quale era successivamente fissata all'obelisco in attesa della stagione dell'inondazione.

Al sopraggiungere della stagione propizia, contestualmente al crescere del livello del fiume, l'imbarcazione avrebbe sollevato il monolito, trasportandolo quindi fino alla destinazione definitiva.

Il granito. Il granito è una roccia eruttiva intrusiva proveniente dall'interno del globo terrestre, formata dall'associazione di quarzo, feldspato ed altri minerali, la quale è caratterizzata da una notevole durezza e resistenza. È impiegato in architettura come materiale pregiato da costruzione, e la possibilità di rifinirne la superficie con una bella politura lucente ne ha favorito l'impiego per sarcofagi e statue di ogni genere. La densità del granito (Goyon) si può assumere pari a $2,7 \text{ g/cm}^3$, e la sua resistenza a trazione per flessione dovrebbe essere intorno i $75 \div 80 \text{ kg/cm}^2$.

Geometria dell'obelisco. In tutti i casi noti il rapporto tra altezza e lato di base (H/b) risulta² circa 10.

La conferma che la pendenza assunta nella rastremazione del fusto fosse costante e dell'1%, si evince inoltre dal confronto tra quanto rilevato ed un documento egizio in cui due scribi (Hori ed Amenemope) trattano problemi relativi al trasporto di un obelisco di 110 cubiti, con una pendenza di 1 cubito ed 1 dito (pari appunto all'1%).

Queste constatazioni ci hanno suggerito la possibilità di stabilire per tutti gli obelischi (con una ragionevole approssimazione) la relazione esistente tra il lato di base (b), l'altezza (H) ed il lato della sommità (c)³, cosicché si possano dedurre, noto uno di questi parametri, gli altri due.

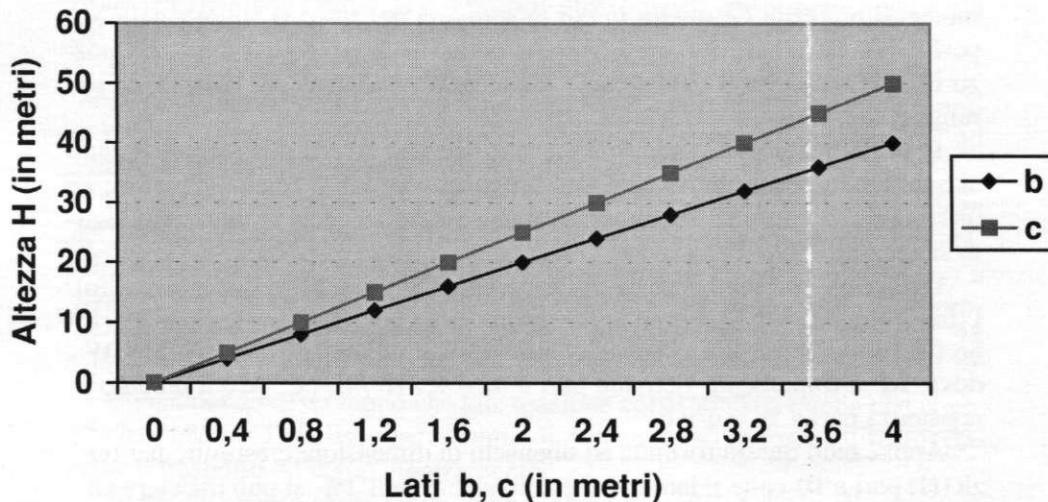
Nel considerare un modello di obelisco accetteremo quindi che la sua altezza sia 10 volte il lato di base, e che la pendenza delle facce sia 1%; così, per esempio, un obelisco di 20 metri di altezza avrà la base di $2,0 \times 2,0$ metri, e la sommità (base della cuspide) $1,60 \times 1,60$ metri.

In conseguenza di quanto sopra esposto si può tracciare quindi un diagramma in cui le ordinate indicano l'altezza (H) dell'obelisco, e le ascisse le misure del lato di base (b) e della cuspide (c).

² Sesostri 110,97 - Luxor 9,97 - Aswan (incompiuto) 10,43 - Parigi 9,36.

³ Pari al lato di base della cuspide sommitale.

Relazione tra altezze e basi degli obelischi



Lo scopo di questo diagramma è quello di fornire una stima approssimativa dell'altezza (e del volume) di un obelisco del quale si sia trovata una intera sezione trasversale del fusto.

Se l'ipotetico frammento ritrovato avesse infatti il lato di base di 2 metri, dal grafico si rileverebbe che in corrispondenza dell'ascissa 2 le ordinate delle due rette inclinate danno un'altezza pari rispettivamente a 20 e 25 metri. Ciò significa che l'altezza originaria dell'obelisco sarebbe probabilmente compresa tra questi due valori.

In particolare se l'ipotetico frammento in questione avesse costituito la base del monolito, l'altezza dell'obelisco sarebbe quella indicata dalla retta inferiore (retta b), pari a 20 metri; se invece tale frammento avesse costituito la base della cuspide, allora l'altezza del monumento risulterebbe dalla lettura della retta superiore (retta c), pari a 25 metri.

Di conseguenza tutti i frammenti intermedi a questi estremi non potrebbe essere appartenuti che ad un monumento (rispondente alle premesse) di altezza compresa tra questi due valori.

Caratteristiche meccaniche. A fronte di una ottima resistenza alla compressione, il granito fornisce una mediocre resistenza alla trazione (come pure tutte le rocce, il calcestruzzo ed i laterizi).

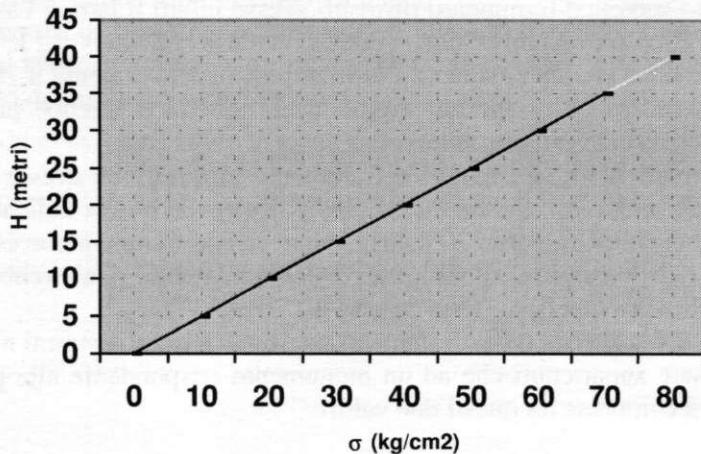
Di conseguenza le situazioni in cui l'obelisco è sottoposto agli sforzi più pericolosi per la sua integrità si presentano ogni qualvolta il fusto sia in parte a sbalzo, e sono proporzionali all'entità di tale sbalzo. In particolare uno dei momenti più critici è quello in cui la sommità del fusto si solleva dalla superficie della rampa, durante la discesa della sua base verso il fondo del pozzo in cui è ospitato il piedistallo⁴, rimanendo "a sbalzo" per metà della sua lunghezza.

In tali condizioni l'obelisco è soggetto ad uno sforzo di flessione dovuto al suo stesso peso, che induce una trazione sulle fibre litiche superiori; se questa tensione di trazione supera il limite ammesso per il granito, il monolito si spezza.

Dalla Scienza delle costruzioni sappiamo che, noti **P** (carico distribuito), **I** (lunghezza trave), e **d** (lato della sagoma d'incastro), la tensione di flessione (δ) in mezzeria di una trave avente sezione quadrata è dato da M / W , dove **M** è il momento flettente pari a $M = P * (I^2 / 8)$, e **W** è il modulo di resistenza pari a $W = d^3 / 6$.

Applicando questa formula ad obelischi di dimensioni crescenti, di altezza (H) pari a 10 volte il lato di base e pendenza dell'1%, si può tracciare un diagramma relativo alle tensioni che si generano alla metà del fusto in funzione della sua altezza.

Tensione di trazione per flessione



⁴ Si veda la successiva ipotesi costruttiva.

Risulta quindi evidente che esiste un limite alla possibile altezza di un obelisco, non superabile se non si riesce a contenere la zona soggetta a trazione per flessione (generata dal proprio stesso peso) entro meno della metà del fusto.

Poiché i costruttori egizi non potevano che avere una nozione puramente intuitiva di tale rapporto, era oltremodo indispensabile che il banco di granito da cui era ricavato l'obelisco non presentasse alcuna disomogeneità, ad evitare di abbassare ulteriormente tale limite di rottura.

A conferma di quanto considerato teoricamente sulla effettiva resistenza del granito, abbiamo eseguito una prova di flessione su due campioni di granito sardo aventi sezione quadrata di 4 centimetri di lato e lunghezza pari a 10 volte il lato di sezione (40 centimetri); la rottura dei due campioni di prova è avvenuta rispettivamente sotto una tensione di 78 kg/cm^2 , e di 74 kg/cm^2 .

Concludendo osserviamo che tale tensione corrisponde a quella che si verificherebbe per l'obelisco incompiuto di Aswan (qualora fosse ultimato) durante il trasporto od il suo innalzamento.

In base a quanto sopra risulta quindi che con quell'obelisco gli antichi egizi avevano raggiunto il limite delle possibilità pratiche consentite dalla loro tecnologia.

Ipotesi costruttive. L'ipotesi avanzata da Engelbach, ripresa da Chevrier, e successivamente modificata da Golvin e Goyon, suggerisce che l'obelisco, saldamente fissato ad una slitta, fosse trainato su di una enorme rampa ascendente in mattoni⁵ di altezza quanto più possibile prossima a quella del monolito, costruita sopra al piedistallo prescelto come base per il monumento.

Questo piedistallo era ospitato al fondo di un vasto pozzo ricavato nella rampa (grossolanamente a forma di imbuto) interamente riempito di sabbia. Nelle adiacenze degli spigoli del piedistallo si aprivano due coppie di corridoi contrapposti (rispettivamente ad Est e ad Ovest del piedistallo) che attraversavano trasversalmente la rampa stessa in cui erano ricavati, mettendo in comunicazione la cavità con l'esterno della struttura (**tavv. 2a - 2b**).

La rampa⁶ era costituita da due lunghi piani inclinati convergenti in alto (dei quali l'uno serviva allo scorrimento dell'obelisco e l'altro al posizionamento delle maestranze addette al traino), separati da una parte sommitale piana, occupata al suo centro dall'ampia apertura superiore del vano ad imbuto inizialmente livellata con la sabbia di riempimento (**tav. 1a**).

⁵ Per maggior chiarezza, nella seguente descrizione si farà riferimento ad una rampa disposta con asse maggiore E-O, con l'obelisco proveniente dal piano occidentale.

⁶ Le dimensioni di questa rampa erano conseguenti all'altezza dell'obelisco, ed alla necessità di contenere la pendenza della superficie di traino.

È da precisare che la cavità a forma di imbuto era fortemente allungata parallelamente alla rampa (E-O), che le pareti laterali (Nord e Sud) e quella orientale dovevano presentare un'inclinazione fortemente accentuata, che quella occidentale era notevolmente meno inclinata, e che l'imboccatura superiore (nell'asse N-S) doveva essere poco più larga della base dell'obelisco (tav. 2b).

Le maggiori attenzioni nella progettazione di questa cavità dovevano essere dedicate alla parete occidentale, in quanto su di essa si sarebbe adagiato l'obelisco nella fase discendente, e ad essa spettava la maggior parte del compito di indirizzarlo verso la corretta posizione sul piedistallo.

Se infatti la parete fosse stata troppo poco inclinata non avrebbe consentito un facile scivolamento del monolito a causa dell'enorme attrito generato, mentre un'inclinazione eccessiva avrebbe reso difficoltose ed imprecise le indispensabili manovre di fine regolazione della direzione di discesa.

In tal modo le pareti convergevano in modo differente sul piedistallo, obbligando l'obelisco a discendere nella direzione voluta, fino a condurre lo spigolo di base del monolito che durante la discesa era più vicino al suolo ad articolarsi esattamente con l'incavo del piedistallo ad esso destinato (tav. 2c).

Dato il bassissimo coefficiente di attrito del limo fluido di cui era cosparsa la superficie di scorrimento della rampa ascendente, è stato calcolato che per l'obelisco di Luxor (227 tonnellate) sarebbero stati necessari 2000 addetti per trainarlo su di una rampa siffatta.

L'obelisco veniva quindi trascinato sulla parte piana della rampa, finché la sua superficie di base non fosse giunta pressoché sulla verticale del sottostante piedistallo in pietra (tav. 1a).

Estraendo quindi opportunamente la sabbia dai corridoi menzionati⁷, l'obelisco sarebbe stato fatto scendere lentamente con la sua parte inferiore in modo consequenziale alla rimozione della sabbia, fintantoché la sua base non avesse raggiunto il piedistallo. Questa operazione era possibile in quanto, discendendo, l'obelisco avrebbe fatto leva sullo spigolo superiore occidentale dell'imbuto, verticalizzandosi gradualmente (tavv. 1b - 1c).

Trainando quindi ulteriormente la sua sommità per mezzo di corde, le maestranze poste sulla rampa orientale (opposta a quella di salita) avrebbero infine completato l'operazione.

Il ritrovamento sulle superfici superiori di tutti gli zoccoli di base degli obelischi di una incisura (larga circa 20÷30 cm e profonda 6÷10 cm) parallela e prossima ad un lato⁸, è stata spiegata infatti con la necessità di fornire, al

⁷ L'esistenza di quattro corridoi posti in prossimità degli spigoli dello zoccolo sarebbe servita per selezionare la sabbia da rimuovere, onde intervenire sulla direzione di discesa.

⁸ Questo lato è sempre posto dalla parte del terreno circostante con minori impedimenti, in accordo con la necessità di disporre del lato più favorevole per lo scorrimento dell'obelisco.

termine della discesa, una stabile guida allo spigolo inferiore dell'obelisco, e consentirgli successivamente di compiere la necessaria ulteriore verticalizzazione senza rischio di scorrimenti indesiderati (**tav. 1d**).

Questa metodica è generalmente accettata in quanto convincente, e realizzabile con i mezzi e le conoscenze tecniche sicuramente in possesso degli egizi, anche se permane qualche ininfluente dubbio su alcuni dettagli che dovevano essere adottati per regolare esattamente la traslazione orizzontale dello spigolo di base onde consentirgli di articolarsi nell'incavo del piedistallo.

Ritenendo dispendiosa la rampa proposta, Arnold pensò che fosse sufficiente limitare l'altezza della rampa a circa $\frac{1}{2}$ di quella dell'obelisco (con conseguente notevole riduzione del volume) per ottenere il medesimo effetto-leva necessario a questa metodica, e con l'ulteriore contenimento del volume della parte orientale, destinata unicamente ad ospitare le maestranze addette al traino.

Questa soluzione pare molto più adattabile ad alcune situazioni di spazio adiacente limitato, quale ad esempio l'area ove è ospitato l'obelisco di Hatshepsut nel tempio di Karnak.

Successivamente ad Eugelbach, Borchardt formulò una diversa ipotesi che aveva il vantaggio di non richiedere la costruzione di alcuna rampa.

Secondo questo Autore l'obelisco avrebbe potuto essere trainato con la sua estremità direttamente sul piedistallo, finché lo spigolo della sua base inferiore fosse giunto esattamente al di sopra e parallelamente alla scanalatura della superficie superiore dello stesso.

Altri incavi (anch'essi frequentemente rinvenuti sulle superfici superiori dei piedistalli) perpendicolari e contrapposti alla base dell'obelisco rispetto alla precedente scanalatura, avrebbero dovuto offrire un solido appoggio a delle corte travi, le quali fissavano un asse massiccio allo spigolo inferiore di base dell'obelisco (**tav. 2c**).

Utilizzando quindi l'asse come punto di appoggio (onde evitare che questo spigolo fuoriuscisse dalla scanalatura durante le successive manovre), si sarebbe innalzato il monolito agendo con leve e supporti in muratura progressivamente maggiori, fino a raggiungere un'inclinazione sufficiente ad applicare vantaggiosamente le corde per la verticalizzazione⁹.

Ovviamente la funzione dei supporti lignei della base sarebbe cessata, e quindi sarebbero stati rimossi, nel momento in cui lo spigolo di base si fosse saldamente articolato nella scanalatura del piedistallo.

Da un punto di vista tecnico questa metodica era realizzabile con i mezzi a disposizione degli egizi, per quanto ci appaia instabile e pericolosa. Si pen-

⁹ Ponendo ad esempio le maestranze su di un rilievo quale la sommità di un muro o di un edificio già esistente.

si infatti alla difficoltà ad ottenere un esatto parallelismo con la scanalatura, alla possibilità di rotazione di tutto l'obelisco sul suo asse trasversale ed a quanto fosse arduo rimuovere i legni incastrati.

Esistono per altro alcuni indizi che farebbero propendere per questa ipotesi, quali la frequente raffigurazione (seppur simbolica) del re mentre erige un obelisco tirando semplici corde, e la constatazione che le scanalature dei piedistalli presentano il bordo esterno molto inclinato (**tav. 2c**). Quell'ultimo dato indicherebbe che l'estremità di base dell'obelisco iniziava ad articolarsi con il suo piedistallo con una inclinazione molto contenuta ($1^{\circ} \div 10^{\circ}$).

A nostro avviso la metodica Borchardt pare essere la più facilmente realizzabile (e quindi più vantaggiosa) per l'innalzamento di obelischi di piccole dimensioni, ma riteniamo che l'ipotesi di Arnold sia in genere più accettabile, ed anzi obbligata per quelli di medie e grandi dimensioni.

Crediamo però di aver rilevato in essa alcuni aspetti poco convincenti quali l'inevitabile approssimazione nel regolare l'incastro della base nel piedistallo, il posizionamento a sbalzo di una eccessiva parte del monolito durante le manovre, la scarsa verticalizzazione raggiunta dall'obelisco al termine della discesa nel pozzo e l'applicazione non idonea della trazione finale per verticalizzarlo.

Per correggere la prima lacuna riteniamo indispensabile ipotizzare l'aggiunta di una massiccia e lunga lastra in pietra, opportunamente sagomata, che costituisca la parte terminale della superficie di scorrimento della parete occidentale su cui discendeva l'obelisco (**tavv. 1-2**). Rimuovendo la sabbia, ad un certo punto della discesa lo spigolo di base dell'obelisco si sarebbe quindi adagiato su questa lastra, la quale sarebbe appunto servita da guida, unitamente alle altre pareti (inclinate anche per tale scopo), nella difficile fase di incastro nell'incavo (**tav. 2c**).

Le due obiezioni successive potrebbero essere ovviate supponendo che la parete del pozzo su cui sarebbe disceso l'obelisco non fosse rettilinea, ma con una iniziale curvatura progressiva, la quale avrebbe evitato un forte sbalzo, ed avrebbe consentito di raggiungere un'inclinazione finale di almeno 60° (**tav. 3a**). Tale risultato avrebbe richiesto un minor lavoro, e quindi una minor quantità di operai, per trainare l'obelisco nella sua definitiva posizione.

L'ultimo punto poteva essere ottenuto sopraelevando successivamente la parte Est della rampa ipotizzata (opposta a quella di scorrimento dell'obelisco) per la sola collocazione delle maestranze addette alla verticalizzazione, le quali si sarebbero quindi trovate con una direzione di traino più elevata, e quindi più favorevole (**tav. 3b**); tale risultato non avrebbe richiesto alcuna aggiunta al numero di operai che avevano lavorato fino a quel momento (condizione invece indispensabile nel caso di un aggravio lavorativo).

A chiarimento delle tesi proposte riteniamo infine di aggiungere un nostro contributo originale, verificando nella pratica (secondo il nostro modello) la posa in opera dell'obelisco superstite di Luxor, avente un'altezza di 25 metri ed un peso di 254 tonnellate (Arnold).

I parametri più significativi della struttura muraria di supporto all'innalzamento sono essenzialmente tre: pendenza della superficie di scorrimento di ascesa, inclinazione delle pareti del pozzo di discesa, e quota delle murature.

Inoltre sembra logico supporre che le squadre degli operai addette al trasporto dell'obelisco lungo la rampa fossero le stesse impiegate per le operazioni di raddrizzamento finale. Ciò per evidenti esigenze di affiatamento, per usufruire delle medesime attrezature accessorie (corde, slitte, leve ecc.), e per il fatto che per le manovre di innalzamento sembra fossero sufficienti solamente poche ore¹⁰, quindi senza disperdere le maestranze operanti fino a quel momento.

Seguendo Goyon ("Il segreto delle piramidi"), si può considerare una rampa di salita con pendenza del 6,1% (pari a 3°50'), con attrito pressoché nullo ed uno sforzo continuo di 12 kg per operaio. In tal caso il numero di operai necessari è:

$$N = \frac{254.000 \times \sin 3^{\circ}50'}{12} = 1.300 \text{ uomini, arrotondabili a 1.400 tenendo conto dei ruoli accessori}^{11}$$

La parete Ovest del pozzo viene scelta con una curvatura progressiva che conduce il monolito, al termine della discesa, ad un'inclinazione finale di 60° sull'orizzonte (posizione prossima a quella definitiva), per limitare lo sforzo al successivo innalzamento del monumento.

L'altezza della rampa può essere notevolmente inferiore a quella dell'obelisco, e si può stimare pari ai 6/10, cioè 15 metri.

Con la pendenza ipotizzata di 6,1%, la lunghezza della rampa risulterebbe di circa 245 metri¹².

Attualmente la distanza dell'obelisco in questione dal Nilo è di circa 160 metri, ma tenendo conto dell'innalzamento del livello del fiume in oltre 3000 anni¹³, nonché il suo progressivo spostamento verso Est, la lunghezza di 245 metri non sembra improponibile.

¹⁰ CURTO S., *L'Antico Egitto - Società e costume*, pag. 572.

¹¹ Portatori d'acqua, limo, costruttori della rampa, ecc.

¹² $15 / 0,061 = 245 \text{ m.}$

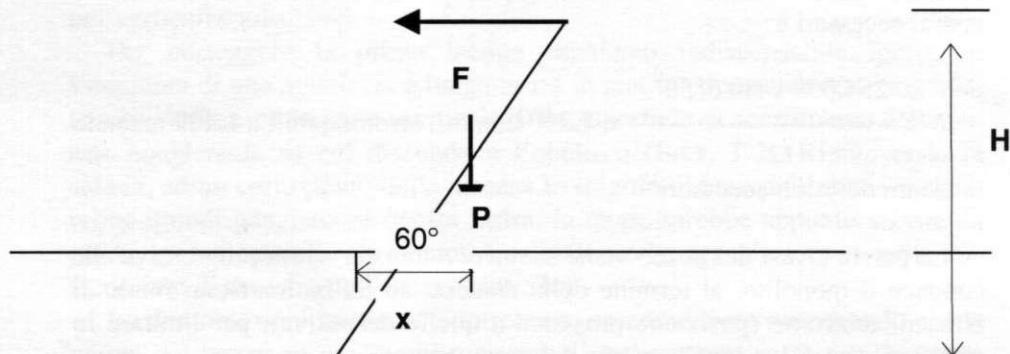
¹³ È da ricordare infatti che nel 1950 l'obelisco di Eliopoli (650 km più a Nord) è stato sollevato di 2 metri, a causa dell'innalzamento del livello di falda che stava compromettendone le fondamenta.

Poiché le corde per la definitiva verticalizzazione del monumento dovevano essere fissate sulla parte sommitale dell'obelisco, e la direzione di trazione ottimale doveva essere la più orizzontale possibile, l'altezza della parte della rampa opposta a quella di salita, dove avrebbero dovuto prendere posto le maestranze addette a questa fase, si potrebbe assumere di 20 metri (8/10 dell'altezza del monumento).

Da ciò deriva che la parte di rampa sulla quale avrebbero dovuto prendere posto le squadre addette alla verticalizzazione, si sarebbe innalzata in questa fase di 5 metri nel caso prospettato.

Con queste premesse, e tenendo conto che le complesse manovre di verticalizzazione del monolito dovevano avvenire lentamente, con brevissimi periodi di trazione (per altro bilanciata da una idonea resistenza attuata da squadre contrapposte onde evitare un brusco movimento del monolito) (tav. 3b), si può ritenere accettabile uno sforzo momentaneo di 50 kg per operaio, che comporterebbe un numero di operai pari a 1.460 (entità compatibile con le premesse).

Questo numero deriva dal seguente semplice calcolo:



Dati $P = 254$ t, $x = 6,25$ m ed $H = 21,65$ m la forza F risulta dalla relazione $P \cdot x = F \cdot H$ cioè $254 \cdot 6,25 = F \cdot 21,65$ da cui deriva che $F = 73.000$ kg

Perciò nell'ipotesi di cui sopra si otterrebbe una richiesta di $73.000 / 50 = 1.460$ operai.

Qualunque fosse la metodica adottata l'operazione di innalzamento di un tale monumento doveva comunque essere piuttosto difficile e precaria, in quanto quasi tutti gli obelischi attualmente posti sui piedistalli originari mostrano delle notevoli irregolarità di posizionamento¹⁴.

¹⁴ L'obelisco di Hatschepsut è lontano 20 cm dalla scanalatura, ed è ruotato rispetto al piedistallo.

2) Travi delle camere sepolcrali

Questo tipo di copertura, introdotto dai costruttori della piramide di Cheope, si basa sull'elevata resistenza alla compressione offerta da un sistema di travi a contrasto, le quali dissipano direttamente sui punti di appoggio (spalle) la forza applicata sulle loro superfici superiori, creando una specie di capriata protettiva alle zone sottostanti.

Tali travi, di grandi dimensioni e di conseguente notevole peso, sono sempre affiancate in successione continua (tanto fitta da non lasciare che scarsi spazi tra i singoli elementi) tale da costituire una vera copertura a due spioventi.

Questa caratteristica limita le ipotesi costruttive a quelle che prevedono la possibilità di spostare orizzontalmente gli elementi per mezzo di leve per ottenere un affiancamento delle travi, in quanto la stretta connessione dei monoliti non consentiva sicuramente l'utilizzo di corde.

Dato il grande peso sia dei singoli elementi che dell'intera struttura¹⁵, e la conseguente tendenza delle coppie di travi a divaricare, il sistema è affidabile soltanto se le spalle hanno un solidissimo sostegno, il quale, nelle piramidi, era fornito da una profonda risega nel terreno di base o nel nucleo stesso della sovrastruttura.

Con tali vincoli la messa in opera di queste strutture (seppur relativamente usuale per i costruttori egizi) doveva comunque creare non pochi problemi, soprattutto in spazi ristretti come le camere sepolcrali poste nel sottosuolo, in cui non era possibile intervenire con lunghe leve, rampe, o maestranze numerose.

Se infatti la camera sepolcrale delle piramidi di Sahura e Neferirkara ad Abusir sono poste a livello del suolo, quelle di Userkaf, Niuserra, Djedkara Isesi, Unas, e tutte quelle della VI dinastia e del Medio Regno, sono collocate in avvallamenti più o meno accentuati.

In questa operazione le maestranze poterono comunque usufruire di alcune semplici macchine fisiche da loro sicuramente conosciute, quali leve, piani inclinati, carrucole elementari (costituite da cavalletti con trave orizzontale cilindrica) o complesse (in cui la puleggia era sostenuta da tronchi posizionati ad "A")¹⁶.

Per quanto riguarda le possibili metodiche utilizzate per la loro messa in opera esistono solamente le ipotesi di Borchardt e di Arnold, che trovano la

¹⁵ La copertura della cripta di Djedkara Isesi è composta da travi di 24 t ognuna, e quella di Niuserra ha 60 elementi.

¹⁶ Documentate da ritrovamenti nel quarto pozzo della piramide di Djeser (III din.), e nella tomba di Khentkaus (IV din.).

loro attendibilità proprio nell'utilizzo delle sole documentate tecniche in possesso degli egizi.

Secondo la prima ipotesi le travi erano calate dall'alto nella cavità che ospitava la cripta (costituita da un pozzo di varia profondità ricavato nella muratura del nucleo o scavato direttamente nella roccia di base), per mezzo di carrucole e di cavalletti a trave cilindrica posti a cavallo dell'apertura superiore del pozzo.

Ritenendo poco convincente questa ipotesi, e soprattutto non essendo spiegate questioni importanti quali le modalità di affrontamento delle travi, Arnold formulò un'ipotesi secondo cui i monoliti sarebbero stati trascinati attraverso il corridoio discendente di accesso alla cripta, introdotti in questa, ed innalzati con la "spalla" posizionata nella risega meridionale di contenimento¹⁷.

Sostenendo quindi provvisoriamente con impalcature lignee l'estremità che si sarebbe successivamente articolata con quella del lato opposto, la trave veniva spinta lateralmente per mezzo di leve verso uno dei lati corti (Est od Ovest) della cripta, guidata dalla risega stessa.

Tale operazione era quindi ripetuta indirizzando le travi alternativamente verso le estremità Est ed Ovest della cripta, fino al completamento di tutto lo spiovente Sud, opposto al corridoio d'ingresso.

Si sarebbe infine posizionato lo spiovente settentrionale con identica metodica, eccettuata l'ultima trave che sarebbe stata posta in opera dall'esterno della cripta.

Entrambe queste metodiche presentano però a nostro avviso degli aspetti poco convincenti, o quanto meno lacunosi.

L'ipotesi di Borchardt si basa infatti sulla elevata resistenza offerta dai cavalletti e dalle funi, la quale però, nella realtà da noi conosciuta, risulta ben inferiore a quella necessaria a tener sospesi tali pesi¹⁸, e comunque non definisce il sistema da adottarsi per affrontare le travi a contrasto.

Seppur più complessa l'ipotesi di Arnold sembra maggiormente soddisfacente, in quanto realizzabile con i mezzi esistenti all'epoca, ma ci trova scettici sulla possibilità di impiegare impalcature lignee per sostenere pesi così elevati, per tutto il tempo di attesa, necessario per mettere in opera le travi di sostegno contrapposte.

Inoltre l'utilizzo della stessa cripta per il passaggio delle travi ci sembra in disaccordo con le grandi dimensioni di molti elementi, non giustificabile per le travi dello spiovente settentrionale, e comunque eccessivamente complessa.

¹⁷ Tale scelta è dovuta al fatto che i corridoi di accesso (eccettuati quelli del Medio Regno) hanno sempre origine sulla faccia Nord della piramide.

¹⁸ Per lo meno nel caso specifico, in cui i cavalletti avrebbero dovuto attraversare l'ampio specchio della cavità.

Trovandomi quindi di fronte a soluzioni non esaurienti, e facendo tesoro delle esperienze altrui, ho elaborato un'ipotesi che sembra risolvere le questioni finora insolute.

Poiché i problemi generati da queste coperture sono presenti in tutte le piramidi, è presumibile che siano stati affrontati e risolti ricorrendo a metodi simili, adattate alle differenti situazioni architettoniche. Per tale ragione ho analizzato innanzitutto il primo esempio noto.

2a) Travi della camera di Cheope (tav. 4)

Interrompendo la consuetudine di realizzare la copertura dei grandi vani con il metodo degli aggetti (usuale nelle cripte di tutte le piramidi precedenti), nel monumento di Cheope comparve una complessa copertura a travi orizzontali sovrapposte, sormontata da un sistema di travi a contrasto.

A tal fine i costruttori dovettero affrontare problemi unici ed irripetuti a causa dell'esclusiva disposizione architettonica, in quanto è l'unica piramide in cui il corridoio di accesso è in salita, e la Camera sepolcrale è a grande altezza dal suolo, interamente racchiusa nella sovrastruttura dell'edificio.

Il vero problema però è costituito dal posizionamento delle travi a contrasto, in quanto per la movimentazione delle travi orizzontali di questa cripta è logico supporre che siano ricorsi al diffuso sistema delle slitte trainate su rampe cosparse di limo fluido.

Nel caso di questa piramide si può infatti pensare che la costruzione dell'edificio sia proseguita normalmente fino al raggiungimento della quota corrispondente alla sommità dei muri perimetrali della cripta del re.

Poiché le metodiche egizie di tutte le epoche (ed ovviamente in modo particolare nei periodi più antichi) rispondono sempre ad un principio di estrema economia e semplicità, e nessuna macchina fisica complessa è nota con certezza né se ne può supporre ragionevolmente l'esistenza, abbiamo considerato il problema della costruzione di questo particolare ricorrendo unicamente a ciò che era sicuramente in possesso dei costruttori: leve, slitte, piani inclinati, carrucole, tempo e manodopera pressoché illimitati, e materiali poveri quali sabbia, mattoni di fango, ecc.

Immaginando quindi di trovarci alla sommità dei muri della camera sepolcrale di Cheope (49 m circa dal suolo), e dovendo posizionare le grandi travature orizzontali delle cosiddette "camere di scarico", si può supporre che si sia riempita interamente la stanza di sabbia fino a raggiungere la sommità dei muri (e della conseguente muratura di nucleo), ponendo sulla sua superficie superiore alcune travi di legno per evitare l'affondamento delle slitte cariche. In tal modo tutta la superficie del monumento, in quel momento, risultava spianata.

In una condizione simile è facile supporre che le grandi travi, giunte in quota ben fissate alle slitte, fossero trainate nella sede della loro messa in opera semplicemente facendole scorrere sulla superficie superiore della sovrastruttura, e quindi posizionate nella sede definitiva per mezzo di leve.

In tal modo si sarebbe evitata, oltre ad una inutile movimentazione ulteriore, l'incongruenza della inevitabile presenza di funi tra una trave e l'altra, impossibili per lo stretto accostamento (ed infatti mai reperite).

Completato in questo modo un corso di travi, si innalzava contestualmente il monumento fino a ripetere l'identica metodica a tutte le quote successive.

Giunti a 60,5 metri dalla base (quota stabilita per la posa in opera delle spalle delle travi a contrasto¹⁹) si posizionava solamente l'ultimo strato di travi orizzontali, interrompendo momentaneamente la progressione in altezza della sovrastruttura in quelle adiacenze.

In tal modo sull'ampia superficie raggiunta a quel punto dalla costruzione in corso d'opera, sarebbe rimasto solamente un nucleo rilevato, costituito dall'ultimo corso delle travi orizzontali di copertura.

Sulla superficie superiore dell'ultimo corso di travi orizzontali si costruiva quindi una muratura prismatica in mattoni (o blocchi di calcare), e su ognuno dei suoi spioventi si adagiavano tre cordoli di calcare ben distanziati, orizzontali ed ortogonali allo spiovente stesso, la cui faccia esterna avrebbe corrisposto alla linea prevista per l'intradosso della copertura a contrasto (tav. 4a).

Completando quindi la struttura con sabbia fino alla linea prevista per l'intradosso, si trainava su questo spiovente la prima trave, saldamente fissa-
ta alla slitta ma con l'estremità già sagomata per articolarsi successivamente con la trave contrapposta (tav. 4b), e la si scaricava quindi dalla slitta.

Avendo come linea guida la superficie esterna dei citati cordoli di calcare, si collocava su di essi il monolito, facendolo scorrere per mezzo di leve e cavalletti fino alla sua posizione corretta.

Giunta in tal modo la trave nella sede e con l'inclinazione definitiva, si ergevano alcuni corsi del nucleo solamente in corrispondenza della sua spalla, onde fornire ad essa uno stabile appoggio (tav. 4c).

Ripetendo la medesima operazione per la trave corrispondente dello spiovente opposto, si sarebbe ottenuto che le travi si sarebbero articolate, sostennendosi da sole, trattenute dalla sovrastruttura già posizionata allo scopo (tav. 4d).

È da notare che per ovvi motivi le travi a contrasto sono sempre sfalsate le une con le altre; in tal modo si poteva disporre di una superficie di riferimento nelle operazioni di preparazione ed affrontamento.

¹⁹ Quota più bassa di quella della sommità dell'ultimo strato di travi orizzontali di copertura.

Si procedeva quindi con la identica metodica al posizionamento della seconda trave del primo spiovente, accostandola infine esattamente con l'ausilio di sole leve.

Continuando in tal modo alternativamente sui due spioventi per tutte le travi successive, era sufficiente infine rimuovere il prisma interno attraverso le due aperture laterali residue, lasciando la struttura a reggersi da sola, e completando in ultimo la sovrastruttura della piramide (tav. 4e).

2b) Travi delle camere sepolcrali delle piramidi successive a Cheope (tavv. 5 - 6)

Date le sostanziali differenze con le camere sepolcrali delle piramidi successive (costituite nella fattispecie dal posizionamento della camera sepolcrale a livello del suolo o sotto di esso), è probabile che i costruttori abbiano dovuto adattare a queste nuove situazioni l'esperienza già acquisita nella piramide di Cheope.

A tal fine ho pensato che sarebbe stato necessario completare interamente la costruzione dei muri perimetrali della cripta, e far sì che questa si trovasse al fondo di un ampio pozzo "ad imbuto" ricavato direttamente nel terreno di base (tav. 5a) o, per le cripte poste a livello del suolo, nella sovrastruttura appositamente realizzata per alcuni corsi²⁰.

Questo pozzo, la cui altezza era prossima a quella dell'apice dell'estradosso previsto per le travi a contrasto, doveva avere dimensioni sensibilmente maggiori di quelle esterne della camera sepolcrale, in quanto la sua base, costituita da una risega del terreno, avrebbe successivamente dovuto ospitare sui lati maggiori le spalle delle travi a contrasto, e prevedere uno spazio libero (adiacente ai lati minori) per le manovre successive.

Riempita la cripta di sabbia, si edificava sulla superficie superiore di questa una muratura a due spioventi di altezza prestabilita, (in mattoni o lastre di pietra), e su ognuno di questi spioventi si adagiavano tre cordoli di calcare ben distanziati, orizzontali ma ortogonali allo spiovente stesso, la cui faccia esterna corrispondeva alla linea prevista per l'intradosso della copertura a contrasto.

Questo pozzo era infine completamente riempito di sabbia fine (tav. 5b).

Facendo quindi scorrere in orizzontale sulla superficie superiore della sovrastruttura realizzata una trave per volta (ancora montata sulla slitta, ma privata delle funi di fissaggio e già sagomata per articolarsi con quella di fronte), questa sarebbe stata trainata sulla sabbia di colmo del pozzo nella posizione approssimata che avrebbe assunto successivamente (seppur alcuni metri al di sopra di quanto preventivato), e scaricata dalla slitta per mezzo di cavalletti e leve (tav. 5c).

²⁰ La funzione di tale pozzo è di fornire un adeguato sostegno alle "spalle" delle travi a contrasto.

Rimuovendo quindi la sabbia²¹ la trave si sarebbe progressivamente abbassata (guidata dalla parete del pozzo che obbligava la "spalla" ad andarsi ad incastrare nella risega di base), fino ad adagiarsi sui cordoli di calcare posti sullo spiovente, che ne avrebbero fissato la posizione (**tav. 5d**).

Lo spazio previsto tra i cordoli in calcare posti sullo spiovente, doveva ovviamente consentire alle maestranze di poter operare nelle ultime fasi anche sotto la trave, come pure negli spazi laterali compresi tra le travi più esterne e le pareti del pozzo.

Il preciso collocamento di ogni trave nell'esatta posizione prevista era infine effettuato per mezzo di leve agenti sulla muratura già esistente. Le travi venivano infine bloccate da spessori in pietra, posti tra le loro spalle e le pareti dell'imbuto (**tav. 6c**). Dopo aver riempito nuovamente il pozzo di sabbia, si poteva quindi trainare la trave contrapposta (di forma già predisposta sulla precedente) con le identiche modalità ma con direzione contraria (**tav. 6a**).

Rimuovendo opportunamente e con identica metodica la sabbia, anche questa trave sarebbe discesa andando inevitabilmente ad incastrarsi nel luogo assegnatole, fino ad affrontare quella già posizionata, eventualmente con l'utilizzo di leve (**tav. 6b**).

Ripetendo l'operazione si sarebbe potuto completare la copertura posizionando alternativamente le travi dei due spioventi, in modo che queste si sostenessero sempre da sole (**tav. 6c**).

Completata l'intera copertura a contrasto, si poteva rimuovere infine la sabbia e la muratura di sostegno su cui erano al momento adagiate le travi, asportando il materiale direttamente dalla cripta (**tav. 6d**), e quindi obliterare completamente il pozzo con muratura di nucleo.

Questa mia ipotesi sembrerebbe trovare conferma nella particolare posizione dei corsi superiori delle travi a contrasto²², i cui vertici sono sempre sullo stesso asse verticale, ma le cui spalle sono poste su linee progressivamente divergenti, le quali costituirebbero semplicemente la prosecuzione verso l'alto delle pareti inclinate del pozzo di costruzione (**tav. 7**).

²¹ La presenza dei previsti spazi liberi lateralmente a tutte e travi avrebbe consentito di regolare con relativa precisione la direzione di discesa.

²² In molte piramidi la copertura della cripta è costituita da tre strati sovrapposti di travi a contrasto, le quali presentano dimensioni progressivamente crescenti, procedendo verso l'alto.

BIBLIOGRAFIA

- ARNOLD D.; *Building in Egypt*, New York-Oxford 1991.
- BORCHARDT L., *Zur Baugeschichte des Amuns-Tempels von Karnak*, Leipzig 1905.
- CHEVRIER H., ASAÉ 52 (1954).
- COULTON J.J., *Journal of hellenic studies* 94 (1974).
- CURTO S., *L'Egitto antico*, Torino 1981.
- DIBNER B., *Moving the Obelisks*, London 1982.
- ENGELBACH R., *Problem of the Obelisks*, S.A.E. 1925.
- GOLVIN J.C., GOYON J.C., *Les batisseurs de Karnak*, Paris 1987.
- GULLINO G., *Scienza ed archeologia nella Grecia d'Occidente*, Aosta 1992.
- PILLET M., ASAÉ 22 (1922).

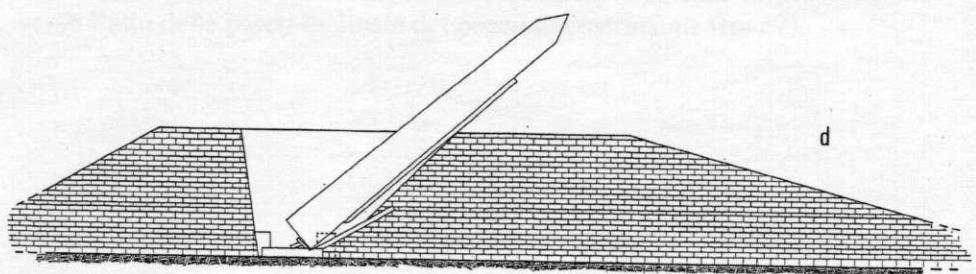
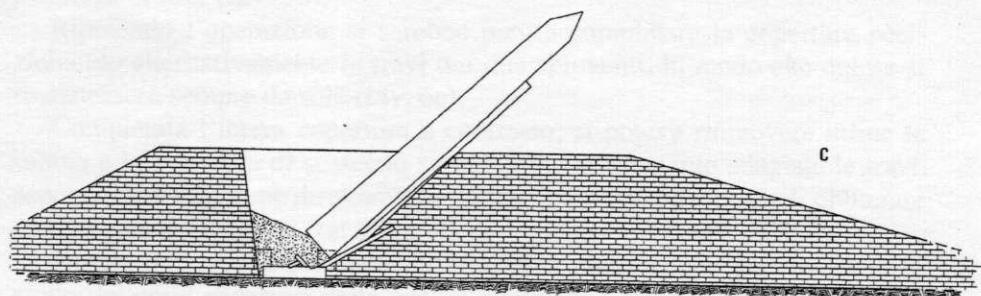
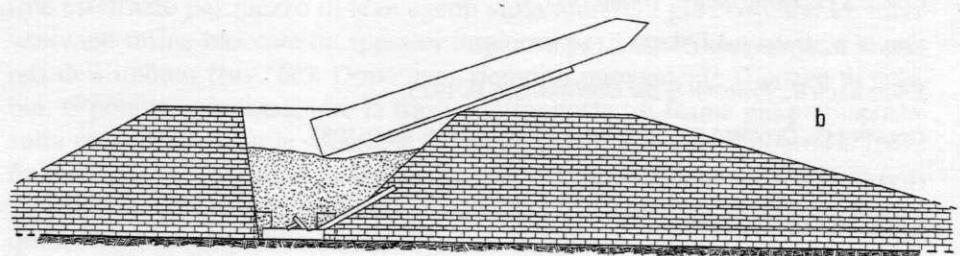
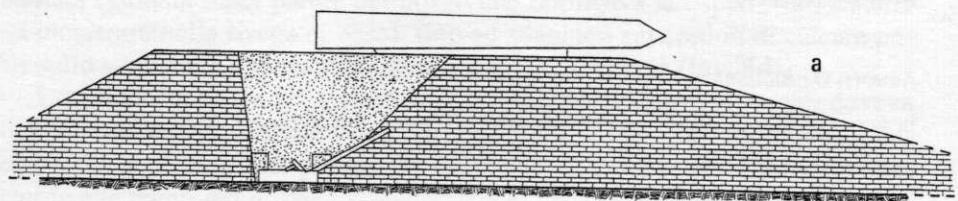


Tavola 1 - Metodica di innalzamento di un obelisco.

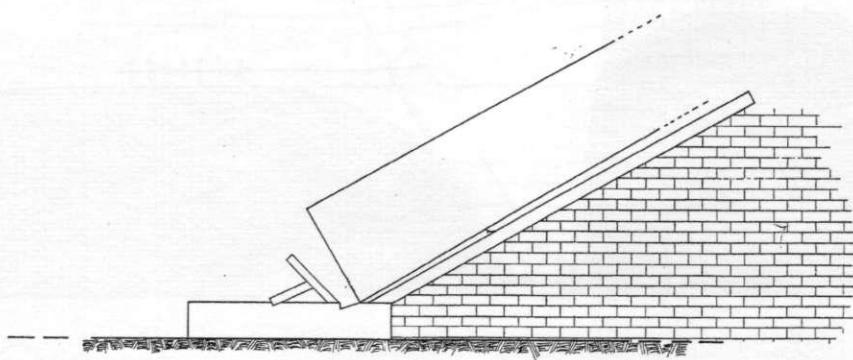
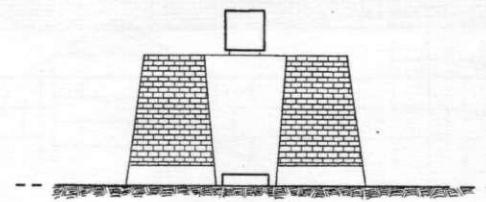
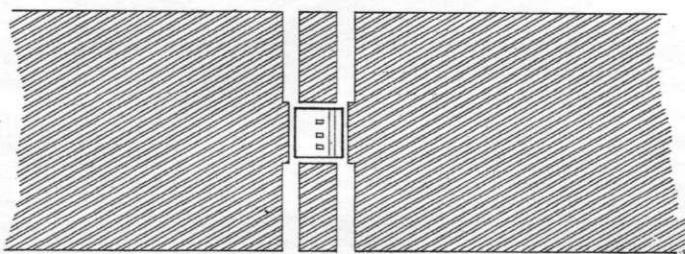


Tavola 2 - Particolari della rampa e della metodica di innalzamento di un obelisco.

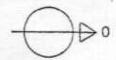
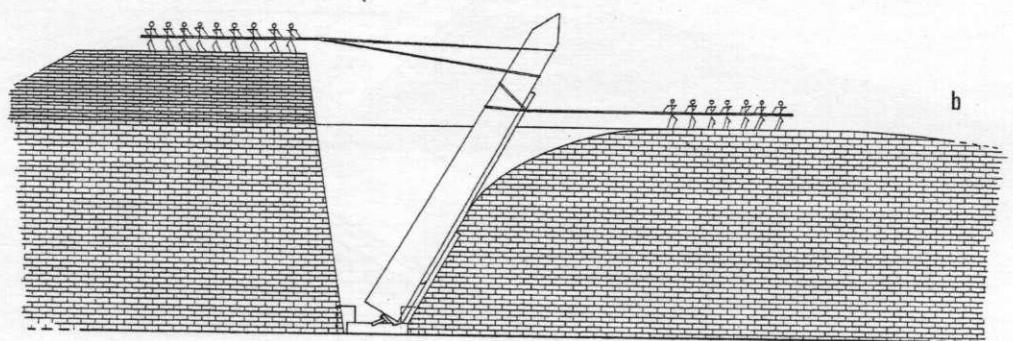
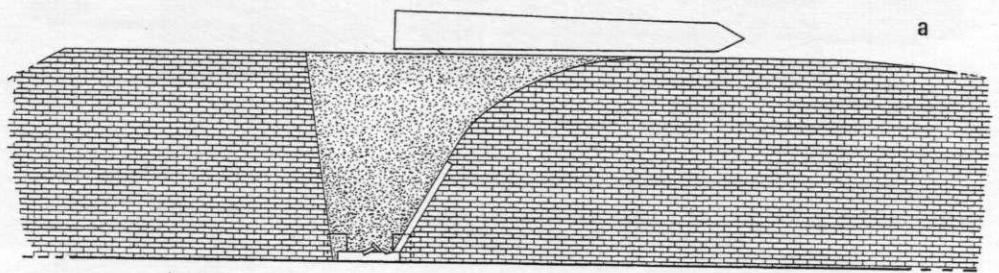


Tavola 3 - Ipotesi proposta per l'innalzamento di un obelisco.

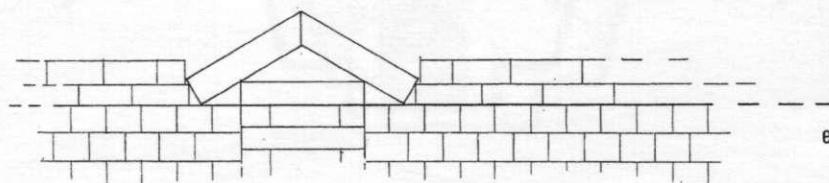
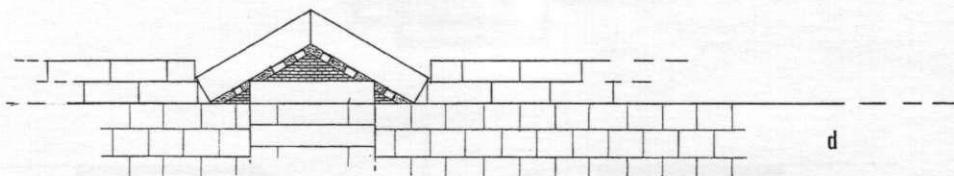
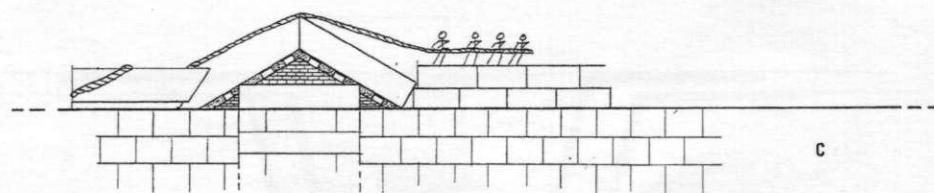
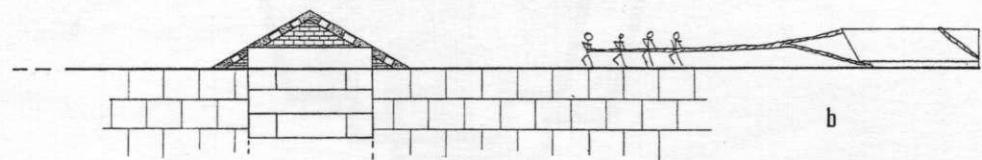
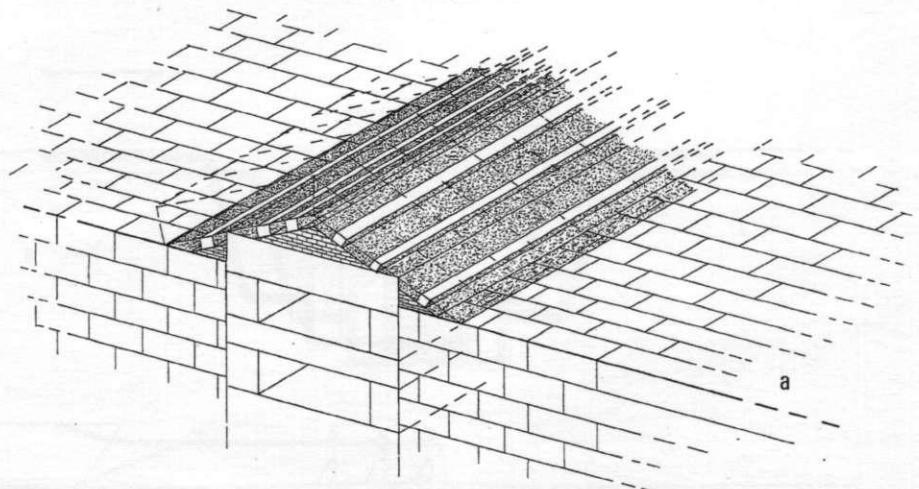


Tavola 4 - Ipotesi di messa in opera delle travi a contrasto nella cripta della piramide di Cheope.

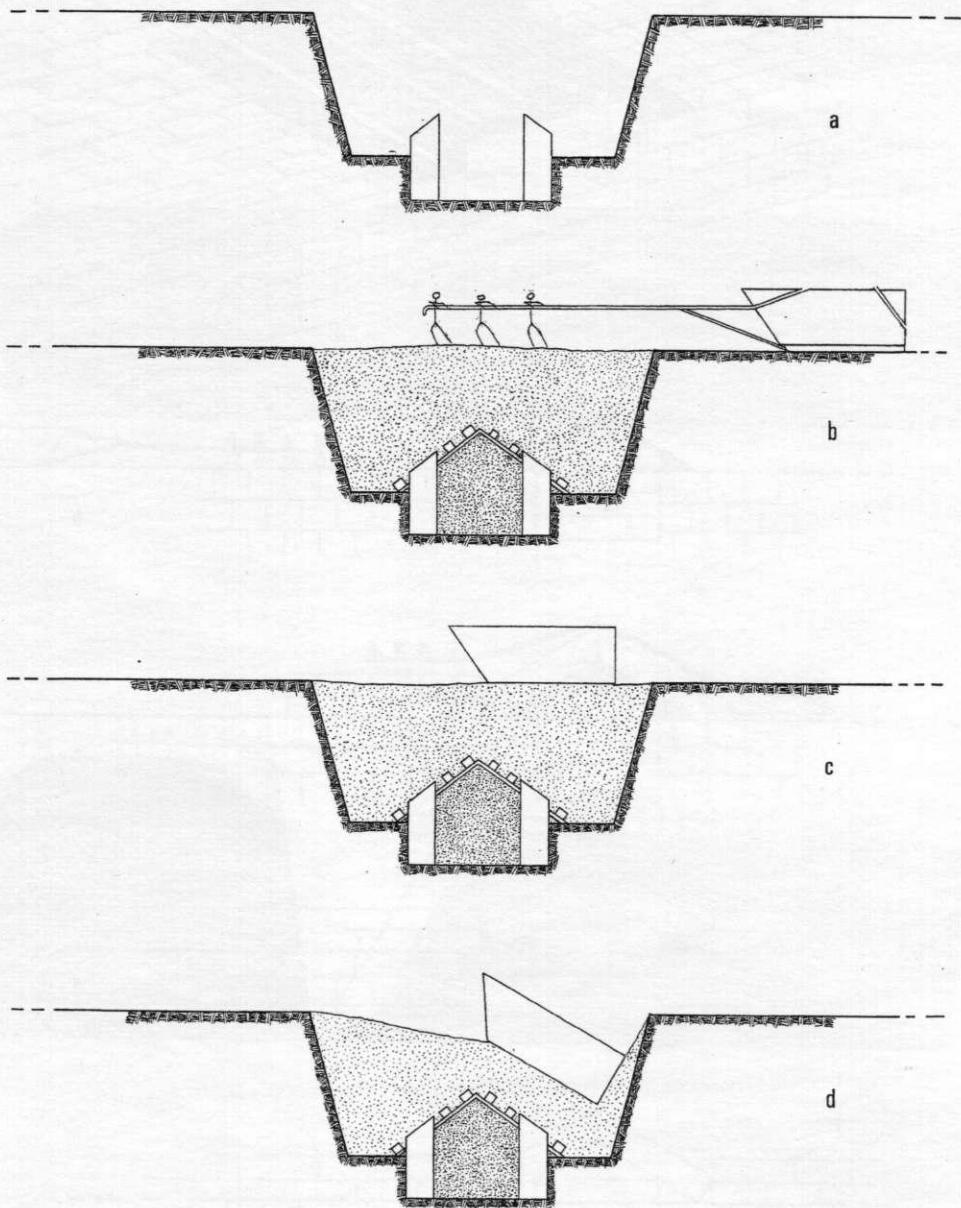


Tavola 5 - Prime fasi della ipotizzata messa in opera delle travi a contrasto nelle cripte piramidali.

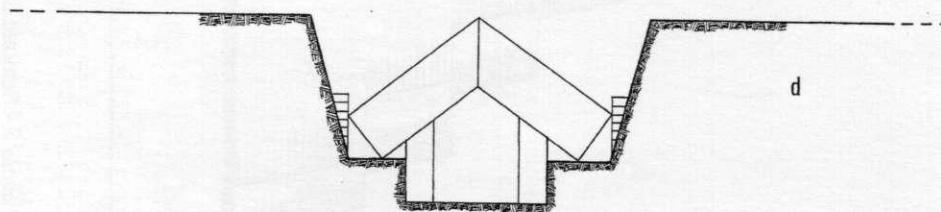
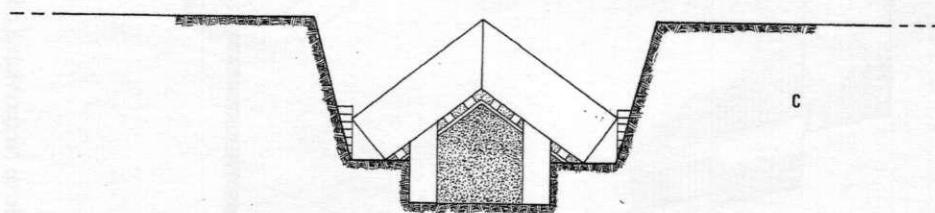
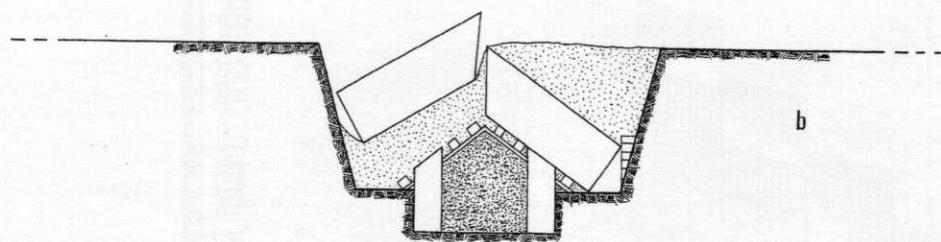
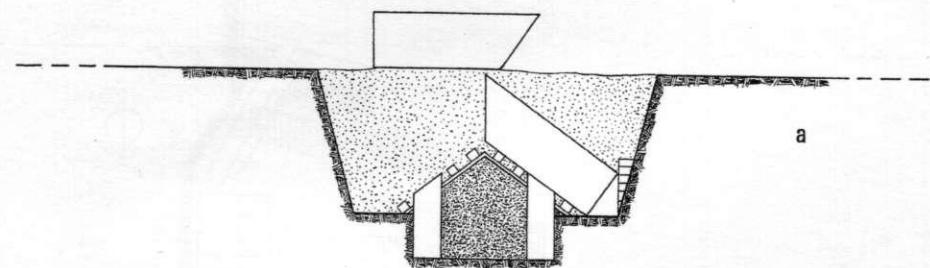


Tavola 6 - Ultime fasi della ipotizzata messa in opera delle travi a contrasto nelle cripte piramidali.

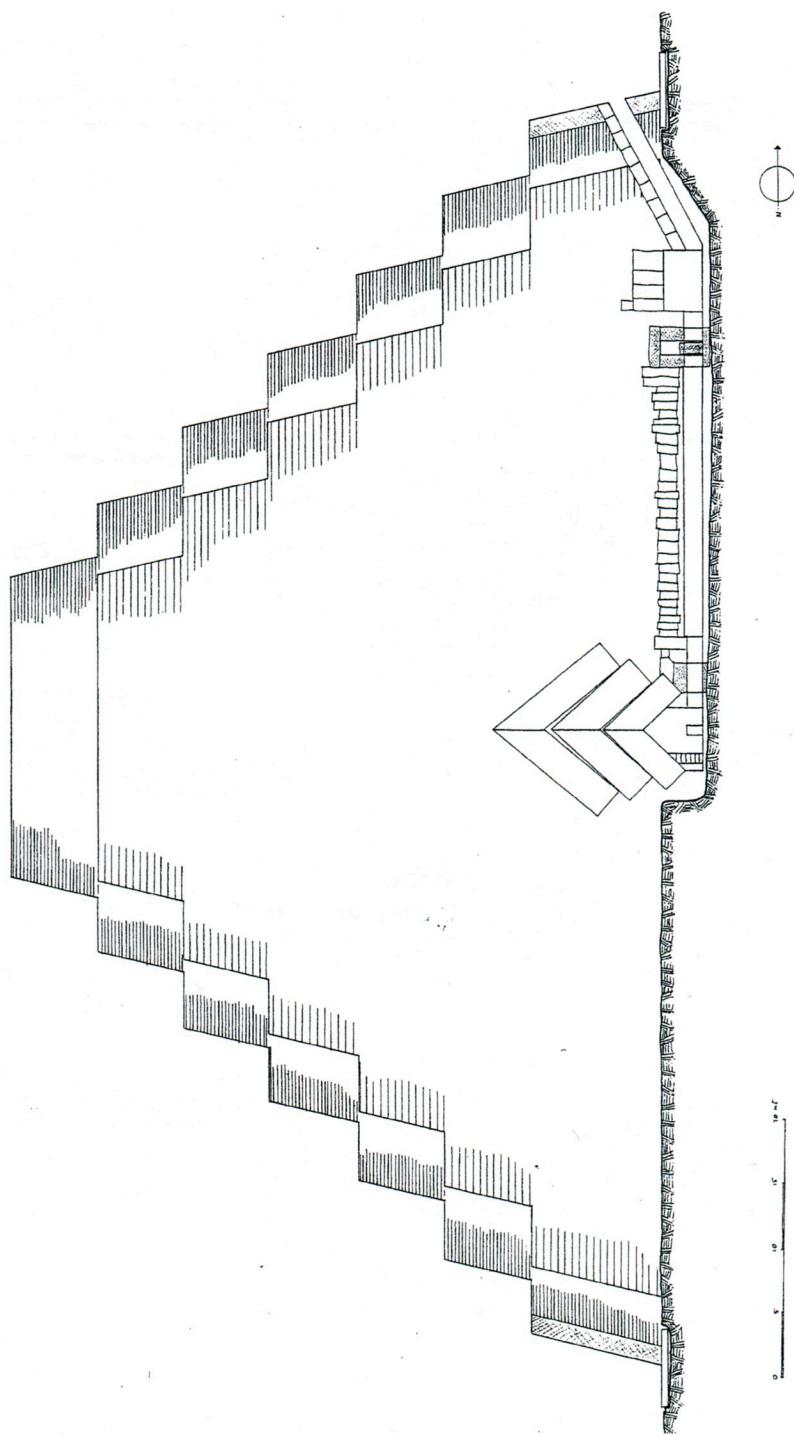


Tavola 7 - Sezione della piramide di Neferirkava ad Abusir.