

CAPO I.

Preliminari storici.

a) Generalità.

L'apparecchio meccanico ad aria compressa, mediante il quale si può lavorare sott'acqua, per eseguire, senza il grave ostacolo della presenza di essa, fondazioni per ponti, per muraglioni di riva, per bacini e per altri importanti manufatti, è un progresso delle *campane pneumatiche* o *da palombaro* (*cloches à plongeur*) che fin dal secolo scorso cominciarono ad adoprarsi per esplorazioni subacquee.

Pare che il primo ad usare di quelle campane sia stato l'inglese signor Smeaton nel 1778, sebbene in quello stesso anno anche il Coulomb proponesse di adoperare una campana o cassone di ferro per far eseguire alcuni lavori in acqua.

Ma per riguardo alle fondazioni in terreni mobili, incoerenti e compressibili, il sistema pneumatico può affermarsi derivare, o meglio essere un conseguente progresso dei metodi delle palificazioni tubolari metalliche (*) sostituite alle palafitte di legname: perciò le prime fondazioni pneumatiche furono del tipo a *colonne tubolari*.

La costituzione di queste colonne progredi con diversi mezzi ed anche per diversi scopi in meno di un decennio, dal 1841. Dall'affondamento mediante la rarefazione dell'aria, con battitura od altro carico, alternatamente, dei tubi di ghisa o di ferro del diametro di m. 0,30 (viadotto Menay o Britannia (**), si giunse a quelli del diametro di m. 2,45 (ponte presso Chepstow sulla Wye (***)). Mediante

(*) Una delle prime opere fondate con tal sistema di palafitte di ghisa fu lo scalo di Milton sul Tamigi.

Al metodo delle palafitte metalliche tenne poi dietro, nel 1832, l'adozione dei pali a vite, perchè questi offrivano maggior garentia di stabilità.

(**) Il viadotto Menay (1846), a travata tubolare di lunghezza m. 460, sorretto da n.º 3 pile, poggia con la sua pila centrale sopra n.º 19 tubi di ghisa di diametro m. 0,30 e di altezza m. 4,80. Questi tubi sono tra loro collegati da una robusta piastra di ghisa (del peso di 9 tonnellate) posta superiormente al pelo d'acqua.

(***) Questo ponte fu nel 1852 costruito dall'ing. Brunel. Una delle tre pile su cui esso si eleva, fu fondata su n.º 6 grossi tubi, alti m. 30,91 dalla base al pelo d'acqua di bassa marea, e m. 27,00 fino all'impalcatura: occorse profundarli molto, a causa di un grosso strato di m. 15 di terreno melmoso. I tubi sono formati di anelli di ghisa tra loro inchiavardati, del diametro m. 2,45 (la parte superiore ha il diametro di m. 1,83).

l'aria compressa, invece, si andò dal diametro di m. 1,03 (pozzo a Chalennes sulla Loire), a quello di m. 2,00 (ponte presso Rochester sul Medway): nel 1855 si giunse all'affondamento di colonne tubolari di diametro m. 10,67 (ponte di Saltash sul Tamar), e nel 1859 si modificò il sistema tubolare in quello dei cassoni (ponte a Kehl sul Reno).

Verso quell'epoca intanto, per le successive innovazioni introdotte nelle varie applicazioni del sistema, si praticavano due distinti metodi di affondamento, come si dirà: quello cioè dell'*afflusso dell'acqua* (*méthode de fonçage par la rentrée de l'eau*), e quello del lavoro continuo *ad aria compressa*, ossia il *metodo pneumatico* propriamente detto (*méthode pneumatique*).

b) Sistema Triger: ad aria compressa (1841).

Il primo passo in questa importante applicazione, fu dato dal francese signor Triger, ingegnere delle miniere, il quale nel 1841, per raggiungere uno strato carbonifero soggiacente ad uno strato di sabbia di spessore circa m. 20, nel fondo della Loire, presso Chalennes, fece uso di un tubo di ferro di diametro m. 1,03 aperto inferiormente: scacciando l'acqua da questo tubo con la forza dell'aria compressa, gli operai poterono in esso eseguire il lavoro di cavamento all'asciutto.

Nella parte superiore del tubo vi era una camera, la quale con opportuni uscioli permetteva agli operai di entrare o di uscire da quello — equilibrandosi l'aria alla pressione atmosferica, ovvero a quella dell'aria compressa, con la manovra di alcuni rubinetti: tale camera fu detta perciò *camera d'equilibrio*.

Il tubo era formato di diversi anelli di lamiera, con bordi o risalti verso l'interno, dov'essi venivano inchiodati: l'unione dei pezzi era resa ermetica mercè strisce di cuoio (v. fig. 1). L'affondamento progrediva gradatamente per l'azione prodotta da un forte carico agente sul tubo.

Questo metodo fu dall'istesso Triger nel 1845 esposto su più ampia scala, ed applicato poi alla costruzione delle fondazioni di varii ponti: esso fu detto *tubolare* od *a colonne*.

c) Sistema Pott: ad aria rarefatta (1843).

L'altro sistema intanto di fondazione subacquea fu nel 1843 introdotto dal dottore inglese signor Pott: esso consisteva nell'affondare i tubi con la pressione atmosferica esterna, producendo cioè il vuoto nel loro interno.

In tal guisa, da una parte la pressione atmosferica, dall'altra l'azione dell'acqua saliente per effetto del vuoto nel tubo, facilitavano la discesa del medesimo. Il vuoto era prodotto entro camere comunicanti con

i tubi, e l'intercettazione era fatta da robinetti. Furono adoperati in pratica tubi di diametro da m. 0,30 a m. 0,75, o poco maggiori.

Affondatosi alquanto il tubo, e colmato anche in parte dai materiali smossi e trascinati dall'acqua, lo si vuotava, per metterlo di nuovo in comunicazione con la camera pneumatica, e così ripetere l'operazione (*).

Questo metodo, che si basa su di un principio tutt'affatto opposto a quello del Triger, fu applicato, dagli inglesi specialmente, nella costruzione di diversi ponti (**): esso però nei terreni molto consistenti od ingombri di massi duri isolati, come i trovanti, non dette buoni risultati, siccome ebbesi a sperimentare in varie circostanze. Sicché fu preferito il sistema Triger, il quale constitui proprio il cosiddetto sistema di *fondazione tubolare ad aria compressa*, e venne poi man mano perfezionandosi nei suoi particolari (***)

d) Modifica Hughes al sistema tubolare Triger: metodo con l'afflusso dell'acqua (1851).

Nella costruzione delle fondazioni pel ponte sul Medway presso Rochester in Inghilterra, l'Ing. Hughes, per la natura pietrosa del sottosuolo, dovette abbandonare il sistema Pott suddescritto, ed adottare invece il sistema tubolare Triger; modificando però la camera d'equilibrio, col farla a doppio scompartimento, per facilitare l'estrazione del materiale scavato. Ciascuno scompartimento, munito di due robinetti, poteva essere messo in comunicazione con l'aria compressa o con l'atmosfera: così equilibrati, essi davano accesso nell'interno, ovvero permettevano l'uscita.

L'acqua veniva espulsa dal pozzo per mezzo di un piccolo tubo a sifone, di cui un estremo raggiungeva il fondo e l'altro era poco al disopra del pelo d'acqua del fiume (v. fig. 2). Tale tubo era munito di valvola che veniva chiusa un momento prima che il braccio più lungo del sifone cessasse di pescare nella poca acqua del fondo; e

(*) Nei primi esperimenti si ebbe per risultato che per affondare di m. 9,92 nel terreno un tubo di diametro m. 0,76, occorsero n° 6 ore; mentre nello stesso tempo una barra di ferro di diametro m. 0,076 si poté affondare soltanto di m. 3,40 mediante un battipalo ordinario.

(**) Così furono fondati: il ponte di Black Potts sul Tamigi, costruito dall'ing. Brunel, i ponti Britannia e Conway (1846-50) costrutti dall'ing. R. Stephenson, il ponte a Benha sul Nilo (ing. Stephenson e Swinsburne), il ponte sul Shannon in Irlanda (ingegnere Hemans), quello a Neuville sul Sarthe (1849) costruito dall'ing. Fox, ed il ponte sul Great Pee Dee negli Stati Uniti d'America (1854) per l'ing. W. Gwin.

(***) Col sistema Pott, ed anche col sistema Triger, non potendosi sempre raggiungere grandi profondità, l'involucro cilindrico servi alcune volte (come pel ponte a Szegedin sul Theiss) per costipare la parte di sottosuolo non soggetta a corrosioni, dalla base cioè del cilindro in giù, mediante palificazioni di legname, sulle quali si faceva la gettata di calcestruzzo per tutto il cavo della colonna. Un tale processo costituiva così un sistema misto di approfondamento del sostegno e di correzione al sottosuolo.

ciò per non fare sfuggire l'aria compressa, ed evitare di conseguenza una diminuzione di pressione, che avrebbe prodotto disturbo al procedimento del lavoro. L'estrazione del materiale veniva fatta con secchioni sollevati da una ruota.

Per facilitare la discesa del cilindro, si sovraccaricò questo man mano con grossi pesi, che giunsero fino a 40 tonnellate. Gli operai intanto dopo avere scavato il fondo per un certo spessore, uscivano dal tubo, aprivano un robinetto, e ne facevano scaricare tutta l'aria compressa: in tal modo l'acqua rimontava con tal forza nel tubo, da smuovere e trascinare seco altro terreno dal fondo; per cui il tubo, agevolato dal suddetto sovraccarico, affondava per gravità. Cessato questo movimento di discesa, s'immetteva di nuovo l'aria compressa nel tubo, e vi rientravano poscia gli operai per lo sgombero dei materiali smossi e pel posteriore lavoro di scavo.

Questo processo di lavoro alternato con l'aria compressa e col ritorno dell'acqua, costituì il *metodo con l'afflusso dell'acqua*. Esso ha una certa analogia col metodo Pott per ciò che riguarda ritorno dell'acqua nel tubo e conseguente discesa del medesimo: ne è però più vantaggioso, giacchè, potendosi mercè l'aria compressa eseguir direttamente lo scavo, esso è applicabile anche nei casi di terreni molto consistenti (*).

e) **Modifica Brunel** (1855).

Un'altra modificazione fu introdotta dal Brunel, il quale, nella costruzione del ponte di Saltash sul fiume Tamar presso Plymouth, per la fondazione della pila centrale adoperò un grosso cilindro di altezza m. 15,25 e di diametro m. 10,67, che verso la parte superiore si allargava di m. 0,30 in giro. Allo scopo di ridurre di molto il volume dell'aria compressa, nella parte inferiore del cilindro, ad un'altezza di circa m. 6, vi era un soffitto a cupola; e la camera sottoposta veniva divisa in due da una parete verticale concentrica a quella del cilindro, collegata e tenuta distante dalla stessa per m. 1,27, da diaframmi radiali. Lo spazio anulare compreso tra le due pareti cilindriche (detto *jacket*) comunicava con la camera d'equilibrio mediante un pozzo di diametro m. 1,83: lo spazio centrale comunicava invece con l'aria esterna a mezzo di altro pozzo di diametro m. 3,05, che conteneva il primo (v. fig. 3).

Affondato il cilindro, ed immessa l'aria compressa nella parte anulare, si praticò lo scavo in giro per raggiungere e spianare la roccia, posta a circa m. 27 sotto il massimo pelo d'acqua, ed a m. 5

(*) Come esempi di altre fondazioni costrutte col suddetto metodo, citiamo il ponte a Szegedin sul Theiss in Ungheria (1857) ed i ponti francesi: a Macon sul Saone (1855), a Moulins ed a S.t Germain-des-Fossées (1858) sull'Allier, a Montluçon sul Cher ed a Bordeaux sulla Garonne (1859).

sotto il fondo sabbioso. Fatto lo scavo, si murò l'anello per m. 2 quasi di altezza, sicchè in tal modo il cassone potette funzionare da tura; ed il lavoro nella parte centrale fu eseguito all'aria libera, aggettandosi l'acqua con l'uso delle trombe, ed eseguendosi coi mezzi ordinarii lo scavo e la muratura.

f) Modifica Cézanne : metodo pneumatico, propriamente detto (1859).

L'Ing. Cézanne nella fondazione del ponte sul fiume Niemen presso Kowno in Russia, apportò un'altra modificazione al processo Triger, separando cioè la parte inferiore di ciaschedun cilindro con un soffitto, dal quale partivano due tubi o camini di servizio, che mettevano in comunicazione la inferiore camera di scavo, cioè la cosiddetta *camera di lavoro (chambre de travail)* con quella di equilibrio. Lo spazio compreso tra i camini e la parete del cilindro, superiormente alla camera di scavo, era pieno d'acqua, il cui peso facilitava l'affondamento dell'apparecchio.

Eseguito lo scavo, si faceva una gettata di calcestruzzo con cemento Portland per uno spessore capace ad impedire che l'acqua filtrasse di sotto; quindi, smontati il camino ed il soffitto della camera di lavoro, si colmava la rimanente altezza del cilindro con simile muramentò (v. fig. 4).

Questa modifica introdotta dall'ingegnere Cézanne caratterizzò il *metodo pneumatico* propriamente detto, pel quale il lavoro procede continuo all'aria compressa (*).

g) Modifica Fleur S.^t Denis (1859).

Nell'istesso anno l'ingegnere francese Fleur S.^t Denis, in occasione della costruzione del grandioso ponte sul Reno a Kehl presso Strasburgo, considerò la difficoltà e l'imperfezione che presentava l'uso delle pile tubolari, le quali non potevano essere impiantate perfettamente verticali, specialmente quando dovevano raggiungere una considerevole profondità, come in quel caso, in cui bisognava scendere a circa m. 20 sotto il pelo delle magre, attraversando uno strato di arena mobilissima. Pensò quindi di adoperare per ogni pila tre o quattro cassoni di lamiera di ferro, ciascuno di base m. 6,00 × 7,00, e diviso da un soffitto in due compartimenti, di cui l'inferiore alto m. 3,00 adibito a camera di lavoro.

Per ogni cassone, elevavansi dal soffitto tre pozzi, uno centrale (a base ellittica, di assi m. 2,30 e m. 1,50) per il passaggio dei materiali di scavo, e due (a base circolare, di diametro m. 1,00) per la discesa degli operai (v. fig. 5).

(*) I primi ponti fondati con questo metodo sono: in Germania il ponte a Kehl sul Reno (1859), ed in Francia il viadotto d'Argenteuil (1861) e quello di Orival (1863), entrambi sulla Senna, ed il viadotto di Briollay sul Loir (1863).

I due pozzi di servizio funzionavano alternatamente, ossia *a riprese*; e ciò per non interrompere il lavoro allorquando per l'affondamento del cassone quelli dovevansi allungare. Nel pozzo centrale, messo in comunicazione con l'aria esterna, girava una specie di draga (noria a cucchiaie), la quale, mossa da una locomobile, scendeva fin sotto il livello del fondo in un ampio fosso, fatto dagli operai, di dove asportava il materiale di sterro. Il movimento si faceva in acqua, giacchè sia il fosso, che il tubo centrale ne erano pieni.

Durante la manovra di affondamento i cassoni erano sospesi con catene a lunghe maglie, affidate nel capo superiore a *verrini* (*vérins*) (v. fig. 6), poggianti sul palco del castello di manovra: la discesa posteriore era facilitata dal sovraccarico di muratura costruita sul soffitto della camera di scavo.

Arrivati al piano stabile, e congiunti i cassoni tra di loro, le camere di lavoro venivano riempite di calcestruzzo. Poscia, smontati i pozzi, si completava la gettata di calcestruzzo per la rimanente altezza di ciascun cassone (*).

h) **Modifica Castor** (1861).

Le fondazioni delle pile del viadotto ad Argenteuil sulla Senna furono dall'Ing. Castor eseguite con grandi cilindri di ghisa, di diametro m. 3,60, formati da anelli di altezza m. 1,00 e spessore variabile da $\frac{m}{m}$ 38 a $\frac{m}{m}$ 55. Sul primo segmento cilindrico del fondo poggiava un'armatura di travi di ghisa a T, formante un soffitto conico, detto, per la sua forma, *crinolina* (*crinoline*): queste travi erano unite tra loro da anelli di ghisa decrescenti, e concorrevano all'anello minore, di diametro m. 1,00, sul quale poggiava un tubo verticale di legno (v. fig. 7).

Sopra tale soffitto fu eseguita una specie di vólta conica di muratura con pietre da taglio, ed in tutto il rimanente spazio anulare fu fatto un riempimento con calcestruzzo di cemento Portland.

La camera d'equilibrio, di diametro quasi eguale a quello del cilindro sottostante, aveva altro cilindro concentrico di diametro m. 1,40, e la zona di forma anulare era divisa in due da tramezzi verticali di lamiera: in tal modo il vuotamento delle materie di scavo (fatto per mezzo di secchioni) era continuo, funzionando alternatamente le due camere d'equilibrio per cacciar fuori il materiale.

Raggiuntosi e spianato il fondo stabile di posa, si eseguiva un primo strato di smalto di centim. 25 ben pistonato ed intonacato, e

(*) Le prime fondazioni eseguite con cassoni metallici sono quelle pei ponti francesi di Voulte e di Culoz sul Rodano (1860), di Lorient sullo Scorff (1862) e di Nantes sulla Loire (1863); i ponti italiani di Piacenza (1863) e di Mezzanacorti (1864) sul Po; ed i ponti tedeschi di Königsberg sul Pregel (1864) e quello di Stettino sull'Oder (1866).

poscia si riempiva di simile materiale la rimanente camera di lavoro. Per impedire intanto che l'acqua potesse di sotto infiltrarsi attraverso il calcestruzzo e dilavarlo, vi si manteneva per 24 ore l'aria compressa, allo scopo di attendere una parziale presa del masso; dopo di che si murava il pozzo superiore.

Tale procedimento fu applicato in altre circostanze consimili, ma alla ghisa fu più utilmente sostituito il ferro.

i) Fondazioni con unico grande cassone (1863).

Per la costruzione del ponte a Piacenza sul Po fu adoperato un sol cassone, delle dimensioni, in pianta, eguali all'area totale della pila, ossia di m. 5,00 × 11,00, con rostri semicircolari ai due lati corti del rettangolo di base. I due pozzi di servizio comunicanti con le camere d'equilibrio, erano del diametro di m. 1,00: il pozzo centrale era di diametro m. 2,05, e serviva per l'esaurimento del materiale di scavo.

L'apparecchio effossorio ed elevatorio al tempo stesso, era costituito da una noria a cucchiaie, che girava in quel pozzo alla presenza dell'acqua, la quale riempiva tutto il detto tubo, mantenutavi dalla pressione dell'aria nel cassone. Questo cammino centrale pescava per circa m. 0,80 sotto il fondo del terreno in una specie di fosso aperto dagli operai, e ricolmo esso pure di acqua, nel quale scendeva la noria, animata da una motrice a vapore. — Più avanti (Capo III—2^o, c) si terrà anche parola di questa manovra (v. fig. 8).

k) Uso generalizzato dei grandi cassoni.

Il procedimento tenuto sinoggi per cosiffatti lavori è quasi esclusivamente quello dei cassoni, adoperandosene uno solo di dimensioni e forma, in pianta, della pila a costruirsi (*).

Varii congegni hanno perfezionato il sistema: ad esempio, il cammino d'estrazione dei materiali, che messo in comunicazione con l'aria esterna (come pei citati ponti a Kehl ed a Piacenza) poteva produrre delle perdite d'aria compressa attraverso l'acqua, è stato invece posto in comunicazione anch'esso con una camera d'equilibrio, cui sonosi aggiunti dei compartimenti per l'estrazione dello sterro, la quale si esegue così in presenza dell'aria compressa (v. fig. 9). Alla noria a cucchiaie è stato più utilmente sostituito il tiro a secchioni; ed alle camere di equilibrio si sono aggiunte camerette di più piccole dimensioni per l'introduzione del calcestruzzo occorrente alla muratura di fondazione.

(*) Le difficoltà di adoperare cassoni di grandi dimensioni specialmente per la manovra di affondamento, sono state man mano superate: un esempio ce lo porge il grandioso ponte dell'Est tra New-York e Brooklyn, avente le pile di superficie in base da mq. 1596 a mq. 1632. Proporzioni maggiori riscontransi nei due cassoni costruiti per i bacini di carenaggio nel porto di Tolone: essendo le dimensioni di ciascun cassone di m. 144 × 41 = mq. 5904 in pianta, e m. 19 in altezza.

Delle successive modificazioni che sonosi gradatamente apportate, si parlerà in particolare nelle descrizioni seguenti.

CAPO II.

Apparecchio odierno per fondazioni pneumatiche.

I.º — Parti costitutive.

Descrizione sommaria.

Le parti che costituiscono gli odierni apparecchi per le fondazioni ad aria compressa sono :

1) *il cassone* che è una camera senza fondo, formata ordinariamente di lamiere di ferro, e divisa orizzontalmente, da un robusto diaframma, in due scompartimenti: — l'inferiore che serve a lavorare per lo scavo in presenza dell'aria compressa, e che perciò denominasi *camera di lavoro* o *di scavo*; il superiore che, esposto all'aria libera, permette di sovralzare all'asciutto la muratura di fondazione, la quale col proprio peso facilita la discesa del cassone; e che perciò è detto *camera di caricamento* (*);

2) i *camini* o *pozzi*, di forma tubolare, che partendo dal soffitto della camera di scavo, mettono questa in comunicazione con le parti seguenti dell'apparecchio;

3) le *camere di equilibrio* o *camere d'aria*, di forma cilindrica, che servono per l'entrata e l'uscita degli operai dal cassone;

4) le *camere di estrazione* o *di scarico* dei materiali di scavo, che vengono collegate alle camere d'equilibrio;

5) le *bettoniere*, tramogge che servono per l'introduzione dello smalto o calcestruzzo (*béton*) o di altro materiale occorrente per la fondazione; e che potrebbero chiamarsi *camere* o *tramogge d'immissione*;

6) i *compressori* dell'aria, finalmente, che vengono animati generalmente dal vapore o dalla forza idraulica, e mandano, mediante tubi, l'aria compressa nel cassone.

(*) Nei primi tempi invece, come già si è fatto cenno altrove, per agevolare l'affondamento del cassone col vincerne l'attrito contro il terreno, che si oppone alla discesa, e l'azione dell'aria compressa che da sotto spinge il soffitto della camera di lavoro, si affondava il cassone con sopraccarichi d'acqua o d'altro materiale pesante, come travi o rotaie di ferro, ovvero con l'azione di torchi idraulici.