

Il tunnel sottomarino della metropolitana di Hong Kong

1.0 – Presentazione.

Il territorio di Hong Kong ha una superficie totale di 1.300 km² ed una popolazione di oltre 7.000.000 di abitanti; queste due cifre, però, non forniscono appieno la misura della straordinaria concentrazione della popolazione residente.

In effetti l'ex colonia britannica si divide in due zone:

— l'isola di Hong Kong propriamente detta, con una superficie totale di 82 km², sulla quale è insediato circa un quarto della intera popolazione, di cui la maggior parte concentrata in un'area di 6 km², localizzata sulla costa Nord dell'isola;

— i Nuovi Territori che comprendono, oltre a qualche isola scarsamente abitata, la parte continentale del territorio, separata dall'isola di Hong Kong da un braccio di mare nel quale ha sede il porto; la città di Kowloon, che si sviluppa lungo il suddetto braccio di mare, nei suoi vari quartieri ospita più della metà dell'intera popolazione della colonia su una superficie di appena 20 km².

I tre quarti della popolazione, dunque, sono ripartiti tra i quartieri di Kowloon, su un lato del porto, e la costa Nord dell'isola di Hong Kong, sull'altro lato; al tempo stesso la quasi totalità delle attività industriali si è via via concentrata a Kowloon, mentre gli uffici della pubblica amministrazione ed i grandi centri di affari si sono raggruppati nel cuore dell'isola.

Lo sviluppo economico, industriale e commerciale di Hong Kong, il cui porto si trova attualmente al quarto posto nel mondo per il movimento dei containers, la creazione di nuove zone industriali e di nuovi centri residenziali nel corso degli anni '60 ed al principio degli anni '70, resero indispensabile una modernizzazione del sistema dei trasporti pubblici, assicurati essenzialmente da autobus.

Nel 1968 il Governo di Hong Kong, sulla base di uno studio dei trasporti urbani, intravide nella costruzione di una metropolitana il mezzo per far fronte ai problemi che si sarebbero presentati negli anni '80.

A seguito di diverse ipotesi preliminari, di tipo sia tecnico sia finanziario, fu costituita la M.T.R.C. (Mass Transit Railway Corporation), società di diritto privato avente come unico azionista il Governo di Hong Kong, il cui compito era di portare a compimento lo studio e la realizzazione dell'opera.

2.0 - Il tracciato della metropolitana

Dopo aver approfonditamente esaminato varie possibili soluzioni relative al tracciato della linea metropolitana, la M.T.R.C. prese la propria decisione definitiva e diede il via alla progettazione esecutiva.

Sull'isola di Hong Kong i convogli, partendo alternativamente dalle due stazioni capolinea Pedder e Chater, sarebbero confluiti su un percorso comune per poi attraversare il braccio di mare che divide l'isola dalla terraferma, proseguire per un tratto e infine il percorso si sarebbe nuovamente differenziato in due ramificazioni, l'una diretta verso Nord, e l'altra, compiendo una ampia conversione, verso Sud.

Pur essendo stato previsto di procedere alla realizzazione in fasi successive, la progettazione esecutiva dovette tener conto anche delle già programmate espansioni della rete metropolitana.

La maggior parte dell'intera rete si sarebbe snodata in galleria e solo brevi tratti sarebbero stati in

trincea coperta o in superficie; il problema maggiore, comunque, sarebbe stato quello costituito dall'attraversamento del braccio di mare.

Il progetto di tale attraversamento fu sviluppato per gradi, in modo da adattarsi al graduale sviluppo dei piani per il finanziamento e la costruzione dell'intera opera; il risultato finale fu che la metropolitana di Hong Kong avrebbe attraversato il Victoria Harbour in un tunnel sottomarino posto a collegamento tra due quartieri.

Le informazioni disponibili indicavano che le nature dei diversi fondali erano relativamente simili tra loro ed in genere favorevoli all'impiego delle tecnologie previste per la costruzione dei tunnel sottomarini, così come era già stato concretamente dimostrato, tra il luglio 1969 e l'ottobre 1972, con la realizzazione del Cross Harbour Tunnel, destinato al traffico veicolare.

Si iniziò quindi lo sviluppo di un progetto per un tunnel in cemento armato precompresso longitudinalmente e questa soluzione risultò essere la più economica; una alternativa, costituita da una struttura in ferro, venne anche presa in considerazione in un primo momento, ma successivamente si dimostrò non competitiva sotto l'aspetto dei costi.

3.0 - Descrizione tecnica

La galleria sommersa è lunga 1.400 m ed è costituita da 14 elementi prefabbricati in cemento armato, lunghi ciascuno 100 m.

Ogni elemento è formato da un blocco in cemento armato precompresso longitudinalmente, all'interno del quale trovano posto due tunnel ferroviari affiancati, ciascuno con sezione circolare di diametro 5,34 m; le dimensioni esterne dell'elemento, oltre alla già citata lunghezza, risultano essere 6,50 m in altezza e 13,10 m in larghezza, per un dislocamento complessivo di circa 7.800 tonnellate.

La linea ferroviaria, nell'attraversamento del braccio di mare, devia dalla linea retta secondo una curva avente raggio 2.800 m e, di conseguenza, ciascuna unità prefabbricata è costruita con la medesima curvatura orizzontale.

Le quote d'imposta delle due estremità del tunnel sono di -21,63 m a Nord e di -19,58 m a Sud, con il punto di massima profondità, localizzato approssimativamente ad 1/3 del percorso da Nord a Sud, posto a quota -24,24 m; questa leggera curvatura verticale si ottiene, mantenendo rettilineo l'asse di ogni elemento, attraverso la posa in opera degli elementi stessi con gli assi lievemente angolati.

Dodici delle quattordici unità costituenti il tunnel sono analoghe sia nel progetto sia nella costruzione, e quindi teoricamente intercambiabili, mentre i due elementi alle estremità risultano diversi, sia rispetto agli altri sia tra di loro, dovendo essi inglobare le basi delle torri di ventilazione, necessarie su ambo i lati del braccio di mare, e le strutture di collegamento con le gallerie scavate in terraferma.

Le due torri di ventilazione, ciascuna alta circa 40 m, sono state costruite al di sopra di cassoni galleggianti prefabbricati in cemento armato, successivamente fatti affondare nella giusta posizione sulla verticale dei due elementi di estremità, opportunamente predisposti e precedentemente collocati in opera all'interno di una trincea.

Il collegamento dei cassoni agli elementi terminali del tunnel, segue lo stesso principio adottato per ciascuna delle quattordici unità ed è costituito da un giunto in gomma che assicura la immediata tenuta all'acqua e consente, dopo l'esaurimento, di proseguire i lavori dall'interno in

ambiente asciutto.

Ovviamente, per consentire tutto ciò, gli elementi del tunnel sono stati costruiti con un idoneo alloggiamento per il giunto in gomma ed una paratia provvisoria a chiusura, analogamente a quanto fatto per i cassoni in cemento armato; tali paratie sono state rimosse dopo che le verifiche effettuate sui suddetti cassoni avevano dato le necessarie garanzie di esatto posizionamento e di richiesta resistenza.

Ciascuna torre, costituita da una struttura in cemento armato gettata in opera, contiene un impianto di ventilazione, delle scale di emergenza e dei dispositivi anti-inondazione.

Avendo i calcoli relativi al sistema di ventilazione dato come risultato che il diametro dei pozzi doveva essere uguale a quello delle gallerie, si sono dovuti risolvere alcuni difficili problemi, di natura sia geometrica sia strutturale; sono infatti necessari, ad ambo le estremità e per ciascuna galleria, canalizzazioni separate per l'immissione dell'aria dall'esterno e per l'espulsione di quella dall'interno, ed ognuna di tali canalizzazioni deve essere dotata di dispositivi anti-inondazione da far funzionare nel caso di un catastrofico allagamento in un punto qualsiasi della rete di gallerie sotterranee o al fine di isolare il tunnel sottomarino dal resto del sistema.

Come conseguenza di quanto sopra esposto, ciascuna torre ha pianta rettangolare, con lati di circa 14,50 m e 13 m e si eleva per 41 m, dei quali 13,50 m entroterra e 27,50 m fuori-terra.

Tutti gli elementi del tunnel hanno la superficie inferiore rivestita da lastre in acciaio, spesse 6 mm ed opportunamente trattate al fine della protezione dalla corrosione, saldate tra loro; tali lastre si estendono per l'altezza di 1 m lungo le pareti laterali a copertura dei giunti di collegamento realizzati nel corso della costruzione.

Le restanti parti delle pareti laterali e della copertura sono impermeabilizzate con due strati di membrana bituminosa ricoperti da altri due strati di membrana protettiva.

Al termine del processo di fabbricazione, le estremità di ogni elemento vengono collegate a quelle degli elementi adiacenti per mezzo di flange in acciaio regolabili.

Un gerlo in gomma, appositamente disegnato e dotato di una protuberanza morbida a sezione triangolare, viene posto in opera sulla flangia ad una estremità ed assicura la sigillatura per contrasto con la flangia dell'unità contigua; questo tipo di collegamento, progettato in modo da assorbire le inevitabili tolleranze presenti nella fase costruttiva, garantisce per ogni giunto, nel momento stesso in cui due estremità vengono poste a contatto l'una con l'altra, l'immediata tenuta all'acqua.

Dopo la realizzazione di questa prima sigillatura e dopo lo svuotamento dell'acqua compresa nello spazio tra le paratie poste alle estremità degli elementi prefabbricati, una seconda barriera contro le infiltrazioni, costituita da una guarnizione in gomma a forma di omega, viene posta in opera, dall'interno del tunnel, lungo tutta la residua fessura esistente tra le due unità; infine gli elementi vengono bloccati nella esatta reciproca posizione per mezzo di cemento armato gettato in opera all'interno di una opportuna scanalatura, lasciata, durante la costruzione, in corrispondenza del giunto.

Ognuno degli elementi standard è uniformemente precompresso, da una estremità all'altra, a seguito dell'ipotesi, fatta in sede di calcolo, che i giunti siano in grado di assorbire gli sforzi rotazionali e siano in grado di trasmettere le sollecitazioni originate dagli assestamenti differenziali; in ogni caso ciascuna unità esercita solo una lieve pressione sul letto di fondazione, in modo da attenuare al massimo tali assestamenti.

Solo nel caso dei due elementi di estremità del tunnel, maggiormente sollecitati in funzione dei carichi ad essi trasmessi dalle sovrastanti torri di ventilazione, la pressione ammissibile sulle fondazioni è stata adeguatamente incrementata.

Al fine di ridurre gli effetti della differenza dei carichi, la massicciata in pietrame posta al di sotto delle estremità degli elementi terminali risulta intonacata a spruzzo, con una operazione eseguita dall'interno del tunnel, e viene introdotto, per l'occorrenza, un particolare tipo di giunto; dei tiranti provvisori, posti in corrispondenza di tale giunto durante le manovre di traino e di affondamento, conferiscono ai due elementi terminali le stesse caratteristiche di rigidità tipiche di quelli standard ma, dopo il posizionamento ed il parziale reinterro, la loro rimozione ridona al giunto la proprietà di assorbire gli sforzi di rotazione.

Delle paratie provvisorie in acciaio sono poste a chiusura delle estremità di ogni elemento di tunnel per assicurarne il galleggiamento durante la fase di rimorchio dal cantiere di prefabbricazione al luogo dell'affondamento; in aggiunta a queste i due tratti terminali sono dotati anche di una paratia secondaria utilizzata, come elemento di sicurezza, fino al completo collegamento con le gallerie scavate sottoterra.

4.0 - Considerazioni sul progetto

4.1 - Caratteristiche richieste

Le seguenti caratteristiche erano state esplicitamente richieste dal committente:

- a) il tunnel deve costituire una singola unità, inglobante due gallerie separate da una parete in calcestruzzo;
- b) ciascuna galleria, contenente una linea ferroviaria, deve avere una sezione interna libera non inferiore a 20,50 m² escludendo lo spazio necessario alla struttura di appoggio dei binari, ai passaggi pedonali, etc.;
- c) un marciapiede di emergenza deve essere previsto per ogni galleria in adiacenza alla parete divisoria e tale marciapiede deve trovarsi alla stessa quota del pavimento delle vetture;
- d) dei passaggi, dotati di porte stagne, devono essere previsti ad intervalli non superiori ai 18 m e devono consentire l'accesso di emergenza da una galleria all'altra;
- e) dei dispositivi meccanici anti-inondazione devono essere collocati sul lato rivolto verso terra delle torri di ventilazione e devono essere in grado di isolare il tunnel sommerso dal resto del sistema ferroviario sotterraneo in caso di inondazione;
- f) la sezione trasversale di ciascuna galleria deve consentire una tolleranza costruttiva di ± 150 mm rispetto alla struttura tipo;
- g) la quota superiore del reinterro finito non deve essere maggiore di -12,50 m, con la sola eccezione dei due tratti, lunghi ciascuno 120 m, prospicienti la linea dei moli.

4.2 - Criteri progettuali

I criteri progettuali del tunnel sommerso erano basati su principi determinati in funzione delle seguenti ipotesi:

- a) il tunnel sarebbe stato soggetto ad avverse condizioni locali ed ambientali, sia durante la

costruzione sia dopo l'entrata in servizio;

b) le acque del porto ed i materiali costituenti il fondale erano insolitamente corrosivi rispetto a quelli riguardanti altri tunnel sommersi costruiti in precedenza;

c) l'interno del tunnel poteva frequentemente risultare bagnato dando luogo alla presenza di acqua di condensa contenente sali disciolti altamente corrosivi.

4.3 - Sollecitazioni e deformazioni

La struttura del tunnel è stata calcolata in modo da resistere alle sollecitazioni derivanti dal peso proprio, dai carichi indotti, dai carichi accidentali e dagli effetti delle deformazioni.

I carichi accidentali includono gli effetti del naufragio di una nave al di sopra del tunnel e vengono stimati in un carico uniforme di 50 KN/m^2 ($5,1 \text{ tonn/m}^2$) alla quota della copertura.

Le deformazioni comprendono gli effetti delle variazioni di temperatura, del ritiro e della fessurazione del calcestruzzo, dell'assestamento delle fondazioni e dell'eventuale mancanza dei margini di tolleranza.

La variazione stagionale nella temperatura media della struttura in calcestruzzo è stata stabilita pari a 12°C , ai fini della determinazione delle dilatazioni in direzione longitudinale, e pari a 6°C in ogni periodo dell'anno, tra le superfici interna ed esterna delle pareti esterne per le dilatazioni in direzione trasversale.

Le modificazioni delle caratteristiche di resistenza del sottosuolo, in grado di originare assestamenti differenziali, sono state calcolate per un intervallo massimo di magnitudo pari a 35 mm per unità di lunghezza, ciascuna pari a 100 m; inoltre è stata prevista la eventualità di una deficienza totale di reazione verticale, dovuta a distruzione delle fondazioni, per un tratto di 10 m comunque localizzato lungo l'intero sviluppo, del tunnel.

I solai delle torri di ventilazione sono stati calcolati in modo da resistere ad un carico uniformemente ripartito di $7,5 \text{ KN/m}^2$ ($0,77 \text{ tonn/ m}^2$) e ad un carico concentrato di 20 KN (2,0 tonn) agente su una superficie quadrata di lato 300 mm.

4.4 - Caratteristiche di galleggiamento

Gli elementi del tunnel sono stati progettati in modo da avere una spinta di galleggiamento positiva, tale da garantire il loro sollevamento dal fondo del bacino nel quale venivano costruiti, una superficie, al di sopra della linea di galleggiamento, sufficiente per la sistemazione delle apparecchiature ausiliarie ed infine una discreta stabilità durante le operazioni di traino.

Inoltre è stata esattamente calcolata la quantità di zavorra da applicare ai singoli elementi, durante e dopo le operazioni di affondamento, per far loro ottenere la spinta di galleggiamento negativa sufficiente ad assicurare la necessaria stabilità in condizioni ambientali avverse.

Il progetto è stato basato sulla più sfavorevole combinazione dei seguenti elementi:

a) densità dell'acqua del mare;

b) densità del calcestruzzo;

c) peso degli equipaggiamenti e delle apparecchiature ausiliarie;

- d) intensità delle correnti marine;
- e) altezza delle onde.

Col procedere dei calcoli sono state definite le seguenti caratteristiche minime:

a) Durante il galleggiamento:

Al completo di tutti gli equipaggiamenti ed apparecchiature, l'elemento di tunnel deve galleggiare con una spinta positiva pari al 2%, inclusi gli effetti dell'eventuale riempimento d'acqua del canale superiore; le altezze minime del metacentro e del bordo libero sono rispettivamente 200 mm e 100 mm.

b) Durante e dopo l'affondamento:

Il peso netto della zavorra durante l'affondamento deve essere, istante per istante, pari al 3% del peso del volume d'acqua spostato; dopo l'affondamento e l'allineamento il peso di tale zavorra deve essere incrementato fino al raggiungimento di una spinta di galleggiamento negativa pari al 5%; la struttura finita, comprensiva di zavorra e di reinterro superiore protettivo di spessore 1,5 m, deve avere un fattore di sicurezza superiore a 1,2 senza tener conto del coefficiente di attrito del terreno.

4.5 - Gli elementi standard

L'analisi strutturale, relativa alla sezione trasversale retta del tunnel, è stata condotta mediante l'impiego di modelli di sezione, costituiti da elementi di telaio, elaborati elettronicamente sulla base di un programma a telai piani; l'intero sistema delle fondazioni è stato supposto perfettamente elastico.

In direzione longitudinale gli elementi sono stati analizzati in funzione della sequenza delle condizioni di carico durante la costruzione (galleggiamento, traino ed affondamento) e tenendo conto delle variazioni dei carichi finali, a seguito del reinterro e dei carichi di esercizio; sono state inoltre considerate le sollecitazioni di attrito, presenti nella stessa direzione, dovute alla limitazione delle deformazioni causate dalla temperatura, dal ritiro e dalla fessurazione, oltre agli eventuali effetti di assestamenti differenziali o di perdite di appoggio.

Il modello base è risultato una trave su fondazioni elastiche capace di sostenere il peso dell'arco.

Ogni elemento è stato sottoposto, in fase costruttiva, ad una tensione longitudinale di 61.200 KN (6.200 tonn) per mezzo di cavi di acciaio.

4.6 - Gli elementi terminali

Oltre che in funzione delle caratteristiche esposte per quelli standard, gli elementi terminali sono stati progettati anche in modo tale da fungere da supporto alle torri di ventilazione e da essere ricoperti da un reinterro di spessore fino a 20 m e per una distanza di 36,5 m dalla riva.

Inoltre è stato deciso di adottare su di essi uno speciale giunto ad incastro in modo da isolare la sezione collegata alla terraferma dal resto dell'elemento.

Tale giunto speciale è stato progettato per permettere la contrazione della struttura (circa 10 mm) e la sua rotazione; esso è in grado di trasmettere le sollecitazioni derivanti da una asimmetria

distribuzione dei carichi e, al tempo stesso, di mantenere le caratteristiche di impermeabilità.

5.0 - Prefabbricazione degli elementi del tunnel.

5.1 - Il bacino

Trovare ad Hong Kong un luogo adatto alla installazione del cantiere per la prefabbricazione degli elementi del tunnel, vista la scarsità di terreni non edificati, non era una impresa di facile soluzione, ma alla fine, dopo una accanita ricerca, si è giunti alla conclusione che una certa superficie di una zona di bonifica situata sull'isola, e più precisamente a Chai Wan, appena al di fuori dell'area portuale, poteva adattarsi allo scopo.

In Europa, dove è più diffusa la tecnologia dell'uso di bacini appositamente costruiti per la realizzazione di elementi prefabbricati, i bacini stessi vengono progettati di dimensioni tali da accogliere tutte le unità necessarie e perciò se ne prevede lo svuotamento ed il successivo riempimento per una sola volta.

Tale tipo di approccio non era applicabile ad Hong Kong ed era apparsa subito, in tutta la sua evidenza, la necessità di usare il bacino per più di una volta.

Di conseguenza esso è stato progettato in modo da ospitare le strutture per il getto di quattro elementi di tunnel, in quanto l'intenzione primaria era quella di realizzare tutte le unità in quattro riprese, rispettivamente di 3, 3, 4 e 4 elementi; ciò avrebbe consentito di riservare dello spazio nel bacino, durante le prime due riprese, per la contemporanea costruzione dei cassoni per le torri di ventilazione.

Tuttavia, a causa di un rimarchevole ritardo nell'entrata in funzione del bacino ed in considerazione dei rischi connessi con l'esecuzione dei cicli lavorativi durante due stagioni meteorologicamente caratterizzate dalla probabile presenza di tifoni, è stato deciso di modificare il previsto calendario dei lavori, mantenendo le quattro riprese, ma realizzando le unità in gruppi di 4, 4, 4 e 2.

Questa sequenza aveva il vantaggio di lasciare liberi, nel corso della quarta ripresa, due spazi da utilizzare in caso di emergenza, ma, nel contempo, necessitava della contemporanea costruzione di un piccolo bacino galleggiante nel quale realizzare i cassoni per le torri.

Le prime indagini geologiche effettuate in situ hanno evidenziato la presenza di una debolissima stratificazione di sedimenti marini ad una profondità variabile tra gli 8 m e i 10 m al di sotto del bacino, e certo tale notizia non è stata accolta con gioia dagli addetti ai lavori.

Una analisi successiva, estesa anche al sottosuolo di un adiacente deposito e nel corso della quale erano state effettuate numerose prove di carico, è risultata di notevole ausilio nello stabilire un metodo valido ai fini della determinazione dei parametri necessari alla progettazione; si è inoltre tenuto conto della possibilità di incrementare nel tempo la resistenza del terreno mediante il consolidamento, al di sotto della zona bonificata, degli strati sedimentari più deboli.

In tali condizioni, poi, la stabilità delle pendenze laterali del bacino non era più una questione di tecnica di svuotamento o di progettazione delle pendenze stesse, ma riguardava direttamente la natura del terreno; la conseguenza di ciò è stata la necessità di occupare una maggior superficie in pianta, con il risultato di dar luogo ad imponenti lavori di sbancamento e di consolidamento, quantificabili nel movimento di circa 350.000 m³ di terra e nell'infissione di circa 3.800 pali.

La costruzione del bacino si era rivelata un'impresa molto più ardua di quanto fosse ragionevole prevedere e, nonostante lo svuotamento sia avvenuto con una relativa maggior facilità, l'inizio dei getti della prima ripresa di elementi del tunnel è avvenuto con notevole ritardo rispetto ai tempi fissati.

Comunque, dopo che gli inevitabili problemi, emergenti da un processo produttivo estremamente sofisticato, erano stati superati durante la fabbricazione della prima ripresa di elementi, le tre successive riprese si sono svolte senza intoppi di alcun genere; pur tuttavia è subito risultato evidente come fosse impossibile recuperare, durante la costruzione, il tempo perduto a causa dei problemi connessi con il bacino e, di conseguenza, rispettare il previsto programma dei lavori, stabilito in complessive 80 settimane per le quattro riprese.

In origine era stato programmato di costruire e porre in opera gli elementi del tunnel in sequenza da 1 a 14, con l'unità 1 a Wan Chai e l'unità 14 a Tsim Sha Tsui, ma, a causa del ritardo iniziale, si è constatato che non sarebbe stato possibile posizionare l'unità 14 in tempo utile per consentire la conclusione dei lavori di collegamento della stessa alla galleria scavata sottoterra entro la data fissata per la consegna dell'opera.

Necessaria decisione, quindi, è stata quella di porre l'unità 14 fuori della sequenza e di introdurre uno speciale tipo di giunto che consentisse il collegamento tra le ultime due unità da porre in opera, ed esattamente tra la 12 e la 13; tale decisione, unitamente agli sforzi notevoli delle maestranze, ha consentito di recuperare il tempo perduto e di concludere i lavori entro i termini imposti dal contratto d'appalto.

Il lato a mare del bacino veniva chiuso per mezzo di un cassone in cemento armato, zavorrato in modo da comportarsi come una diga a gravità, che fungeva da supporto ad una paratia metallica; ogniqualvolta gli elementi finiti di tunnel dovevano essere estratti dal bacino, il cassone veniva rimosso e quindi, successivamente, ricollocato in posizione onde consentire di procedere ad un nuovo svuotamento del bacino stesso ed all'inizio di un altro ciclo produttivo.

5.2 - Il cantiere di costruzione degli elementi di tunnel

All'interno del bacino vi erano quattro aree di lavoro, ciascuna dotata di un impianto completo di casseforme mobili altamente automatizzate, che permettevano la costruzione in parallelo di quattro elementi di tunnel; ciascuno di tali elementi, lungo 100 m, ha richiesto l'impiego di circa 3.000 m³ di calcestruzzo.

Ai fini pratici della costruzione, ogni elemento di tunnel era suddiviso in undici segmenti, lunghi cadauno 9 m, dei quali il numero 1 ed il numero 11 leggermente diversi dagli altri sia per dimensione sia per forma, dovendo contenere i giunti di collegamento impermeabili; ovviamente ciascuno di questi segmenti era diviso, a sua volta, in una sezione di base ed in una sezione ad arco, che richiedevano rispettivamente 90 m³ e 180 m³ di calcestruzzo.

Si era inizialmente programmato di gettare la sezione di base e la sezione ad arco di ciascun segmento a distanza di 24 ore l'una dall'altra, in modo da rendere minimi la possibile variazione di temperatura ed i movimenti di ritiro; a causa, però, della scarsa resistenza del terreno all'interno del bacino è risultato evidente come i movimenti dovuti ai carichi indotti dal calcestruzzo bagnato fossero di entità maggiore rispetto ai possibili movimenti differenziali tra basi ed archi, con il risultato di far propendere per la scelta di un maggior lasso di tempo tra il getto delle due sezioni.

Questo cambiamento nella sequenza costruttiva non ha portato ad alcuna differenza nell'utilizzazione delle casseforme ed il lieve ritardo nell'inizio delle operazioni di getto delle sezioni ad arco non ha inciso sui tempi di costruzione.

Ogni zona di lavoro era servita da una gru a portale, in grado di scorrere su binari; la cassaforma esterna, per un segmento di 9 m, veniva mantenuta sospesa a tale gru ed era quindi in condizioni di essere spostata in avanti dal segmento completato al successivo; la rigidità della struttura a portale della gru era tale che la freccia di inflessione, originata dal carico indotto dal calcestruzzo, risultava inferiore ai 5 mm.

La cassaforma interna, indipendente dall'altra, era costituita da due elementi pieghevoli, ciascuno avente la sezione della galleria, il cui supporto e la cui rigidità venivano ottenuti mediante delle strutture reticolari in acciaio.

Durante le fasi di produzione a pieno ritmo, nel bacino venivano costruiti 63 m di tunnel prefabbricato ogni settimana, corrispondenti ad un periodo di sette settimane per ogni ripresa.

A tale periodo va aggiunto il tempo necessario a posizionare e saldare tra loro le lastre di acciaio del fondo, lo sfalsamento tra i getti delle sezioni di base e delle sezioni ad arco, la finitura dei segmenti di estremità, la posa in opera delle guarnizioni in gomma e delle casse di zavorra, le operazioni di pretensione e di impermeabilizzazione ed infine il completamento con le attrezzature per il sollevamento ed il traino.

Tutto ciò porta ad un totale di circa 14 settimane, alle quali ne vanno ulteriormente aggiunte un paio per le sospensioni dovute alle inclementi condizioni atmosferiche ed altre quattro per le operazioni di allagamento e successivo svuotamento del bacino, con il risultato di poter definire in complessive venti settimane la durata effettiva del ciclo di lavorazione.

In vicinanza delle zone di lavoro era stata installata una centrale di betonaggio completamente automatica, comprendente due miscelatori ELBA, ciascuno con capacità $15 \text{ m}^3/\text{h}$, ed un miscelatore ROSS con capacità $40 \text{ m}^3/\text{h}$; sabbia ed inerti venivano trasportati su chiatte dai Nuovi Territori ed accantonati in un deposito capace di contenerne fino a 10.000 m^3 .

Il cemento usato era del tipo a basso sviluppo di calore e resistente ai solfati, di produzione giapponese; esso veniva trasportato in sacchi e conservato sotto un capannone all'uopo costruito per accoglierne 2.000 tonnellate.

Le specifiche tecniche relative al calcestruzzo erano le seguenti:

- a) resistenza caratteristica: 30 N/mm^2 (305 kg/cm^2);
- b) rapporto massimo acqua/cemento: 0,45;
- c) dosaggio massimo di cemento: 360 kg/m^3 ;
- d) diametro massimo degli inerti: 20 mm.

La temperatura del calcestruzzo al momento del getto non doveva superare i 24°C , e ciò ha portato, durante la stagione calda, ad una rigorosa serie di controlli; in taluni casi è stato addirittura necessario proteggere dal soleggiamento diretto i contenitori del calcestruzzo e, raffreddare l'acqua con ghiaccio tritato e con scambiatori di calore.

Il calcestruzzo veniva trasportato dalla centrale di betonaggio alle zone di lavoro mediante autobetoniere da 4 m^3 e gettato all'interno delle casseforme con l'ausilio di pompe, ciascuna di capacità pari a $20 \text{ m}^3/\text{h}$.

Il disarmo della cassaforma interna avveniva 24 ore dopo il getto, consentendo, così, di traslarla rapidamente fino al segmento successivo; la gru a portale, con la cassaforma esterna, invece, poteva essere mossa solo dopo che i rinforzi e le guaine per i tensori erano stati posti in opera, controllati ed approvati dal Direttore del cantiere.

6.0 - Lavori attraverso il porto

6.1 - Maree e tifoni

Il braccio di mare sede del Victoria Harbour è soggetto ad una notevole influenza da parte delle maree, tanto che, per la progettazione delle opere permanenti e provvisorie, si è dovuto tener conto di una normale variazione del livello delle acque, tra la bassa e l'alta marea, di 4,5 m, misura da incrementare di ulteriori 50 cm in previsione di mareggiate.

Le operazioni più direttamente influenzate dalle condizioni atmosferiche erano quelle connesse alla realizzazione del masso di fondazione ed al collocamento in opera degli elementi del tunnel.

Per esse è stata redatta una tabella di prescrizioni, che prevedeva le seguenti condizioni:

a) Operative:

- profondità dell'acqua: 25 m
- velocità del vento: 10 m/sec
- altezza dell'onda: 0,5 m
- velocità della corrente: 0,75 m/sec.

b) Tifone:

- profondità dell'acqua: 10 m
- velocità del vento: 50 m/sec
- altezza dell'onda: 7 m
- velocità della corrente: 1,5 m/sec.

Il complesso dei lavori nel porto, il dragaggio della trincea e la rimozione dei grossi massi non sono stati avversati in modo particolare da sfavorevoli condizioni di vento e di mare.

6.2 - Il dragaggio

Le operazioni di dragaggio risultavano più complicate dell'ordinario per il fatto che dovevano aver luogo in uno dei porti più trafficati del mondo e che, di conseguenza, doveva risultare permanentemente agibile un canale navigabile largo 400 m come minimo; ciò ha comportato, durante l'esecuzione dei lavori, svariate deviazioni al traffico marittimo e ben sei successivi cambiamenti di tracciato per il canale navigabile.

Il dragaggio è stato eseguito in due fasi: la prima ha comportato la rimozione di tutti i materiali ad eccezione dell'ultimo metro di scavo e la seconda è stata eseguita immediatamente prima della posa in opera di una massiciata, alta 1 m, che doveva fungere da fondazione per gli elementi del tunnel.

6.3 - La formazione della massicciata

Oltre al dragaggio vi erano altre tre categorie di lavoro da eseguire in mare: la formazione della massicciata, la posa ed il collegamento degli elementi di tunnel, il reinterro.

L'impresa appaltatrice ha scelto di utilizzare, per esse, una piattaforma appositamente progettata e costruita, la « Tsukudo 2 ».

Essa poteva operare in tre modi diversi:

- a) galleggiante sui due pontoni come un catamarano;
- b) zavorrata in modo che i due pontoni risultassero completamente sommersi ed appoggiati sulle quattro zampe poste a contrasto con il fondale;
- c) poggiata sulle quattro zampe, con i pontoni completamente emersi e sollevati dal livello del mare, durante l'imperversare dei tifoni.

La posa in opera della massicciata sul fondo della trincea dragata non poteva essere effettuata, con la necessaria accuratezza, da una imbarcazione galleggiante, sia pur opportunamente ancorata; è stata questa la ragione che ha fatto propendere per la decisione di adottare la speciale piattaforma « Tsukudo 2 » la quale, una volta posizionata, veniva caricata di zavorra in modo tale che sulle quattro zampe agisse un carico sufficiente ad impedire il sia pur minimo movimento originato dalla marea, dalle correnti e dalle onde.

6.4 - La posa in opera degli elementi del tunnel

Al termine di ogni ciclo costruttivo di elementi del tunnel e dopo la loro rimozione dal bacino di Chai Wan, il primo elemento nell'ordine di posa in opera, veniva rimorchiato direttamente verso la piattaforma « Tsukudo 2 », mentre gli altri trovavano provvisorio ormeggio nella Junk Bay.

Al momento dell'arrivo di ogni elemento, la piattaforma, galleggiante sui due pontoni e con le zampe retratte, si doveva trovare ormeggiata con un angolo di 90° rispetto alla linea del tunnel, in modo che l'unità prefabbricata potesse essere manovrata, al di sotto di essa, rimanendo parallela alla corrente originata dalle maree; solo dopo il perfetto fissaggio dell'elemento del tunnel alla piattaforma, l'intero complesso veniva ruotato e messo in posizione sulla verticale della massicciata.

Otto argani regolavano la posizione della piattaforma, altri quattro provvedevano a deporre l'unità zavorrata al di sopra del masso di fondazione ed infine sei arganelli di precisione tenevano sotto controllo la posizione relativa dell'elemento di tunnel rispetto alla piattaforma.

Dopo che l'unità prefabbricata era stata agganciata mediante cavi ai quattro argani principali, essa veniva zavorrata, fino a raggiungere la richiesta spinta di galleggiamento negativa, in parte mediante l'uso di blocchi di calcestruzzo, costituenti la zavorra permanente, ed in parte mediante il riempimento con acqua di alcuni cassoni provvisoriamente collocati all'interno del tunnel.

Al momento dell'appoggio dell'unità sul fondo della trincea si raggiungeva una spinta di galleggiamento negativa pari a 300 t, ripartita sui quattro argani in ragione di 75 t ciascuno; tuttavia, dal momento che un incidente o l'improprio funzionamento di uno degli argani potevano far gravare il carico sui rimanenti, ciascuno dei punti di sollevamento era stato progettato, ai fini della massima sicurezza, per resistere a carichi di 200 t.

6.5 - Il collegamento degli elementi del tunnel

Nel momento in cui il singolo elemento stava per entrare in contatto con la massicciata e si trovava ad una distanza di circa 0,5 m da quello posto in opera precedentemente, dei sommozzatori mettevano in azione due martinetti idraulici in grado di attirare le due unità, l'una verso l'altra, con una forza di circa 250 t; questa forza era sufficiente a comprimere la guarnizione in gomma, posta tra i due elementi, con una intensità tale che lo spazio compreso tra le paratie di estremità risultava impermeabile in funzione della pressione idrostatica esterna.

A questo punto era possibile drenare il vuoto compreso tra i due elementi mediante il deflusso regolato dell'acqua attraverso delle tubazioni disposte lungo le unità precedentemente poste in opera; durante questa operazione, i valori della pressione idrostatica tra le due paratie scendevano progressivamente sino ad annullarsi, con il risultato che la pressione esterna, esercitata sulla estremità libera del tunnel, comprimeva ulteriormente, con una forza di circa 1.400 t, la guarnizione in gomma.

Appena realizzato il giunto tra due elementi, le paratie provvisorie potevano essere rimosse e si procedeva alla posa in opera, nella fessura esistente tra le due unità, di una ulteriore guarnizione in gomma, a forma di omega, garantendo così una seconda barriera impermeabile nel caso in cui la prima sigillatura dovesse, per una qualsiasi ragione, risultare difettosa.

Infine veniva gettato, all'interno della scanalatura appositamente creata in fase di costruzione, un anello in cemento armato con funzioni di ripartitore dei carichi; tale accorgimento consentiva di far sì che l'intero tunnel, dal punto di vista del modello statico, si comportasse come una successione di travi su appoggi con snodi puntiformi alle estremità.

6.6 - Le torri di ventilazione

Dopo la posa in opera degli elementi numero 1 e 14, i cassoni costituenti la base delle torri di ventilazione sono stati rimorchiati sulla verticale e quindi affondati con l'ausilio di zavorra costituita da acqua; la costruzione delle torri, infine, è proseguita adottando la tecnologia delle casseforme scorrevoli e dei getti in opera.

6.7 - Il giunto di chiusura

Se tutti gli elementi del tunnel fossero stati posti in opera in sequenza dal numero 1 al numero 14, anche tutti i giunti sarebbero stati uguali, ma la modifica di tale sequenza, a cui si è già accennato in precedenza, che prevedeva l'installazione per ultima dell'unità numero 12, ha portato come conseguenza che tale unità veniva accostata alla numero 11 con il metodo ordinario e che doveva essere studiato un nuovo giunto per il collegamento con la numero 13.

Ovviamente era necessario prevedere una tolleranza dimensionale tra questi due elementi in modo da evitare danni accidentali durante le operazioni di posa in opera dell'unità numero 12 ed inoltre per compensare lo scorrimento, valutabile in 80-100 mm, che sarebbe stato provocato dalla compressione esercitata sulla guarnizione in gomma, al momento del drenaggio dello spazio compreso tra le paratie, dalla pressione idrostatica esterna.

Pertanto il giunto di chiusura doveva essere progettato con il duplice obiettivo di bloccare longitudinalmente i due elementi di tunnel, prevenendo il loro reciproco slittamento al momento del drenaggio che avrebbe provocato la perdita di tenuta dei giunti adiacenti, ed inoltre di garantire una impermeabilizzazione, resistente alla pressione esterna, al fine di consentire la

realizzazione del collegamento in cemento armato all'interno, così come fatto negli altri casi.

Lo scopo è stato raggiunto installando due casseforme, una interna ed una esterna, a cavallo delle estremità degli elementi di tunnel, e riempiendone il residuo vuoto con circa 250 m³ di calcestruzzo gettato sott'acqua.

Tutta questa operazione è durata 14 ore, un po' più del previsto, ma se si considera la lunga catena di trasporti, dalla centrale di betonaggio sino alle speciali tubazioni per il pompaggio, il cui diametro interno era di 250 mm, ed il fatto che si operava ad una profondità di circa 25 m, si può affermare che i tempi sono stati estremamente ridotti.

Le caratteristiche del calcestruzzo usato erano le seguenti:

- resistenza media a 7 giorni: 44 N/mm² (445 kg/cm²);
- rapporto acqua/cemento: 0,52;
- rapporto inerti/cemento: 2,78.

6.8 - Il collegamento con le gallerie sotterranee

La successione dei contratti di appalto richiedeva che il tunnel sottomarino fosse completato in anticipo rispetto alle sezioni di galleria che ad esso dovevano collegarsi e ciò ha comportato la necessità che le estremità del tunnel stesso fossero coperte con un reinterro tale da consentire lo scavo delle gallerie sino all'abbattimento dei diaframmi.

Tale reinterro è stato realizzato contornando le due estremità del tunnel sottomarino, per uno spessore di 2 m, con un misto costituito da cemento, bentonite e sabbia, capace di assicurare la perfetta tenuta; al di sopra di esso si è provveduto alla formazione di un ordinario reinterro con il solo scopo di migliorare, per il carico originato dal peso proprio, la resistenza alla pressione atmosferica esercitata dall'interno.

6.9 - I lavori di completamento

Come si è visto, la spinta di galleggiamento negativa degli elementi del tunnel, durante le operazioni di affondamento e di collegamento, era ottenuta anche mediante zavorra di acqua e, ovviamente, i lavori all'interno degli elementi stessi non potevano procedere fino a quando fossero stati presenti i cassoni di zavorra; nel contempo, però, tali cassoni non potevano essere vuotati e rimossi sino a quando la loro funzione statica non fosse stata assunta da una zavorra esterna, in forma di reinterro attorno e sopra il tunnel.

Le operazioni di reinterro, quindi, dovevano immediatamente seguire la posa in opera ed il collegamento degli elementi di tunnel, onde consentire il rapido procedere dei lavori da compiersi all'interno; tali lavori consistevano nell'esaurimento dell'acqua di zavorra, nella rimozione dei cassoni e delle paratie provvisorie, nella costruzione dei giunti di ripartizione in calcestruzzo, nel getto della sede dei binari e dei marciapiedi di emergenza e, infine, in tutto ciò che rendeva il tunnel idoneo alla posa della linea ferroviaria ed alla installazione delle apparecchiature meccaniche ed elettriche.

7.0 - Riepilogo delle caratteristiche tecniche

7.1 - Tunnel

- Lunghezza: 1.400 m
- Elementi costitutivi: 14, ciascuno lungo 100 m
- Raggio di curvatura orizzontale: 2.800 m
- Massima pendenza: 1,5%
- Quote di imposta al livello superiore della massicciata:
 - estremità Sud: -19,58 m
 - estremità Nord: -21,63 m
 - punto di massima profondità: -24,24 m
- Movimenti di terra (dragaggio): 530.000 m³
- Calcestruzzo impiegato: 40.960 m³
- Acciaio per armatura ordinaria: 3.740 t
- Cavi da precompressione: 26 km con diametro 12,5 mm
- Dislocamento di ogni elemento: 7.800 t
- Fattore di sicurezza al galleggiamento: 1,2
- Massima pressione idrostatica all'estremità di ogni elemento: 1.400 t
- Spessore delle pareti esterne: 630 mm
- Impermeabilizzazione: 33.000 m² di membrana a quattro strati.

7.2 - Torri di ventilazione

- Altezza totale: 41 m
- Altezza fuori terra: 27,5 m
- Acciaio per armatura normale 150 t.

8.0 - RIASSUNTO

La linea metropolitana di Hong Kong, attraversa il Victor Harbour in un tunnel sottomarino che collega la penisola di Kowloon all'isola di Hong Kong.

La galleria sommersa, di 1400 m di lunghezza, è costituita da 14 elementi prefabbricati in c.a. ognuno di 100 m di lunghezza, 13,10 m di larghezza e 6,50 m di altezza.

Ogni elemento è formato da un blocco in c.a. precompresso longitudinalmente all'interno del quale trovano posto due tunnel ferroviari affiancati ciascuno di 5,34 m di diametro.

Fonte : Internet