

LO SBARRAMENTO DI TEMPESTA SUL TAMIGI A DIFESA DELLA CITTÀ DI LONDRA

Adriano de Vito (*)

SOMMARIO — Dal 1984 il completamento di uno sbarramento mobile sul Tamigi, realizzato dopo un lungo percorso progettuale e costruttivo, protegge la città di Londra dal pericolo di inondazioni di marea.

L'opera merita la descrizione che segue, non solo per le caratteristiche tecniche e per gli obiettivi raggiunti, ma anche per le annose vicende precedenti la messa a punto del progetto, nonché per i dieci anni dei lavori di costruzione, contraddistinti dal rispetto del progetto originario e da una grande flessibilità contrattuale.

1. GENERALITÀ E CENNI STORICI

Il problema della difesa idraulica della città di Londra dalle acque alte di marea, è di origine remota anche se la necessità di realizzare un'opera di sbarramento sul fiume è di più recente concezione, giustificata sia dall'intenso sviluppo della città nel XIX secolo, sia soprattutto da alcune convinzioni di natura idraulica, geologica e climatica che sono andate approfondendosi con il passare degli anni ed il ripetersi degli eventi. Dal punto di vista antropico la città nel suddetto periodo fu interessata da un'intenso sviluppo residenziale, industriale ed infrastrutturale in aree depresse a ridosso delle vitali vie d'acqua costituite dal Tamigi e dalla sua rete di canali (fig. 1). Inoltre un lento e progressivo fenomeno di subsidenza (1mm/anno) interessante la parte meridionale della Gran Bretagna e la constatazione del ripetersi di eventi estremi di marea (fig. 2) con livelli sempre crescenti (+ 30 cm/100 anni) e soggetti alle conseguenze del temuto progressivo scioglimento delle calotte polari, hanno giustificato un'opera destinata a garantire sicurezza idraulica alla città.

I primi progetti per la realizzazione di uno sbarramento sul Tamigi, seppur motivati più da fattori commerciali di regolazione dei livelli del fiume che non di difesa idraulica, risalgono ai primi anni del '800 per l'importanza che il porto di Londra andava assumendo nel-

l'economia mondiale, ma solo alla vigilia della seconda guerra mondiale si sarebbe potuto dare inizio ai lavori se il timore di un suo bombardamento con la conseguente ostruzione dell'accesso al porto, non avessero consigliato di soprassedere all'iniziativa.

L'evento estremo del 1953 che sconvolse le coste orientali della Gran Bretagna e dei Paesi Bassi, diede finalmente impulso alla realizzazione dell'opera. L'acqua al ponte di Londra superò di 1,13 m (3.7 ft) il livello di alta marea equinoziale e trascinò nelle campagne a valle di Londra: 160.000 acri di terreno agricolo furono sommersi e 300 persone perirono. Più grave fu il bilancio nella vicina Olanda che contò 1800 morti e che, a seguito di quell'evento, varò l'imponente progetto del Delta (Idrotecnica 5/91).

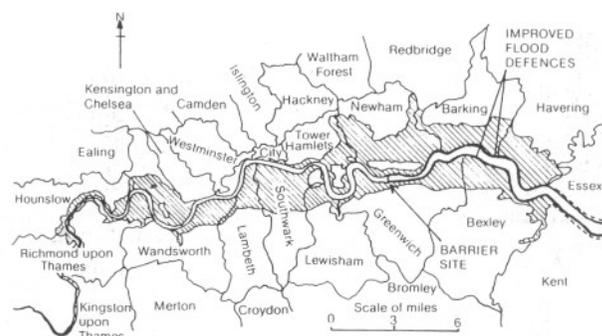


Fig. 1. Aree esondabili a Londra

(*) Dr. ing. Adriano de Vito - CESECO International.

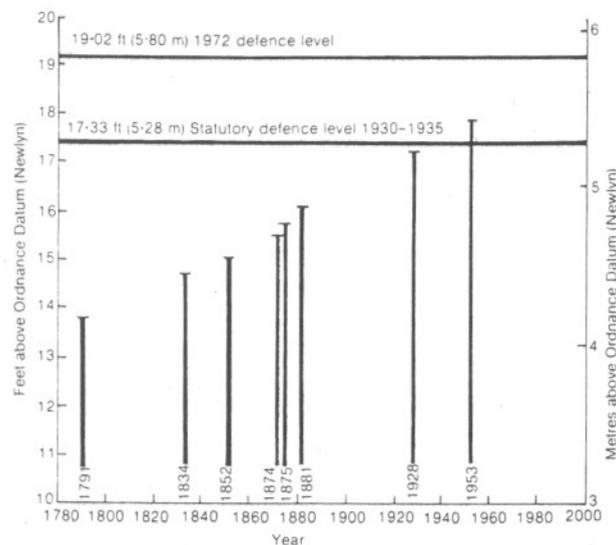


Fig. 2. Incremento dei livelli di piena al ponte di Londra

Crociere turistiche lungo il Tamigi, con imbarco a Westminster, assicurano, con più corse giornaliere, la visita dello sbarramento e della attigua mostra espositiva, oltre ad offrire un'interessante panoramica dei nuovi insediamenti edilizi nei Docklands di particolare pregio architettonico.

2. CENNI METEOROLOGICI

Le condizioni meteorologiche all'origine di questi fenomeni estremi sono determinate dalla formazione di cicloni atlantici generati dall'incontro dei fronti temperati della Corrente del Golfo con quelli polari del Labrador. La depressione, in movimento verso Est, determina un'innalzamento della superficie dell'Oceano (fino a 30 cm) con la formazione di un'"onda" con lunghezza di migliaia di chilometri e velocità di 60-80 km/h. L'effetto dinamico della rotazione terrestre e l'incontro con la piattaforma continentale ne amplificano l'altezza. Generalmente queste perturbazioni, con direzione Nord-Est, passano tra l'Islanda e la Scandinavia dove la massa d'acqua dissipa la sua energia. Più raramente la depressione, spostandosi verso Est, attraversa la Germania settentrionale incanalando l'onda nel poco profondo Mare del Nord che ne accentua ulteriormente l'altezza, incrementata anche dai forti venti settentrionali, generati soprattutto nel caso che la depressione sia accompagnata da un'alta pressione posizionata sull'Irlanda. Mentre la massa d'acqua muove verso Sud, la rotazione terrestre la spinge verso la costa orientale dell'U.K. seguendo anche il movimento delle maree astronomiche. Lo Stretto di Dover, con la sua configurazione e la bassissima profondità, rappresenta generalmente un eccellente "limitatore di portata", ma se i venti del primo quadrante continuano a spirare con intensità, sono da aspettar-

si, a valle dello Stretto e lungo l'estuario del Tamigi, notevoli sovralti (surge tide), che possono divenire disastrosi allorché alle suddette condizioni si accompagnano alte maree equinoziali.

3. IL PROGETTO DELLO SBARRAMENTO

Il livello della marea del 1953 aveva lambito la sommità dei muri di sponda del centro di Londra. Nel 1962 un sovrizzo di tempesta superò nella vicina città di Amburgo di ben 1,8 m il livello del 1953: con livelli analoghi Londra sarebbe stata allagata. La piena avrebbe interessato oltre 1,2 milioni di residenti, 350.000 edifici, 1,5 milioni di lavoratori pendolari sarebbero stati coinvolti, gran parte della rete metropolitana sarebbe stata allagata. Una valutazione del 1966 stimò i potenziali danni materiali in 2000 milioni di sterline.

All'evento del '53 seguirono anni di grande fermento. Più di quattordici progetti furono redatti, mentre furono intrapresi studi e ricerche con lo scopo di approfondire le cause e la dinamica del fenomeno. Contemporaneamente si censirono tutte le opere di difesa spondale e si valutarono i costi per un loro eventuale innalzamento. Uno studio particolare, con costruzione di modelli fisici, riguardò l'impatto dell'opera sul fenomeno del trasporto solido che riveste un importante aspetto, fino a quel momento trascurato, per l'equilibrio dell'estuario e i problemi connessi soprattutto alla sua navigabilità.

Gli standard progettuali imposti dalla Commissione Ministeriale nominata a seguito dell'evento del '53, fissò il livello di progetto di 1,8 m al di sopra del livello raggiunto, considerando che quest'ultimo non si era manifestato in coincidenza di un'alta marea equinoziale.

L'ubicazione dello sbarramento, in accordo con le autorità portuali, fu deciso nel tratto denominato Long Reach, circa 20 miglia a valle del ponte di Londra, che presentava un adeguato compromesso tra esigenze di navigazione, condizioni morfologiche e larghezza del fiume (fig. 3).

L'alternativa allo sbarramento poteva essere ottenuto sovrizzando tutte le esistenti difese spondali di non meno di 1,8 m, soluzione che apparve subito inattuabile per il numero di frontisti lungo il fiume. Una stima di intervento per un sovrizzo più fattibile di 0,6 m avrebbe determinato una spesa di circa £9,3 milioni di sterline (STG) dell'epoca (1954), mentre per 0,9 m di 11,5 milioni.

I primi progetti dello sbarramento furono commissionati dal "Minister of Housing and Local Government" (MHLG) a due società di progettazione, che per prima cosa costruirono un modello idraulico per verificare gli effetti della rifrazione dell'onda di marea nel tratto di estuario a valle dello sbarramento. La neces-

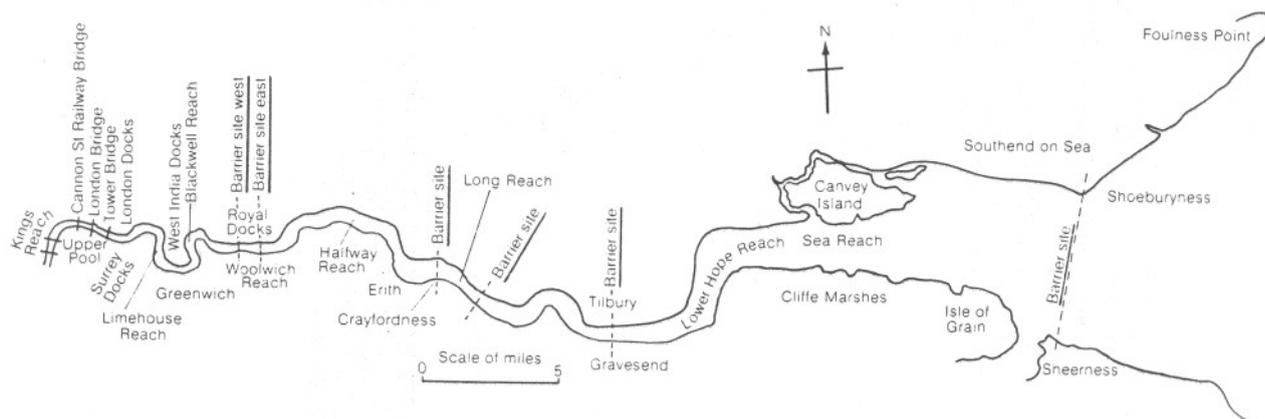


Fig. 3. Siti proposti per lo sbarramento

sità di dover garantire la navigabilità del fiume orientò i progettisti su soluzioni che prevedevano l'uso di paratoie piane affiancate di dimensioni massime di 22 m di altezza e circa 10 m di larghezza, manovrate da un ponte a struttura reticolare di luce massima 150 m, ed appoggiate sul fondo ad una soglia in calcestruzzo. La tipologia della struttura di supporto delle paratoie fu prevista di tre tipi (fig. 4): con ponte sollevabile, con ponte girevole, con ponte scorrevole.

I costi delle tre soluzioni risultavano pressoché confrontabili, tra un minimo di 13 milioni di sterline dell'epoca (1960) della soluzione "girevole" ad un massimo di 17.5 per quella "scorrevole", che comunque comportava molti problemi tecnici.

La pianificazione di alcune nuove banchine da parte del Port of London Authority (PLA), in prossimità del sedime indagato, vanificò i progetti, costringendo l'MHLG a ricercare un nuovo sito per lo sbarramento. Inoltre il PLA decretò la necessità di un allargamento delle luci trasversali per la navigabilità del fiume: dai 150 m iniziali a 420, una dimensione cioè ai limiti delle possibilità tecniche. Con tali disposizioni l'unica soluzione tecnicamente fattibile risultava quella del ponte retrattile. Nel 1965 due Società professionali presentarono due progetti alternativi da realizzarsi sulla sezione fluviale in prossimità di Crayfordness.

Sia l'elevato costo delle soluzioni (30-40 milioni STG), ma soprattutto le dimensioni strutturali delle due opere, con le connesse incertezze realizzative e gestionali, suggerirono una pausa di riflessione necessaria anche per approfondire la probabilità dell'evento e dei danni conseguenti.

Nuovamente furono considerate soluzioni alternative come quella di prevedere, a mò di cassa di espansione, la tracimazione del sovrizzo nelle aree a valle di Londra; o quella di realizzare una sorta di resistenza per frizione alla corrente aumentando le scabrezze dell'alveo con elementi mobili e fissi; o ancora il progetto di realizzare una diga che, bonificando una parte della foce con la realizzazione del terzo aeroporto

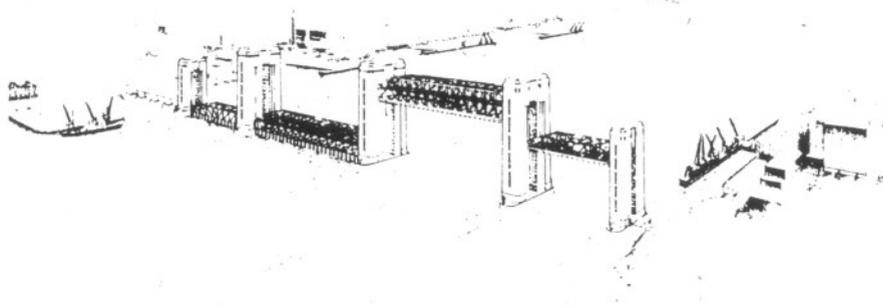
e di un lago interno, ostruisse parzialmente l'estuario. Fu anche investigata la possibilità di realizzare dighe fisse sommerse per livelli prossimi alla metà dell'escurione di marea, ma queste, oltre a problemi di trasporto solido del fiume, avrebbero creato notevoli difficoltà di navigazione. Anche la soluzione di uno sbarramento fisso con chiuse navigabili fu esaminata senza che questa convincesse le Autorità competenti.

Sempre in quegli anni interessanti studi meteomari- ni furono condotti dal "Oceanographic and Meteorological Research Committee" per sviluppare le raccomandazioni tecniche espresse nel 1953 dalla Commissione Waverley, e per valutare i tempi di ritorno degli eventi. I risultati sono riportati nel seguito, dove, elaborando statisticamente i dati di marea disponibili dal 1790, ad ogni sovrizzo è associato il relativo tempo di ritorno:

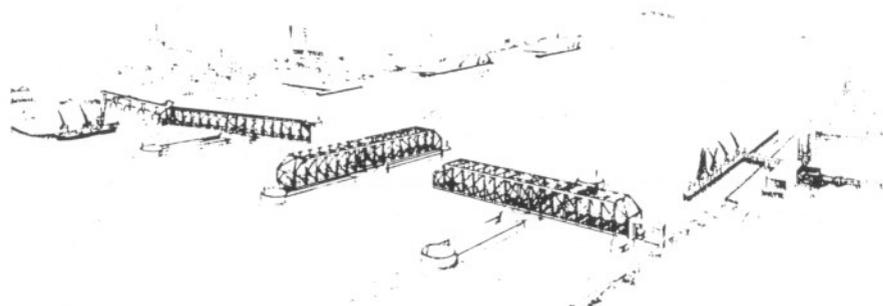
livello del 1953 (O.D.N. + 18 ft)	100	anni
"	"	" + 1 ft ...	350 "
"	"	" + 2 ft ...	1200 "
"	"	" + 3 ft ...	4300 "
"	"	" + 3.7 ft	10000 "

Un evento tecnologico influì direttamente sulla realizzabilità dello sbarramento. Con l'avvento dell'uso dei "containers" nel commercio marittimo, le preoccupazioni sulla navigazione del Tamigi risultarono sensibilmente sminuite. La nuova tecnologia di trasporto infatti, oltre ad imporre la ricerca di nuove aree portuali lungo il fiume per realizzare ampie calate, evidenziò la diseconomia per le navi di una risalita del Tamigi verso i vecchi docks: conseguentemente l'ubicazione del nuovo porto fu pianificata più prossima alla foce (Tilbury). Ciò decretò il declino dei docks londinesi, con i conseguenti problemi sociali ed economici rispetto ai quali lo sbarramento sembrò assumere una funzione di capro espiatorio delle lagnanze sociali.

Nel '66 Lord Zuckerman, il principale consulente governativo, fu incaricato di prospettare una conclusio-



Long Reach: lift barrier (reproduced by permission of Her Majesty's Controller of Stationery)



Long Reach: swing barrier (reproduced by permission of Her Majesty's Controller of Stationery)

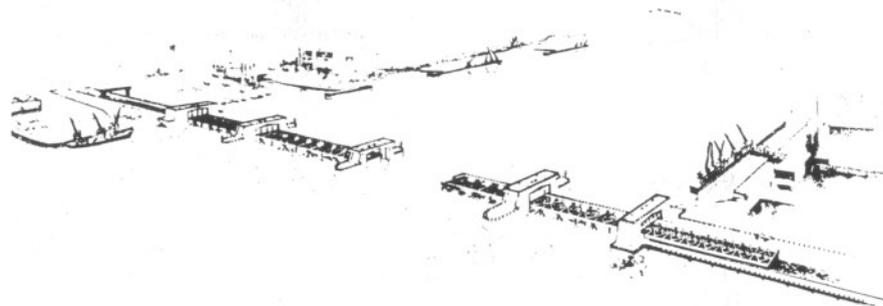


Fig. 4. Solutori progettuali per lo sbarramento mobile

ne operativa che ponesse termine anche all'ingente dispersione di risorse ed energie che aveva caratterizzato quegli ultimi 13 anni. Zuckerman, come primo atto, incaricò una commissione di esperti presieduta da una personalità di grande fama scientifica il Prof. H. Bondi, più volte direttore dell'Organizzazione Europea per le Ricerche Spaziali, di redigere un rapporto scientifico conclusivo sugli studi ed i progetti riguardanti la difesa idraulica di Londra. Bondi, nella ricerca di una soluzione finale, intraprese rapporti con gli uffici tecnici Olandesi e Belgi per aggiornarsi sugli indirizzi e le soluzioni adottate dai due Governi alle prese con analoghi problemi di sicurezza idraulica. In quei

contatti, alla sorpresa da parte degli ingegneri olandesi di constatare come un'opera di ingegneria idraulica di quelle dimensioni fosse nelle mani del Ministero dell'Edilizia, con perfetto stile anglosassone Boldi disse: "Non preoccupatevi per questo, io sono un astronomo!".

Il Rapporto, ultimato nel '67, decretava la necessità di uno sbarramento a prescindere da qualsiasi valutazione costi/benefici. Ubicava tre possibili soluzioni progettuali: sui primi due sbarramenti mobile e sul terzo fisso con chiuse di navigazione. L'istituzione in quegli stessi anni di un'unica

ministrazione statale con competenza su tutta l'area metropolitana londinese, denominata Greater London Council (GLC), rappresentò un importante traguardo per la pianificazione dell'intervento.

Il GLC, su invito del MHLG, avviò immediatamente gli studi e nel '70 fu definita la soluzione finale: lo sbarramento di tipo mobile sarebbe sorto a Silvertown sul Woolwich Reach e avrebbe avuto quattro aperture centrali di larghezza massima di 61 m e cinque laterali da 31,5 m. La trattativa, dai 420 m iniziali, aveva seguito la graduale chiusura dei docks fino al suddetto valore all'annuncio della dismissione dei Surrey docks, gli ultimi ancora operativi.

Nel settembre del 1969 un altro evento meteomarinò accelerò l'iter del progetto: il sovrizzo di marea superò nell'estuario di 20 cm il livello raggiunto nel 1953. Solo la limitata intensità dei venti evitò una nuova catastrofe.

Lo sbarramento (fig. 5) interessava una sezione fluviale di 445 m circa. Sette pile su plinti, con fondazione diretta nella formazione gessosa di base, avrebbero sorretto sei paratoie girevoli a settore, abbattibili e con posizione di riposo in alloggiamento nella soglia di fondo. L'ingegnosa tipologia delle paratoie girevoli fu dell'ing. C. Draper. Il funzionamento delle stesse è evidenziato schematicamente nella fig. 6.

Sulla sommità delle pile sono alloggiati le apparecchiature di manovra protette da un'intelaiatura in legname ricoperta con lamine in acciaio. L'architettura della copertura (fig. 7), simile per tipologia a quella della Sydney Opera House e con forma che ricorda la sagoma di una nave, fu provata in laboratorio per minimizzare il coefficiente aerodinamico.

Il livello di progetto fu fissato corrispondente ad un evento estremo con tempo di ritorno di 1000 anni (ODN + 6 m) maggiorato di 0,8 m di franco per tenere conto di un possibile e progressivo incremento del livello di marea per i fenomeni già ricordati. Non si ritenne utilizzare progettualmente eventi a minore frequenza in quanto elaborazioni specifiche dimostrarono che un'eventuale tracimazione dell'opera per un valore di 0,8 m - ipotizzabile nell'anno 2130 - per effetto di laminazione nel bacino di monte avrebbe ivi determinato un innalzamento di livello di soli 30 cm, garantendo la sicurezza della città.

4. LA REALIZZAZIONE DELLO SBARRAMENTO

Le indagini geognostiche sul sedime dello sbarramento (fig. 8) furono eseguite tra il 1971-72, e comportarono circa un centinaio di carotaggi continui di circa 30 m di profondità per lo più concentrati nelle aree di fondazione dei plinti.

L'appalto dei lavori fu suddiviso in otto contratti separati: il primo riguardava il dragaggio e la sistemazione del canale provvisorio di navigazione, il secondo i lavori preparatori come la costruzione del cantiere, delle strade di accesso etc., il terzo riguardava i lavori di ingegneria civile; i restanti la fornitura, la costruzione e per alcuni, anche il montaggio, delle parti meccaniche, elettromeccaniche, dei motori e delle attrezzature complementari in genere.

L'appalto dei lavori di ingegneria civile ha rappresentato il contratto più impegnativo e di maggior valore economico. Esso prevedeva la costruzione delle

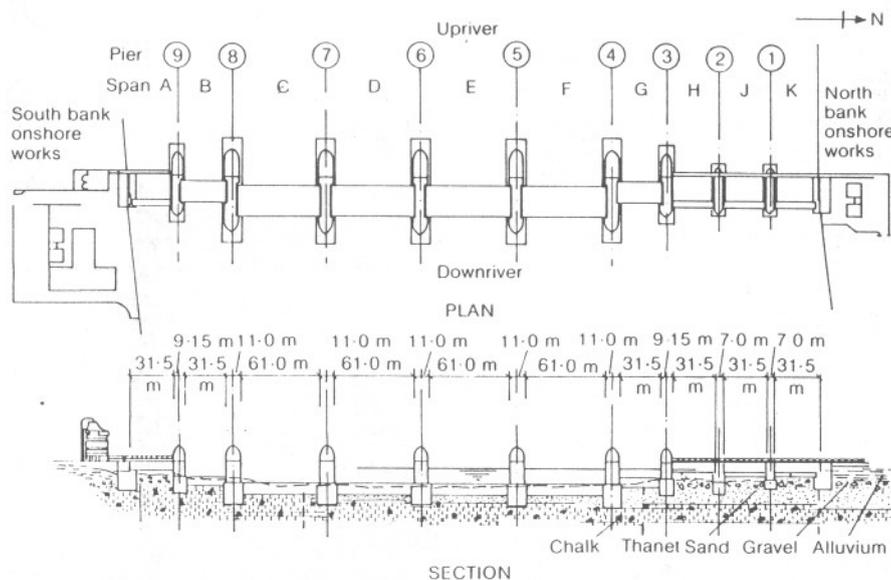


Fig. 5. Pianta e sezione dello sbarramento

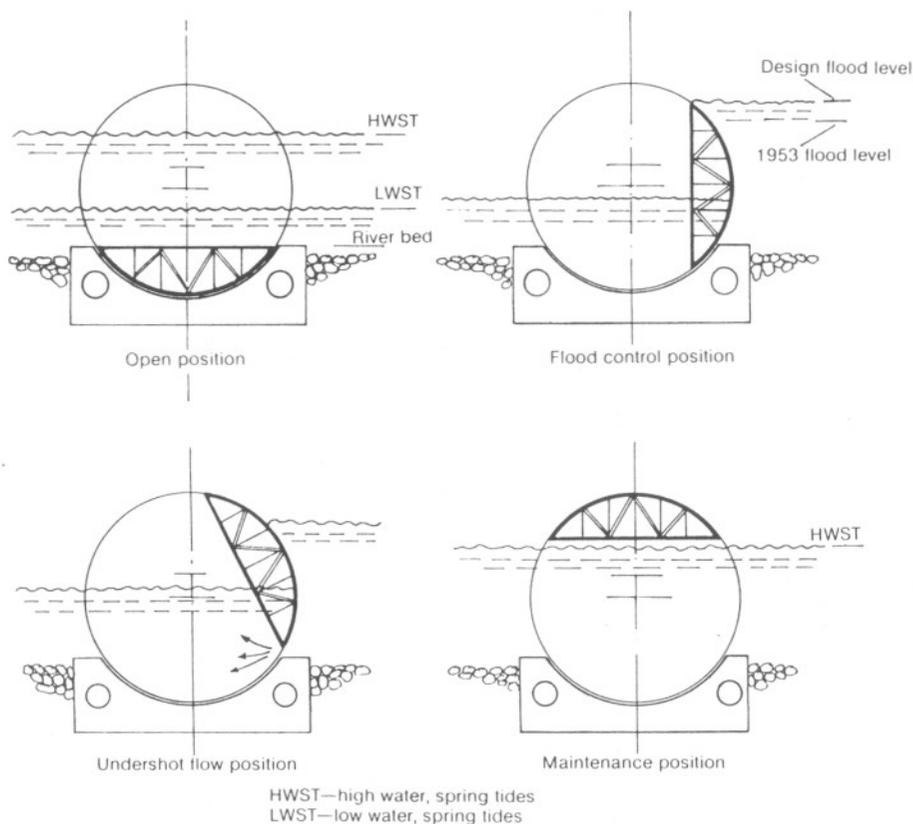


Fig. 6. Quattro posizioni delle paratoie di sbarramento

due spalle dello sbarramento, delle nove pile con le relative sovrastrutture e delle sei soglie prefabbricate da vararsi tra le pile stesse. Complessivamente l'appalto comportava la posa di 160.000 mc di calcestruzzo e di 50.000 t di acciaio.

Alla gara, bandita nel 1973 dal Ministero dell'Agricoltura Pesca e Alimentazione (MAFF) subentrato come committente al MHGL, furono invitate a presentare offerta cinque imprese o consorzi, anche se poi solo tre di queste furono ammesse, nel novembre dello stesso anno, alla successiva fase di aggiudicazione che terminò nel luglio dell'anno successivo con la firma del contratto da parte di un consorzio anglo-olandese.

La congiuntura economica particolarmente sfavorevole di quegli anni (crisi energetica, conflitti sindacali e alta inflazione) resero molto laboriosa la stesura del contratto di un'opera di così ampia dimensione ed esteso in un arco di cinque anni. Particolari clausole dovettero essere inserite rispetto alle "Standard Conditions" comunemente adottate per gli appalti pubblici inglesi. In particolare la responsabilità dell'Appaltatore nel rispetto dei tempi non avrebbe superato i 21 giorni di ritardo l'anno, mentre per quanto riguardava i prezzi, questi sarebbero stati revisionati al termine del secondo anno di attività alla luce delle esperienze tecniche nel frattempo maturate.

La Direzione dei Lavori fu affidata alla Società professionale di ingegneria che aveva progettato l'opera (Render Palmer & Tritton), mentre fu istituita una commissione a livello ministeriale che avrebbe seguito l'iter realizzativo e contrattuale del progetto (GLC's Barrier team).

Le attività costruttive principali riguardavano nell'ordine, oltre al dragaggio del canale provvisorio per la navigazione in sponda sinistra (lato nord) con contratto specifico:

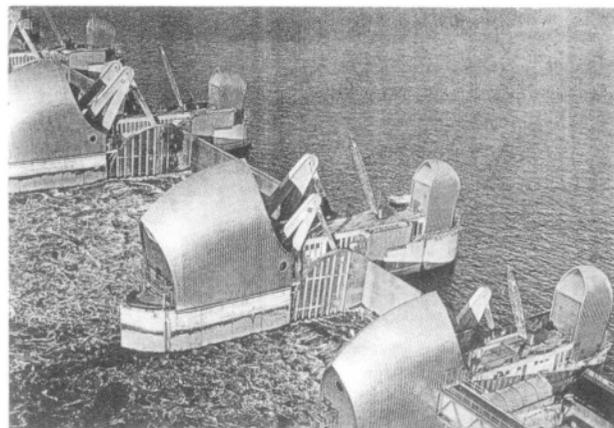


Fig. 7. Veduta aerea dello sbarramento

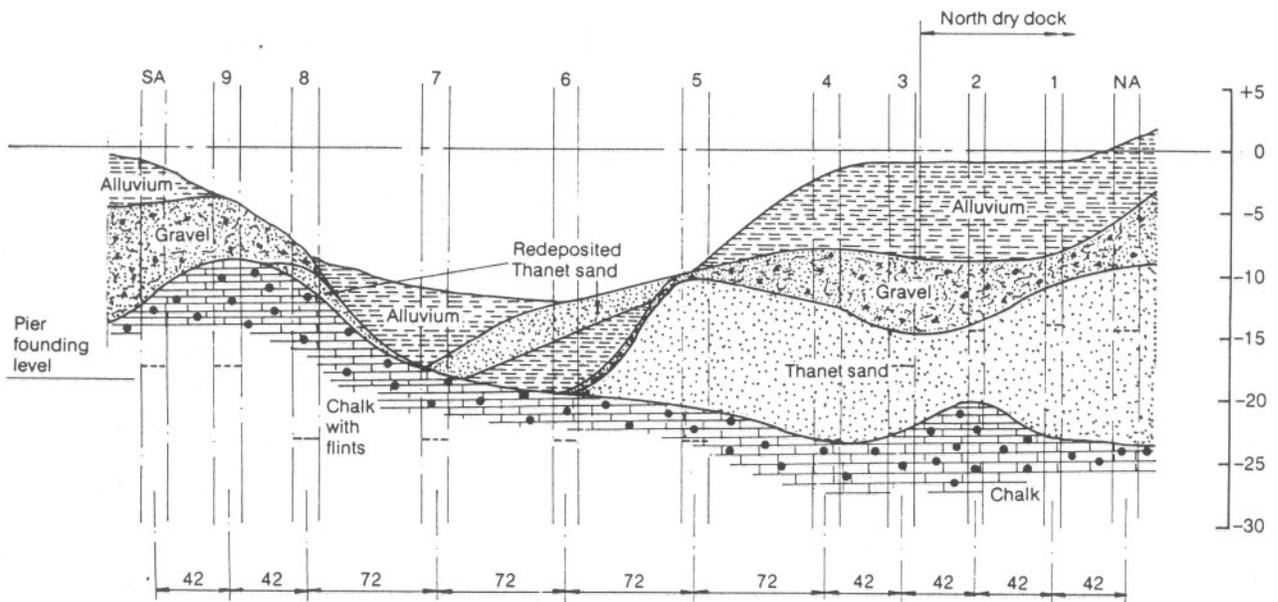


Fig. 8. Woolwich Reach — Sezione geologica (da Institute of Geological Sciences)

- realizzazione dell'area di prefabbricazione delle soglie e costruzione delle stesse;
- costruzione delle 4 pile (nn. 6, 7, 8 e 9) in sponda destra, varo e posa delle relative soglie;
- ripristino della navigazione in sponda destra tra le pile realizzate;
- costruzione delle 3 pile (nn. 3, 4 e 5) in sponda sinistra, varo e posa delle soglie e realizzazione delle due pile a terra e delle spalle.

Il dragaggio del canale navigabile fu ultimato in sei mesi (set. 1974 - feb. '75) con la rimozione di circa 1.000.000 di mc di materiale. Il canale fu delimitato con una doppia palancolata di protezione ai cantieri. A ridosso di questa, lato terra, fu realizzato il cantiere di prefabbricazione delle soglie a cassone: n.2 di dimensioni 31.5 x 20 mq e n.4 da 61 x 20 mq. Quest'area delimitata su tre lati da palancolate, protesa nel fiume, con un'estensione complessiva di 17.000 mq, fu livellata al di sotto del livello di marea in modo da poter permettere il successivo allagamento dell'area stessa, per il trasporto flottato delle soglie.

I lavori di costruzione delle pile, in sponda destra iniziarono nel gennaio del 1975. Il contratto infatti prevedeva un tempo di avvio del cantiere di sei mesi necessari all'impresa per studiare e mettere a punto tutte le procedure realizzative.

Per garantire la continuità delle lavorazioni, con due turni di lavoro da 12 ore per cinque giorni settimanali, fu necessario definire nuovi accordi sindacali. La scelta non fu delle più felici, la produzione infatti soprattutto nelle ultime ore del turno risultò molto bassa a fronte di onerosi costi per gli straordinari.

Dal punto di vista tecnico la realizzazione delle pile, fondate nel sub-strato gessoso fino ad una profon-

dità massima di circa 16 m al disotto del letto del fiume (pila n. 8), era da eseguirsi all'interno di ture realizzate con palancolate che avrebbero garantito le lavorazioni all'asciutto. Le prime difficoltà si incontrarono già nella fase di infissione delle palancole (Larsen n. 6) di altezza complessiva di oltre 30 m. Per contrastare la spinta dell'acqua durante le successive lavorazioni, si dovette provvedere alla realizzazione di quattro intelaiature interne con funzione di irrigidimento, che resero particolarmente fastidioso il lavoro di scavo nelle ture.

Nell'estate del 1976 le quattro palancolate intorno alle pile n. 9, 8, 7, 6 risultavano ultimate e fu realizzato il primo plinto di fondazione della pila n. 9, di spessore 5 m per complessivi 3000 mc circa di calcestruzzo, ultimato in cinque giorni (583 mc/g). I saggi eseguiti sul contatto tra calcestruzzo e sub-strato gessoso pressochè indisturbato evidenziarono un contatto quasi perfetto. Il calcestruzzo era dosato con cemento d'altoforno di 450 kg/mc, con un 50% di contenuto di "ceneri" per limitare il calore di idratazione dei getti, e con ritardanti di presa.

Nella stessa estate '76 scadeva anche il termine di rinegoziazione del contratto: i primi due anni di lavoro, sulle valutazioni di computo, avevano raggiunto un avanzamento del 25%. I committenti manifestarono in quell'occasione l'insoddisfazione per il grave ritardo: sei mesi su diciotto lavorati! Si paventò anche la rescissione del contratto. Le trattative andarono avanti fino all'autunno, in cui fu siglato il nuovo documento nel quale si prevedeva un aumento dei prezzi del 16% per le nuove lavorazioni, mentre i maggior costi dovuti a vertenze sindacali o ritardi di fornitura non direttamente collegabili a responsabilità dell'impresa,

venivano coperti con un contratto a "lump sum" valido fino all'estate '78.

Non poche furono le obiezioni su tale revisione che provocarono cambiamenti nel direttivo del consorzio, che, come primo atto, modificò i turni di lavoro in 3x8 ore, anche se ciò comportò controversie sindacali per la riduzione degli straordinari.

Tra l'ottobre '76 e l'aprile del '77 furono ultimati i getti di fondazione delle pile sulla sponda destra, anche se, prima una serie di scioperi delle maestranze e poi dei problemi di sottopressioni sul plinto di fondazione della pila n. 7 (14.000 t), ritardarono di ulteriori sette mesi i programmi.

Sul finire del 1977 nel cantiere di prefabbricazione risultavano ultimate le 4 soglie per le pile "Sud", e, sulla sponda sinistra, costruiti il plinto della pila n. 2 e la spalla.

Gli eventi di marea del '78 determinarono un nuovo impulso all'opera. Il livello del sovralzò in gennaio e febbraio si fermò solo pochi centimetri al disotto del livello storico del 1953, tanto da rimettere in discussione i coefficienti di sicurezza relativi al tempo di ritorno dell'evento. Ciò comportò molta preoccupazione e, da parte del Ministero, fu decisa una rinegoziazione del contratto per accelerare l'ultimazione dei lavori entro il 1982, la cui stesura impegnò diversi mesi. Fu infine siglato un contratto, a valere dal gennaio '79, a "obiettivo" (target-cost), fissando un tetto di spesa di 165 milioni STG e con una suddivisione tra le parti qualora, per risparmi o maggior costi, detto importo fosse variato tra +5 e -5%, con un limite di 12 milioni; furono previsti una serie di incentivi per accelerare il lavoro dell'appaltatore e una certa revisione per tenere conto dell'inflazione, particolarmente galoppante in quegli anni. Inoltre tre consulenti furono affiancati al direttore tecnico del Ministero.

Di sostanziale efficacia per l'accelerazione dei lavori, evitando l'intelaiatura interna, fu la sostituzione delle palancole di tura per le pile in sinistra (n. 3, 4 e 5) con elementi più pesanti con sezione ad H, denominate "Peine" e fornite dalla Germania. Queste, accoppiate sull'estremità delle ali furono infisse per sei metri circa al di sotto del piano di fondazione adottando fori pre-scavati e riempiti con fanghi bentonitici. La struttura così composta abbisognava di un solo piano di puntoni al momento dello svuotamento dall'acqua, mentre nessun ostacolo era presente durante la fase di scavo. In termini di costo la modifica comportò un sensibile incremento: ogni coppia pesava 20 t e per ogni tura ne servirono 120 coppie.

Nel giugno '79 le pile in sponda destra risultavano ultimate e fu così possibile rimuovere le palancole delle pile 6 e 7 e convogliare tra le stesse il traffico navale, avviando la costruzione della pila n. 5; nel settembre fu varata la prima soglia tra la pila 8 e 9. Questa operazione, particolarmente delicata visto la tolleranza di appena 50 mm per parte, fu eseguita in con-

comitanza con la marea discendente, affondando gradatamente la soglia fino alla base delle pile.

Sul finire dello stesso anno un nuovo accordo sindacale con le maestranze, che prevedeva alcuni "bonus" al termine di ogni fase lavorativa, pose fine allo stato di insoddisfazione generale scaturito dalla modifica del turno lavorativo.

Il 1980 fu particolarmente produttivo: in estate fu terminato il plinto della pila n. 5 e sul finire dell'anno risultavano ultimate le pile n. 1, 2 e 3. Nel 1981 fu spostata la rotta navale dalle pile 6-7 alle pile 7-8; nel marzo fu posizionata la prima soglia da 61 m tra le pile 6-7, mentre con l'inizio dell'estate i lavori delle pile risultarono ultimati. L'ultima soglia fu posizionata nell'ottobre del 1981. Il contratto fu chiuso con economia rispetto al prezzo stabilito.

Contemporaneamente alla realizzazione delle opere civili, dal 1974 furono appaltati, con contratti distinti, i lavori di costruzione delle paratoie e delle altre parti meccaniche. La realizzazione di quest'ultime fu eseguita giuntando longitudinalmente una serie di profilati: 2 di bordo e 3 intermedi. Ogni profilato, composto da 4 elementi, di lunghezza 6 m per una larghezza di 2 ed altezza massima 5,3 m per il profilato centrale, aveva un peso di 50 t, il massimo trasportabile via terra al cantiere di assemblaggio distante circa 20 miglia dall'officina. Sui profilati, una volta assemblati, venivano successivamente montate lamiere a strisce longitudinali che formavano lo scudo semicircolare della paratoia.

Contemporaneamente si procedette alla costruzione degli elementi circolari terminali delle paratoie che supportavano lo scudo e sui quali trovava alloggio il perno di rotazione. Detti elementi, realizzati in U.K., del peso unitario di 1200 t, una volta montati sulle pile, furono solidarizzati alle paratoie utilizzando circa 10.000 bullonature in acciaio Monel.

I supporti del perno di rotazione, da murarsi nelle pile, furono realizzati da una ditta austriaca. Questi, per la paratoia da 61 m, avevano un diametro di 3 m ed un peso unitario di 125 t. Una ditta inglese realizzò i perni di rotazione dimensionati per sopportare azioni dinamiche da 2600 t e forze di taglio statiche di 5000 t. I perni realizzati con acciaio speciale (1% Ni — 1% CrNiMo) con carico di snervamento di 432 N/mm² e di rottura di 586 N/mm², avevano un peso unitario di 48 t.

Per la movimentazione delle parti meccaniche furono realizzati da una ditta americana 142 cuscinetti di tipo rotazionale e 256 di tipo lineare entrambi con lubrificazione secca. Quelli rotazionali del perno, avevano un diametro esterno di 1500 mm, un'altezza di 620 mm, per 13 t di peso.

L'assemblaggio dei vari elementi dello sbarramento fu particolarmente laborioso ed impegnativo tenendo conto che tutte le operazioni vennero eseguite dall'acqua, con livelli e condizioni meteorologiche mol-

to variabili e in presenza di una corrente di marea con velocità fino a 7 m/s. Il trasporto delle paratoie e delle parti meccaniche fu eseguito con chiatte da 6000 t di capacità. L'imbarco delle paratoie fu reso possibile adottando speciali carrelloni da 600 ruote. La costanza della quota di imbarco sulla chiatta, soggetta sia alle escursioni di marea che all'avanzamento del carrello, fu garantita aggettando gradualmente acqua dalla stiva precedentemente riempita. Le operazioni di montaggio, eseguite utilizzando due chiatte con gru da 800 t, impegnarono il cantiere per più di due anni.

Le quattro paratoie centrali da 61 m di luce per 20 di altezza, risultano azionate da un sistema oleodinamico, con pompe da 140 kW che, con una pressione di 16,6 N/mm², esercita una forza di 1500 t con una componente di 600 t sulla biella di rotazione.

Il 7 novembre del 1982 lo sbarramento fu finalmente operativo e le paratoie abbassate contemporaneamente per il primo collaudo.

5. LA MOVIMENTAZIONE DELLE PARATOIE

Gli elementi fondamentali per garantire la funzionalità dello sbarramento affinché il sovrizzo di marea non comprometta le difese di sponda a monte della sezione di sbarramento, sono: la tempestività nel decidere la chiusura delle paratoie e la programmazione delle operazioni conseguenti.

La decisione si basa sull'analisi delle condizioni al contorno di un evento che possano far prevedere il superamento di un livello di guardia prefissato. Gli studi avevano già accertato che il superamento del livello di marea astronomica oltre il valore di 1,2 m era da imputarsi principalmente alla presenza di azioni anemometriche di venti del primo quadrante: su queste condizioni era stato messo a punto, negli anni successivi all'inondazione del 1928, un primo sistema di allarme per la difesa passiva della città.

In seguito all'evento del 1953 un sistema di previsione di tipo empirico fu elaborato dal Liverpool Tidal Institute: esso correlava le varie componenti del sovrizzo — espresso come valore "residuo" (differenza tra il livello di marea astronomica e quello reale) — a dati meteorologici di pressione atmosferica e delle caratteristiche del vento (velocità e direzione), rilevate da due stazioni rispettivamente all'imbocco dell'estuario (Fair Isle) e nel Mare del Nord. Una serie di equazioni, a contenuto idraulico, tarate su elaborazioni statistiche dei dati storici, simulavano la propagazione del sovrizzo residuo all'interno dell'estuario, tra sezioni contigue.

Il margine di errore di un sistema di tal genere era stimato dell'ordine di 20-30 cm, anche se, non solo occasionalmente, poteva superare i 60 cm.

Con lo sviluppo delle tecniche informatiche di elaborazione dei dati, modelli più complessi vennero messi a punto negli anni successivi, correlando le compo-

nenti del sovrizzo con i dati di simulazione di modelli meteorologici ed includendo gli effetti dell'azione dinamica dei movimenti di marea. I risultati delle elaborazioni statistiche e fisiche permisero quindi di individuare per ciascun giorno dell'anno e su una sezione prestabilita (Southend), livelli di guardia da correlare con i fenomeni di piena del F. Tamigi e con il perdurare dei venti Nord-orientali.

Un doppio supporto di trasmissione — radio e via cavo — assicura la trasmissione al Centro Operativo dello sbarramento dei dati elaborati dall'Ufficio Meteorologico. Un contemporaneo controllo dei risultati ricevuti, viene effettuato nel Centro, utilizzando un diverso modello matematico, mentre in tempo reale vengono trasmesse le misure di livello dalle sezioni idrografiche lungo l'estuario.

Dall'arrivo dell'ordine di chiusura da parte del Tidal Warning Service del MAFF alla Centrale Operativa dello sbarramento, le paratoie possono venire abbassate nel tempo minimo di mezz'ora, cominciando da quelle di sponda.

All'arrivo dell'onda le paratoie risultano chiuse per poi essere sollevate dopo un certo tempo "t" (circa un'ora), al fine di mantenere il livello idrico a valle dello sbarramento su valori inferiori di quelli che si sarebbero verificati in sua assenza, per non compromettere la tenuta degli argini a valle. La successiva manovra di apertura inizia allorché, nel corso dell'abbassamento della marea a valle, si determina una differenza di livello tra monte e valle dello sbarramento di 0,2 m: differenze maggiori potrebbero determinare eccessive velocità del deflusso al disotto della paratoia con conseguenti problemi di erosione del letto del fiume.

Dall'elaborazione statistica dei dati meteorologici la chiusura dello sbarramento, per tempi dell'ordine di cinque ore, può essere prevista tre o quattro volte l'anno, anche se dette operazioni potrebbero triplicare nel prossimo secolo per via dei già accennati fenomeni di innalzamento del livello marino.

In questi ultimi anni sono stati approfonditi studi per un utilizzo permanente dello sbarramento come opera di regolazione, oltreché di difesa. L'opera potrebbe garantire una variazione dei livelli di marea intorno ai 2 m riducendo gli inconvenienti delle forti velocità idriche (fino a 6-7 m/s) nel tratto metropolitano. Ciò comporterebbe inoltre vantaggi di natura ricreativa per la città, ma, soprattutto, di approvvigionamento idrico, potendosi prevedere, con la drastica riduzione della salinità, la formazione di un serbatoio strategico nel centro di Londra che risolverebbe la domanda idrica nella bassa valle del Tamigi. Tale progetto appare oggi più realizzabile dopo il successo ottenuto dall'Autorità di Bacino del Tamigi nella risoluzione dei gravi problemi di inquinamento che affliggevano il fiume e che ne scongiuravano un'interruzione di flusso anche parziale.

6. COSTO DELL'OPERA

In conclusione merita riportare l'analisi del costo dell'opera che, a prezzi del 1984, ammonta complessivamente a £ 440 milioni STG rispetto a una previsione contrattuale del 1973 di 110 milioni. Detto incremento è stato giustificato per un 70% da motivi inflat-

tivi, per un 5% da adeguamenti progettuali in corso d'opera, per un 10% da difficoltà costruttive e per un 15% da scarsa produzione delle maestranze. A conforto di tale analisi sta il confronto tra le quantità computate in fase di progetto e quelle contabilizzate che risultano maggiori di circa il 15%.

BIBLIOGRAFIA

- ALLEN F.H. — *et al.* - *Model experiments on the storm surge of 1953 in the Thames Estuary and the reduction of future surges.* «Proc. Instn Civ. Engrs», 1955, Part III, Vol. 4, Apr., 48-82.
- BARBER T.W. — *The Port of London and the Thames Barrage. - A series of expert studies and reports by the Thames Barrage Committee.* Swa Sonneschein, Anglo-Saxon Chronicle. Anon., Trans. Anne Savage, Heinemann, London.
- BONDI H. — *London flood barrier.* Report to the Ministry of Housing and Local Government, 1967. Unpublished work.
- BOWEN A.J. — *The tidal regime of the River Thames; long term trends and possible causes.* «Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.» 1972, 272, 187-201.
- BUNGE J.H.O. — *Dam on the Thames. A plan for a tideless river in London.* The Thames Barrage Association, London, 1935.
- BUNGE J.H.O. — *The Thames Barrage scheme and its importance to the London reconstruction plans.* «J. Roy. Soc. Arts.» 1945, XCIII, No. 4692, 25 May.
- CORKAN R.H. — *Storm surges in the North Sea.* 1/2 HO Misc. 15072, Washington, DC.
- CREMER and WARNER — *Assessment of the effect on pollution of a full barrage located near London Bridge.* Cremer and Warner, London, 1969.
- DEPARTMENT OF SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH. — *Effects of polluting discharges in the Thames Estuary.* «Wat. Poll. Res. Tech.» Paper 11, HMSO, London, 1964.
- DOODSON A.T. and DINES J.S. — *Report on Thames flood and meteorological conditions associated with high tides in the Thames.* «Geophysical Memoirs», N. 47, 1929.
- DUNHAM K.C. — *The evidence for subsidence of South-East England.* «Phil. Trans. Roy. Soc.» Lond., 1972, A272, 79-274.
- GILBERT S.K. — *The Thames Barrage,* Vernon Harcourt Lecture to the Institution of Civil Engineers, 1969.
- GRICE J.R. and HEPPLEWHITE E.A. — *Design and construction of the Thames Barrier cofferdams.* «Proc. Insts Civ. Engrs», Part 1, 1983, 74, May, 191-224.
- GRIEVE H. — *The great tide.* Essex County Council, 1959.
- GUMBEL E.J. — *Probability tables for the analysis of extreme value data.* US Dept of Commerce, National Bureau of Standards, Applied Mathematics, Series 22, July 1953.
- HORNER R.W. — *The Thames Barrier scheme.* «J. Roy. Soc. Arts.» 1971, CXIX, No. 5179, May, 369-383.
- HORNER R.W. — *The Thames Barrier* «J. Instn Wat. Engng Sci.», 1981, 35, No. 5, 395-407.
- HERBERT A.P. — *The Thames.* Weidenfeld and Nicolson, London, 1966.
- HEAPS N.S. — *Development of storm surge models at Bidston,* Internal Report No. 51, Institute of Oceanography, 1977.
- JENKINSON A.F. — *Frequency distribution of annual maximum (or minimum) values of meteorological elements.* «Qu. J. Roy. Met. Soc.» 1955, 81, Apr., 158-171.
- KEERS J.F. — *An empirical investigation of interaction between storm surge and astronomical tide on the east coast of Britain.* Conf. on floods due to high winds and tides. Academic Press, London, 1968.
- LONGFIEDL T.E. — *The subsidence of London.* Ordnance Survey Professional Papers, New Series No. 4, 1932.
- MINISTRY OF HOUSING AND LOCAL GOVERNMENT — *Technical possibilities of a Thames flood barrier.* Command 956, HMSO, London, 1960.
- MARSH T.J. and DAVIES P.A. — «Proc. Instn Civ. Engrs», Part 1, 1983, 74, May, 263-276.
- North Sea floods of 1953* — Conference at the Institution of Civil Engineers, London, 1954.
- PUGH D.T. and VASSIE J.M. — *Applications of the joint probability method for extreme sea level computation.* «Proc. Instn Civ. Engrs», 1969, 42, Dec., 959-975.
- ROSSITER J.R. — *Interaction between tide and surge in the Thames.* «Geophys. J.R. Astr. Soc.», 1961, 6, 29-53.
- ROSSITER J.R. and LENNON G.W. — *An intensive analysis of shallow water tides.* «Geophys. J.R. Astr. Soc.», 1968, 16, 275-293.
- ROSSITER J.R. — *First report of studies, Thames Flood Prevention Investigation App. 7,* Greater London Council, 1969.
- ROSSITER J.R. — *Research on methods of forecasting storm surges on the east and south coasts of Great Britain,* «Q.J.R. Met. Soc.», 1959, 85, 262-277.
- ROTHWELL D. *et al.* — *Management of an urgent public works project,* 1975, School of Technological Management, University of Bradford.
- INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS *et al.* — *Conditions of contract for works of civil engineering construction.*
- SUTHONS C.T. — *Frequency of occurrence of abnormally high sea levels on the east and south coasts of England,* «Proc. Insts Civ. Engrs», 1963, 25, 433-449.
- TOWNSEND J. — *Storm surges and their forecasting.* Conf. on floods due to high winds and tides. IMA, Academic Press, London, 1980.
- VALENTIN H. — *Present vertical movements in the British Isles:* Geog. J., 1953, 119, 229.