

A Istanbul hanno costruito il tunnel più profondo al mondo: 60 metri sotto il Mar di Marmara. E a soli 16 km da una delle faglie sismiche più pericolose. Ecco come hanno fatto.

Foto di Stefano Dal Pozzolo

Asia ↔ Europa

La linea Marmaray è il tunnel a immersione più profondo del mondo, e il primo a unire due continenti.

**11 anni**

Durata dei lavori: finiranno nel 2015.

**13,5 km**

Lunghezza della linea ferroviaria attiva oggi: quando sarà completata arriverà a 76,3 km.

**4 minuti**

Tempo per attraversare il Mar di Marmara.

La stazione di Üsküdar, della linea Marmaray, sulla sponda asiatica di Istanbul. A destra, la moschea Semsî Pasa.

# IN TRENO SOTTO IL BOSFORO

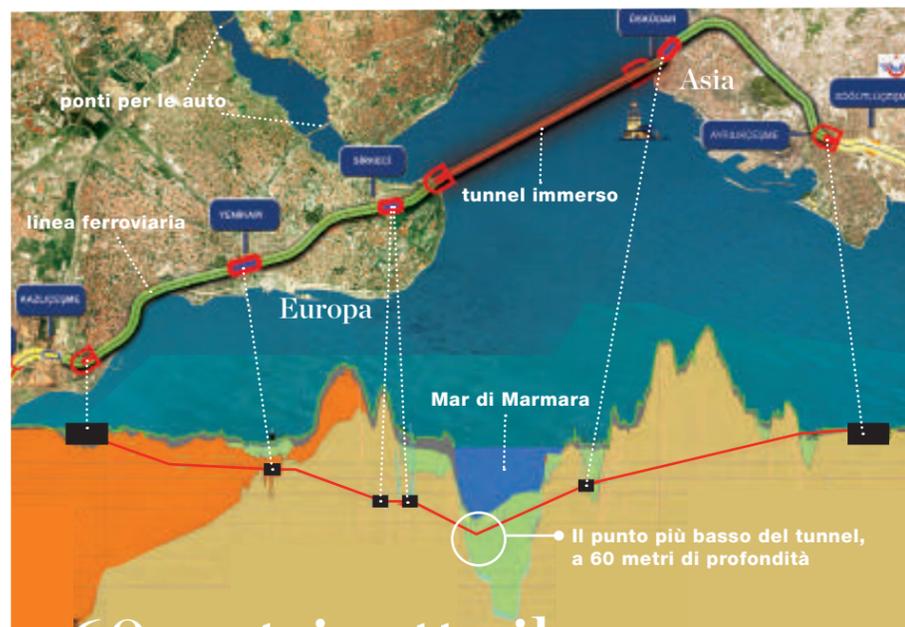
**I**l treno sfreccia al buio, nella galleria di cemento. Il vagone è pieno di gente. Potremmo essere in una qualsiasi metropolitana del mondo. Tranne che per un dettaglio invisibile: sopra quella galleria c'è un muro d'acqua alto 60 metri, come un palazzo di 20 piani. Il treno passa infatti sotto lo stretto del Bosforo, nel Mar di Marmara. Siamo a Istanbul, Turchia, dove da poco è stato aperto il tunnel ferroviario som-

merso più profondo del mondo: il Marmaray. Non si vede, ma non è un'illusione: è una delle opere ingegneristiche più audaci, controverse e complesse dell'ultimo decennio. Costata 1,3 miliardi di €, è la prima a collegare due continenti, l'Europa e l'Asia, e in soli 4 minuti. Per realizzarla, 5 mila persone hanno lavorato per 9 anni tra gallerie sotterranee e correnti impetuose, rimuovendo una quantità di terra che ▶



# 1,2 milioni di m<sup>3</sup>

La terra rimossa per i lavori: riempirebbe quasi fino all'orlo lo stadio Meazza di Milano.



## 60 metri sotto il mare

Nella mappa, le 5 fermate della ferrovia che unisce le 2 sponde di Istanbul.

- LUNGHEZZA DEL TUNNEL SOTTOMARINO: 1,387 km
- CEMENTO USATO: 870 mila m<sup>3</sup>
- ACCIAIO USATO: 145.500 tonnellate
- PERSONE COINVOLTE: 1.343 ingegneri e 3.000 operai (più 600 manovali e 83 fra archeologi e restauratori per i reperti archeologici)

Quando i treni si imbarcavano sui traghetti, il Bosforo si attraversava in 85 minuti. Ora ne bastano 4

Una ruspa in una delle gallerie scavate sotto Istanbul. La linea passa sotto terra per 13,5 km tra le due sponde.

potrebbe riempire lo stadio Meazza di Milano. Lo scopo? Non più unire l'impero ottomano, ma liberare la metropoli dalla morsa del traffico. Con 13,8 milioni di abitanti, Istanbul è la sesta città più popolata del mondo. E tutti hanno un'auto: due soli ponti collegano le sponde della città, e gli ingorghi sono all'ordine del giorno. Grazie ai primi 13,5 km interrati del Marmaray (1,3 di tunnel sotto il mare e 5 fermate in galleria fra le sponde europea e asiatica), i pendolari turchi ora risparmiano 81 minuti di viaggio: prima, i treni dovevano essere imbarcati su traghetti.

**MOSCHEA BLU.** E in futuro ne beneficerà il traffico interurbano: dal 2015, quando i lavori saranno finiti, si potrà viaggiare in treno da Halkali (lato europeo) a Gebze (lato asiatico) attraversando Istanbul e lo stretto. I 76,3 km del tragitto si faranno in 105 minuti, e saranno integrati alle linee internazionali ad alta velocità: si potrà salire su un treno a Londra, scendere alla moschea blu di Istanbul, e proseguire fino a Pechino. Il traffico veicolare di Istanbul (e lo smog) potrà ridursi del 20%: la linea sarà usata da 1,5 milioni di passeggeri al giorno. Per costruire quest'opera, gli operai han-



# 1,5 milioni di passeggeri al giorno

Un vagone del Marmaray affollato: il biglietto costa 3 lire turche (1 euro).

no scavato nelle profondità del mare, tra forti correnti (pari a quelle dello Stretto di Messina) e un intenso traffico navale (un ferry ogni 10 minuti). E hanno dovuto fare i conti, sulla terraferma, con un imprevisto tesoro di resti archeologici. Mentre i progettisti affrontavano uno scenario da incubo: il Marmaray giace infatti a soli 16 km a nord dalla faglia anatolica settentrionale, una delle più attive al mondo. Spinta di 3 cm l'anno dalle placche eurasiatica, arabica e africana, negli ultimi 70 anni la faglia ha causato 7 terremoti di magnitudo 7 o più, in un'inquietante marcia di avvicinamento a Istanbul: secondo i sismologi, è molto probabile che entro 20 anni un violento terremoto colpirà la città. Così "il progetto del secolo", come l'ha ribattezzato il premier Recep Tayyip Erdoğan, ha acceso forti ansie e polemiche sulla sicurezza dell'opera: è stata una scelta azzardata?

**SOGNO VISIONARIO.** Per rispondere a questa domanda, Focus è andato a visitare il tunnel, parlando con i progettisti e gli esperti del settore. Scoprendo che quest'opera visionaria, in realtà, fu concepita già 154 anni fa: nel 1860 un ingegnere francese, Simon Préault, su invito del sultano Abdülmeçid I, progettò una



Il tunnel sottomarino progettato dal francese Simon Préault nel 1860, riprodotto su un muro della stazione di Kazlıçeşme.

condotta ferroviaria sottomarina retta da piloni poggiati sul fondo del mare. A quell'epoca stava nascendo il metrò di Londra, ma il sogno era troppo in anticipo sui tempi. Tornò in auge nel 1980, quando la Turchia bandì un concorso per uno studio preliminare, affidato nel 1985 alla statunitense Parsons Brinckerhoff (Pb), specializzata in grandi opere. Ma perché non costruire un altro ponte sullo stretto, invece di un tunnel? «Volevamo collegare tra loro le stazioni

ferroviarie già esistenti, e con un ponte non sarebbe stato possibile» risponde l'ingegner Haluk Özmen, coordinatore del progetto e direttore regionale del DİH (Direttorio Grandi opere dei trasporti). Di qui la decisione di passare sotto il mare: non scavando con talpe meccaniche sotto il fondale (com'è accaduto sotto la Manica), bensì con la tecnica del tunnel a immersione, molto più sicuro in caso di sismi. Il Marmaray, infatti, è stato costruito poggiando e unendo tra loro ▶



Gli elementi prefabbricati del tunnel sono stati calati sul fondale con un margine d'errore di 16 mm

Passeggeri alla stazione di Yenikapi: si stima che quando la linea sarà terminata il traffico ferroviario salirà dal 3,6% al 27,7%.

## TUNNEL, CANALI, PONTI: UNA GRANDEUR CONTESTATA

**Il Marmaray non sarà l'unico tunnel sotto il Bosforo:** nel 2017 sarà pronta Eurasia, una galleria sommersa per auto, in costruzione sotto il Bosforo a 1,7 km a sud del Marmaray. Sarà scavata da talpe meccaniche fino a 106 m sotto il livello del mare. Costo: 950 milioni di euro. E non è tutto: nel 2016 sarà pronto un terzo ponte sospeso sullo stretto, e all'orizzonte si profilano il terzo mega-aeroporto della città, una nuova moschea per 37 mila persone e "Kanal Istanbul", un canale artificiale navigabile di 50 km, parallelo al Bosforo, a ovest di Istanbul. «Questi progetti faraonici sembrano più utili alla gloria del premier Erdoğan che al Paese. Servono soprattutto al partito di governo, l'Akp, per restare al potere: la spesa in infrastrutture è una delle spinte principali di crescita nel Pil turco» commenta Atilla Yesilada, analista di Global Source partners. «Le opere annunciate comportano investimenti complessivi per 185 miliardi di €: se le facessero tutte, i debiti esteri porterebbero la Turchia in un terreno molto pericoloso. Perciò è probabile che alcuni di questi progetti saranno ritardati se non annullati, come quello del canale».



Le principali fasi di costruzione del tunnel. A sinistra, lo scavo della trincea da una chiatta, e qui a lato il maxi livellatore robotizzato che l'ha spianata dopo i lavori di scavo e consolidamento del fondale marino.

11 segmenti prefabbricati di cemento armato in una trincea sul fondo del Bosforo. In questo modo si evita il rischio che, in caso di terremoto, si aprano crepe nelle pareti delle gallerie scavate sotto terra. Questa tecnica, tra l'altro, è più rapida rispetto ai tunnel scavati con talpe meccaniche. Per affrontare questa sfida, i turchi si sono affidati a un popolo che di sfide e di terremoti se ne intende: i giapponesi. L'opera infatti è stata realizzata dalla turca Yüksel Proje Uluslararası con le Ferrovie giapponesi, la Oriental consultants e la Taisei. Il lavoro ha comportato il coordinamento di 3 mila operai e 1.300 ingegneri di nazioni diverse.

**ALGORITMI.** Prima di iniziare i lavori sono stati necessari lunghi studi negli Anni '90. Innanzitutto sulle correnti stratificate del Bosforo, che arrivano fino a 6 nodi (11,2 km/h) e cambiano repentinamente durante la giornata. Con l'Istituto danese di idraulica è stato rica-

vato un algoritmo in grado di prevedere le correnti con un anticipo di 24 ore, necessarie per programmare determinati lavori sullo stretto, possibili solo quando la corrente era sotto i 3 nodi (5,5 km/h). Sono seguiti gli studi geologici sul fondale del Bosforo: navi con trivelle hanno fatto varie perforazioni per studiare la conformazione del fondale fino a 500 m di profondità. Si è scoperto che in molti punti era limoso-sabbioso: si sarebbe liquefatto come sabbie mobili in caso di sisma, minacciando la stabilità della trincea del tunnel.

**TRIVELLE.** I lavori sono iniziati nel 2004: mentre 4 talpe meccaniche scavavano sotto le sponde europea ed asiatica di Istanbul, sul Bosforo enormi escavatori su chiatte galleggianti rimuovevano oltre 1 milione di m<sup>3</sup> di terreno soffice e sabbia. Poi, usando lunghe trivelle di profondità protette da manicotti, hanno iniettato, fino a 8 m sotto il fondale, 2.778 colonne

di ghiaia e malta per rinforzare la trincea su cui si sarebbe poggiato il tunnel. Tutto questo tenendo d'occhio «le correnti marine, il traffico navale e le migrazioni dei pesci» aggiunge Levent Acet, vicedirettore del Dlh. Terminato il dragaggio e il consolidamento del fondale, è stato calato sott'acqua un robot livellatore largo 15 metri, per appianare la trincea. Questa fase è durata 18 mesi.

Nel frattempo, a Tuzla, in un cantiere navale sulla costa asiatica, a 40 km di distanza, si costruivano gli 11 elementi prefabbricati in cemento armato del tunnel, lunghi 126 metri (come un campo da calcio), alti 8,7 e larghi 15,5: parallelepipedi con l'anima d'acciaio, a forma di binocolo, bucati da due gallerie separate. Gli elementi erano tappati da paratie a tenuta stagna agli estremi: una volta pronti, sono stati messi in mare e trainati fino al Bosforo. Qui, al loro interno, sono state riempite d'acqua enormi vasche per zavorrarli; poi sono stati aggancia-

I bacini di Tuzla, dove sono stati costruiti gli 11 segmenti del tunnel, poi trasportati via mare (foto a destra) fino al Bosforo. Sotto, a sinistra, le vasche piene d'acqua che zavorravano i segmenti per calarli sul fondale; a destra, il pontile con cammino d'accesso al segmento poggiato sulla sponda asiatica.



## 18 mila tonnellate

Il peso di ciascuno degli 11 segmenti prefabbricati di cemento armato del tunnel: come 100 aeroplani Boeing 747. Ogni elemento era lungo 126 metri, largo 15,5 (ospitando 2 gallerie) e alto 8,7 metri.

# I lavori di scavo nelle stazioni hanno portato alla luce l'antico porto di Teodosio. Con preziosi reperti e 37 navi antiche

## COSÌ È EMERSO UN TESORO INATTESO

**Gioielli, anfore, monete d'oro.** Scheletri di uomini e di animali. E una schiera di antiche navi. Gli scavi per le stazioni della linea del Marmaray hanno fatto emergere i resti di villaggi neolitici, rivelando che Istanbul era abitata fin dal 6.500 a. C. Non solo: grazie agli scavi nella stazione di Yenikapi (lato europeo), è tornato alla luce il più antico porto della città, quello edificato sotto Teodosio I nel 4° secolo d. C. Senza contare i reperti della cultura ellenistica e romana, sotto i resti delle architetture bizantine nelle stazioni asiatiche di Sirkeci e Üsküdar. Le scoperte hanno bloccato i lavori per 4 anni, facendo lievitare i costi dell'opera: 600 operai, 60 archeologi, 7 architetti, 6 restauratori, 6 storici dell'arte e 4 operatori del Museo archeologico di Istanbul hanno scavato a mano 353 mila m<sup>3</sup> di terra, portando alla luce 35 mila reperti: una parte è esposta nel Museo archeologico della città.

## 35.000 reperti

La quantità di oggetti antichi rinvenuti grazie ai lavori per il Marmaray. Comprendono anche 37 navi del 5°-11° secolo, tra cui le prime galee mai ritrovate.



La grande distesa di casse piene di reperti antichi alla stazione di Yenikapi. A sinistra, in primo piano, i resti di un edificio.

ti con cavi d'acciaio ultra resistenti, con un margine d'oscillazione massimo di 20 cm, e calati fino a 60 m di profondità. Una fase delicatissima, se si considera che ogni segmento pesa 18 mila tonnellate: come 100 Boeing 747.

**PASSEGGIATA.** Il primo segmento è stato poggiato alla sponda asiatica. Una volta sul fondale, si è agganciato alla galleria scavata nella costa, spinto da martinetti idraulici: quando le estremità (in acciaio spesso 7 mm, ricoperto da una membrana di plastica) combaciavano, una pompa faceva uscire l'acqua delle zavorre, e la differenza di pressione idrostatica fra le estremità provocava l'aggancio. Per l'operazione (ripetuta per gli 11 segmenti) sono state necessarie 8 ore di lavoro, con l'ausilio di sonar e Gps. «Quando il primo segmento è stato posizionato, nel marzo 2007, la precisione è stata impressionante» racconta Walter Granz, ingegnere della Pb. «Era più basso di soli 16 mm rispetto alle gallerie sul lato asiatico: ed è stato facile correggerne la posizione». Quando tutti gli 11 elementi sono stati posizionati e uniti, sono stati ricoperti

da uno strato di cemento e stabilizzati nella trincea con una copertura armata spessa 2 metri, per proteggere il tunnel da ancore o navi affondate.

A gennaio 2011 il tunnel era pronto. «Io e il mio vicedirettore abbiamo percorso a piedi, da soli, l'intero tratto sotto il Bosforo in quelle vuote gallerie di cemento» ricorda Özmen. «Era la prima volta che un essere umano lo faceva. Sono stati i 40 minuti più emozionanti della mia vita».

**PAURE.** Con questa stessa tecnica, l'anno prossimo, sarà costruito il Fehmarn Belt, un tunnel che collegherà Germania e Danimarca sotto il Baltico. Ma come proteggere il Marmaray dal rischio di terremoti? L'ultimo studio, del 2004, stimava un rischio del 66% di un sisma di magnitudo superiore a 7 entro 30 anni a Istanbul. E oggi? «È ancora così» dice Tom Parsons, geofisico dell'Usgs, tra gli autori della ricerca. «E anche eliminando il fattore di ciclicità dei terremoti, il rischio medio è elevato: il 41% di probabilità».

Così alcuni membri dell'Ordine degli ingegneri turchi (Tmmob) hanno contestato l'opera, dicendo che non è sicura ▶



Il punto d'unione fra il tunnel prefabbricato sotto il Bosforo (in primo piano, pareti verticali) e la galleria circolare scavata nella costa europea da talpe meccaniche.

## Il sistema antisismico dà l'allarme 15 secondi prima che la scossa arrivi in città



Sopra, la cabina di guida del Marmaray. I treni, forniti dalla coreana Hyundai Rotem per 580 milioni di €, sono dotati dei più moderni sistemi automatici di controllo. A sinistra, la stazione di Yenikapi, sul lato europeo: è una delle più spettacolari della linea.

## UN PATTO DI SANGUE PER FINIRE I LAVORI

**I politici volevano a tutti i costi inaugurare il Marmaray per il 29 ottobre, 90° anniversario della Repubblica turca. Era l'inizio del 2013, ma i lavori erano in grande ritardo. Così il direttore generale del ministero delle Infrastrutture, Metin Tahan, ha fatto un colpo di teatro: ha convocato i contractor giapponesi, dicendosi pronto a suicidarsi se il progetto non fosse stato consegnato nei tempi previsti. L'ha scritto in una lettera, s'è tagliato a un dito e ha fatto cadere il proprio sangue sul documento. Pur conoscendo bene l'*harakiri* per disonore, i giapponesi non volevano accettare. Allora Tahan ha detto: «Se non firmate, abbandonate il lavoro e tornate al vostro Paese». Alla fine i giapponesi hanno firmato (senza sangue), mantenendo l'impegno con un durissimo rush finale. La lettera è oggi conservata in una cornice dorata nel Direttorio delle infrastrutture. Non si saprà mai se sia stato solo un bluff.**

in caso di terremoti. «Il Marmaray» replica Özmen «ha un livello di protezione garantito ai massimi standard possibili oggi, anche in caso di incendi e di tsunami. Può resistere a terremoti di magnitudo 7,5, la massima stimata dai geologi per quest'area. Il nostro tunnel non è l'unico vicino a una faglia: a San Francisco negli Usa c'è il Bart (Bay Area Rapid Transit District) e in Giappone l'Osaka South Port Tunnel: entrambi sono stati colpiti (nel 1989 e nel 1995), da sismi di magnitudo superiore a 7 senza riportare gravi danni. E hanno una tecnologia precedente alla nostra. Il Marmaray è paral-

lelo alla faglia, e perciò non rischia gravi choc in caso di terremoti. Ha pure una certa elasticità grazie a giunti sismici nei punti d'unione con le coste: sono in grado di assorbire le deformazioni verticali e orizzontali causate dalle scosse. Il tunnel è alimentato da generatori elettrici autonomi e ha un sistema automatico di allerta precoce: una rete di sensori posti sotto il mare e lungo la costa, monitorati dall'Osservatorio geologico Kandilli dell'Università del Bosforo, registra le scosse e attiva in automatico le procedure di emergenza. Fa arrivare il treno alla stazione più vicina e chiude le paratie del tunnel all'altezza delle coste, per evitare che si allaghi, 15 secondi prima che la scossa arrivi in città».

Basteranno tutti questi accorgimenti? A giudicare da quanto sono affollati i treni, i turchi ci credono. **F**

Vito Tartamella

**IL TUNNEL ANCHE SU FOCUS TV**  
Non perdetevi il documentario sul tunnel Marmaray su Focus tv: in onda giovedì 27 febbraio alle ore 22:05.