Uniscono coste lontane e sono capolavori di ingegneria. Ecco come si costruiscono i **tunnel sommersi,** affrontando sfide mai tentate. Anche in Italia (non solo a Messina).

di Vito Tartamella

# BUCHI NELL'ACQUA

Il più ambizioso è stato proposto in Cina: un tunnel lungo 90 km, come da Parma a Bologna, per collegare in treno le città di Dalian e Yantai. Passando sotto il mare di Bohai. La galleria farebbe scendere a 40 minuti un percorso che oggi si copre in 8 ore caricando i vagoni su un traghetto. Se lo costruissero, sarebbe lungo oltre il doppio del tunnel sotto la Manica, la galleria sottomarina più lunga al mondo (39 km, *v. tabella*). Una scelta non facile: il cantiere costerebbe 37 miliardi di euro e durerebbe 15 anni. Ma anche in Europa non si scherza. Da anni fa discutere il progetto di una galleria subacquea fra Tallin ed Helsinki: 80 km sotto il Baltico per collegare l'Estonia alla Finlandia, unendo l'Europa Orientale ai Paesi scandinavi. L'opera costerebbe 12 miliardi di euro, che l'Unione Europea non finanzia. Così l'anno scorso si è fatto avanti l'imprenditore finlandese Peter Vesterbacka, padre del noto videogame *Angry birds*: vorrebbe scavare il tunnel con finanziamenti cinesi, ma la prospettiva non piace alle autorità europee.

Una terza galleria sottomarina accende le discussioni anche in Italia: quella ipotizzata per lo Stretto di Messina. Dopo 8 ▸

GALLERY

I TUNNEL IMMERSI CHE HANNO SEGNATO LA STORIA

## I 10 TUNNEL SUBACQUEI PIÙ LUNGHI DEL MONDO

Tunnel a galleria artificiale
Tunnel a tubo immerso
Tunnel sotto un fiume
In grassetto e giallo i record mondiali per tipologia di tunnel.

| | GALLERIA | lunghezza tratto sommerso | uso | profondità sotto il livello del mare | anni di costruzione |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Manica (Francia-Gran Bretagna) | **39 km** | treno+veicoli | 115 m | 1988-1994 |
| 2 | Boknafjord Rogfast (Norvegia) | 27 km | veicoli | **392 m** | 2018-2029* |
| 3 | Seikan (Giappone) | 23,3 km | treno | 240 m | 1971–1988 |
| 4 | Fehmarn Belt (Danimarca-Germania) | **17,6 km** | treno+veicoli | 40 m | 2020-2028* |
| 5 | Ryfast (Norvegia) | 14,3 km | veicoli | 292 m | 2013–2020 |
| 6 | Eysturoy (Danimarca) | 11,2 km | veicoli | 189 m | 2016-2021* |

| | TUNNEL | lunghezza tratto sommerso | uso | profondità sotto il livello del mare | anni di costruzione |
|---|---|---|---|---|---|
| 7 | Sandoy (Danimarca) | 10,8 km | veicoli | 155 m | 2019-2023* |
| 8 | Tokyo Wan Aqua-Line (Giappone) | 9,6 km | veicoli | 60 m | 1988-1997 |
| 9 | Shanghai (Cina) | **8,9 km** | veicoli + metro | 26 m | 2005-2009 |
| 9 | Karmøy (Norvegia) | 8,9 km | veicoli | 139 m | 2009-2013 |
| 10 | Storebælt (Danimarca) | 8 km | treni | 75 m | 1991-1998 |

Le opere con asterisco (*) sono attualmente in costruzione.

**TUFFO** Il ponte di Øresund fra Danimarca e Svezia: qui l'ingresso del tunnel Drogden lungo 4 km a 21 m di profondità nel Mar Baltico.

Ipa

**SCAVI BAGNATI**
La testa fresante della talpa meccanica usata per costruire un tunnel sottomarino di 5 km tra Hong Kong e l'isola di Lantau, a 55 metri sotto il mare. La galleria apre a fine anno.

anni e 300 milioni spesi per progettare un ponte a campata unica di 3,3 km, di recente il governo ha rimesso in discussione il collegamento fra Sicilia e Calabria, chiedendo a una commissione di tecnici di valutare anche due attraversamenti subacquei: una galleria flottante a 50 metri di profondità, oppure un tunnel da scavare a 170 metri sotto il fondale marino. Due ipotesi che, nella storia dello Stretto, non sono nuove: il primo fu proposto nel 1969, il secondo nel 1870.

### LA SFIDA EPICA DEI GIAPPONESI

I tunnel sommersi, però, non sono solo sogni sulla carta. Finora ne è stato costruito oltre un centinaio in tutto il mondo. Gli apripista sono stati gli olandesi: il loro territorio è interrotto da fiumi, coste e istmi, perciò fin dagli anni '60 hanno scavato gallerie sotterranee dove non era possibile costruire ponti per mancanza di spazi o per l'impatto sul traffico navale.

Uno scenario simile a quello dell'altro gigante del settore, il Giappone, con 430 isole abitate. Nel 1954 un tifone aveva affondato 5 traghetti causando 1.430 morti, e le autorità nipponiche decisero di collegare le isole di Honshu e Hokkaido con un tunnel ferroviario sommerso: lì un ponte rischiava d'essere spazzato via da un altro uragano. Così nel 1971 i giapponesi si imbarcarono in un'opera senza precedenti: scavare sotto il fondale marino a 240 metri dal pelo dell'acqua. Impiegarono 3mila operai per 24 anni, usando 2.900 tonnellate di esplosivo per aprirsi un passaggio sotto le rocce e impiegando per la prima volta sostanze per impermeabilizzare le rocce. Il tratto sottomarino, lungo 23,3 km, è a tutt'oggi il secondo più lungo al mondo. Un primato pagato a caro prezzo: durante i lavori morirono 34 operai. «Un tempo per fare queste opere c'era un morto al km», dice Daniele Peila, docente di tunneling al Politecnico di Torino. «Oggi invece gli incidenti gravi sono un'eccezione, grazie ai progressi tecnologici».

E così il settore vive un grande fermento: negli ultimi tempi si sono aperti cantieri che affronteranno sfide ingegneristiche mai tentate. Anche per l'ingresso di nuovi attori che superano Cina e Usa: la Norvegia e la Danimarca. Sono loro i leader mondiali nei tunnel sottomarini: la prima ha costruito oltre 70 km di gallerie subacquee, la seconda oltre 40 km. I due Paesi nordici, infatti, hanno il territorio frammentato da fiordi, fiumi, isole, penisole. E pur avendo 5 milioni di abitanti ciascuno, hanno economie floride.

Perciò la Norvegia sta investendo quasi 40 miliardi di euro per un progetto epocale: liberare dai traghetti la E39, la strada che collega Trondheim, al centro del Paese, con Kristiansand, a sud, in un percorso di 1.100 km. Oggi, per percorrerlo in auto si impiegano 21 ore su coste frastagliate e traghetti. Il governo vuole ridurle a 11 ore.

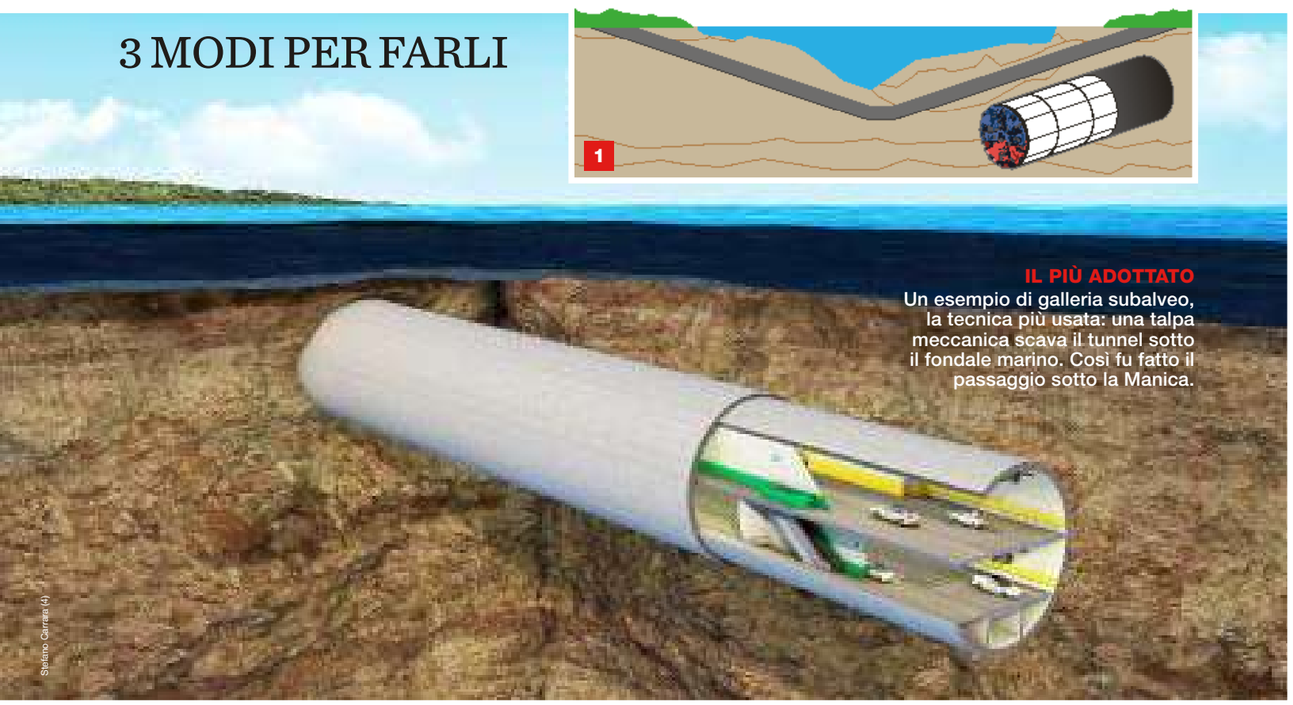
### PULCINELLA DI MARE E ROTATORIE SOMMERSE

Anche la Danimarca, Paese di collegamento fra l'Europa continentale e la Svezia, ha fatto scelte simili. E ha puntato sui tunnel anche il suo arcipelago nell'Atlantico del Nord, fra l'Islanda e la Norvegia: le Faroe, 18 isole vulcaniche. I suoi 52mila abi- ▸

**Oggi i leader mondiali sono Norvegia e Danimarca: coi tunnel collegano un territorio con numerosi fiordi e isole**

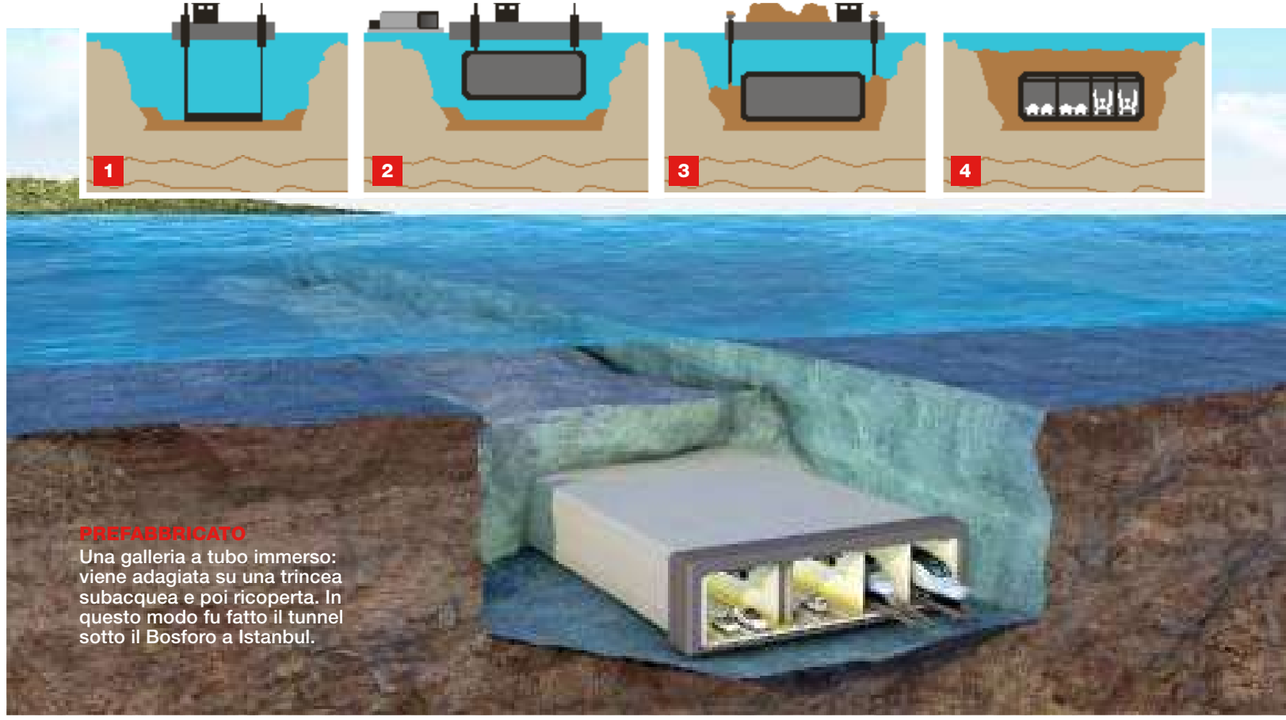
## 3 MODI PER FARLI



**IL PIÙ ADOTTATO**
Un esempio di galleria subalveo, la tecnica più usata: una talpa meccanica scava il tunnel sotto il fondale marino. Così fu fatto il passaggio sotto la Manica.

Stefano Carrara (4)




**PREFABBRICATO**
Una galleria a tubo immerso: viene adagiata su una trincea subacquea e poi ricoperta. In questo modo fu fatto il tunnel sotto il Bosforo a Istanbul.

## 1 GALLERIE SUBALVEO

È la tecnica più usata. Le talpe meccaniche scavano una galleria partendo dalla superficie: scendono fino a passare sotto il fondale del mare (di un lago o un fiume), per poi risalire sulla sponda opposta. Più il tunnel è profondo, più le gallerie di accesso saranno lunghe e inclinate. Le talpe possono avere un diametro di 18 metri (come un palazzo di 6 piani), essere lunghe 130 m e pesare 4.500 tonnellate. Grazie a una testa fresante, le talpe scavano 3 metri di galleria all'ora (a seconda del terreno) e nel contempo rivestono di cemento la galleria. I lavori sono preceduti da studi geologici: occorre evitare rocce franose o terreni sabbiosi, infiltrazioni d'acqua, faglie.

## 2 GALLERIE A TUBO IMMERSO

Il tunnel è composto da segmenti prefabbricati installati sott'acqua. Prima si scava una trincea subacquea, per appianare il fondale e renderlo stabile, con sabbia, ghiaia e argilla (disegno **1**). Intanto, sulla terraferma si costruiscono i segmenti del tunnel: sono in calcestruzzo e contengono il piano stradale o ferroviario. Ogni segmento è lungo anche 180 metri (2 campi da calcio), largo 16 e alto 9 (come un palazzo di 3 piani), e può pesare 80mila tonnellate (come una portaerei).
I segmenti sono trasportati via mare e calati sul fondale (**2**). Una volta sul fondo, sono uniti a quelli già calati, con un margine d'errore di 2 cm. Poi la galleria è interrata (**3-4**) per proteggerla.

**30** MAGGIOR NUMERO, IN UN SINGOLO STATO (PAESI BASSI), DI TUNNEL IMMERSI

**73** KM LUNGHEZZA TOTALE PIÙ ELEVATA DI TUNNEL IMMERSI IN UN SINGOLO PAESE (NORVEGIA)

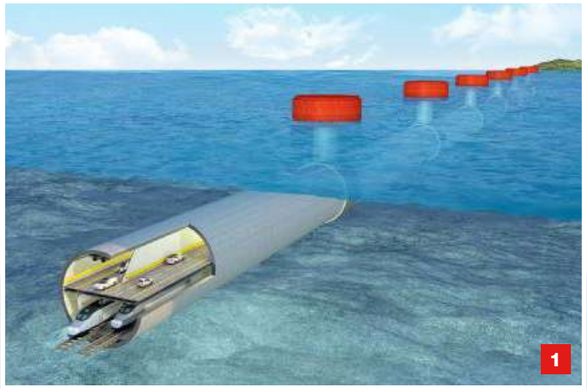
**100** I TUNNEL IMMERSI NEL MONDO COSTRUITI PER TRAFFICO DI VEICOLI

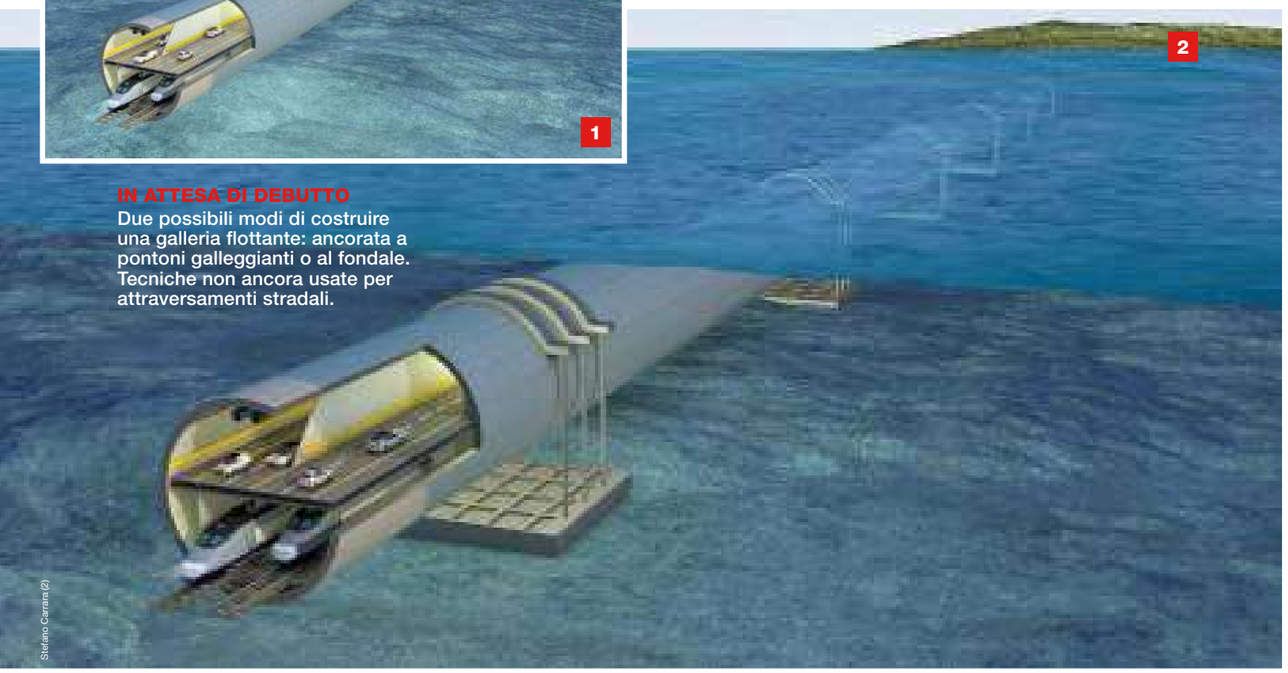
tanti, che vivono fra nebbie, pecore e pulcinella di mare, hanno la più alta concentrazione di tunnel al mondo: 20 operativi, di cui 2 sottomarini, a cui se ne stanno aggiungendo altri 2 in costruzione dall'isola di Streymoy. Uno, l'Eysturoy, avrà la prima rotatoria al mondo sotto l'oceano Atlantico. I tunnel evitano infatti di passare su montagne ripide e battute dal vento, agevolando il trasporto dei carichi di sgombri e merlani all'aeroporto internazionale: le Faroe vivono esportando pesce.

### IL PRIMO? SOTTO IL TAMIGI A LONDRA

«Ma l'Italia non è da meno», avverte il professor Peila. «Abbiamo 2.100 km di gallerie: siamo primi in Europa e secondi al mondo per tunnel stradali e ferroviari. Gran parte però attraversano Alpi e Appennini. Tuttavia lo scorso agosto, nel cantiere della galleria di base del Brennero (il tunnel ferroviario più lungo al mondo, fra Italia e Austria, *ndr*), sono iniziati i lavori sotto il fiume Isarco a Fortezza, Bolzano: 4 gallerie da 60 metri ciascuna, che saranno costruite congelando i terreni sottostanti con iniezioni di azoto liquido a -196 °C: è l'unico modo per stabilizzarli bloccando le infiltrazioni». Una tecnica molto complessa: richiederà 2 anni di lavoro.

Come si spiega questo attivismo in un campo tanto difficile? In fondo (è il caso di dirlo) questa tecnologia ha già 2 secoli di vita: il primo tunnel subacqueo fu costruito nel 1800 a Londra, sotto il Tamigi. Merito di una macchina inventata dall'ingegnere francese Marc Brunel, lo scudo perforatore: un treno in ghisa lungo 12 metri che procedeva su ruote, dentro cui 36 operai lavoravano dietro paratie mobili che li proteggevano dalle infiltrazioni di acqua e fango. Era l'antenata delle odierne talpe meccaniche. Ma lo scudo di Brunel dava una protezione rudimentale: il tunnel si allagò 5 volte uccidendo 6 operai. Ci vollero 17 anni, dal 1825 al 1843 per costruire una galleria lunga 396 metri a 23 metri di profondità dalla superficie del fiume. Ma l'opera – usata ancora oggi come tunnel ferroviario sulla linea East London – aprì una nuova era nel campo dei tunnel subacquei. Che sono rimasti opere rare, in tutto il mondo, fino agli anni '70 del '900: perché?





**IN ATTESA DI DEBUTTO**
Due possibili modi di costruire una galleria flottante: ancorata a pontoni galleggianti o al fondale. Tecniche non ancora usate per attraversamenti stradali.

Stefano Carrara (2)

## 3 GALLERIE FLOTTANTI

Il tunnel è composto da segmenti prefabbricati, ancorati a galleggianti o isole artificiali superficiali (disegno **1**) o a zavorre sul fondale (**2**). Sono detti anche "ponti di Archimede" perché sfruttano la spinta idrostatica del principio di Archimede.
Sono posti a 20-70 metri sotto la superficie delle acque. La tecnica costruttiva è derivata da quella delle piattaforme petrolifere in mare aperto. Finora questi tunnel sono usati per lo smaltimento delle acque reflue e non ancora nel campo dei trasporti. In tal caso, i segmenti del tunnel sono già dotati del piano stradale o ferroviario, e sono assembleati come nella tecnica dei tunnel a tubo immerso. A differenza di questi, però, possono essere più vulnerabili essendo totalmente esposti all'acqua.
Sono tunnel adatti per essere installati in acque molto profonde o con fondali geologicamente instabili.

Femarn A/S

**SFIDA INGEGNERISTICA**
Il rendering dell'ingresso del tunnel del Fehmarn Belt, fra Germania e Danimarca. Sarà il tunnel a tubo immerso più lungo al mondo (17,6 km). In basso, la sala di controllo del tunnel Drogden in Danimarca.

**ANIMAZIONE**
**COME SARÀ COSTRUITO IL TUNNEL DEL FEHMARN BELT**

### CARICHE ESPLOSIVE E PEDAGGI

«Mancavano due innovazioni, che hanno facilitato queste opere: le iniezioni cementizie e le talpe meccaniche», risponde Peila, vicepresidente della società italiana delle gallerie. «Le iniezioni sono fatte con materiali leganti, che rendono le rocce e i terreni impermeabili, consentendo lo scavo in sicurezza: una volta inseriti nelle pareti da scavare attraverso piccole perforazioni, questi materiali impediscono che l'acqua penetri nel tunnel, allagandolo. Le talpe meccaniche, poi, dall'inizio degli anni '80 sono diventate capaci non solo di scavare, rimuovere le macerie e installare anelli di cemento per stabilizzare le pareti della galleria, ma anche di applicare una pressione al fronte di scavo davanti alla macchina, per bloccare le infiltrazioni d'acqua e sostenere i terreni: usando fluidi e fanghi speciali, riescono a controllare la spinta del muro d'acqua anche se è superiore a 100 metri d'altezza. Così riescono a scavare in sicurezza 20-30 metri al giorno, a seconda della durezza della roccia». Con questa tecnica è stato scavato il tratto sotto il fondale della Manica, dove sono state impiegate 11 talpe che, fra tunnel, passaggi d'emergenza e condutture d'aria hanno creato in tutto oltre 200 km di gallerie.

Ma non è l'unico sistema, se lo spazio di manovra in superficie non consente l'ingresso di questi macchinari. In Norvegia si avanza con cariche esplosive precedute da iniezioni di cemento per impermeabilizzare le rocce. «Merito della maestria nell'uso degli esplosivi, e della stabilità delle rocce norvegesi», dice Peila. Proprio in Norvegia si è aperto, nel 2018, un cantiere ambizioso, quello del tunnel Rogfast. Quando sarà pronto, nel 2029, sarà il secondo tunnel più lungo al mondo (27 km) e il più profondo mai realizzato: sarà scavato a 392 metri sotto il livello del mare nel fiordo Bokna, a sud-ovest del Paese. Un'opera che ha rischiato di abortire prima ancora di nascere: il suo costo di 1,6 miliardi di euro era lievitato di oltre 600 milioni e le autorità hanno stoppato il cantiere. L'opera è finanziata dallo Stato solo per ⅓: il resto sarà ripagato dai pedaggi dei veicoli che copriranno il tragitto in 40 minuti invece che in 5 ore. Ma se il pedaggio costerà troppo, molti automobilisti continuerebbero a usare i traghetti e l'opera non si ripagherebbe. In aprile il governo ha ridotto il costo di 380 milioni e i lavori sono ripartiti.

### QUANDO L'ARGILLA SI RIGONFIA

Ugualmente inedita un'altra sfida iniziata sul Baltico: la costruzione del tunnel più lungo con la tecnica del tubo immerso (*v. disegno 2*). Il tunnel del Fehmarn Belt, che collegherà le isole Fehmarn (Germania) e Lolland (Danimarca) per velocizzare i viaggi fra l'Europa continentale e la Svezia. Con una spesa di ▸

Oresundsbron

La tecnica c'è da 2 secoli, ma si è diffusa dagli anni '70 grazie alle **iniezioni di cemento**: rendono impermeabili le rocce

Getty Images

**ROTONDA**
A lato una delle isole artificiali del ponte Hong Kong-Zhuhai-Macao: comprende un tunnel sommerso di 6,7 km. Sotto, il tunnel Eysturoy: ha la prima rotonda mai fatta sotto il mare.

Finlelf Mortensen/Ncc

# I tunnel che sono costruiti oggi sono progettati per resistere a **esplosioni**, **terremoti** o impatti di **navi** che affondano

7 miliardi di euro la Danimarca costruirà un tunnel con 4 corsie per le auto e 2 binari ferroviari. «In quell'area non conveniva usare le talpe meccaniche: ne occorrevano di mastodontiche, da usare in condizioni geologiche difficili e con un'alta pressione dell'acqua», racconta l'ingegner Francesco Petrella di Arup, la società che ha ideato l'opera con Ramboll e Tec. «Un ponte sarebbe stato troppo lungo e avrebbe ostacolato il traffico navale. Così si sono scelte le gallerie prefabbricate, che hanno un impatto ecologico inferiore». In 8 anni e mezzo di lavoro saranno costruiti, a ciclo continuo in un cantiere sull'isola di Lolland, 89 segmenti larghi 42 metri e lunghi 217: il doppio di un campo da calcio. I prefabbricati – quasi 6 milioni di tonnellate di cemento e acciaio – saranno trasportati da chiatte e immersi a 40 metri di profondità in una trincea scavata sott'acqua.

«Per limitare l'impatto sull'ambiente», aggiunge Petrella, «sono previsti molti accorgimenti. Per esempio, gli esemplari di tritone crestato, un anfibio, saranno messi al sicuro in habitat adatti fuori dal cantiere». Ma il punto critico dell'opera è un altro: il terreno. «È argilloso, e quando si scava tende a rigonfiarsi d'acqua. Questo pregiudicherebbe la tenuta del tunnel sul fondale. Perciò abbiamo fatto scavi pilota per capire i tempi di rigonfiamento del terreno e per progettare le opere in modo che i prefabbricati siano posati sul fondale in tempo utile per evitare che si rigonfi troppo».

Ancora più audace un progetto che la Norvegia accarezza da un decennio: costruire il primo tunnel flottante della storia. Si tratta di installare, a 60 metri di profondità, una galleria prefabbricata stabilizzata verticalmente con tiranti o pontoni galleggianti oppure con pilastri poggianti sul fondale marino. Una tecnologia applicata nel 1980 per proteggere due gasdotti sottomarini, ma mai utilizzata come galleria ferroviaria o automobilistica. «Spesso in ingegneria non ci si avventura in strade nuove, temendo che ciò che è sconosciuto sia pericoloso», osserva Arianna Minoretti, capo ingegnere dello Statens Vegvesen, l'agenzia governativa delle strade norvegesi. È la responsabile degli studi di fattibilità sul ponte flottante che i norvegesi stanno valutando per l'attraversamento del Sulafjord, sulla costa sud-ovest: «In questo fiordo il fondale è profondo e lungo le coste ci sono diverse isolette. Non c'è spazio per creare rampe d'accesso. L'idea è di installare un tunnel prefabbricato stradale lungo 4 km a 60 metri di profondità, dove le correnti sono meno forti rispetto alla superficie».

## A PROVA DI SOTTOMARINI

Ma una galleria subacquea senza protezioni, non rischia di essere più vulnerabile? «Il tunnel», risponde Minoretti, «è progettato per resistere a impatti di navi e sottomarini, e anche a esplosioni e incendi. Stiamo facendo tutti i test, e abbiamo già redatto le linee guida per la Federazione internazionale del calcestruzzo strutturale e l'Associazione internazionale del tunnel (Ita-Aites). In attesa che le autorità norvegesi decidano se scegliere questa struttura».

Ma al di là delle tecnologie, quale progetto sarebbe più rivoluzionario per il Pianeta oggi? «Il tunnel sotto lo stretto di Gibilterra», risponde Peila. «Non è una distanza elevata (23 km), bisogna scavare a grande profondità, ma non è un problema con le tecnologie attuali. Unire due continenti ha un fascino appassionante».