

Riflessioni su aspetti geologici rilevanti nella prospettiva di realizzazione di un tunnel di attraversamento dello Stretto di Messina scavato nel substrato sommerso

Alessandro Baietto, Paolo Perello

GDP-GEOMIN srl

Via Vittorio Amedeo II n.6

10121 - Torino

1. Riassunto

Alla luce delle recenti proposte di riprendere in esame il tema dell'attraversamento dello Stretto di Messina anche con un tunnel sottomarino scavato nel substrato che ne costituisce il fondale, si è ritenuto utile portare alcune riflessioni sugli aspetti geologici implicati in tale ipotesi progettuale. Si discutono brevemente l'assetto geologico-strutturale e il contesto sismico dell'area, delineando le sfide progettuali che si prospettano per la realizzazione dello scavo e per l'esecuzione di un'opera della quale devono essere garantiti elevati standard di sicurezza nell'ambito della sua vita. Attraverso una breve disamina di alcuni progetti di tunnel sottomarini realizzati in contesti geologici in parte simili a quello dello Stretto di Messina, si suggerisce un approccio di indagine e di studio geologico volto a fornire le informazioni idonee ad una corretta progettazione dell'opera e alla gestione dei rischi costruttivi. L'attenzione è quindi rivolta ai problemi realizzativi derivanti dalla geologia, ma allo stesso tempo alle tecniche di indagine e scavo che possono rendere tali problemi superabili.

2. Premessa

Nell'ambito della decennale disputa sulle modalità di collegamento infrastrutturale tra le due sponde dello Stretto di Messina è stata recentemente riportata all'attenzione, in alternativa al progetto del ponte, l'ipotesi di rianalizzare l'attraversamento dello stretto per mezzo di un tunnel sottomarino (inteso come scavo di una galleria naturale nel substrato sommerso; Saccà & Crapanzano, 2020). L'ipotesi del tunnel era già stata considerata negli anni '80 in sede di analisi comparativa tra varie tipologie di soluzione e poi accantonata. Tuttavia, in ragione del significativo incremento delle conoscenze geologiche sulla regione intercorso da quell'epoca e delle importanti innovazioni tecnologiche intercorsi negli ultimi decenni nel mondo del tunnelling, vale oggi effettivamente la pena riconsiderare l'ipotesi di attraversamento in sotterraneo. A partire dagli anni '90 alcuni progetti di tunnel sottomarini un tempo considerati particolarmente futuristici, sono stati realizzati, anche con condizioni geologiche piuttosto complesse e profondità del fondale marino considerevoli.

L'ipotesi di un progetto di attraversamento di un tunnel dello Stretto di Messina dovrebbe necessariamente confrontarsi con alcuni aspetti geologici rilevanti che diverrebbero giocoforza dei vincoli importanti per valutarne la fattibilità, la convenienza economica e la garanzia che siano mantenuti elevati standard di sicurezza nell'ambito della vita prevista per l'opera. Tra gli aspetti principali, di seguito discussi con maggiore dettaglio, vi sono:

- l'elevata articolazione geologica stratigrafico-strutturale implicante una eterogeneità geotecnica dei corpi attraversati;
- l'elevata sismicità dell'area e la probabile presenza di faglie attive che potranno interessare sia il tunnel sottomarino sia le opere di collegamento in Sicilia e Calabria (gallerie, ponti);
- gli elevati carichi idraulici insistenti sulla galleria in fase di scavo a fronte di carichi litostatici relativamente poco elevati e parallelamente la possibile presenza di strutture geologiche potenzialmente permeabili con ricarica virtualmente infinita dal mare.

3. Assetto geologico dello Stretto di Messina

L'area dello Stretto di Messina si colloca in una zona geologicamente complessa, che funge da svincolo tra zone di subduzione con caratteristiche differenti. Incrociando i dati da osservazioni geologiche dirette sulle

aree di terraferma presenti sulle due sponde e recenti dati derivanti da indagini di sismica profonda ottenuti nell'ambito di progetti di ricerca del CNR è oggi possibile ricostruire un quadro geologico di massima.

La morfologia del fondale marino è contraddistinta da un alto della topografia ("sella" sottomarina), allungata in direzione NW-SE tra le due sponde dello stretto a partire da Villa San Giovanni, per una profondità minima dell'ordine dei 108m nel settore culminante (Figura 1; Antonioli et al., 2014). Trasversalmente alla sua direzione di allungamento, essa presenta una larghezza variabile da un minimo di qualche decina di metri nella parte culminante (profondità 108m) a più di 3km se si considera una profondità di 170m. La presenza della sella è il risultato di un'interferenza tra i fenomeni tettonici più antichi (pre-messiniani) che hanno contribuito alla costruzione della dorsale appenninica, originariamente emersa e continua tra le due sponde, e i fenomeni tettonici recenti, legati alle faglie attive che hanno determinato lo sprofondamento della suddetta dorsale in corrispondenza dello stretto.



Figura 1. Foto aerea con estratto (area interna al tratteggio bianco) della morfologia del fondale marino ove è riportata in verde l'isobata 108m che marca il culmine della "sella" sottomarina; la batimetria del fondale è tratta da Antonioli et al. (2014).

L'assetto litostratigrafico nell'area dello stretto è individuato da un basamento cristallino metamorfico, al di sopra del quale riposa in discordanza una successione sedimentaria miocenico-quadernaria (Figura 2; Del Ben et al., 1996; Doglioni et al., 2012). Questa presenta alla base dei depositi conglomeratico-sabbiosi di etàortoniana generalmente ben cementati (Conglomerato di Pezzo), a cui si sovrappongono delle marne di età pliocenico inferiore (Formazione dei Trubi). In discordanza sui precedenti livelli riposa una successione Plio-Pleistocenica, costituita da argille, sabbie e calcareniti. Lo spessore di queste successioni nella parte sommersa non è del tutto noto, sia a causa dell'assenza di indagini di dettaglio, sia per il complesso pattern di faglie che ne determinano la dislocazione.

Le faglie attive che bordano lo stretto sono perlopiù attribuite dai diversi Autori (es. Ghisetti, 1992; Ferranti et al., 2008; Doglioni et al., 2012) a un sistema estensionale a direzione NE-SW, cui localmente si associa un sistema con segmenti di faglia più corti, sempre di natura estensionale, a direzione ENE-WSW. Il sistema principale, NE-SW, è meglio definito sulla sponda lato Calabria, dove affiorano numerose faglie ad esso attribuibili. Si tratta di faglie immergenti verso NW che hanno prodotto un evidente sollevamento del settore SE, come testimoniato dalla presenza di numerosi terrazzi marini di età via via più antica all'aumentare della quota. Le faglie affioranti sulla terraferma hanno degli evidenti analoghi in mare, come evidenziato dai rilievi batimetrici, che mostrano la presenza di scarpate sommerse di altezza pari ad alcune decine di metri in prossimità della linea di costa (Faglia di Scilla).

Sulla sponda lato Sicilia lo stretto è bordato da strutture simili ma con immersione opposta, ovvero verso SE. In particolare, i recenti studi sismici a riflessione a mare (progetto CROP) hanno messo in evidenza anche che lungo la linea di costa è presente una struttura sommersa di questo sistema, nota come Faglia di Messina, che però non raggiunge la superficie, poiché verso l'alto la dislocazione si trasferisce in una sinforme sin-sedimentaria (Doglioni et al., 2012).

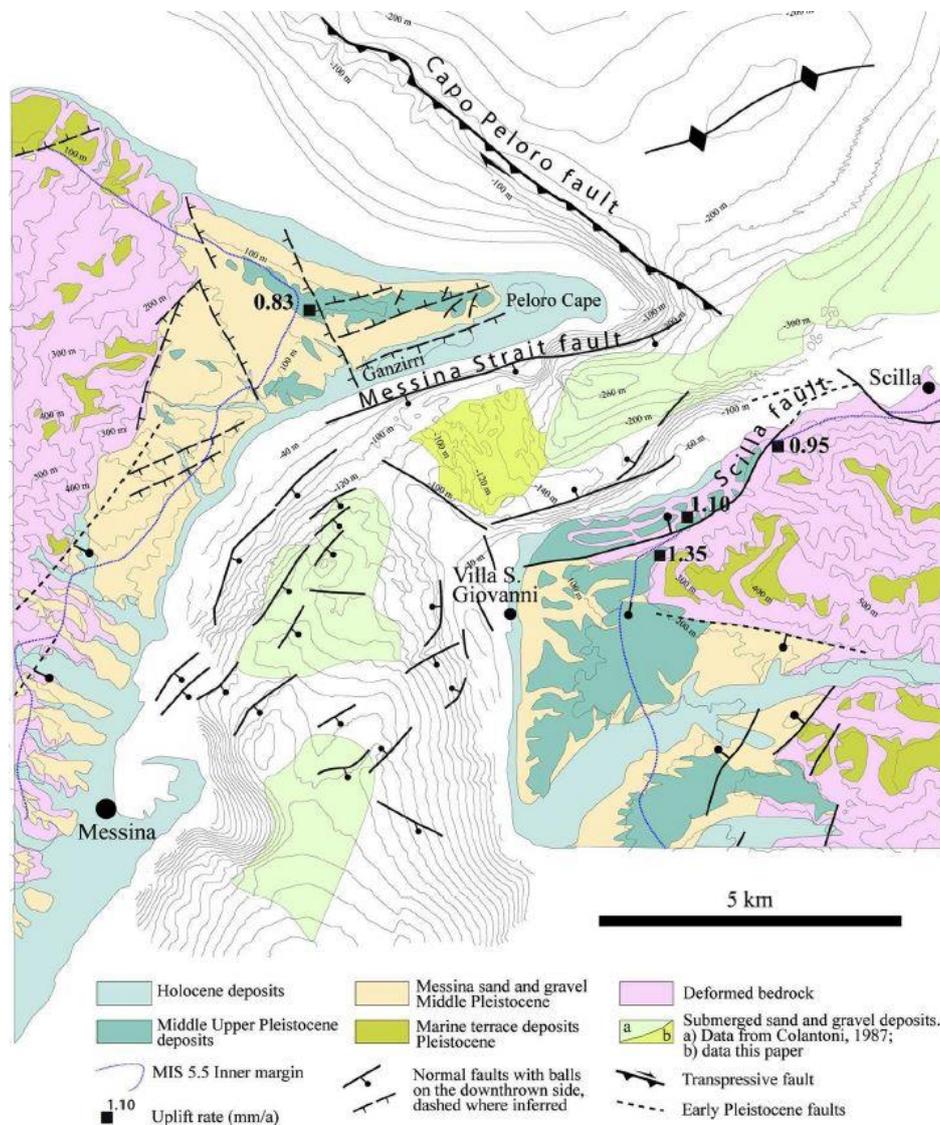


Figura 2. Schema geologico-strutturale dell'area dello Stretto di Messina; figura estratto da Antonioli et al., 2014 e derivata da dati citati al suo interno.

4. Sfide progettuali legate agli aspetti geologici

4.1. Caratteristiche meccaniche dei terreni

La zona dello stretto ove è presente l'alto morfologico cui si è accennato in precedenza è quella in cui potrebbe essere localizzato il tunnel sottomarino (Figura 1). Secondo i dati sismici disponibili, in questa zona di alto la successione sedimentaria miocenico-quadernaria è molto sottile e il basamento cristallino è molto vicino alla superficie topografica sommersa. Tale condizione è indubbiamente favorevole per la realizzazione di un'opera sotterranea, dal momento che i litotipi del basamento cristallino presentano caratteristiche meccaniche generalmente migliori rispetto ai terreni di copertura. Ciò vale soprattutto se si confrontano i litotipi del basamento con quelli sedimentari più recenti, pliocenico-pleistocenici, il cui stato di consolidamento e cementazione potrebbe essere scarso o moderato, con conseguenti caratteristiche geotecniche scadenti.

Tuttavia, l'andamento dei limiti litologici ad oggi non è noto nel dettaglio, dal momento che non ci risultano esistere né indagini dirette (sondaggi), né indagini sismiche ad alta risoluzione lungo l'intera sezione coinvolta (asse della sella sommersa). La natura erosionale di molti dei contatti stratigrafici ne rende piuttosto articolata e complessa la geometria. A ciò si deve aggiungere la presenza molto probabile di faglie che hanno contribuito a segmentare e disarticolare ulteriormente i limiti stratigrafici. Pertanto, l'assetto stratigrafico è certamente uno degli aspetti chiave da appurare con adeguate indagini, valutando infine quale sia la profondità ottimale a cui collocare il tracciato dell'opera, sia in funzione dei vincoli progettuali (es. pendenze massime consentite, posizione di sbocco a terra del tunnel), sia in funzione dell'elevata sismicità dell'area e delle faglie attive eventualmente presenti.

4.2. Sismicità e faglie attive

La presenza dei sistemi di faglie attive richiamati in precedenza impone un'attenzione particolare alla problematica della sismicità per qualsiasi infrastruttura aerea, subacquea o sotterranea da inserirsi nella regione. Le misure GPS esistenti per gli ultimi decenni attestano un allontanamento della Calabria dalla Sicilia dell'ordine di 1-3 mm/anno (Ferranti et al., 2008). Tuttavia, gran parte di questa deformazione non sembra essere stata accomodata nella sezione dello stretto, ove la distanza tra Messina e Villa San Giovanni è rimasta invariata nel tempo. Ciò è in accordo con l'ipotesi che la zona dello stretto sia un settore in cui le faglie sono bloccate e accumulano energia elastica che viene di tanto in tanto scaricata attraverso eventi sismici puntuali del tipo di quelli accaduti nel '700 e nel '900 (Monaco e Tortorici, 2000; CPTI Workgroup, 2004).

Incrociando le ipotesi sulla lunghezza dei segmenti di faglia che si sono attivati durante alcuni degli eventi principali e la magnitudo di questi ultimi si è stimato che le dislocazioni prodotte in corrispondenza delle faglie per un singolo evento sono dell'ordine del metro (Ferranti et al., 2008; Doglioni et al., 2012). In un contesto di questo tipo, per un'infrastruttura sotterranea come l'ipotetico tunnel esistono dunque due aspetti di cui tenere conto: i) il primo è legato alla sollecitazione per taglio e compressione sui rivestimenti indotta dalla propagazione delle onde sismiche; ii) il secondo è legato alle dislocazioni localizzate per le sezioni in cui l'opera si dovesse eventualmente trovare ad attraversare una faglia attivabile sismicamente.

Per entrambe queste problematiche esistono esempi di soluzioni progettuali che possono essere adottate e che consistono principalmente in giunti di snodo tra i rivestimenti delle gallerie in grado di assorbire le deformazioni in caso di sollecitazioni sismiche. Soluzioni di questo tipo sono state impiegate ad esempio per il Bolu Tunnel in Turchia (Russo et al., 2002), il Su'ai Tunnel in Cina (Hong, 2017), il Marmaray tunnel sotto il Bosforo in Turchia (Yamamoto et al., 2014). Pur esistendo esperienze realizzative del tipo di quelle citate, le soluzioni costruttive per tunnel in aree ad alta sismicità restano comunque una tematica di frontiera dal punto di vista progettuale e richiedono una buona conoscenza delle zone di faglia, soprattutto quando queste debbono essere attraversate dal tunnel stesso. Nel caso del possibile tunnel dello Stretto di

Messina sarebbero necessarie indagini volte a definire i seguenti aspetti: i) posizione e numero delle faglie potenzialmente attive da attraversare; ii) spessore della fascia di movimento attivabile in caso di sisma; iii) caratteristiche geotecniche della zona di faglia; iv) caratteristiche di permeabilità della zona di faglia e v) potenziale di liquefazione dei terreni attorno al tunnel (nel caso di terreni sciolti). Per questi aspetti è necessaria una conoscenza di dettaglio, in quanto le soluzioni progettuali per attraversare una faglia attiva sono complesse e costose e non possono essere applicate su tutto lo sviluppo dell'opera.

Va peraltro notato che la problematica di trovare soluzioni progettuali adatte al superamento di faglie attivabili in caso di sisma non sarebbe strettamente una peculiarità che riguarda il solo tratto di attraversamento subacqueo dello stretto, bensì essa riguarderebbe tutte le infrastrutture sotterranee di approccio alle sponde dello stretto, poiché, almeno in sponda Calabria, esistono numerose faglie attive anche a diversi chilometri nell'entroterra.

4.3. Aspetti idrogeologici

Uno dei rischi principali riguardanti lo scavo di tunnel sottomarini è quello che avvenga un'irruzione improvvisa e violenta di acqua con gravi conseguenze per l'incolumità delle maestranze e delle opere stesse. Questa condizione si può verificare nel caso in cui lo scavo attraversi porzioni permeabili di ammasso in connessione idraulica con il fondale marino e che le pressioni interstiziali dell'acqua insistenti sul fronte di scavo, specialmente se elevate, non siano gestite adeguatamente a livello della galleria. Tipicamente, per fronteggiare questa situazione gli scavi di tunnel sottomarini vengono effettuati con metodo meccanizzato tramite frese scudate (TBM) a modalità chiusa, ovvero equipaggiate con sistemi a contropressione di terra e/o fango, note rispettivamente come EPB o Slurry Shield. Con tali sistemi la stabilità del fronte del tunnel viene gestita in camera di scavo attraverso il controllo combinato delle pressioni idrauliche e delle pressioni di supporto effettivo. Tuttavia, tale controllo non viene applicato direttamente, bensì esso dipende da molteplici fattori sia di tipo geologico-geotecnico (caratteristiche dei terreni scavati, carichi idraulici), sia di tipo operativo (modalità di condizionamento dei terreni nella camera di scavo, velocità di rotazione della coclea, velocità di avanzamento della TBM; Anagnostou & Kovari, 1996). L'esperienza dello scavo del Tunnel sottomarino di Storebælt (parte del *Danish Great Belt Channel*; Danimarca), culminata nel 1991 con l'irruzione di acqua marina che ha provocato l'allagamento del tunnel, ha comunque apportato un significativo guadagno di esperienza nella gestione dei carichi idraulici di TBM a modalità chiusa in condizioni difficili. Il contesto geologico in cui si è verificato l'incidente è risultato essere molto eterogeneo in quanto caratterizzato da marne fratturate e da depositi glaciali con intercalazioni di lenti irregolari di sabbie, ghiaie e blocchi. Le elevate pressioni d'acqua (fino a 4 bar) hanno richiesto il ricorso ad interventi di pre-drenaggio dell'ammasso tali da consentire la ripresa dell'avanzamento della TBM. In seguito, sono stati realizzati con successo altri scavi di tunnel sottomarini in condizioni complesse dal punto di vista sia geologico, sia idrogeologico. Ad esempio, il Tunnel di Melen 7 nel Bosforo, ad uso acquedottistico, ha una lunghezza di ca. 5,5 km e nella sezione più profonda si colloca a 135 m sotto la superficie marina, con una copertura dal fondale pari a 70 m, costituita da appena 35 m di substrato roccioso mentre la parte rimanente è costituita da depositi granulari sciolti (Anagnostou, 2014). Questa situazione è abbinata alla presenza di faglie implicanti un'elevata probabilità di intercettare venute d'acqua molto elevate. Lo scavo è stato gestito con successo grazie all'applicazione di decisioni sulle modalità operative di avanzamento della TBM-EPB di volta in volta basate su indagini in avanzamento e trattamenti preventivi dei terreni più critici da attraversare.

Il contesto di attraversamento di un ipotetico tunnel nello Stretto di Messina presenta alcune analogie con il tunnel di Melen, specialmente per quel che riguarda i battenti idrici in gioco, il rapporto tra i carichi idraulici e quelli litostatici, l'eterogeneità geologica e la possibilità di intercettare faglie molto permeabili. Nel contesto dello Stretto di Messina, la presenza di probabili faglie attive implica la necessità di prevedere se tali strutture possano essere idraulicamente compartimentate e contenere zone in cui l'acqua può trovarsi in sovrappressione. Inoltre, va tenuto in conto che in una zona sismicamente attiva l'acqua potrebbe

non essere il solo fluido circolante attraverso delle faglie permeabili, infatti essa potrebbe essere miscelata con altri tipi di gas la cui presenza può comportare dei rischi aggiuntivi in fase di scavo.

4.4. Indagini conoscitive

Gli aspetti di criticità discussi nei paragrafi precedenti chiariscono l'importanza di poter disporre di un quadro conoscitivo quanto più dettagliato possibile per affrontare adeguatamente la progettazione dell'opera e la gestione dei rischi connessi. Rispetto alle indagini tradizionalmente eseguite per la progettazione di opere sotterranee a terra, l'esecuzione di indagini per i progetti di tunnel sottomarini risulta più complessa. Le indagini dirette (sondaggi) possono essere di tipo *on-shore* e *off-shore* (da terra e da mare). È possibile condurre indagini dirette *on-shore* attraverso la tecnica delle perforazioni teleguidate. Tali perforazioni, già utilizzate nell'ambito di progetti di tunnel sottomarini, possono essere impiegate per acquisire informazioni lungo traiettorie prossime o addirittura coincidenti all'asse della futura galleria. Questa metodologia può essere abbinata all'esecuzione di carotaggi continui di tipo *wire-line* e alla realizzazione di altre indagini geognostiche (geomeccaniche, idrogeologiche), con costi variabili in funzione dei diametri e delle lunghezze di perforazione. Per quanto riguarda i sondaggi eseguiti da mare (*off-shore*), essi risulterebbero dei sondaggi integrativi, perché molto più complicati e costosi, dovendo utilizzare piattaforme o chiatte con speciali predisposizioni con caratteristiche molto differenti anche dei macchinari da perforazione in funzione delle profondità di indagine e del fondale marino (Pennington, 2011).

Un vantaggio delle perforazioni teleguidate da *on-shore*, la cui realizzazione nel caso di un tunnel nello Stretto di Messina potrebbe essere valutata a partire sia dalla costa sicula sia da quella calabra, è quello che esse fornirebbero un continuum a livello conoscitivo, a differenza delle indagini *off-shore* che consentirebbero di ottenere delle informazioni discontinue lungo specifiche verticali, tra le quali sarebbero necessarie delle estrapolazioni. Pur non essendo ipotizzabile di coprire l'intera lunghezza del tunnel sottomarino con sole indagini *on-shore*, è invece certa la possibilità di limitare in modo considerevole la necessità di indagini *off-shore* ricorrendo ad indagini *on-shore* in grado di coprire lunghi tratti del tracciato a partire dalle due sponde dello stretto. In ogni caso, l'acquisizione dei dati diretti va accompagnata con l'acquisizione di dati indiretti ottenuta da indagini di tipo geofisico (sismica a rifrazione e riflessione, geoelettrica, magnetismo).

Un aspetto importante da considerare è che, come dimostrato dalle esperienze dei tunnel sottomarini realizzati nei contesti geologicamente più complessi, le indagini conoscitive non sono limitate unicamente alla parte progettuale, bensì queste diventano parte integrante del processo decisionale da attuare durante la fase di scavo dell'opera. Questo aspetto diventa fondamentale nella gestione dei rischi costruttivi, consentendo sia di mettere in opera le contromisure necessarie per affrontare l'attraversamento di terreni particolarmente critici (es. con consolidamenti, drenaggi), sia di stabilire i parametri di avanzamento della TBM. I risultati delle indagini da attuare in fase di progetto sono quindi fondamentali per la programmazione delle indagini da effettuare in corso d'opera. Queste ultime possono essere condotte direttamente a partire dalle macchine di scavo che possono essere equipaggiate con un vasto range di attrezzature e dispositivi per l'esecuzione di indagini dirette e indirette in avanzamento (AFTES, 2014).

5. Conclusioni

Le tecniche odierne di scavo meccanizzato si sono evolute a tal punto da aver consentito la realizzazione di tunnel sottomarini in presenza di carichi idraulici fino a 12-13 bar (es. Lake Mead in Las Vegas, tunnel di Hallandsås in Svezia; Holzhäuser et al., 2006). La realizzazione di un tunnel sottomarino di attraversamento dello Stretto di Messina, scavato nel substrato sommerso, dovrebbe fronteggiare una condizione simile, di tipo comunque complesso. Inoltre, l'elevata eterogeneità stratigrafica e strutturale (in senso geologico) determinata dalla presenza di faglie, di cui alcune potenzialmente ad elevata permeabilità ed idraulicamente connesse con il fondale marino, rappresentano fattori che conferiscono all'opera la connotazione di una sfida ingegneristica e tecnologica.

Un punto cruciale nell'ambito dello sviluppo di un progetto di questo tipo risiede nella fase di fattibilità, che deve già presentare un grado di approfondimento tale da chiarire se i costi di realizzazione siano confrontabili con i benefici. In questo senso diviene fondamentale definire quali indagini geologico-geotecniche di tipo preliminare (ovvero con costi contenuti) siano in grado di chiarire con sufficiente approssimazione le problematiche geologiche più cruciali da affrontare, come ad esempio la presenza di faglie attive. Poiché non è realistico immaginare che in sede di studio di fattibilità siano realizzabili indagini dirette (sondaggi) né di tipo *on-shore* né di tipo *off-shore*, le risposte ricercate devono essere demandate a metodi indiretti, principalmente rappresentati da indagini sismiche a riflessione di alta definizione. Solo una volta appurato che nelle grandi linee il progetto è fattibile dal punto di vista tecnico ed economico, nelle successive fasi progettuali entreranno in gioco le indagini dirette, prevalentemente *on-shore* e secondariamente *off-shore*. Le indagini continueranno poi nella fase costruttiva con le fondamentali perforazioni in avanzamento.

Va tuttavia tenuto presente che, anche a fronte di un imprescindibile investimento in indagini, per un'opera di questo tipo, non tutti i parametri progettuali possono essere preliminarmente definiti nel massimo dettaglio. Questo aspetto va tenuto nella massima considerazione, poiché da esso deriva la necessità di perseguire la massima attenzione nell'adottare criteri contrattuali che implicino un'adeguata flessibilità operativa nell'applicare soluzioni diverse a seconda delle condizioni geologiche che via via si incontreranno.

6. Bibliografia

- AFTES (2014). Recommendations Forward probing ahead of tunnel boring machines. *French Tunnel and Underground Space Association*.
- Anagnostou G. and Kovári K. (1996). Face stability conditions with Earth Pressure Balanced shields. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11 (2), 165 - 173.
- Anagnostou G. (2014). Some critical aspects of subaqueous tunnelling. *Muir Wood Lecture 2014*. AITES, ISBN: 978-2-9700858-6-7.
- Antonoli F., Lo Presti V., Morticell M.G., Bonfiglio L., Mannino M.A., Palombo M.R., Sannino G., Ferranti L., Furlani S., Lambeck K., Canese S., Catalano R., Chiocci F.L., Mangano G., Scicchitano G. and Tonielli R. (2014). Timing of the emergence of the Europe–Sicily bridge (40–17 cal ka BP) and its implications for the spread of modern humans. *Geological Society London Special Publications*, 411, 111-144.
- CPTI Workgroup, 20015. Catalogo parametrico dei terremoti italiani, versione 20015 (CPTI15. INGV, Bologna); <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>.
- Del Ben et al. (1996). Ricostruzione strutturale e stratigrafica dell'area dello Stretto di Messina mediante analisi comparata dei dati geologici e sismici. *Mem. Soc. Geol. It.*, 51, 703-717.
- Dogliani C., Ligi M., Scrocca D., Bigi S., Bortoluzzi G., Carminati E., Cuffaro M., D'Orlando F., Forleo V., Muccini F. and Riguzzi F. (2012). The tectonic puzzle of the Messina area (Southern Italy): Insights from new seismic reflection data. *Scientific Report 2*, 970.
- Ferranti, L. Monaco C., Morelli D., Antonoli F. and Maschio L. (2008). L. Holocene activity of the Scilla Fault, Southern Calabria: Insights from coastal morphological and structural investigations. *Tectonophysics* 453, 74–93.
- Ghisetti, F. (1992). Fault parameters in the Messina Strait (southern Italy) and relations with the seismogenic source. *Tectonophysics*, 210, 117-133.
- Holzhauser J., Hunt S.W., Mayer C. (2006). Global Experience with Soft Ground and Weak Rock Tunneling under Very High Groundwater Heads. *Paper presented at the Proc. of the North American Tunneling Conference in Chicago*.

- Hong K (2017). Typical Underwater Tunnels in the Mainland of China and Related Tunneling Technologies. *Engineering*, 3(6): 871 -879.
- Monaco, C., Tortorici, L. (2000). Active faulting in the Calabrian Arc and eastern Sicily. *Jour. Geodyn.*, 29, 407-424.
- Pennington T. W. (2011). Tunneling beneath open water, *Parsons Brinckerhoff Inc.*, New York, NY, USA.
- Saccà G., Crapanzano S. (2020). Obiettivo: attraversare lo Stretto di Messina. Il ponte a campata unica è proprio la soluzione? *Il Giornale dell'Ingegnere*, 6.
- Russo M., Amberg W., (2001), Gallerie profonde in zone sismiche, recenti sviluppi, *X Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia" (ANIDIS)*, Potenza-Matera 9-13 settembre.
- Yamamoto, T., Tateishi, A, Tsuchiya, M. (2014). Seismic design for immersed tube tunnel and its connection with TBM tunnel in Marmaray project". *2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Istanbul, pp. 1-12.