

Aspetti geologici e di stabilità per il Ponte sullo Stretto di Messina

Alessandro Guerricchio¹, Maurizio Ponte²

¹Ordinario di Geologia Applicata - Dipartimento Difesa del Suolo "V. Marone" - Università della Calabria.

E-mail: guerrich@dds.unical.it (autore corrispondente)

²Assegnista di ricerca - Dipartimento Difesa del Suolo "V. Marone" - Università della Calabria

E-mail: mauponte@dds.unical.it

Geological and stability aspects for the Messina Strait Bridge (Southern Italy)

ABSTRACT: The Calabrian slope, involved in the building of the Strait of the Messina Bridge is made up of Tyrrhenian sandy marine terraces resting on magmatites and has been considered to be stable according to several researchers. The present paper presents a quite different interpretation of the conditions of the slope which has been involved in ancient large deep seated gravitational slope deformations of Upper Pleistocene epoch, that caused the loss of peak mechanical characteristics of the terrains. It is pointed out by tilted bodies, bulgings and deep cuts crosswise to the slope, as well as by altimetric variations of the ancient Tyrrhenian coast line. The scarp of the DSGSD is a "scissor-like" rupture, in which it is quite likely that all the stresses that caused its progression are at present concentrated in the southern part of the DSGSD, near the area in which the Calabrian tower of the Bridge will fall. Anyway, we cannot exclude that this DSGSD has not reexhumed a preceding surface of a normal fault, from which the DSGSD itself has to be distinguished for modality of movement and seismic answer. The slope stability analysis carried out for the geological section traced according to the Bridge axis in non-seismic conditions furnishes a safety factor value a little greater than 1, which means that the slope is very close to a critical condition. The same analysis, carried out referring to a pseudostatic condition furnishes a safety factor less than 1. Due to the depth of the slip surfaces (some of which exceed 250 meters) it is very difficult to plan slope stabilization works to allow the building of the tower.

Key terms: Calabria, earthquakes, DSGSD, big landslides, stability analyses

Termini chiave: Calabria, terremoti, DGPV, grandi frane, verifiche di stabilità

Riassunto

Il versante calabrese interessato dalla costruzione del Ponte sullo Stretto di Messina è costituito da terrazzi marini tirreniani, poggiati su magmatiti, considerato stabile da vari ricercatori.

Il presente lavoro propone una interpretazione completamente differente circa le condizioni del versante, che è stato coinvolto in un'antica grande deformazione gravitativa profonda in epoca pleistocenica, che ha provocato il decadimento delle caratteristiche meccaniche dei terreni. Essa è evidenziata da corpi basculati, rigonfiamenti e profonde rotture trasversali al versante stesso, nonché da variazioni altimetriche della linea di costa tirreniana.

La scarpata della DGPV è una rottura "a forbice", nella quale è molto probabile che le tensioni che l'hanno causata siano ancora attualmente concentrate nella sua porzione meridionale, proprio nell'area in cui andrà a ricadere la torre del ponte dal lato Calabria.

In ogni caso, non si può escludere che questa DGPV non abbia riesumato la preesistente superficie di una faglia diretta, dalla quale la DGPV deve essere distinta sia per

modalità di movimento che per la risposta sismica.

Verifiche di stabilità condotte per la sezione in asse ponte forniscono fattori di sicurezza di poco superiori all'unità in condizioni statiche ed inferiori all'unità in condizioni pseudostatiche

1. Premessa

Nel presente studio vengono affrontate le problematiche relative alla stabilità del versante calabrese interessato dal costruendo Ponte sullo Stretto di Messina.

Il versante in esame è costituito da un basamento magmatico su cui poggiano terrazzi marini tirreniani, le cui variazioni delle quote attuali sono da attribuirsi alle DGPV ed alle grandi frane lungo costa.

Sono state eseguite numerose verifiche di stabilità in condizioni statiche e pseudostatiche su molte sezioni topografiche nelle aree limitrofe a quella ove insisterà la torre calabrese del ponte, che hanno fornito coefficienti di sicurezza prossimi od inferiori all'unità. In particolare, si riportano i risultati relativi alle analisi condotte con riferimento alla sezione tracciata in asse ponte.

2. Lineamenti geologici e tettonici

Lo Stretto di Messina ricade in una zona del bacino del Mediterraneo contrassegnata, nel Quaternario, ma soprattutto negli ultimi 700.000 anni, da un'attività geodinamica molto intensa. In tale periodo, nel versante occidentale dell'Aspromonte, infatti, si registra un sollevamento di circa 300m comprovato dai resti di superfici terrazzate (Miyachi et al., 1994); a quote inferiori, tra i 160 e i 100m sul livello del mare, altri lembi di terrazzo marino, databile al Tirreniano (125.000 anni dal presente), ultimo periodo interglaciale che precede quello in cui viviamo, consentono di valutare il tasso di sollevamento medio a 1,2 mm/anno, recentemente aggiornato a 1,3-1,8 mm/anno a seguito del ritrovamento di una spiaggia sollevata fino a 4m sull'attuale livello marino, risalente a un periodo tra i 2.500 e i 3.500 anni dal presente (Antonioli et al., 2002).

Sotto l'aspetto tettonico, lo Stretto di Messina è impostato in un sistema di faglie di lunghezza regionale che definiscono una struttura del tipo fossa tettonica (Ghisetti, 1992). Alcune di esse sono affioranti, altre sommerse nei fondali dello Stretto o nel Mar Tirreno; alla loro attività, oltre i suddetti innalzamenti, si devono terremoti particolarmente energetici e distruttivi, fino al decimo e undicesimo grado della scala Mercalli. Dagli studi di geodesia spaziale si evince che la Sicilia e la Calabria sono coinvolte da spostamenti orizzontali dell'ordine dei 10mm/anno (Anzidei et al., 2001) e che, pur partecipando entrambe a un movimento verso N, tendono a divergere (Oldow et al., 2002). Ciò a causa della tettonica estensionale che caratterizza la zona assiale della regione calabrese e la Sicilia orientale, compreso l'*offshore* dello Stretto con la scarpata della faglia di Malta, forse la struttura sismogeneratrice dei terremoti distruttivi della Sicilia orientale del 1169 e del 1693. Malgrado tali informazioni provengano da ricerche di geodesia spaziale, non c'è ancora accordo su quali siano le faglie attive cui attribuire i suddetti meccanismi, responsabili, tra l'altro, anche dei più forti terremoti accaduti in tempi storici, quali quelli del 1783 (Vivenzio, 1783; Sarconi, 1784; Mercalli, 1897) e del 1908.

Fino ad oggi la faglia di Citanova, o faglia d'Aspromonte, è stata in genere identificata quale l'espressione superficiale della struttura sismogenetica del terremoto del 1783 (Cotecchia, Guerricchio e Melidoro, 1986; Guerricchio e Ronconi, 1997). Essa è attiva e ha prodotto numerosi eventi sismici nell'Olocene e in tempi storici, di energia così elevata da generare rotture sulla superficie terrestre, oltre che nell'area epicentrale della piana di Gioia Tauro anche nella zona dello Stretto di Messina. In quest'ultima, infatti, si riconoscono profondi "suarci" ("trenches") nelle rocce granitoidi particolarmente dure e resistenti del rilievo collinare allungato in senso E-W bordante lo Stretto dal lato calabrese. Tra essi vanno ricordati, ad esempio, quello che, iniziando dalla località di Piano Matiniti, si dirige verso Campo Piale e poi verso Villa

San Giovanni con direzione E-W e l'altro che, sempre da Piano Matiniti, giunge verso Cannitello assumendo una orientazione all'incirca NW-SE. Se consideriamo la somiglianza geologica tra la faglia di Citanova e quelle del Mesima, di Sant'Eufemia, di Delianova e Armo con essa confinanti, unitamente alla distribuzione delle intensità dei principali "recenti" terremoti catastrofici, può dedursi che, con molta probabilità, le suddette faglie siano le strutture sismogeneratrici di questi ultimi sismi avvenuti tra Catanzaro e lo Stretto di Messina. Questo sistema, che immerge verso il Tirreno, cioè verso O, potrebbe forse essere correlato al processo di rotazione della cerniera dello *slab* litosferico ionico in subduzione con contestuale assottigliamento della crosta oceanica tirrenica. Pertanto, la struttura dello Stretto di Messina, prima definita fossa tettonica, può rappresentare la zona di svincolo o di trasferimento tra le faglie della Calabria meridionale immergenti verso ovest (Mesima, Citanova, Sant'Eufemia, Delianova e Armo) e quella materializzabile con la scarpata di Malta immergente verso E, lungo la quale si concentra l'attività tettonica e magmatica della Sicilia orientale, caratterizzata da sismicità distruttiva e intenso magmatismo (Baratta, 1910; Hirn et al., 1997).

3. Brevi considerazioni sui tempi di ritorno dei sismi

Per quanto riguarda i tempi di ritorno dei terremoti catastrofici dello Stretto di Messina (Valensise e Pantosti, 1992) si è fatto riferimento a dati archeosismologici da cui risulta che nel IV secolo d.C. si concentrano fasi di distruzione e abbandono da terremoto in Calabria e in Sicilia. Tali dati ben si accorderebbero con quanto avvenuto in conseguenza del catastrofico sisma del 1783 e pertanto quell'evento sarebbe il penultimo nella zona dello Stretto.

Va però sottolineato che la valutazione dei tempi di ritorno di terremoti in strutture così complesse sotto l'aspetto tettonico, qual è quella dello Stretto di Messina, è molto complicata e difficile. Se infatti paragoniamo il tempo di ritorno di un terremoto generato dal movimento di una faglia a quello di un pendolo, sarebbe relativamente facile calcolare il suo tempo di ritorno (periodo); ma se al movimento della prima faglia (primo pendolo) venissero accoppiati anche quelli di una seconda faglia (secondo pendolo) e di una terza faglia (terzo pendolo), ecc., tra loro collegate, si complicherebbe notevolmente il calcolo. È proprio il caso dello Stretto di Messina in cui sono numerose le faglie attive, alcune delle quali non facilmente osservabili.

Attualmente, per i modelli di occorrenza dei terremoti si fa riferimento a tre metodi di analisi (Cornell, 1968). Secondo l'approccio completamente probabilistico (poissoniano), si fissa un tempo di ritorno, un intervallo di tempo, cioè, in cui si ipotizza possa verificarsi un certo fenomeno di una certa intensità con una data probabilità (ad esempio del 95%).

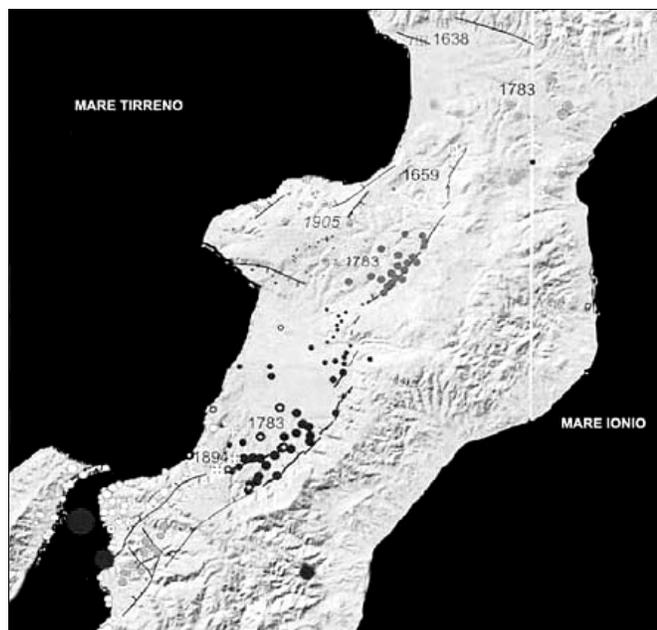


Fig. 1 - DTM della Calabria meridionale con la traccia delle principali faglie attive e la distribuzione dei punti di maggiore intensità dei sismi del 1783. Questi ultimi, a partire da nord, si distribuiscono lungo le faglie del Mesima, di Cittanova, di Delianova e in parte di Sant'Eufemia. Al centro dello Stretto ricade l'epicentro del terremoto del 1908 ($M = 7,1$) con i relativi punti di maggiore intensità, sulla costa quello di Reggio Calabria del 1975 ($M = 4,5$) e nell'Aspromonte orientale quello di Ferruzzano del 1978 ($M = 5$). Le principali faglie, la cui parte ribassata è indicata dai trattini indicanti pure l'immersione del piano di faglia, convergono nello Stretto

Southern Calabria DTM with traces of the main active faults and locations of the 1783 earthquake major intensity points. These last, starting from N, are located along Mesima, Cittanova, Delianova and partially Sant'Eufemia faults. The 1908 earthquake epicentre falls in the middle of the Messina Strait ($M = 7,1$) with the major intensity points, the epicentre of 1975 earthquake of Reggio Calabria ($M = 4,5$) along the coast, and the epicentre of 1978 earthquake of Ferruzzano ($M = 5$) in the eastern Aspromonte. Main faults, whose lowered part and dip are indicated by dashes, converge toward the Strait

Tale approccio implica, quindi, anche l'assunzione di un certo rischio (pari al 5% nell'esempio considerato) che si verifichi un fenomeno di intensità più elevata rispetto a quello in esame. Secondo tale approccio, inoltre, il fatto che nell'intervallo di tempo considerato il fenomeno effettivamente si verifichi non influenza in alcun modo la probabilità che esso possa ripetersi. In altri termini, si ha una sorta di "mancanza di memoria" del tempo trascorso dall'ultimo evento. In particolare, per un processo poissoniano, la probabilità che un evento abbia ampiezza A maggiore di a è:

$$P(A > a, t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

dove λ è la frequenza di eccedenza dell'ampiezza. Questa analisi fornisce le basi per la previsione a medio termine.

Un secondo metodo, che riguarda la previsione a breve termine, comprende un processo poissoniano per la sismicità moderata e un modello renewal con meccanismo di "memoria" a un livello per la sismicità più elevata.

Il terzo metodo, che consente la previsione a lungo termine, è il cosiddetto "approccio ibrido": processo poissoniano per le regioni sismiche e terremoto caratteristico per le faglie. Nell'approccio ibrido, in cui si utilizzano i dati sulle singole faglie, il fatto che il fenomeno nell'intervallo di tempo considerato effettivamente si verifichi modifica la probabilità che esso possa ripetersi. In particolare, contrariamente a quanto si potrebbe ritenere, se accade un evento sismico nel periodo considerato, aumenta la probabilità che esso possa ripetersi in virtù di una sorta di "reazione a catena" nell'attivazione di meccanismi di faglie sismogenetiche. Basandosi quindi sull'osservazione del fenomeno, in tale metodo c'è anche una componente deterministica. Inoltre, si dovrebbe modificare l'intervallo di tempo in oggetto, considerandone uno "nuovo" a partire dal momento in cui si è verificato il fenomeno stesso.

Come si intuisce, prevedere il tempo di ritorno di un terremoto non è una procedura agevole. A nostro avviso, sebbene le strutture che hanno generato i sismi catastrofici relativamente recenti, del 1638, del 1783 e del 1908, possano essere state diverse, esse devono tuttavia avere un loro collegamento essendosi i sismi verificati in una zona calabro-sicula molto ristretta. Poiché il periodo trascorso tra un evento e l'altro è in media di circa 135 anni, si ritiene, forse con presunzione, che il prossimo evento di particolare energia possa accadere tra gli anni 2030-2050.

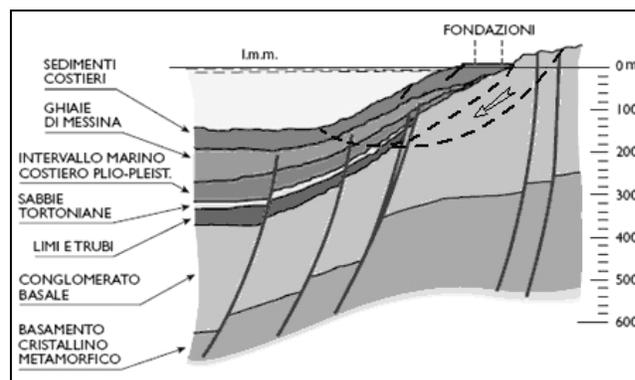


Fig. 2 - Sezione geologica del versante calabrese dello Stretto di Messina, desunta dagli studi della Società Stretto di Messina SpA, che riporta la sola presenza di faglie dirette (linee spesse). Lungo le tratteggiate delle rotture gravitative, ricostruite attraverso i rilevamenti sul terreno e dall'esame delle fotografie aeree stereoscopiche, sono state condotte le verifiche di stabilità *Geological section of the Calabrian slope of the Strait of Messina, desumed by the studies of the Stretto di Messina Society, that only reports the presence of normal faults (thick lines). Along the gravitative dashed ruptures, reconstructed by field surveys and stereoscopic aerophotographs examinations, stability analyses have been carried out*



Fig. 3 - Mappa della batimetria dello Stretto di Messina, da cui si evince la lunga scarpata della faglia di Malta con carattere di trascorrenza sinistra orientata NNO-SSE, che converge, all'altezza dell'Etna, su quella orientata NE-SO più direttamente interessante la zona del Ponte e che rappresenta un elemento importante per la struttura della fossa tettonica dello Stretto

Bathymetric map of the Strait of Messina, from which it can be deduced the long Malta fault scarp, with left-transcurrence characteristic, NNW-SSE oriented, which converges, level with Etna volcano, on that NE-SW oriented, more directly involving the Bridge area and which represents an important element for the tectonic structure of the Strait

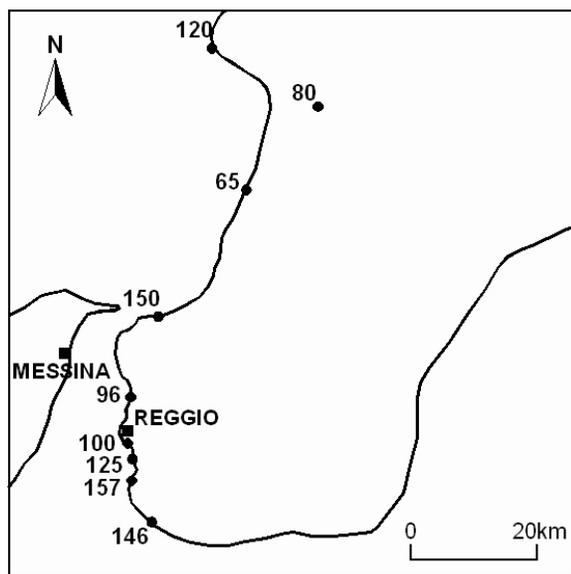


Fig. 4 - Le variazioni delle quote attuali del terrazzo tirreniano (125ka) (da Bordoni e Valensise, 1998, modificata) che vanno attribuite alle DGPV ed alle grandi frane lungo costa
Variations in the Tyrrhenian terrace present elevations (125ka) (modified after Bordoni and Valensise, 1998), to ascribe to DSGSD and big landslides along the coast

4. Principali osservazioni geomorfologiche e verifiche di stabilità

Lo studio geologico-geomorfologico del versante calabro interessato dal costruendo Ponte sullo Stretto ha evidenziato la diffusa fragilità di quel territorio, come già affermato in diversi studi precedenti (Guerricchio e Melidoro, 1981; Guerricchio, 1988, 2000, 2001; Guerricchio et al., 2002; Guerricchio, 2005). Contrariamente a quanto risulta dagli studi in letteratura, i numerosi corpi rocciosi del versante orientale dello Stretto dal lato Calabria, interpretati come terrazzi marini stabili, in particolare quelli tirreniani, sono risultati coinvolti da antichi movimenti gravitativi profondi di vaste dimensioni, come comprovano, ad esempio, pure le forti oscillazioni pianoaltimetriche delle quote del terrazzo tirreniano (Fig. 4). In tali masse rocciose così mobilitate, e quindi deformate, sono state perse le caratteristiche di resistenza meccanica originaria soprattutto lungo le fasce prossime alle "superfici" di scorrimento. Si osservano basculamenti, rigonfiamenti da carico, rilassamenti da rotture di più piccole dimensioni e profonde incisioni trasversali al versante, in una prima analisi interpretabili come fenomeni di erosione meteorica.

Va, al contrario, messa in evidenza la presenza di un'estesa scarpata di rottura da "deformazione gravitativa profonda di versante" (DGPV) e/o da grande frana, di epoca tardo-pleistocenica, la quale, molto alta e sviluppata nella sua porzione settentrionale, tende a diminuire, fino ad azzerarsi, procedendo verso S (Fig. 5). Trattasi quindi di una rottura a forbice in cui è quasi certo che attualmente tutti i massimi sforzi, che porteranno alla prosecuzione della rottura stessa, sono concentrati nella zona meridionale presso la quale ricade la torre calabrese del Ponte. Inoltre, i vari fossi interpretati come generati unicamente dall'erosione meteorica sono il prodotto, invece, di aperture per "espansione laterale" dell'ammasso coinvolto dal movimento dell'antica frana, successivamente modellati dalle acque meteoriche. Non può, però, escludersi che il grande corpo di antica "frana" non abbia anche "riesumato" una precedente superficie di faglia diretta, da cui esso va differenziato per modalità di movimento e di risposta sismica. A tale riguardo sono state sottoposte a verifica dinamica numerose sezioni geologiche sulle quali sono state riportate: a) le superfici di scorrimento potenziali desunte anche dai rilevamenti di campagna e dall'esame di fotografie aeree stereoscopiche di varie epoche; b) i numerosi *trench* o "strappi" del terreno, generalmente prodotti dall'attività sismica pregressa; c) il verso dei fenomeni di trazione che ha generato i relativi *trench*; d) le principali faglie pleistoceniche da neotettonica.

Nelle verifiche di stabilità non è stata tenuta in conto la presenza della falda idrica sotterranea, che i rilevamenti di campagna hanno consentito di fissare a circa dieci metri di profondità dal piano campagna.

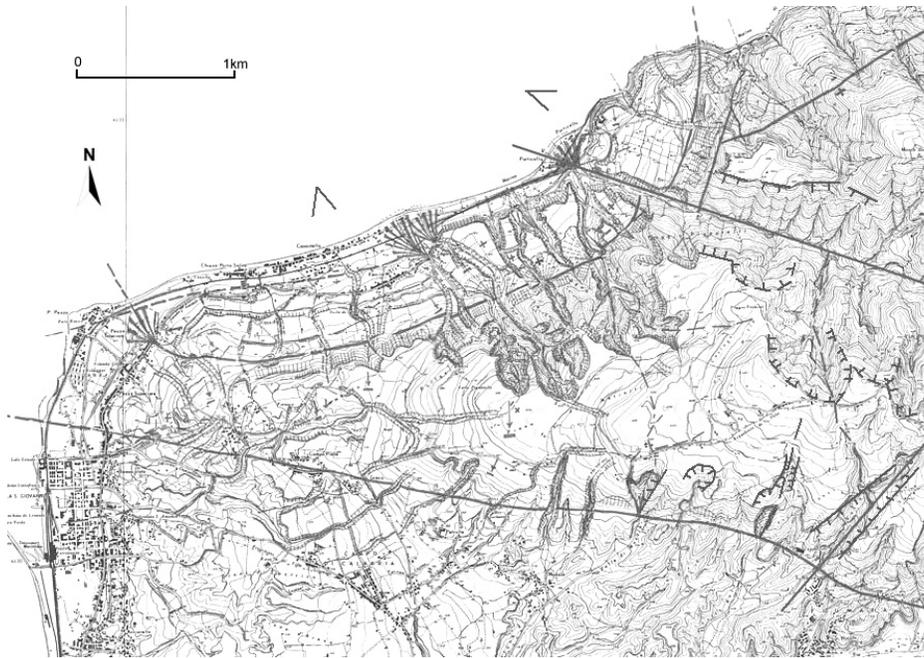


Fig. 5 - Carta geomorfologica finalizzata alle deformazioni gravitative profonde di versante (DGPV), alle grandi frane e ai principali trench prodotti da sismi di elevata energia, indicati dalle linee con "barbette" fitte lateralmente ad alcuni fossi. Sono pure riportate le principali faglie. Nel versante dello Stretto la linea arcuata, che borda verso monte le superfici terrazzate, rappresenta la rottura della DGPV che lo coinvolge interamente con un motivo di deformazione a corda molle. I segni - (meno) indicano le zone ribassate e/o basculate per frane o deformazioni da sismi

Geomorphological map directed to deep seated gravitational slope deformations (DSGSD), big landslides and main trenches induced by high energy earthquakes, pointed out by lines with fine-tooth beside some ditches.

Main faults are marked too. In the Strait slope the curved line, which bounds uphill the terraced surfaces, represents the DSGSD main rupture which completely involves it with an upward convex shape. Minus signs (-) indicate areas lowered or tilted by landslide or deformations induced by earthquakes

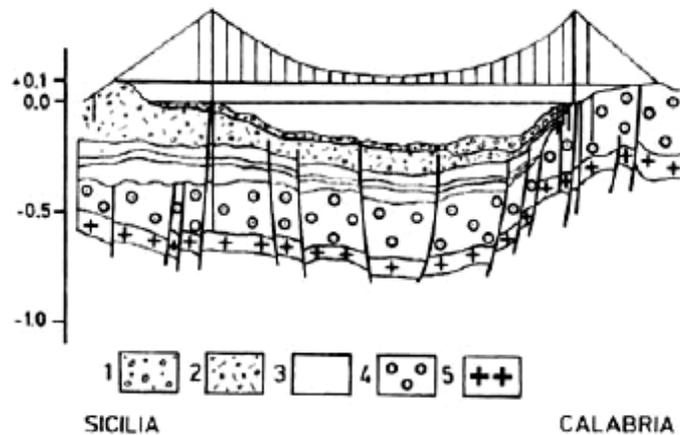


Fig. 6 - Sezione stratigrafica dello Stretto di Messina (da pubblicazione della Società Stretto di Messina SpA): 1. ghiaia sabbiosa della piana costiera, Olocene; 2. ghiaie sabbiose marine, "ghiaie di Messina", Pleistocene; 3. argille e sabbie, Pliocene; 4. conglomerato di Pezzo e arenarie, Miocene; 5. basamento cristallino, Paleozoico. Le rotture riportate come faglie, specialmente dal lato calabrese, sono talora originate da DGPV, con possibile superficie di scorrimento ultima che giunge al piede della scarpata sottomarina, alquanto inclinata per effetto delle spinte dei movimenti di massa

Stratigraphic section of the Strait of Messina (after Stretto di Messina Society): 1. sandy gravel of coastal plain, Holocene; 2. marine sandy gravels, "Messina gravels", Pleistocene; 3. clays and sands, Pliocene; 4. Pezzo conglomerates and sandstones, Miocene; 5. crystalline basement, Palaeozoic. Ruptures reported as faults, especially on the calabrian side, are sometimes produced by DSGSD, with possible ultimate slip surface which reaches the toe of the submarine slope, quite inclined and bulged due to the pushes of the mass movements

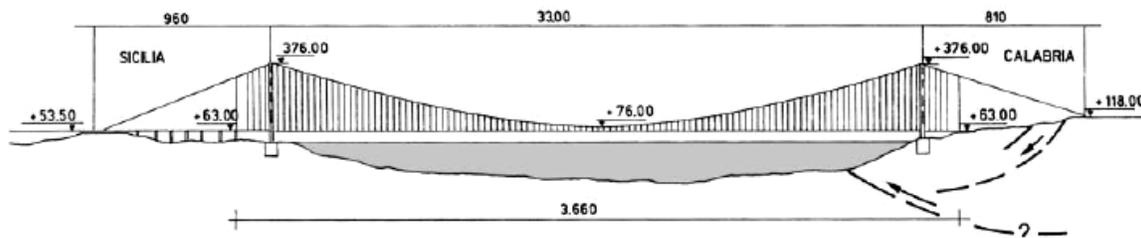


Fig. 7 - Sezione longitudinale del Ponte sullo Stretto, con l'indicazione di rotture da DGPV nel versante calabrese (le frecce indicano il verso del movimento)

Longitudinal section of the Bridge on the Strait, with indications of the DSGSD ruptures in the calabrian slope (arrows indicate the direction of movement)

Dai risultati delle indagini geognostiche eseguite dalla società Stretto di Messina SpA sono state dedotte le litologie profonde costituenti il territorio in esame, che sono, a partire dall'alto: depositi sabbioso-ghiaiosi terrazzati; ghiaie di Messina; limi e trubi; conglomerato di Pezzo; plutoniti.

A ogni litologia sono stati attribuiti i range dei parametri geotecnici indicati nella relazione geotecnica e di calcolo

del progetto preliminare del Ponte sempre dalla Società Stretto di Messina SpA.

L'analisi, di tipo "pseudostatica", considerando i coefficienti sismici dettati dalla nuova normativa che andrà in vigore nei prossimi mesi, è stata effettuata con l'ausilio del programma di calcolo Slob 4.0, è stata condotta con riferimento ad 8 superfici di scorrimento (Fig. 8).

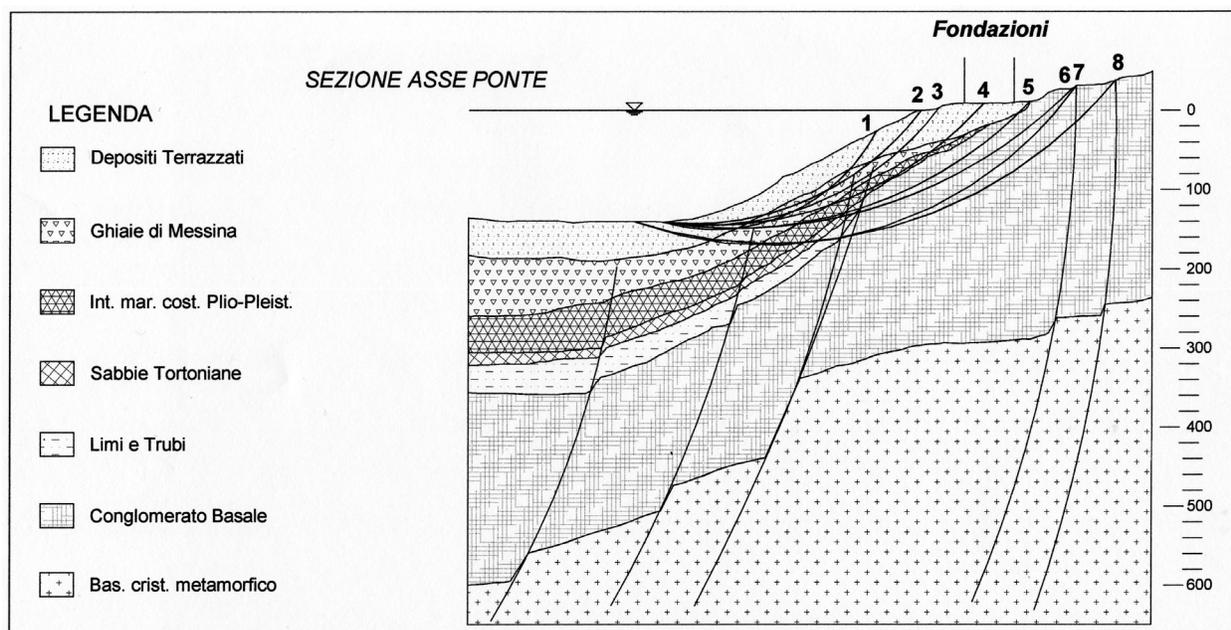


Fig. 8 - Sezione geologica in asse Ponte con le superfici di scorrimento analizzate, numerate da 1 a 8
Geological section drawn according to the Bridge axis with the analysed slip surfaces, numbered from 1 to 8

In virtù delle ipotesi fatte, in condizioni pseudostatiche e senza considerare la presenza di una falda, il versante risulta coinvolto da movimenti franosi attivi che potranno pregiudicare la corretta funzionalità del Ponte.

Le analisi di stabilità eseguite hanno fornito risultati preoccupanti, con valori dei coefficienti di sicurezza ben al di sotto dell'unità su tutte le superfici testate.

A titolo di esempio nelle Tabb. 1 e 2 si riportano i risultati relativi alla superficie n. 1, completamente subacquea, e n. 6, coinvolgente l'area di impronta delle

fondazioni.

La situazione più preoccupante è stata riscontrata per le scarpate subacquee al di sotto della fondazione della torre del Ponte. Un evento sismico di entità anche inferiore a quello del 28 dicembre 1908 potrebbe mobilitare parte del versante, in particolare la zona di appoggio della torre stessa. A causa delle elevate profondità cui si sviluppano le superfici di scorrimento ricostruite (alcune superano i 250m di profondità dal piano campagna), è impossibile realizzare interventi di stabilizzazione del versante.

Tab. 1 – Risultati verifiche di stabilità superficie n. 1
Stability analysis results for the slip surface n. 1

Sezione ASSE PONTE		Superficie N°: 1				Tipo:	Circ.		Risultati FS								Note
Strato	Parametri Geotecnici				Fv1	Fv2	Fo1	Fo2	Bv1	Bv2	Bo1	Bo2	Jv1	Jv2	Jo1	Jo2	
	γ	γ_{sat}	ϕ'	c													
Parametri di Picco																	
Depositi terrazzati	22	23	30	20	0,96	1,00	1,35	0,65	0,99	1,06	1,97	0,69	0,99	1,37	1,06	0,69	INS
Ghiaie di Messina	19	20	30	0													
Plutoniti	22	23	28	5													
Trubi	20	21	22	0													
Conglomerato di Pezzo	21	22	40	20													

Tab. 2 – Risultati verifiche di stabilità superficie n. 6
Stability analysis results for the slip surface n. 6

Sezione ASSE PONTE		Superficie N°: 6				Tipo:	Circ.		Risultati FS								Note
Strato	Parametri Geotecnici				Fv1	Fv2	Fo1	Fo2	Bv1	Bv2	Bo1	Bo2	Jv1	Jv2	Jo1	Jo2	
	γ	γ_{sat}	ϕ'	c													
Parametri di Picco																	
Depositi terrazzati	22	23	30	20	1,50	1,57	2,00	1,02	1,58	1,61	2,67	1,06	1,58	1,84	1,61	1,06	INS
Ghiaie di Messina	19	20	30	0													
Plutoniti	22	23	28	5													
Trubi	20	21	22	0													
Conglomerato di Pezzo	21	22	40	20													

5. Conclusioni

Lo studio sulla stabilità del versante calabrese interessato dal costruendo Ponte sullo Stretto di Messina, eseguito nel presente lavoro indica che, in caso di sisma di particolare energia, la struttura potrebbe essere coinvolta in fenomeni gravitativi di importanti dimensioni. È ben chiaro, com'è noto, il limite che un approccio alle verifiche di stabilità bidimensionale presenta. I metodi che affrontano il problema in piano, infatti, non consentono di tenere conto degli effetti tridimensionali, per cui non è da escludersi che verifiche condotte con riferimento ad un modello 3D, che necessiterebbero di una grande mole di dati di elevata qualità per tarare gli stessi, potrebbero condurre a risultati differenti. Tuttavia, il gran numero di sezioni analizzate in condizioni pseudostatiche che forniscono coefficienti di sicurezza prossimi od inferiori all'unità deve indurre a considerare seriamente l'aspetto relativo alla stabilità delle

scarpate, sia subaeree che subacquee, eventualmente ripensando l'impianto fondazionale dell'opera stessa. A nostro avviso, anche spostando di qualche centinaio di metri l'impronta a terra sul versante calabrese, infatti, non produrrebbe significativi effetti positivi per la stabilità, in quanto è praticamente tutta l'area in esame ad essere interessata dai succitati fenomeni, come, peraltro, evidenziato dalle numerose rotture (trenches) ivi presenti, riconducibili ad episodi sismici relativamente recenti. Inoltre, sebbene la struttura sia stata calcolata nel rispetto di tutte le prescrizioni vigenti e nell'ipotesi di sismi caratterizzati da accelerazioni al suolo particolarmente severe (fino a 0.58g), un eventuale, anzi probabile, meccanismo di instabilità che dovesse coinvolgere il versante su cui insiste la "torre" lato Calabria produrrebbe una sollecitazione di tipo impulsivo sulla struttura con serissime conseguenze sulla stabilità strutturale.

Bibliografia

- Alonso M. L., Bottari A., Caruso V. & Godano C., 1993. Frequency Dependence of Site Amplification Factor in the Messina Strait Area. *Pageoph*, vol. 140, 3, 415-426.
- Antonoli F., Sylos Labini S. e Ferranti L., 2002. Il Ponte sullo Stretto: problematiche geologiche. *Energia, Ambiente e Innovazione*, ENEA, 1, 63-67, Roma.
- Anzidei M., Baldi P., Casula G., Galvani A., Mantovani A., Pesci A., Riguzzi A., Serpelloni E., 2001. Insights into present-day crustal motion in the central Mediterranean area from GPS surveys. *Geophys. L. Int.*, 146, 98-110.
- Baratta M., 1910. La catastrofe sismica Calabro-Messinese (28 dicembre 1908). *Rel. Soc. Geogr.* It., 496.
- Bordoni, P. & Valensise G., 1998. Deformation of the 125 ka marine terrace in Italy: tectonic implications. In: I. Stewart e C. Vita Finzi (eds), *Late Quaternary coastal tectonics*, Geological Society Special Publications, 46, 71-110.
- Cornell C. A., 1968. Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 58, 1583-1606.
- Cotecchia V., Guerricchio A., Melidoro G., 1986. The geomorphogenetic crisis triggered by the 1783 earthquake in Calabria (southern Italy). *Int. Symp. on Eng. Geol. Probl. in Seismic Areas*, 6, 245-304, Bari.
- Ghisetti F., 1992. Recent deformations and the seismogenetic source in the Messina Strait (Southern Italy). *Int. Symp. on Eng. Probl. in Seism. Areas*, 6, 245-304, Bari.
- Guerricchio A. e Melidoro G., 1981. Movimenti di massa pseudo-tettonici nell'Appennino dell'Italia meridionale. *Geol. Appl. e Idrogeol.*, XVI, 251-284, Bari.
- Guerricchio A., 1988. Aspetti geologici sull'erosione dei litorali e loro influenza nel campo applicativo. *Geol. Appl. e Idrogeol.*, XVIII, 29-78, Bari.
- Guerricchio A. & Ronconi M. L., 1997. The geomorphic modifications produced by the 1783 Calabrian Earthquake on the coastal slope of San Lucido (Tyrrhenian Calabria). *Geol. Appl. e*

- Idrogeol., XXXII, 99-120, Bari.
- Guerricchio A., Biamonte V., Mastromattei R., Ponte M., Simeone V., e Zimmaro S., 2000. Deformazioni gravitative profonde nel territorio di Rosarno (RC) indotte da fenomeni di liquefazione delle sabbie dal terremoto delle Calabrie del 1783. Atti 21° Corso in: Tecniche per la Difesa dall'Inquinamento, 529-550, Guardia Piemontese Terme (CS).
- Guerricchio A. & Zimmaro S., 2000. Il monitoraggio satellitare GPS di elevata precisione applicato alle deformazioni gravitative: i casi di Verbicaro e S. Lucido (Cosenza, Calabria tirrenica). X Congresso Nazionale dei Geologi, International Conference, 39-53, Roma.
- Guerricchio A., 2000. La fragilità del territorio dell'Italia centro-meridionale desumibile da immagini da satellite. X Congresso Nazionale dei Geologi, 443-482, Roma.
- Guerricchio A., 2001. DGPV, grandi frane e loro influenza sulle condizioni di stabilità di abitati, infrastrutture e sull'erosione dei litorali. Atti del 3° Congresso Regionale dell'Ordine dei Geologi di Sicilia, 1-35, Agrigento.
- Guerricchio A., 2005. Problematiche geologiche di stabilità per il Ponte sullo Stretto di Messina. *L'Architetto Italiano*, 8, 26-29, Roma.
- Hirn, A., Nicolich, R., Gallart, J., Laigle, M., Cernobori, L., ETNASEIS Scientific Group, 1997. Roots of Etna volcano in faults of great earthquakes. *Earth and Planetary Science Letters*, 148, 171-191.
- Mercalli G., 1897. I terremoti della Calabria meridionale e del Messinese. Monografia sismica regionale. Mem. Soc. Geol. Delle Scienze, detta dei XL, 3, 21.
- Miyauchi T., Dai Pra' G. & Sylos Labini S., 1994. Geochronology of Pleistocene marine terraces and regional tectonics in the Tyrrhenian coast of South Calabria, Italy. *Il Quaternario*, 7 (1), 13-34.
- Oldow J.S., Ferranti L., Lewis D.S., Campbell J.K., D'Argenio B., Catalano R., Pappone G., Carmignani L., Conti P. & Aiken C.I.V., 2002. Active fragmentation of Adria based on global positioning system velocities and regional seismicity. *Geology*.
- Sarconi M., 1784. Osservazioni fatte nelle Calabrie e nella frontiera di Valdemone sui fenomeni del tremuoto del 1783 e sulla geografia fisica di quelle regioni. R. Acc. Sc. E delle Belle Lett., Napoli.
- Valensise G., & Pantosti D., 1992. A 125 kyr-long geological record of seismic source repeatability: the Messina Straits (southern Italy) and the 1980 earthquake (Ms 7½). *Terra Nova*, 4, 472-483.
- Vivenzio G., 1783. Istoria e teoria de' tremuoti ed in particolare di quelli avvenuti nella Provincia della Calabria Ulteriore e nella città di Messina nell'anno 1783. e di quanto nella Calabria fu fatto per lo suo risorgimento fino al 1787. Preceduta da una teoria ed istoria generale dei tremuoti. II Edizione, Stamperia Reale, 2 vol., Napoli.