L'attraversamento stabile dello stretto di Messina. Elementi di riflessione per la progettazione del ponte a più campate

The stable crossing of the Strait of Messina. Elements of reflection for the design of the multi-span bridge

Giovanni SACCÀ [(*)]

Sommario - Il 27 agosto 2020 il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT) ha nominato un Gruppo di Lavoro (GdL) composto da professionalità di alto profilo tecnico-istituzionale al fine di fornire gli elementi per le valutazioni sulle possibili alternative per l'attraversamento stabile dello stretto di Messina. Nella relazione, consegnata al Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili (MIMS ex MIT) il 30/04/2021, il GdL dichiara che "la soluzione aerea a più campate sia potenzialmente più conveniente di quella a campata unica" e suggerisce di sviluppare la prima fase del Progetto di Fattibilità limitando il confronto ai due sistemi di attraversamento con ponte a campata unica e ponte a più campate.

Il presente articolo, condividendo i contenuti della relazione del GdL del MIMS e nel rispetto del principio dei progressi continui e graduali, vuole evidenziare, con numerosi riferimenti bibliografici, alcuni aspetti che potrebbero essere tenuti in considerazione nella prima fase del Progetto di Fattibilità.

1. Introduzione

L'ANAS bandì nel 1969 un Concorso internazionale di idee per un collegamento stabile viario e ferroviario tra la Sicilia ed il continente. Furono presentati ben 154 studi, 85 dei quali furono accettati dalla Commissione Internazionale Giudicatrice. Di questi ultimi, 45 proponevano una soluzione con ponte, 19 con tunnel e 21 con ponti galleggianti, istmi, dighe o altro. La commissione giudicatrice, composta da docenti universitari ed esperti italiani e stranieri, il 25 novembre 1970 assegnava 6 primi premi e 6 secondi premi *ex aequo* (Tab. 1).

Soffermiamo la nostra attenzione sulla proposta di ponte sospeso a campata unica del Gruppo Musmeci (tra i vincitori *ex aequo* del primo premio) e su quella dello

(*) Preside CIFI della Sezione di Verona e Responsabile del Settore Studi Trasporti Ferroviari del CAFI, iscritto all'Ord. degli Ingegneri di Verona.

Summary *- On 27 August 2020 the Ministry of Infrastructure and Transport (MIT) appointed a Working Group (WG) composed of high-profile technical-institutional professionals to provide the elements for assessments on possible alternatives for the stable crossing of the Strait of Messina. In the report, delivered to the Ministry of Sustainable Infrastructures and Mobility (MIMS, ex MIT) on 30 April 2021, the WG declares that "the multi-span aerial solution is potentially cheaper than the single span one" and suggests developing the first phase of the Feasibility Project by limiting the comparison to the two crossing systems with single-span bridge and multi-span bridge.*

This article, sharing the views of the MIMS WG report and in compliance with the principle of continuous and gradual progress, aims to highlight, with numerous bibliographic references, some aspects that could be taken into consideration in the first phase of the Feasibility Project.

1. Introduction

ANAS S.p.A. (The Italian National Autonomous Road Corporation) announced in 1969 an international competition of ideas for a stable road and rail link between Sicily and the continent. 154 studies were presented, 85 of which were accepted by the International Judging Commission. Of the latter, 45 proposed a solution with a bridge, 19 with tunnels and 21 with floating bridges, isthmuses, dams or other. The jury, made of university professors and Italian and foreign experts, on 25 November 1970 awarded 6 first prizes and 6 second prizes ex aequo *(Tab. 1).*

We focus our attention on the Musmeci Group's single-span suspension bridge proposal (among the ex aequo winners of the first prize) and on that of Studio Nervi (among the ex aequo winners of the second prize).

(*) Dean of CIFI of the Verona Section and Head of the Railway Transport Studies Sector of the CAFI, enrolled in the Verona's Board of Engineers.

Tabella 1 – *Table 1*

Elenco dei 12 progetti premiati nel 1970 [1]
List of 12 projects awarded in 1970 [1]

Tipologia progetti premiati nel 1970 ***Type of project sawarded in 1970***	**N. progetti** ***N. projects***	**Vincitori** ***ex aequo*** **1° premio Ex aequo** ***winners[1st] prize***	**Dimensioni campate (m)** ***Span dimensions (m)***	**Vincitori** ***ex aequo*** **2° premio Ex aequo** ***winners[2nd] prize***	**Dimensioni campate (m)** ***Span dimensions (m)***
Ponte sospeso ad 1 campata *1-span suspension bridge*	2	Gruppo Musmeci	3000	Studio Nervi	3000
Ponte strallato a 3 campate *Cable-stayed bridge with 3 spans*	1	Gruppo Lambertini	540+1300+540	–	–
Ponte sospeso a 3 campate *Suspension bridge with 3 spans*	3	Gruppo Ponte Messina S.p.A.	770+1600+770	Colleviastreme 384	650+1300+650
				Zancle 80	750+1500+750
Ponte sospeso a 4 campate *Suspension bridge with 4 spans*	2	Montuori con Calini e Pavlo	465+1360+1360 +465	Gruppo Samonà	700+1830 +1830+700
Ponte sospeso a 5 campate *Suspension bridge with 5 spans*	1	Technital S.p.a.	500+1000+1000 +500	–	–
Tunnel a mezz'acqua (in alveo) *Submerged Floating Tunnel (SFT)*	1	Alan Grant	–	–	–
Tunnel incassato sul fondo su diga sottomarina *Tunnel embedded in the bottom on a submarine dam*	1	–	–	Parson Brinckeroff, Quadre and Douglas	–
Tunnel sottomarino *Subsea tunnel*	1	–	–	Costruzioni Umberto Girola S.p.A.	–

Studio Nervi (tra i vincitori *ex aequo* del secondo premio).

È interessante leggere una dichiarazione dell'Ing. S. Musmeci rilasciata subito dopo le premiazioni [2]:

"La realizzazione dell'attraversamento viario e ferroviario dello Stretto di Messina può divenire un problema di opere marittime, oppure, alternativamente, un problema di grande luce libera (3.000 m). Questa proposta nasce dalla convinzione che il secondo problema consente soluzioni più controllabili tecnicamente e quindi più economiche, in quanto svincolate dalle molte incognite poste da ogni eventuale opera in mare: forti correnti, fondali profondi e instabili, oltre che poco conosciuti dal punto di vista geotecnico. Tutti problemi acuiti dalla forte sismicità della zona. Omissis …

Il ponte che si propone (del Gruppo Musmeci) è in tensostruttura; la presenza di cavi traenti lo stabilizza molto efficacemente nei riguardi del vento e delle azioni sismiche (Fig. 1). Gli studi e le esperienze già acquisiti per questo tipo di strutture assicurano la fattibilità tecnica ed economica dell'opera."

It is interesting to read a statement by Eng. S. Musmeci released immediately after the awards [2]:

"The realization of the road and rail crossing of the Strait of Messina can become a problem of maritime works, or, alternatively, a problem of great free span (3,000 m). This proposal stems from the belief that the second problem allows solutions that are more technically controllable and therefore cheaper, as they are free from the many unknowns posed by any possible work at sea: strong currents, deep and unstable bottoms, as well as little known from a geotechnical point of view. All problems exacerbated by the strong seismicity of the area. [Omitted]...

The proposed bridge (of the Musmeci Group) is in tensile structure; the presence of pulling cables stabilizes it very effectively regarding wind and seismic actions (Fig. 1). The studies and experiences already acquired for this type of structure ensure the technical and economic feasibility of the work. "

Eng. P.L. Nervi [3] stated:

L'Ing. P.L. NERVI [3] affermava:

"Ogni mio sforzo è stato diretto ad eliminare quello che si è manifestato essere il vero punto debole dei grandi ponti sospesi, ossia la scarsa stabilità laterale degli impalcati nei riguardi delle azioni orizzontali indotte dal vento. Il rapporto tra la larghezza dell'impalcato e la sua lunghezza è già prossimo ad un valore limite nei maggiori ponti sospesi realizzati; nel caso presente sarebbe stato molto al di sotto di tale valore, sicché lo schema tradizionale di ponte sospeso con funi parallele doveva essere necessariamente abbandonato. Riflettendo sul problema di una intrinseca stabilità trasversale dei cavi e per conseguenza dell'interno dell'impalcato, mi convinsi che tale stabilità sarebbe stata ottenuta in modo del tutto spontaneo qualora i due cavi anziché paralleli fossero stati disposti in modo da formare delle curve sghembe, con un andamento parabolico sia nella proiezione verticale sia nella proiezione orizzontale. Per ottenere questo è indispensabile che i sostegni delle funi ad ognuna delle due estremità siano sensibilmente distanziati tra loro, salvo a solidarizzare cavi e impalcati nelle sezioni di mezzeria" (Fig. 2).

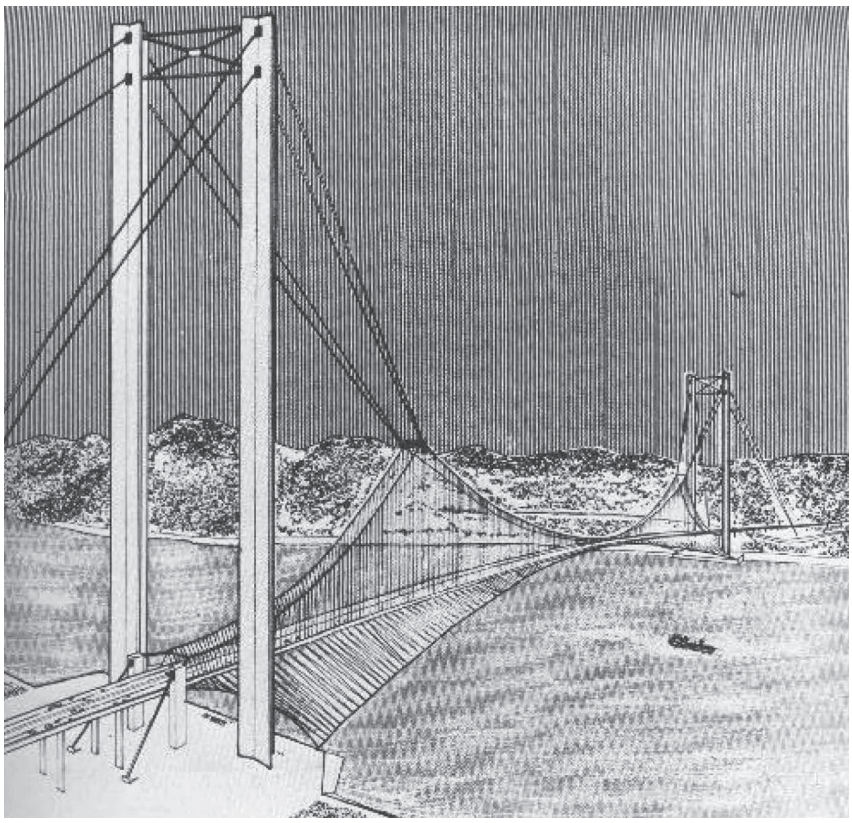


Figura 1 – La soluzione proposta dall'Ing. S. MUSMECI [2].
Figure 1 – The solution proposed by Eng. S. MUSMECI [2].

Tutti gli altri progetti di ponti premiati prevedevano la realizzazione di piloni in mare con 3, 4 e 5 campate.

A seguito dei risultati del "Concorso internazionale d'idee" fu approvata la legge n. 1158/1971 che disciplina il collegamento stabile viario e ferroviario fra la Sicilia e il Continente [4] e nel 1981, in attuazione a tale legge, fu costituita la Società Stretto di Messina (SdM) [5] che, dopo aver esaminato negli anni Ottanta tutte le alternative premiate nel 1970, decise di progettare un ponte a campata unica da 3300 m, con funi parallele, ovvero privo sia delle funi di stabilizzazione orizzontali previste nel progetto del Gruppo Musmeci sia dei cavi con andamento parabolico sulla proiezione verticale e sulla proiezione orizzontale previsto nel progetto dello Studio Nervi.

Un'infrastruttura stradale e ferroviaria che non aveva e a tutt'oggi non ha alcun termine di paragone realizzato o in via di realizzazione.

Tale soluzione era stata discussa pubblicamente per la prima volta du-

"All my efforts have been aimed at eliminating what turned out to be the real weak point of the large suspension bridges, that is the poor lateral stability of the decks regarding the horizontal actions induced by the wind. The ratio between the width of the deck and its length is already close to a limit value in the major suspension bridges built; in the

Figura 2 – La soluzione proposta dall'Ing. P.L. NERVI [3].
Figure 2 – The solution proposed by Eng. P.L. NERVI [3].

rante un importante convegno tenutosi a Roma, dal 4-6 luglio 1978 su «L'attraversamento dello Stretto di Messina e la sua fattibilità» organizzato dall'Accademia Nazionale dei Lincei [38] insieme al Gruppo Ponte di Messina (GPM). Anche la rivista Ingegneria Ferroviaria (luglio/agosto 1979) ne diede notizia con il lungo articolo del Dott. Ing. G. Angeleri "La Sicilia è destinata a rimanere isola?" e con l'articolo di approfondimento "Il ponte sullo Stretto di Messina" (aprile 1980) di autori vari.

2. Gli studi della Società Stretto di Messina sui ponti a più campate

La Società Stretto di Messina (SdM) negli anni Ottanta studiò la possibilità di realizzare ponti a una o a due campate (Fig. 3). Le direttrici indicate in nero si riferiscono alle soluzioni scartate per prime, le direttrici indicate in rosso si riferiscono ai ponti selezionati per la scelta finale (Fonte: Fig. 7.2 pag. 241 del libro *"The Messina Strait Bridge"* del 2009 [1]).

present case it would have been far below this value, so that the traditional scheme of a suspension bridge with parallel ropes had to be necessarily abandoned. Reflecting on the problem of an intrinsic transversal stability of the cables and consequently of the interior of the deck, I was convinced that this stability would have been obtained in a completely spontaneous way if the two cables instead of parallel had been arranged in such a way as to form skewed curves, with a parabolic trend both in the vertical and horizontal projection. To achieve this, it is essential that the supports of the ropes at each of the two ends are significantly spaced apart, except for joining cables and decks in the middle sections." (Fig. 2).

All the other award-winning bridge projects involved the construction of pylons in the sea with 3, 4 and 5 spans.

Following the results of the "International competition of ideas", Law no. 1158/1971 which governs the stable road and rail link between Sicily and the Continent [4] and in 1981, in implementation of this law, the Società Stretto di

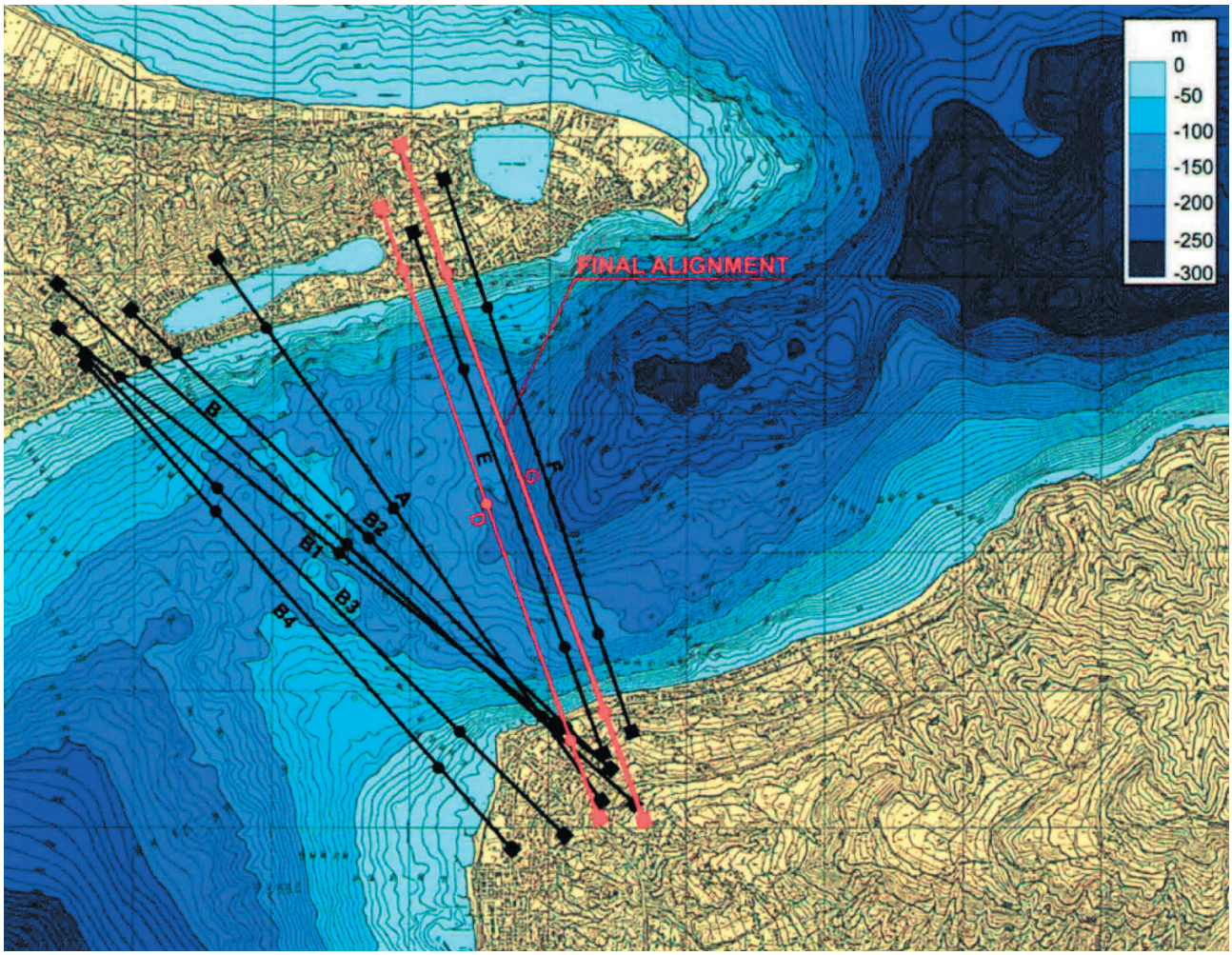


Figura 3 – Localizzazione dei ponti sospesi a una e a due campate studiati dalla SdM negli anni '80 [1].
Figure 3 – Location of the suspension bridges with one and two spans studied by the SdM in the 80's [1].

Nel biennio 1986-1988 vennero confrontate le alternative a due campate (Fig. 4) e a campata singola con la seconda preferita, ma con la prima più vicina all'esperienza esistente. Per entrambi sono stati preparati progetti preliminari, esaminando in modo approfondito i problemi di costruzione e di costo. Anche la rivista Ingegneria Ferroviaria, marzo 1989, diede notizia degli studi di quegli anni con l'articolo del Prof. C. Gavarini "Soluzioni tecniche per l'attraversamento dello Stretto di Messina".

A seguito di apposite consulenze commissionate agli inizi degli anni Novanta, la SdM, come riportato a pag. 40 del libro sopra citato [1], concluse che non erano realizzabili piloni in mare nello stretto di Messina *"Why an offshore foundation in the Strait is unfeasible"*. Il paragrafo del libro fa riferimento alle fondazioni del pilone centrale del ponte sospeso a due campate posto in un luogo dove la profondità del mare è compresa tra 146 e 157 m (FINAL ALIGNMENT "D" punto centrale linea rossa di Fig. 3) e il terreno è in pendenza (Fig. 4). Inoltre, dopo aver descritto sommariamente le caratteristiche del fondale, nel testo della SdM [1] viene precisato che in tali condizioni "non è possibile realizzare una fondazione superficiale appoggiata direttamente sul fondale, in quanto lo spessore dello strato di conglomerato è tutt'altro che sufficiente. Sarebbe invece necessario sfondare il conglomerato, asportare parte delle sabbie e ghiaie sottostanti e predisporre una piattaforma piana di circa 34000 m², eventualmente trattando il terreno localmente, e formando un letto di elementi regolari lapidei/rocciosi. Tutto questo dovrebbe essere fatto alla suddetta profondità dell'acqua, combinata con forti correnti che cambiano direzione ogni sei ore.

Le attrezzature e le tecnologie esistenti nei primi anni Novanta erano assolutamente inadeguate a tale compito (e con riferimento all'allineamento progettuale, le stesse perplessità sussistono oggi). Lo sviluppo di speciali apparecchiature telecomandate in grado di approntare la piattaforma di fondazione non è impensabile, ma sarebbe di per sé un compito enorme, con radicali incertezze in termini di tempi, costi ed efficacia dei risultati, e ciò andrebbe effettuato prima di definire un bando di gara disegno e costo. Sfide simili si applicherebbero ai problemi di costruzione del molo stesso. Tutte le diverse soluzioni studiate, basate principalmente su procedure di prefabbricazione tratte dall'esperienza del Mare del Nord con piattaforme petrolifere, hanno mostrato una serie di problemi, non ultimo la precisione del corretto posizionamento per affondamento della struttura.

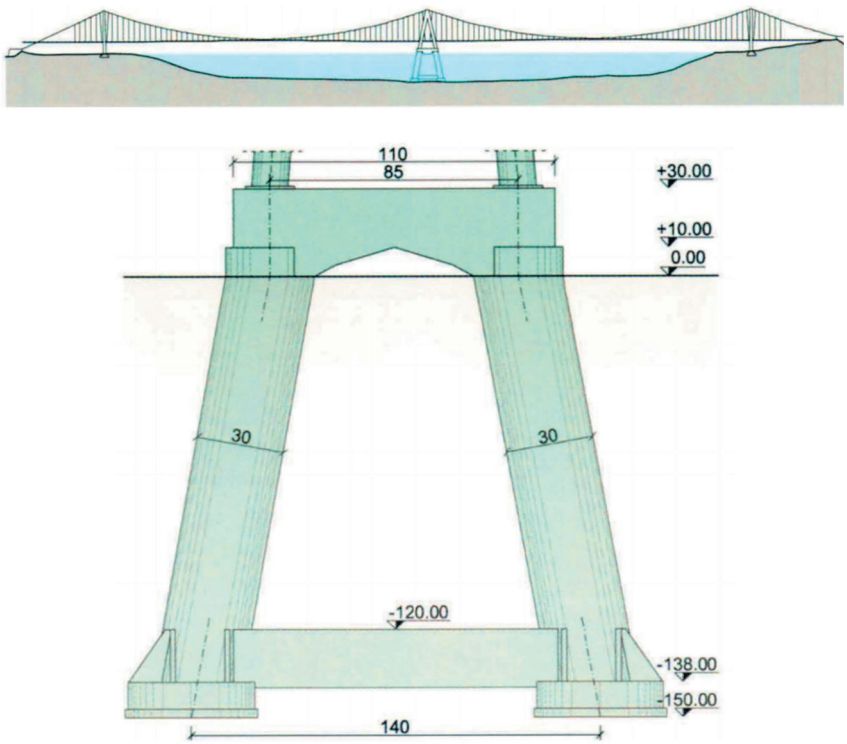


Figura 4 – Ponte a due campate da 1750 m e pilone centrale studiati dalla SdM [1].

Figure 4 – Bridge with two 1750 m spans and central pylon studied by SdM [1].

Messina (SdM) [5] was established which, after having examined over the Eighties all the alternatives awarded in 1970, he decided to design a 3300 m single-span bridge, with parallel ropes, i.e. without both the horizontal stabilization ropes envisaged in the Musmeci Group project and the cables with parabolic progression on the vertical projection and on the projection horizontal foreseen in the project of Studio Nervi.

A road and railway infrastructure that did not have and to date has no term of comparison made or under construction.

This solution had been publicly discussed for the first time during an important conference held in Rome from 4-6 July 1978 on "The crossing of the Strait of Messina and its feasibility" organized by the Accademia Nazionale dei Lincei [38] together with the Ponte di Messina Group (GPM). Even the magazine Ingegneria Ferroviaria (July / August 1979) gave news of it with the long article by Dr. Eng. G. Angeleri "Is Sicily destined to remain an island?" and with the in-depth article "The bridge over the Strait of Messina" (April 1980) by various authors.

2. Studies of the Strait of Messina Society on multi-span bridges

The Strait of Messina Society (SdM) in the 80's studied the possibility of building bridges with one or two spans

Anche se tutte le difficoltà di montaggio fossero superate, la robustezza strutturale della fondazione nelle condizioni sismiche richieste sarebbe discutibile, a causa degli effetti diretti e dell'interazione suolo-acqua-struttura.

In tali circostanze un progetto preliminare affidabile per il molo *off-shore* intermedio non è stato ritenuto fattibile, con il problema da riconsiderare solo se la soluzione a campata unica si dovesse rivelare un vicolo cieco".

3. Il ponte a campata unica da 3300 m

Le principali dimensioni dell'opera di attraversamento secondo il progetto definitivo del 2010 sono riportate nella Tab. 2. La Fig. 5 e la Fig. 6 rappresentano rispettivamente la sezione longitudinale dell'opera e dell'impalcato. I collegamenti ferroviari e stradali del ponte sono indicati in Fig. 7.

Gli elaborati del "Progetto dell'attraversamento stabile dello Stretto di Messina e collegamenti stradali e ferroviari sui versanti Calabria e Sicilia" (Progetto Definitivo) sono pubblicati sul sito del Ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio e del mare [7]. Per notizie ufficiali

(Fig. 3). The lines indicated in black refer to the solutions rejected first, the lines indicated in red refer to the bridges selected for the final choice (Source: Fig. 7.2 page 241 of the book "The Messina Strait Bridge" *[1]).*

In the two-year period 1986-1988 the alternatives with two spans (Fig. 4) and single span were compared with the second preferred but with the first closest to the existing experience. Preliminary designs were prepared for both, examining in depth construction and cost issues. The magazine Ingegneria Ferroviaria, March 1989, also reported on the studies of those years with the article by Prof. C. GAVARINI *"Technical solutions for crossing the Strait of Messina".*

Following specific consultancy commissioned in the early nineties, the SdM, as reported on page 40 of the book [1], concluded that pylons at sea in the Strait of Messina were not feasible. The paragraph of the book "Why an offshore foundation in the Strait is unfeasible" *refers to the foundations of the central pylon of the two-span suspension bridge placed in a place where the depth of the sea is between 146 and 157 m (FINAL ALIGNMENT "D" central point red line in Fig. 3) (Fig. 4). Furthermore, after having briefly described the characteristics of the seabed, the text of the SdM*

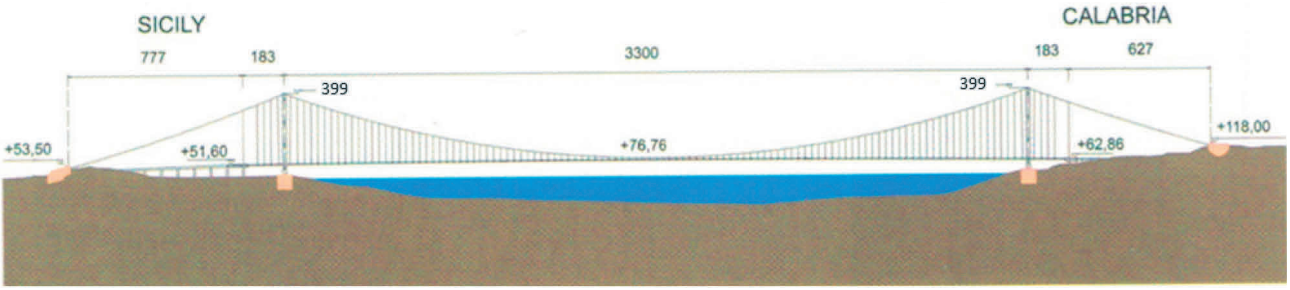


Figura 5 – Sezione longitudinale del ponte progettato dalla Società Stretto di Messina [7].
Figure 5 – Longitudinal section of the bridge designed by the Strait of Messina [7].

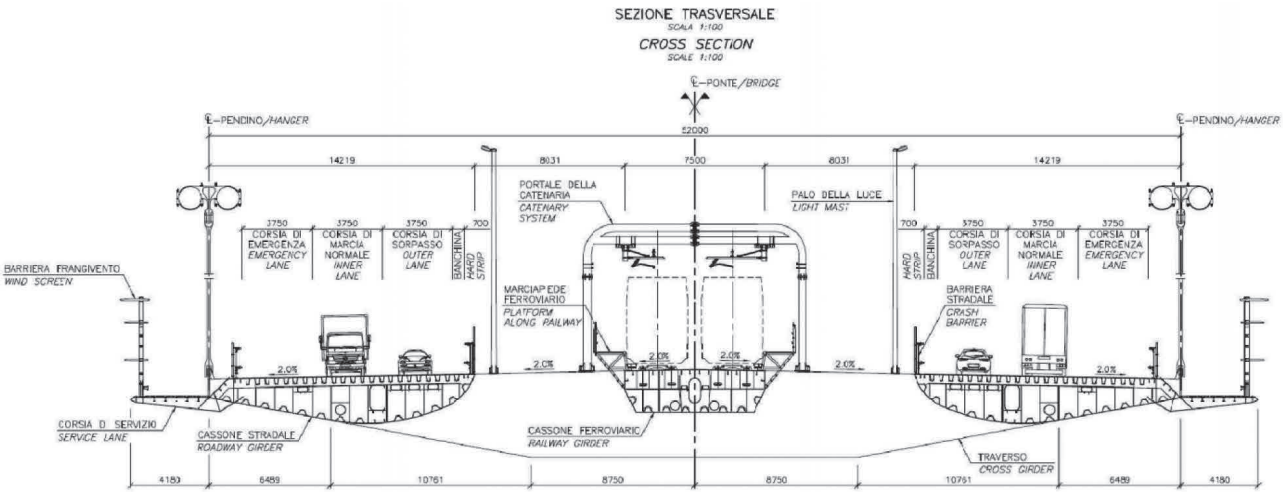


Figura 6 – Sezione di impalcato del ponte - Progetto Definitivo 2010 [6].
Figure 6 – Bridge deck section - Definitive Project 2010 [6].

Tabella 2 – *Table 2*

Principali dimensioni dell'opera di attraversamento a campata unica [7]
Main dimensions of the single-span bridge [7]

Principali dimensioni del Ponte a campata unica ***Main dimensions of the single-span bridge***	
Lunghezza della campata centrale *Length of the central span*	3300 m
Lunghezza complessiva con campate laterali *Overall length with side spans*	3666 m
Larghezza dell'impalcato *Deck width*	60,4 m
Altezza della sezione trasversale dell'impalcato *Height of the cross section of the deck*	2,5 m
Altezza delle torri *Height of the towers*	399 m
Cavi nel sistema di sospensione *Cables in the suspension system*	4
Lunghezza dei cavi di sospensione *Length of suspension cables*	5290 m
Diametro dei 4 cavi di sospensione *Diameter of the 4 suspension cables*	1,274 m
Altezza del canale navigabile *Height of the waterway*	76 m
Franco minimo in corrispondenza del canale navigabile *Minimum clearance in correspondence of the navigable channel*	65,4 m
Larghezza canale navigabile centrale *Central waterway width*	600 m
Altezza per ciascuno dei canali navigabili laterali *Height for each of the lateral waterways*	50 m
Larghezza per ciascuno dei canali navigabili laterali *Width for each of the side waterways*	1000 m
Indice di snellezza dell'impalcato (altezza della sezione trasversale dell'impalcato / lunghezza campata) *Deck slenderness index (height of the cross section of the deck / span length)*	1/1320

sull'enorme mole di lavoro svolto dai primi anni Settanta sino al 2009, la Società Stretto di Messina ha pubblicato il libro *"The Messina Strait Bridge: A challenge and a dream"* Ed. CRC Press 2010 [1].

Sul più grande Database internazionale online di ingegneria strutturale e civile *(International Database and Gallery of Structures)* alla voce *"Messina Straits Bridge", unrealized project*, viene tra l'altro messa in rilievo la principale criticità del ponte a campata unica da 3300 m "Il problema più grande nella progettazione del ponte è la stabilità aerodinamica dell'impalcato sotto l'azione del vento, così come dell'attività sismica"[8].

[1] specifies that in such conditions "it is not possible to have a superficial foundation resting directly on the seabed, as the thickness of the conglomerate layer is far from sufficient. It would on the contrary be necessary to break through the conglomerate, remove part of the underlying sands and gravels and prepare an even platform of about 34000 m², possibly treating the soil locally, and forming a bed of regular stone/rock elements. All this would have to be done at the said water depth, combined with strong currents which change direction every six hours.

The equipment and technologies existing in the early nineties were absolutely inadequate for such a task (and with reference to the design alignment, the same perplexities exist today). The development of special remotely controlled equipment able to prepare the foundation platform is not unthinkable, but it would be a tremendous task in itself, with radical uncertainties in time, cost and outcome effectiveness, and this would need to be carried out before defining a tender design and cost. Similar challenges would apply to the problems of construct- ing the pier itself. All the several solutions studied, mainly based on prefabrication procedures drawn from North Sea experience with oil platforms, showed a number of problems, not least the touch down accuracy.

Even if all the erection difficulties were overcome, the structural robustness of the foundation under the required seismic conditions would be questionable, due to the direct and soil-water-structure interaction effects.

Under such circumstances a reliable preliminary design for the inter mediate offshore *pier was considered not feasible, with the issue to be re-considered only if the single span solution proved to be a dead end".*

3. The 3300 m single span bridge

The main dimensions of the crossing work according to the final design of 2010 are shown in Tab. 2. Fig. 5 and Fig. 6 respectively represent the longitudinal section of the work and the deck. The railway and road connections of the bridge are shown in the Fig. 7.

The documents of the "Project for the stable crossing of the Strait of Messina and road and rail links on the Calabria

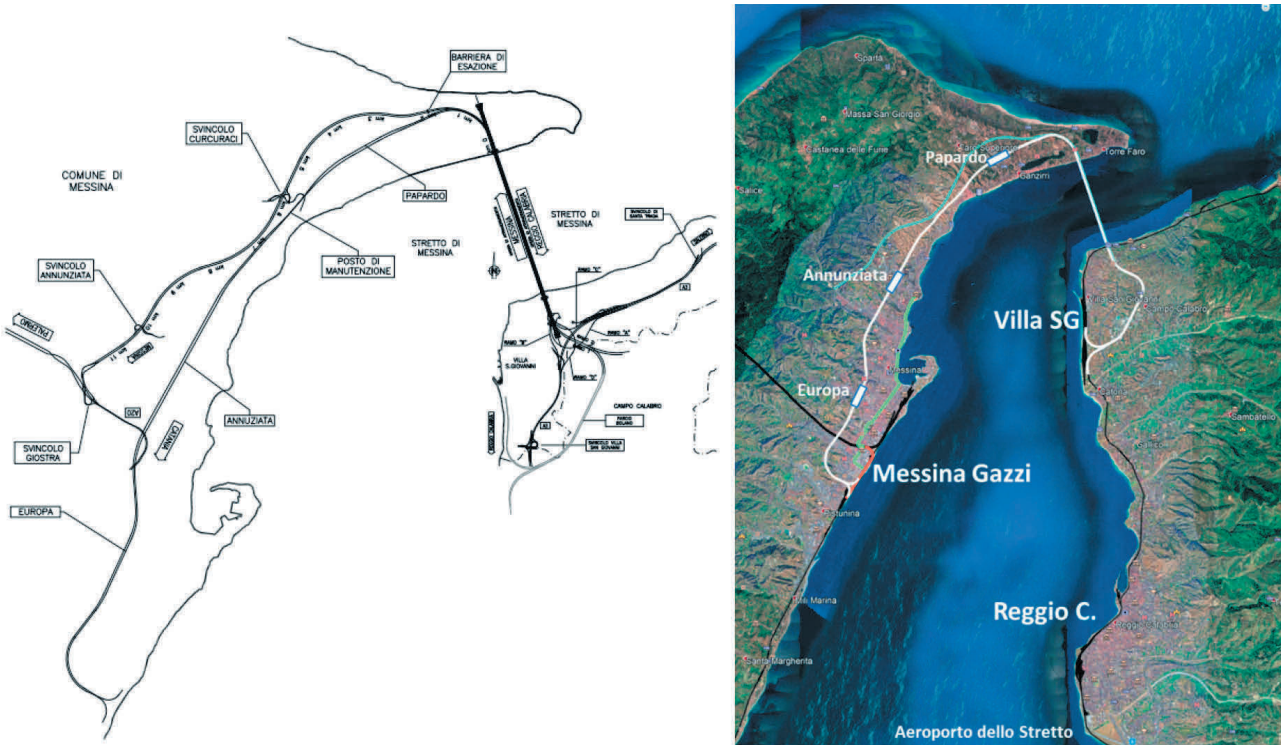


Figura 7 – Collegamenti ferroviari e stradali del ponte a campata unica 3300 m [7]. Ferrovia da Contesse (ME) a Concessa (RC) con fermata Europa e stazioni Annunziata e Papardo, autostrada dallo svincolo Giostra (ME) allo svincolo Piale (RC) con svincoli intermedi Annunziata e Curcuraci.

Figure 7 – Rail and road connections of the single-span bridge 3300 m [7]. Railway from Contesse (ME) to Concessa (RC) with Europa stop and Annunziata and Papardo stations, motorway from the Giostra (ME) junction to the Piale (RC) junction with intermediate Annunziata and Curcuraci junctions.

4. Le recenti decisioni

Come riportato nella scheda n.65 "Ponte sullo Stretto di Messina", del Sistema Informativo Legge Opere Strategiche (SILOS) della Camera dei Deputati: [9]

- il 1° marzo 2013 la Società Stretto di Messina è stata messa in liquidazione e sono stati caducati tutti gli atti da essa sottoscritti con DPCM 15/04/2013 [10];
- nei DEF-Allegato infrastrutture, a partire dal 2017 è stato previsto di "effettuare studi di fattibilità finalizzati a verificare le possibili opzioni di attraversamento sia stabili che non stabili".

Il 27 agosto 2020 con Determina del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - STM n. 2620 viene istituito un Gruppo di Lavoro (GdL) composto da professionalità di alto profilo tecnico-istituzionale al fine di fornire gli elementi per le valutazioni a supporto delle decisioni politiche. Il GdL sulla base degli indirizzi del Ministro P. De Micheli, doveva "definire i contenuti del lavoro di confronto fra soluzioni alternative del sistema complessivo di attraversamento dello Stretto di Messina, intendendo i raccordi terrestri e l'opera di attraversamento dello Stretto propriamente detto integrati nel sistema di attraversamento, da sottoporre a dibattito pubblico, anche con rife-

and Sicily sides" (Definitive Project) are published on the website of the Ministry of the Environment and the protection of the territory and the sea [7]. For official information on the enormous amount of work carried out from the early seventies until 2009, the Messina Strait Society has published the book "The Messina Strait Bridge: A challenge and a dream" *Ed. CRC Press 2010 [1].*

On the largest online database of structural and civil engineering (International Database and Gallery of Structures) *under the heading* "Messina Straits Bridge", unrealized project, *highlights among other things, the main criticality of the 3300 m single-span bridge: "The greatest problem in designing the bridge is the aerodynamic stability of the deck under wind as well as seismic activity"[8].*

4. Recent decisions

As reported in card no. 65 "Bridge over the Strait of Messina", of the Information System Law for Strategic Works (SILOS) of the Chamber of Deputies: [9]

- *on 1 March 2013 the Società Stretto di Messina was put into liquidation and all the deeds signed by it with DPCM 15 April 2013 [10] were terminated;*

rimento alla contestualizzazione del quadro economico e infrastrutturale delle Regioni del Mezzogiorno nel collegamento tra la Sicilia e l'Europa" [11].

Il 7 maggio 2021 il Ministro delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, E. Giovannini, trasmette ai Presidenti del Senato della Repubblica e della Camera dei Deputati la relazione finale del Gruppo di Lavoro tecnico avviato dal precedente esecutivo per valutare gli eventuali sviluppi del progetto del sistema di attraversamento stabile dello Stretto di Messina [11]. Il documento analizza il contesto socioeconomico e trasportistico, il contesto fisico e ambientale, il processo decisionale per la scelta delle infrastrutture di trasporto, le alternative progettuali e il sistema dei collegamenti alle reti stradali e ferroviarie, le valutazioni preliminari ed approfondimenti necessari per i sistemi di attraversamento stabile dello Stretto di Messina.

La relazione finale del Gruppo di Lavoro del 30 aprile 2021, denominata "La valutazione di soluzioni alternative per il sistema di attraversamento stabile dello Stretto di Messina", esamina le seguenti alternative progettuali (Fig. 8):

- ponte sospeso a unica campata da 3300 m, progetto definitivo presentato dalla Società concessionaria Stretto di Messina S.p.A.;
- l'alternativa progettuale del ponte a più campate;
- l'alternativa progettuale del tunnel in alveo ovvero di un Tunnel Galleggiante Sommerso posizionato sotto il livello del mare e vincolato al fondale tramite sistemi di ancoraggio;
- l'alternativa progettuale del tunnel in subalveo / sottomarino (sotto al fondo del mare).

Il GdL, dopo l'esame delle possibili soluzioni, ritiene che "la soluzione aerea a più campate sia potenzialmente più conveniente di quella a campata unica. Il GdL ritiene di sconsigliare le soluzioni dei tunnel subalveo e in alveo soprattutto per l'elevato rischio sismico ad esse collegato e per la mole di indagini geologiche, geotecniche e fluidodinamiche necessarie per verificarne la fattibilità tecnica, ma anche per l'eccessiva lunghezza necessaria per il tunnel subalveo e la presumibile durata degli approfondimenti necessari per la nuova soluzione del tunnel in alveo, per la quale mancano riferimenti ed esperienze.

Tenuto conto della complessità e dello stato di conoscenza delle problematiche sismiche, geotecniche, geologiche, ambientali e meteo-marine ad esso relative, il GdL suggerisce di sviluppare la prima fase del progetto di fattibilità limitando il confronto ai due sistemi di attraversamento con ponte a campata unica e ponte a più campate, anche ipotizzando diverse soluzioni progettuali per i collega-

- *in the DEF-Annex infrastructures, starting from 2017 it was planned to "carry out feasibility studies aimed at verifying the possible stable and unstable crossing options".*

On 27 August 2020 with the Resolution of the Ministry of Infrastructure and Transport - STM n. 2620 a Working Group (WG) is set up made up of professionals with a high technical-institutional profile to provide the elements for evaluations to support political decisions. On the basis of the addresses of Minister P. De Micheli, the WG had to "define the contents of the work of comparison between alternative solutions of the overall system of crossing the Strait of Messina, meaning the land connections and the work of crossing the Strait properly called integrated in the crossing system, to be submitted to public debate, also with reference to the contextualization of the economic and infrastructural framework of the Southern Regions in the connection between Sicily and Europe "[11].

On May 7, 2021, the Minister of Sustainable Infrastructures and Mobility, E. Giovannini, transmits to the Presidents of the Senate of the Republic and the Chamber of Deputies the final report of the Technical Working Group initiated by the previous executive to evaluate any developments in the project of the stable crossing of the Strait of Messina [11]. The document analyzes the socio-economic and transport context, the physical and environmental context, the decision-making process for the choice of transport infrastructures, the design alternatives, and the system of connections to road and rail networks, the preliminary assessments and in-depth analyzes necessary for the stable crossing of the Strait of Messina.

The final report of the Working Group of 30 April 2021, entitled "The evaluation of alternative solutions for the stable crossing of the Strait of Messina", examines the following design alternatives (Fig. 8):

- *suspension bridge with a single span of 3300 m, final project presented by the concessionaire company Stretto di Messina S.p.A;*
- *the design alternative of the bridge with several spans;*

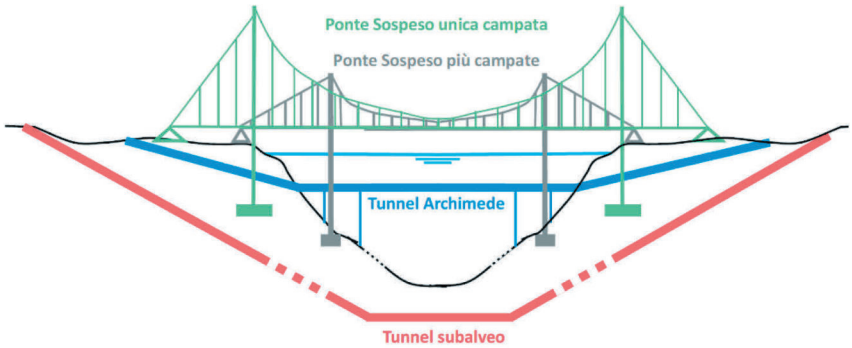


Figura 8 – Possibili soluzioni per l'attraversamento stabile dello stretto di Messina [11].
Figure 8 – Possible solutions for the stable crossing of the Strait of Messina [11].

menti a terra e, nel caso del ponte a più campate, per la localizzazione e la struttura. I confronti andranno effettuati rispetto alla soluzione di riferimento di attraversamento dinamico dello Stretto sulla base di scenari di domanda viaggiatori e merci, dei costi di realizzazione e gestione, degli impatti ambientali e socioeconomici, del livello di sicurezza complessiva, delle capacità di resilienza e rischio sismico dell'intero sistema di attraversamento, dei tempi di progettazione, approvazione, affidamento e realizzazione. Considerata poi la rilevanza, la durata attesa ed il costo dell'opera, l'attraversamento stabile dovrà essere progettato per sostenere indenne le accelerazioni ipotizzabili in area epicentrale in caso di terremoto.

Infine, la prima fase del progetto di fattibilità delle diverse soluzioni tecniche possibili dovrà essere sottoposta ad un successivo dibattito pubblico, come previsto dal D.lgs. n.50/2016 e successive integrazioni e dal DPCM n. 76/2018".

Il 4 agosto 2021 il Ministro Giovannini, in audizione presso le Commissioni riunite ambiente e trasporti della Camera dei Deputati [12][13], ha riferito di condividere le indicazioni del GdL di redigere il Progetto di Fattibilità tecnico economica suggerito per la prima fase. Per tale studio sono stati stanziati 50 milioni di euro già individuati con la Legge di Bilancio 2021.

Il Ministro ha affermato che la prima fase del Progetto di Fattibilità dovrebbe concludersi entro la primavera del 2022. A questa seguirà il Dibattito Pubblico per arrivare ad una scelta condivisa con i diversi portatori di interessi coinvolti.

Si tratta di verificare tutti gli aspetti suggeriti dal GdL, in primo luogo se ad oggi sia possibile contemporaneamente:

- risolvere le problematiche relative al comportamento aeroelastico del ponte sotto l'azione del vento al punto da garantire il servizio stradale e ferroviario 24h/24h 365gg/anno;
- progettare e realizzare piloni in mare nello stretto di Messina, così come ipotizzato dalla maggior parte dei progetti di ponti premiati nel 1970 e anche dalla SdM negli anni Ottanta, come sopra riferito;
- progettare un ponte stradale e ferroviario in grado di fare circolare su di esso i treni viaggiatori e merci nel rispetto delle Specifiche Tecniche di Interoperabilità europee ed in particolare treni merci lunghi 750m 2000t trainabili da una sola locomotiva, così come evidenziato nella Relazione ministeriale (1.2.5. Il deficit di accessibilità tra la Sicilia e la terraferma e 5.3. L'evoluzione delle normative nazionali ed europee sulla progettazione delle gallerie, dei ponti e dei viadotti [14]). È da tenere conto anche delle possibili evoluzioni delle normative europee dei prossimi decenni [15].

5. Grandi ponti stradali e ferroviari

Prendiamo in considerazione i più grandi ponti misti stradali e ferroviari oggi esistenti (Tab. 3 e Fig. 9).

- *the design alternative of the tunnel in the riverbed or a submerged floating tunnel positioned below sea level and bound to the seabed by anchoring systems;*
- *the design alternative of the sub-river / submarine tunnel (under the seabed).*

The WG, after examining the possible solutions, believes that "the multi-span aerial solution is potentially cheaper than the single span one. The WG deems it advises against the solutions of the tunnel under the riverbed and in the riverbed above all due to the high seismic risk connected to them and the amount of geological, geotechnical and fluid dynamics investigations necessary to verify their technical feasibility, but also for the excessive length necessary for the tunnel under the riverbed and the presumable duration of the investigations necessary for the new solution of the tunnel in the riverbed, for which references and experiences are lacking.

Considering the complexity and the state of knowledge of the seismic, geotechnical, geological, environmental and weather-marine problems related to it, the WG suggests developing the first phase of the feasibility project by limiting the comparison to the two span bridge crossing systems single and multi-span bridge, also assuming different design solutions for the ground connections and, in the case of the multi-span bridge, for the location and structure. Comparisons will be made with respect to the reference solution of dynamic crossing of the Strait on the basis of passenger and freight demand scenarios, construction and management costs, environmental and socio-economic impacts, overall safety level, resilience and seismic risk capabilities. of the entire crossing system, of the planning, approval, assignment, and implementation times. Considering then the relevance, the expected duration and the cost of the work, the stable crossing must be designed to sustain unscathed the hypothetical accelerations in the epicentral area in the event of an earthquake.

Finally, the first phase of the feasibility project of the various possible technical solutions will have to be subjected to a subsequent public debate, as required by Legislative Decree 50/2016 and subsequent additions and by the DPCM n. 76/2018".

On 4 August 2021, Minister Giovannini, in a hearing at the meeting of the environment and transport commissions of the Chamber of Deputies [12][13], reported that he shared the indications of the WG to draft the technical-economic feasibility project suggested for the first phase. For this study, 50 million euros have already been allocated, already identified with the 2021 Budget Law.

The Minister stated that the first phase of the Feasibility Project should be completed by the spring of 2022. This will be followed by the Public Debate to arrive at a shared choice with the various stakeholders involved.

It is a question of verifying all the aspects suggested by the WG, first whether it is currently possible at the same time:

Tabella 3 – *Table 3*

I 10 ponti misti stradali e ferroviari più grandi del mondo [16]
The 10 largest mixed road and rail bridges in the world [16]

	Ponti misti stradali e ferroviari ***Railroad (railway) bridges***	**Nazione** ***Country***	**Attivazione** ***Activation***	**Campata principale** ***Main span***	**Piani** ***Floors***	**Tipo di ponte** ***Structure***
1	Yavuz Sultan Selim Bridge (realizzato per essere misto, attualmente è solo stradale) *Yavuz Sultan Selim Bridge (made to be mixed, it is currently road only)*	Turchia *Turkey*	2016	1.408 m	1	*Suspension bridge with cable-stays*
2	Tsing Ma Bridge	Cina *China*	1997	1.377 m	2	*Suspension bridge*
3	Minami Bisan-Seto Bridge	Giappone *Japan*	1988	1.100 m	2	*Suspension bridge*
4	Hutong Yangtze River Bridge	Cina *China*	2020	1,092 m	2	*Cable-stayed bridge*
5	Tagus River Bridge	Portogallo *Portugal*	1966	1.013 m	2	*Suspension bridge*
6	Kita Bisan-Seto Bridge	Giappone *Japan*	1985	990 m	2	*Suspension bridge*
7	Shimotsui-Seto Bridge	Giappone *Japan*	1988	940 m	2	*Suspension bridge*
8	Ohnaruto Bridge	Giappone *Japan*	1985	876 m	2	*Suspension bridge*
9	Chongming North Bridge	Cina *China*	2009	730 m	2	*Cable-stayed bridge*
10	Queensferry Crossing	Regno Unito *United Kingdom*	2017	650 m	1	*Cable-stayed bridge*

Dalla tabella si nota che i ponti ferroviari a grande luce, realizzati dal 2000 in poi, sono di tipo strallato *(Cable-stayed bridge)*. In effetti, un ponte sospeso classico è piuttosto flessibile, non è facile da adattare ai carichi pesanti e concentrati di un treno. Quando il treno è a circa un quarto di campata, i cavi di sospensione si muovono verso il basso sotto il carico e verso l'alto sul lato opposto, con un'efficienza limitata producendo deviazioni molto grandi [17].

Utilizzando contemporaneamente il sistema ibrido a sospensione e stralli di irrigidimento vicino alle torri si ottengono minori flessioni delle campate sino a ridurle di un fattore compreso tra 3 e 4 (Fig. 10).

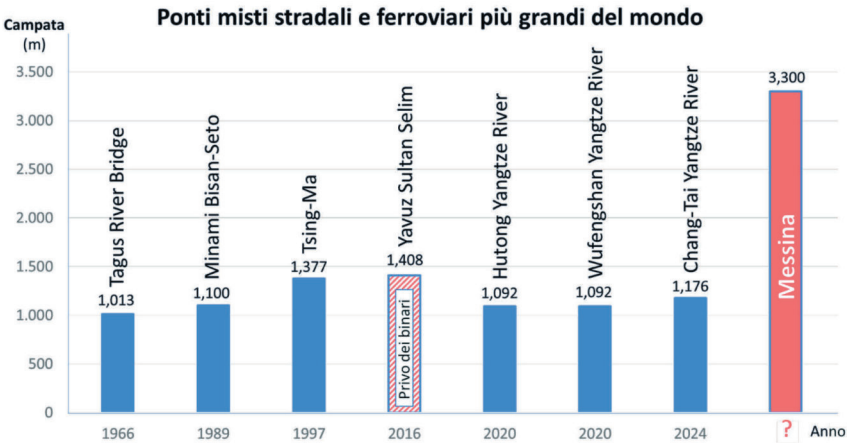


Figura 9 – Confronto tra le campate dei più grandi ponti misti stradali e ferroviari esistenti e del Ponte sullo stretto di Messina a campata unica [16].
Figure 9 – Comparison between the spans of the largest existing mixed road and rail bridges and the one-span bridge over the Strait of Messina [16].

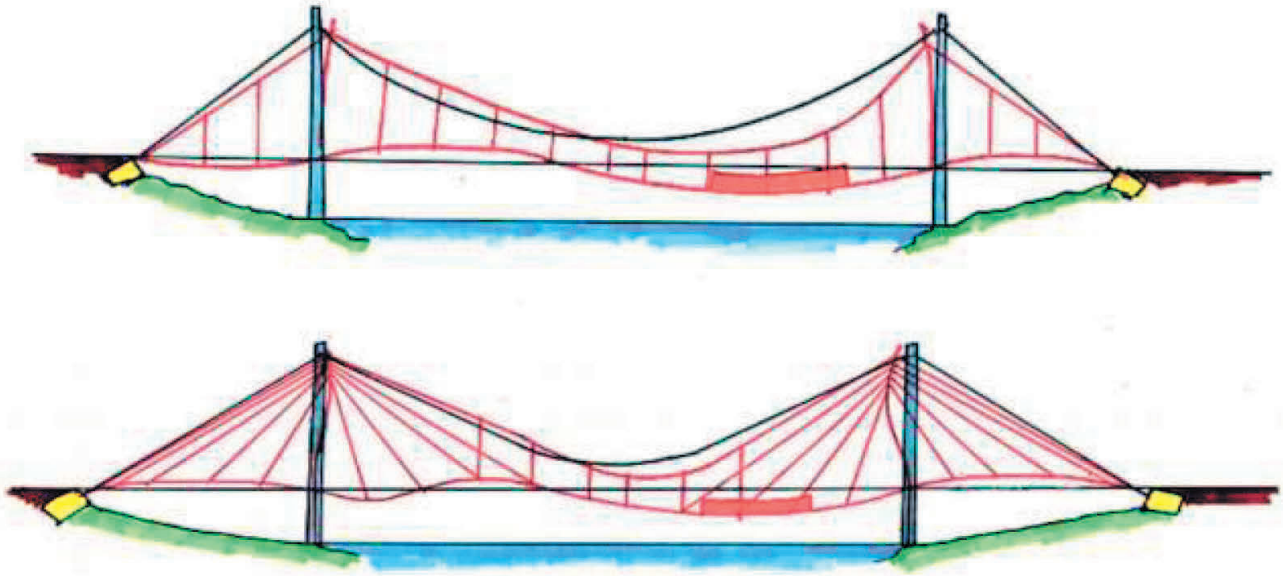


Figura 10 – Flessione di un ponte sospeso e di un ponte ibrido (H.R.S.B.) sottoposti a carichi ferroviari [18].
Figure 10 – Deflection of a suspension bridge and a hybrid bridge (H.R.S.B.) subjected to railway loads [18].

Per realizzare il più grande ponte misto stradale e ferroviario del mondo, ovvero lo Yavuz Sultan Selim Bridge, è stata adottata una nuova soluzione denominata H.R.S.B. *(High Rigid Suspension Bridge)*, ideata dall'Ing. M. VIRLOGEUX.

Attivato nel 2016, lo Yavuz Sultan Selim Bridge, ha una campata principale di 1408 m (Fig. 11) e a tutt'oggi (2022) è utilizzato solo come ponte autostradale, in quanto i binari previsti non sono stati ancora posati. In base a recenti notizie entro il 2028 dovrebbero concludersi i lavori ferroviari ad alta velocità, attualmente in fase di Verifica di Impatto Ambientale (VIA), che, collegando Adapazarı con l'aeroporto Sabiha Gökçen [19], attraverserà anche il ponte Yavuz Sultan Selim YHT.

In base ai documenti di progetto [18], sul ponte Yavuz Sultan Selim:

- Velocità massima autostradale 120 km/h;
- Velocità massima treni viaggiatori 160 km/h;
- *solve the problems related to the aeroelastic behavior of the bridge under the action of the wind to the point of guaranteeing road and rail service 24h/24h 365 days/year;*
- *to design and build pylons in the sea in the Strait of Messina, as assumed by most of the bridge projects awarded in 1970;*
- *design and build pylons at sea in the Strait of Messina, as assumed by most of the bridge projects awarded in 1970 and also by the SdM in the 80's, as mentioned above;*
- *design a road and railway bridge capable of circulating passenger and freight trains on it in compliance with the European Technical Specifications for Interoperability and 750 m and 2000 t long freight trains that can be towed by a single locomotive, as highlighted in the Ministerial Report (1.2.5 The accessibility deficit between Sicily and the mainland and 5.3 The evolution of nation-*

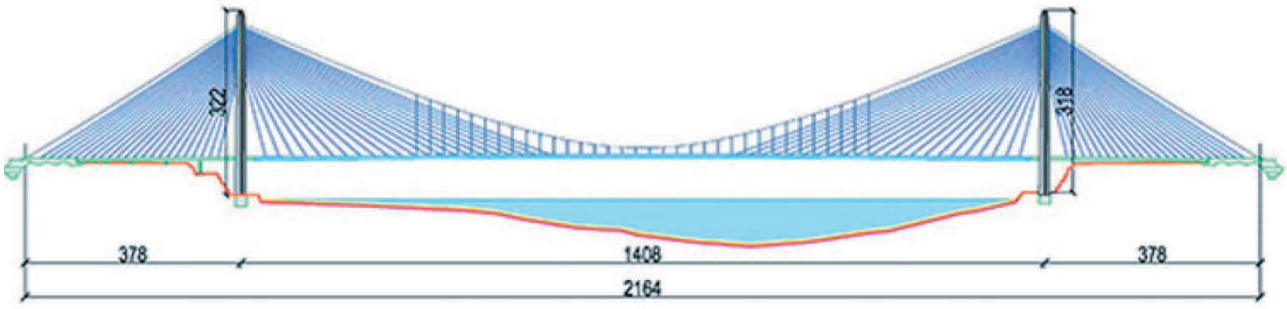


Figura 11 – Sezione longitudinale del ponte Yavuz Sultan Selim [20].
Figure 11 – Longitudinal section of the Yavuz Sultan Selim bridge [20].

- Velocità massima treni merci 80 km/h;
- Lunghezza massima treni viaggiatori e merci 400 m
- Il traffico stradale viene interrotto con venti superiori a 90 km/h (25 m/s);
- Il traffico ferroviario verrà interrotto (dopo che verranno posati i binari) per venti superiori a 115 km/h (32 m/s).

La verifica strutturale in tempo reale del ponte è eseguita dallo STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEM (SHMS) [21], che, tra l'altro, dà indicazioni sulle limitazioni da applicare alla circolazione stradale e ferroviaria (in futuro).

Attualmente il più grande ponte stradale e ferroviario in servizio è lo Tsing Ma Bridge di Hong Kong [22]. Attivato nel 1997, ha una campata principale di 1377 m (Fig. 12), ovvero 1923 m in meno del ponte progettato dalla Società Stretto di Messina.

Il ponte, che prende il nome dalle due isole che collega vale a dire Tsing Yi e Ma Wan, unisce Lantau, l'isola più grande di Hong Kong, alle aree urbanizzate del territorio. Il Lantau Link, di cui fa parte il ponte Tsing Ma, è stato costruito come parte dell'*Airport Core Programme*.

Lo Tsing Ma Bridge, come tutti i grandi ponti stradali e ferroviari in servizio, presenta un impalcato a due livelli con due binari ferroviari alloggiati al piano inferiore (Fig. 13). Verificato nella galleria del vento sino a venti estremi di 95 m/s (media di un minuto) pari a 342 km/h, garantisce al piano inferiore, protetto dai venti, salvo situazioni estreme, il servizio in sicurezza 24 h/giorno 365 gg/anno.

In base ai documenti di progetto sul ponte Tsing Ma [23][26]:

- velocità massima autostradale al piano superiore 100 km/h;
- velocità massima stradale al piano inferiore 50 km/h;
- velocità massima treni viaggiatori 135 km/h;
- quando la velocità media del vento per 10 minuti supera i 60 km/h ma non supera i 75 km/h, è vietato l'utilizzo del ponte superiore ai veicoli sensibili al vento, che

al and European regulations on the design of tunnels, bridges, and viaducts [14]). The possible evolutions of European regulations in the coming decades should also be considered [15].

5. Large road and rail bridges

Let's consider the largest mixed road and rail bridges in existence today (Tab. 3 e Fig. 9).

From the table the large-span railway bridges, built from 2000 onwards, are of the cable-stayed bridge type. Indeed, a classic suspension bridge is quite flexible, it is not easy to adapt to the heavy and concentrated loads of a train. When the train is about a quarter of a span, the suspension cables move down under the load and up on the opposite side, with limited efficiency producing very large deviations [17].

Using the hybrid suspension system and stiffening stays near the towers at the same time, lower bending of the spans is obtained, reducing them by a factor of between 3 and 4 (Fig. 10).

To build the largest mixed road and rail bridge in the world, the Yavuz Sultan Selim Bridge, a new solution called H.R.S.B. (High Rigid Suspension Bridge)*, designed by Eng. M. Virlogeux.*

Activated in 2016, the Yavuz Sultan Selim Bridge has a main span of 1408 m (Fig. 11) and to this day (2022) it is only used as a highway bridge, as the planned tracks have not yet been laid. According to recent news, the high-speed rail works, currently undergoing Environmental Impact Assessment (EIA), should be completed by 2028, which, connecting Adapazarı with Sabiha Gökçen airport [19], will also cross the Yavuz Sultan Selim YHT bridge.

According to the project documents [18], on the Yavuz Sultan Selim bridge:

- *Maximum motorway speed 120 km/h*
- *Maximum speed of passenger trains 160 km/h*
- *Maximum speed of freight trains 80 km/h*
- *Maximum length of passenger and freight trains 400 m*

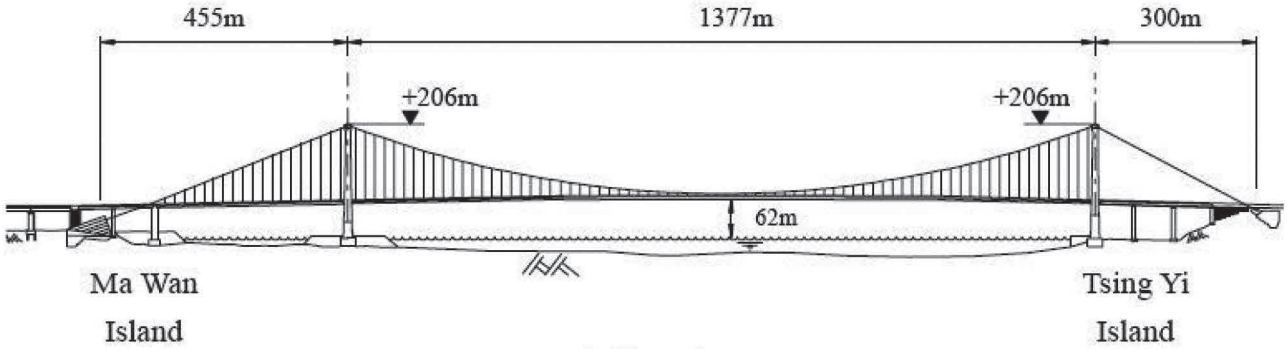


Figura 12 – Sezione longitudinale dello Tsing Ma Bridge [22].
Figure 12 – Longitudinal section of the Tsing Ma Bridge [22].

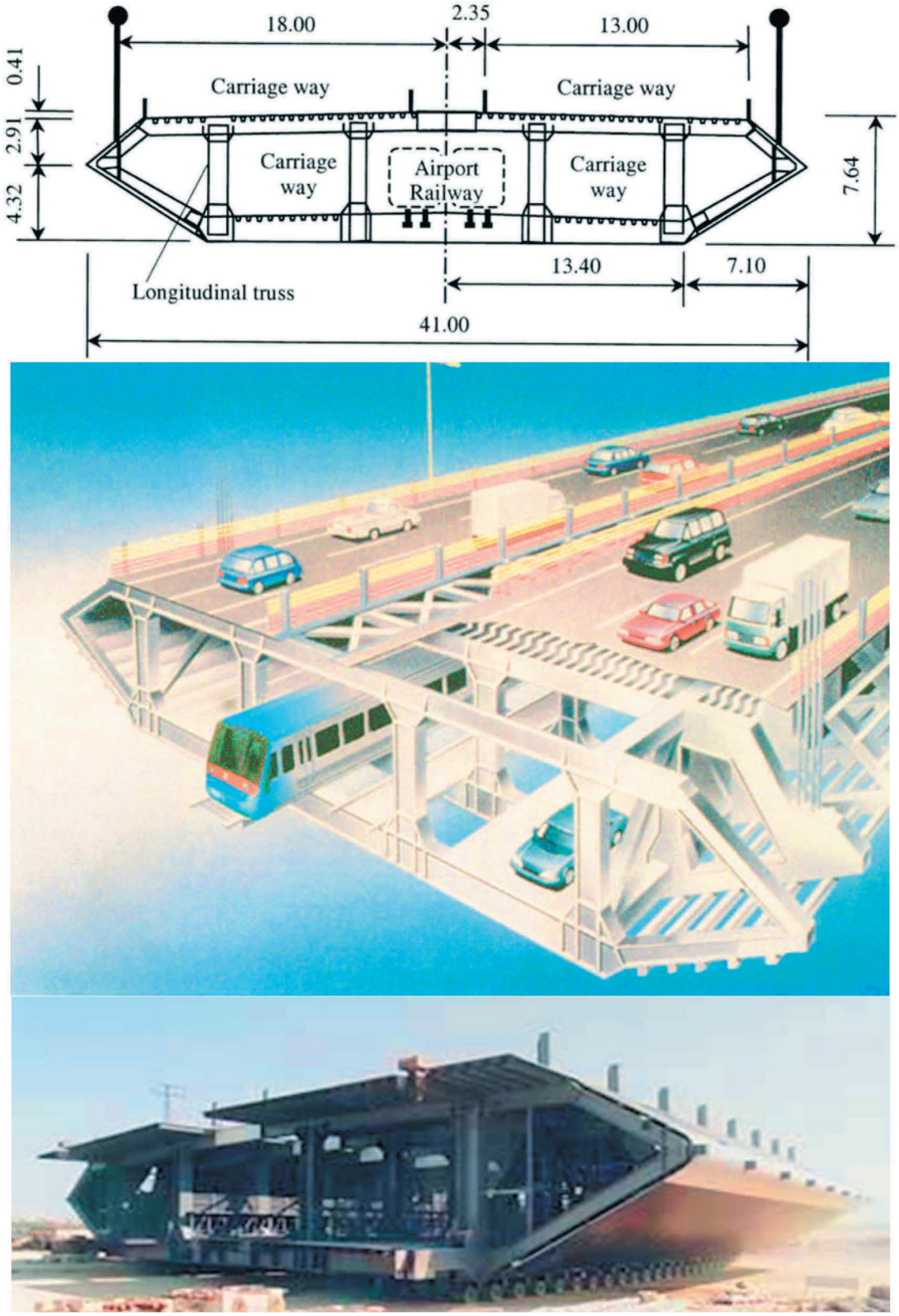


Figura 13 – Sezione dell'impalcato del ponte Tsing Ma di Hong Kong [28][29].
Figure 13 – Section of the deck of the Tsing Ma bridge in Hong Kong [28][29].

dovranno utilizzare il ponte inferiore protetto dai venti viaggiando ad una velocità non superiore a 50 km/h;

- quando la velocità media del vento per 10 minuti è superiore a 75 km/h il ponte superiore viene completamente chiuso al traffico stradale e deviato al ponte inferiore;
- il traffico stradale, che procede alla velocità massima di 50 km/h, viene interrotto anche al piano inferiore solo quando la velocità del vento supera i 165 km/h circa;
- il traffico ferroviario viene interrotto solo in casi eccezionali stabiliti dalla Sala Operativa di controllo dell'Area.

Normalmente sul ponte circolano treni viaggiatori (MTR) di due linee della metropolitana di Hong Kong [24], però potrebbero circolare sul ponte anche treni merci di limitata lunghezza e peso.

La circolazione stradale al piano superiore e nelle corsie di servizio ed emergenza al piano inferiore è regolamentata dallo TSING MA CONTROL AREA (GENERAL) REGULATION [25][26]. L'esercizio stradale e ferroviario è gestito dall'autorità di supervisione e controllo [27], che utilizza i dati del sistema di monitoraggio denominato WASHMS *(Wind and Structural Health Monitoring System)*.

I ponti in grado di sopportare il traffico ferroviario, che determina forti sollecitazioni che aumentano con la velocità e con il peso del treno, hanno campate che non superano i 1400 m circa. Attualmente i ponti progettati per fare circolare anche i treni merci lunghi e pesanti hanno una campata che non supera i 1100 m (Hutong Yangtze River Bridge e Wufengshan Yangtze River Bridge ambedue con campata da 1092 m), lunghezza decisamente inferiore rispetto a quella dei ponti costruiti per il solo traffico stradale che, tra l'altro, sono tutti di tipo sospeso (Tab. 4).

5.1. Percorribilità, sicurezza e confort dei grandi ponti stradali e ferroviari

Tutti i ponti a grande luce presentano delle limitazioni di utilizzabilità stabilite dalle Autorità competenti. Il traffico stradale subisce limitazioni per velocità del vento inferiori a quelle prese in considerazione per il traffico ferroviario. In altre parole, è molto più frequente l'interruzione del traffico stradale piuttosto che di quello ferroviario, che avviene di rado e solo in situazioni estreme nei ponti a due piani come lo Tsing Ma Bridge. Diverso comportamento si ha sui ponti ad un solo piano come lo Yavuz Sultan Selim, dove è prevista l'interruzione anche del traffico ferroviario per venti superiori a 115 km/h, ma al momento ci limitiamo a riferire dati teorici, dato che i binari non sono ancora stati posati.

Per il ponte a campata unica sullo stretto di Messina, previsto ad un solo piano e quindi con i mezzi stradali e ferroviari esposti al vento [31], sono stati condotti dalla SdM approfonditi studi di "Analisi di Percorribilità, Sicurezza e Comfort" [32][33] soprattutto per la modalità fer-

- *Road traffic is interrupted with winds above 90 km/h (25 m/s);*
- *Rail traffic will be disrupted (after the tracks are laid) for winds above 115 km/h (32 m/s).*

The real-time structural verification of the bridge is performed by the STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEM (SHMS) [21], which, among other things, gives indications on the restrictions to be applied to road and rail traffic (in the future).

Currently the largest road and rail bridge in service is Hong Kong's Tsing Ma Bridge [22]. Activated in 1997, it has a main span of 1377 m (Fig. 12), or 1923 m less than the bridge designed by the Strait of Messina.

The bridge, which takes its name from the two islands it connects namely Tsing Yi and Ma Wan, joins Lantau, the largest island in Hong Kong, to the urbanized areas of the territory. The Lantau Link, of which the Tsing Ma Bridge is a part, was built as part of the Airport Core Program.

The Tsing Ma Bridge, like all large road and rail bridges in service, features a two-level deck with two railway tracks housed on the lower level (Fig. 13). Tested in the wind tunnel up to extreme winds of 95 m/s (average of one minute) equal to 342 km/h, it guarantees safe service 24 hours a day 365 days on the lower floor, protected from winds, except in extreme situations./Year.

According to the project documents on the Tsing Ma bridge [23][26]:

- *maximum highway speed upstairs* *100 km/h.*
- *maximum road speed on the lower floor* *50 km/h.*
- *maximum speed of passenger trains* *135 km h.*
- *when the average wind speed for 10 minutes exceeds 60 km/h but does not exceed 75 km/h, it is forbidden to use the upper deck for wind-sensitive vehicles, which must use the lower deck protected from the winds while traveling at a speed not exceeding 50 km/h;*
- *when the average wind speed for 10 minutes is above 75 km/h the upper deck is completely closed to road traffic and diverted to the lower deck;*
- *road traffic, which proceeds at a maximum speed of 50 km/h, is also interrupted on the lower floor only when the wind speed exceeds approximately 165 km/h.*

rail traffic is interrupted only in exceptional cases established by the Area Control Operations Room.

Passenger trains (MTR) of two Hong Kong metro lines [24] normally run on the bridge, but freight trains of limited length and weight could also run on the bridge.

Road traffic on the upper floor and in the service and emergency lanes on the lower floor is regulated by the TSING MA CONTROL AREA (GENERAL) REGULATION [25][26]. Road and rail operations are managed by the supervisory and control authority [27], which uses data from the monitoring system called WASHMS (Wind and Structural Health Monitoring System).

Tabella 4 – *Table 4*

I 10 ponti stradali più grandi del mondo [30]
The 10 longest road bridges in the world [30]

	Ponti stradali ***Road and highway bridges***	**Nazione** ***Country***	**Attivazione** ***Activation***	**Campata principale** ***Main span***	**Tipo di ponte** ***Structure***
1	Akashi Kaikyo Bridge	Giappone *Japan*	1998	1.991 m	*Suspension bridge*
2	Yangsigang Bridge	Cina *China*	2019	1.700 m	*Suspension bridge*
3	Nansha Bridge (East)	Cina *China*	2019	1.688 m	*Suspension bridge*
4	Xihoumen Bridge	Cina *China*	2009	1.650 m	*Suspension bridge*
5	Great Belt East Bridge	Danimarca *Denmark*	1998	1.624 m	*Suspension bridge*
6	Osman Gazi Bridge	Turchia *Turkey*	2016	1.550 m	*Suspension bridge*
7	Runyang Yangtze River North Bridge	Cina *China*	2005	1.490 m	*Suspension bridge*
8	Hangrui Expressway Dongting Lake Bridge	Cina *China*	2018	1.480 m	*Suspension bridge*
9	Humber Bridge	Regno Unito *United Kingdom*	1981	1.410 m	*Suspension bridge*
10	Yavuz Sultan Selim Bridge (realizzato per essere misto, attualmente è solo stradale) *Yavuz Sultan Selim Bridge (made to be mixed, it is currently road only)*	Turchia *Turkey*	2016	1.408 m	*Suspension bridge with cable-stays*

roviaria. Il progetto però non è mai arrivato al punto da interessare le Autorità competenti per approvarne la Normativa di Esercizio e il Piano di Gestione delle Emergenze [34][35].

Consultando i documenti del "Progetto Definitivo dell'Attraversamento stabile dello Stretto di Messina e dei collegamenti stradali e ferroviari sui versanti Calabria e Sicilia" [36], tramite il sito del Ministero della Transizione Ecologica è possibile leggere tra gli altri [37] anche i documenti relativi all'Analisi di rischio e le bozze dei Manuali di esercizio e gestione delle emergenze.

È da ricordare che nello stretto di Messina, così come risulta dai dati statistici storici [38], la velocità del vento raggiunge valori compresi tra 60 e 100 km/h per 25 gg/anno.

La velocità del vento supera i 100 km/h per 14 gg/anno, sia con venti di scirocco (7 gg/anno), che di libeccio (1 gg/anno) che di maestrale (6 gg/anno).

Valori superiori ai 185 km/h preventivati o di progetto possono verificarsi solo come fenomeno imponderabile, che esuli dai normali criteri di studio e di controllo della situazione meteorologica (Tab. 5).

The bridges capable of withstanding railway traffic, which determines strong stresses that increase with the speed and weight of the train, have spans that do not exceed about 1400 m. Currently, the bridges designed to circulate even long and heavy freight trains have a span that does not exceed 1100 m (Hutong Yangtze River Bridge and Wufengshan Yangtze River Bridge both with a span of 1092 m), a length much shorter than that of bridges built for road traffic only (Tab. 4).

5.1. Runability, safety and comfort of large road and railway bridges

All large span bridges have usability limitations established by the competent Authorities. Road traffic is limited by wind speeds lower than those taken into consideration for rail traffic. In other words, the interruption of road traffic is much more frequent than rail traffic, which occurs rarely and only in extreme situations in double-decker bridges such as the Tsing Ma Bridge. Different behavior occurs on single-storey bridges such as the Yavuz Sultan Selim, where the interruption of rail traffic is also expected for winds exceeding 115 km/h, but now we limit ourselves to re-

Da notare che la direzione del vento non è sempre ortogonale all'impalcato, ma può provenire da vari settori sia con valori costanti sia a raffiche variabili con valori diversi lungo tutta l'estensione del ponte. Inoltre, il ponte può essere interessato dal passaggio di trombe d'aria. È quindi importante valutare non solo il comportamento aeroelastico del ponte sotto l'azione del vento, ma anche la sua continua utilizzabilità.

Pertanto, dando per acquisita la stabilità aeroelastica del ponte a campata unica, che la SdM ritenne di aver risolto con il profilo alare dell'impalcato, rimane da chiarire, tramite l'inoltro alle Autorità attualmente competenti in materia di tutti i documenti del caso, la reale percorribilità del ponte h 24 e gg 365 non solo al variare della velocità e alla direzione del vento, ma in tutte le situazioni normali e di emergenza.

Tabella 5 – *Table 5*

Velocità del vento nello stretto di Messina [38]
Wind speed in the Strait of Messina

Vento tra Ganzirri e Punta Pezzo ***Wind between Ganzirri and Punta Pezzo***	**Velocità del vento (km/h)** ***Wind speed (km/h)***	**Gg/anno** ***Days/year***
Da calmo a quasi calmo *Calm to almost calm*	0	56
Da debole a moderato *Weak to moderate*	0<x≤60	270
Da forte a molto forte *Strong to very strong*	60<x<100	25
Da fortissimo a eccezionale *From very strong to exceptional*	x≥100	14
Totale giorni *Total days*		365

Il già citato articolo *"Runability Analysis for the planned Messina Strait Bridge"* (Andersen *et al.*, 2011) [33] pur valutando utilizzabile il ponte per l'esercizio ferroviario, non elimina tutti i dubbi per quanto riguarda il possibile ribaltamento e deragliamento dei treni merci, sul ponte e sui viadotti limitrofi, in alcune particolari situazioni (forti venti, terremoti significativi o guasti al materiale rotabile). La maggior parte degli studi relativi all'interazione veicolo-struttura-armamento si sono concentrati per il ponte sullo stretto di Messina sull'interazione ruota-binario (con e senza controrotaia). Su altri ponti, come ad esempio, su quello dell'Oresund è stato previsto nell'interbinario una struttura di acciaio centrale della stessa altezza del marciapiedi rialzato laterale di servizio [39], per ridurre il rischio di ribaltamento dei rotabili e per evitare che il treno deragliando possa invadere il binario adiacente. Tale accorgimento non è stato adottato nel Progetto Definitivo del Ponte a campata unica (Fig. 6), né sui suoi viadotti di adduzione.

6. Grandi ponti realizzati in zona sismica con piloni offshore

Negli ultimi trent'anni, come alternativa ai metodi tradizionali di isolamento sismico, si è sviluppata la tecnica di controllo passivo che consente di evitare gravi danni alla struttura.

L'isolamento sismico implica l'introduzione di opportuni dispositivi – detti isolatori – all'interno di una struttura (alla sua base, negli edifici o nella testata dei ponti) che, grazie alla loro bassa rigidezza orizzontale, disaccoppiano il movimento della struttura dal moto del suolo.

In termini di isolamento sismico dei ponti, i migliori sistemi di isolamento sono generalmente considerati quel-

porting theoretical data, since the tracks on this bridge have not yet been laid.

For the single-span bridge over the Strait of Messina, planned to have a single floor and therefore with road and rail vehicles exposed to the wind [31], in-depth studies of "Runability, Safety and Comfort Analysis" were conducted by SdM [32][33] especially for the railway mode. However, the project never got to the point of involving the competent Authorities to approve the Operating Regulations and the Emergency Management Plan [34][35].

By consulting the documents of the "Definitive Project of the Stable Crossing of the Strait of Messina and of the road and rail links on the Calabria and Sicily sides" [36], through the website of the Ministry of Ecological Transition it is possible to read among others [37] also the documents relating to risk analysis and drafts of the operating and emergency management manuals.

It should be remembered that in the Strait of Messina, as shown by historical statistical data [38], the wind speed reaches values between 60 and 100 km/h for 25 days / year.

The wind speed exceeds 100 km/h for 14 days / year, both with sirocco winds (7 days / year), libeccio (1 day / year) and mistral winds (6 days / year).

Values above 185 km/h estimated or planned can only occur as an imponderable phenomenon, which goes beyond the normal criteria for studying and controlling the meteorological situation (Tab. 5).

It should be noted that the wind direction is not always orthogonal to the deck but can come from various sectors both with constant values and in variable gusts with different values along the entire extension of the bridge. In addition, the bridge may be affected by the passage of tornadoes. It is therefore important to evaluate not only the aeroelastic behavior of the bridge under the action of the wind, but also its continuous usability.

li che sono in grado di limitare le forze trasmesse alle pile. Questo metodo ha come obiettivo quello di minimizzare le possibilità di danneggiamento degli elementi strutturali.

L'applicazione di modelli avanzati non lineari ha permesso l'implementazione in modo pratico di verifiche basate sullo spostamento per terremoti di alta magnitudo con dissipazione dell'energia sismica mediante oscillazione e scorrimento controllato e limitato.

Esaminiamo sinteticamente di seguito le principali caratteristiche tecniche delle fondazioni di alcuni grandi ponti realizzati recentemente in zone altamente sismiche che potrebbero essere prese a riferimento per progettare le fondazioni dei piloni *offshore* del ponte a più campate nello stretto di Messina:

- Akashi Kaikyo Bridge (1998)
- Rion-Antirion Bridge (2004)
- Osman Gazi Bridge (2016)
- Çanakkale 1915 Bridge (2022)

6.1 Le fondazioni dei piloni offshore del ponte Akashi Kaikyo (1994)

Il ponte stradale più lungo al mondo è l'Akashi Kaikyo Bridge [40], ponte sospeso lungo 3911 metri.

Originariamente il ponte è stato progettato sia per il traffico stradale che ferroviario con una campata principale lunga 1780m. Tuttavia, per problemi finanziari delle ferrovie nazionali giapponesi, il ponte è stato riprogettato come ponte stradale tra il 1985 e il 1988 con una campata principale lunga 1990m. Nel 1995 la campata è divenuta di 1991m in seguito ad un violento terremoto che ha determinato l'allontanamento dei piloni principali del ponte ancora in fase di costruzione, quando ancora l'impalcato non era stato installato [41]. Il progetto del ponte è stato quindi riadattato per la nuova lunghezza di 1991 metri della campata principale, mentre quelle laterali sono rimaste di 960m (Fig. 14). Entrato in servizio nell'aprile 1998, unisce la città di Kobe sull'isola di Honshu all'isola Awaji, passando al di sopra dello stretto di Akashi. Il braccio di mare superato dal ponte ha una profondità massima di 110 m, il franco libero per il passaggio delle navi è di 66 m. Le due torri di sostegno dei cavi, aventi altezza di circa 283 m (297 m al punto di attacco dei cavi di sospensione), sono erette su fondali di circa 60 m.

Il ponte è supportato da due ancoraggi (1A e 4A) e due piloni (2P e 3P).

La velocità massima della corrente del mare varia tra 3,5 m/sec 4 m/sec, l'altezza media delle onde è di 51,4 cm e raggiunge valori fino a 6 m durante un tifone, mentre la variazione del livello di marea è di circa 1 m.

Le fondazioni dei piloni del ponte, progettate per trasmettere circa 120.000 ton di carico verso il basso dalle enormi torri principali al terreno di supporto, sono state dimensionate per resistere a forti terremoti e sono state

Therefore, assuming the aeroelastic stability of the single-span bridge, which the SdM believed to have resolved with the wing profile of the deck, remains to be clarified, by forwarding all the relevant documents to the Authorities currently competent in the matter, the real practicability of the H24 and G365 bridge not only when the speed and direction of the wind vary, but in all normal and emergency situations.

The article "Runability Analysis for the planned Messina Strait Bridge" *(*Andersen et al.*, 2011) [33], while evaluating the bridge as usable for railway operation, does not eliminate all doubts regarding the possible overturning and derailment of trains goods, on the bridge and on the neighboring viaducts, in some situations (strong winds, significant earthquakes or breakdowns to rolling stock). Most of the studies relating to the vehicle-structure-armament interaction have focused on the wheel-track interaction for the Messina Strait bridge (with and without counter-rail). On other bridges, such as the Oresund bridge, a central steel structure has been provided in the platform of the same height as the raised side service platform [39], to reduce the risk of rolling stock overturning and to prevent the train derailing may invade the adjacent track. This arrangement was not adopted in the Definitive Project of the single-span bridge (Fig. 6), nor on its adduction viaducts.*

6. Large bridges built in seismic areas with offshore pylons

In the last thirty years, as an alternative to traditional methods of seismic isolation, the passive control technique has been developed that allows to avoid serious damage to the structure.

Seismic isolation implies the introduction of suitable devices – called isolators – inside a structure (at its base, in buildings or in the head of bridges) which, thanks to their low horizontal stiffness, decouple the movement of the structure from the motion of the soil.

In terms of seismic isolation of bridges, the best isolation systems are generally considered to be those that are capable of limiting the forces transmitted to the piers. This method aims to minimize the possibility of damage to the structural elements.

The application of advanced non-linear models allowed the practical implementation of displacement-based verifications for high magnitude earthquakes with seismic energy dissipation by controlled and limited oscillation and sliding.

Let's briefly examine the main technical characteristics of the foundations of some large bridges recently built in highly seismic areas that could be taken as a reference to design the foundations of the offshore *pylons of the multi-span bridge in the Strait of Messina:*

- *Akashi Kaikyo Bridge (1998)*
- *Rion-Antirion Bridge (2004)*
- *Osman Gazi Bridge (2016)*
- *Çanakkale 1915 Bridge (2022)*

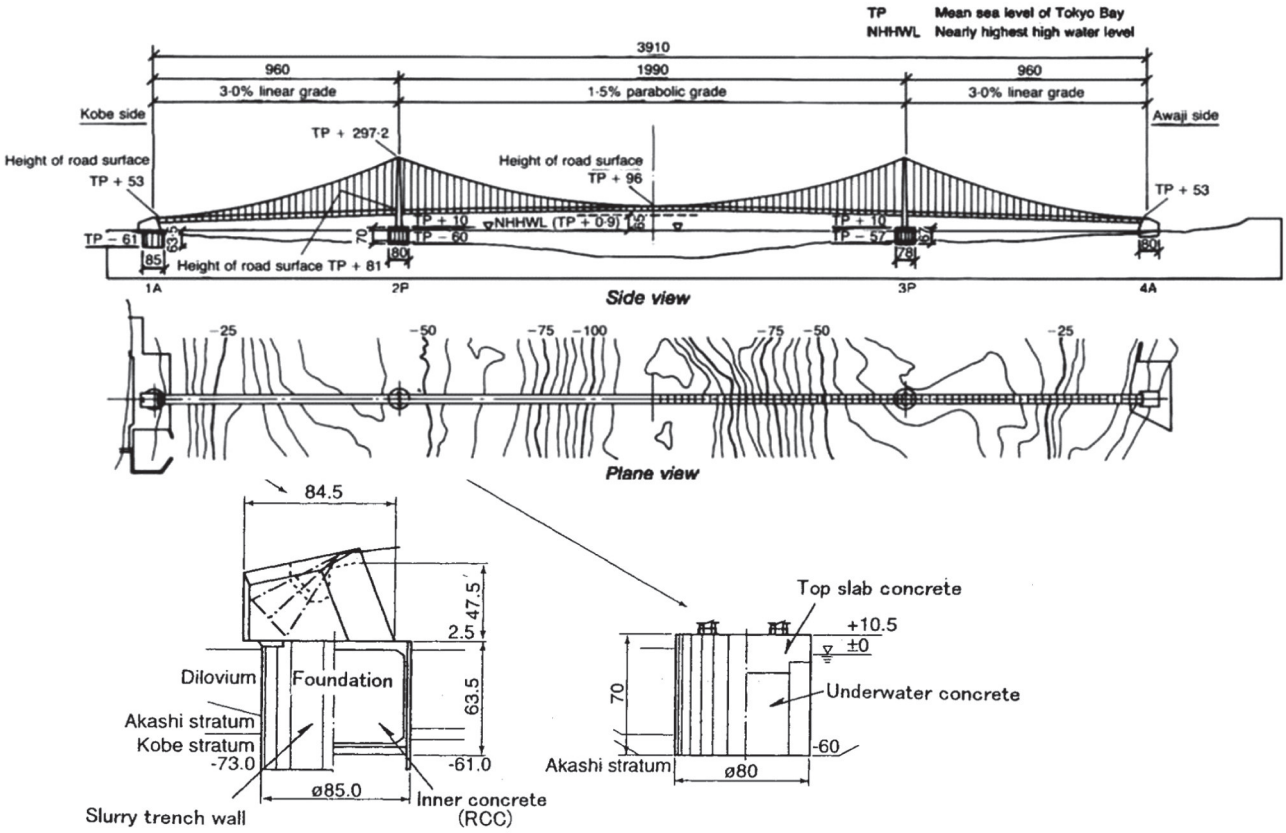


Figura 14 – Le fondamenta del ponte Akashi Kaikyo [42].
Figure 14 – The foundations of the Akashi Kaikyo bridge [42].

realizzate in mare ad una profondità rispettivamente di circa 70m (2P) e 57m (3P).

Data la conformazione geologica del sottosuolo (Fig. 15), che presenta una roccia relativamente morbida e giovane, ad esclusione di quella del 4A, le fondazioni dei due piloni principali (2P e 3P) sono state costruite con il metodo di posa a cassone utilizzato in molti dei ponti del progetto Honshu-Shikoku, compresi i ponti Seto-Ohashi. Ciò ha comportato che la progettazione sismica dovesse tenere conto della non linearità dello strato portante.

6.1. The foundations of the offshore pylons of the Akashi Kaikyo bridge (1994)

The longest road bridge in the world is the Akashi Kaikyo Bridge [40], a suspension bridge 3,911 meters long.

Originally the bridge was designed for both road and rail traffic with a 1780m long main span. However, due to financial problems of the Japanese National Railways, the bridge was redesigned as a road bridge between 1985 and 1988 with a 1990m long main span. In 1995 the span be-

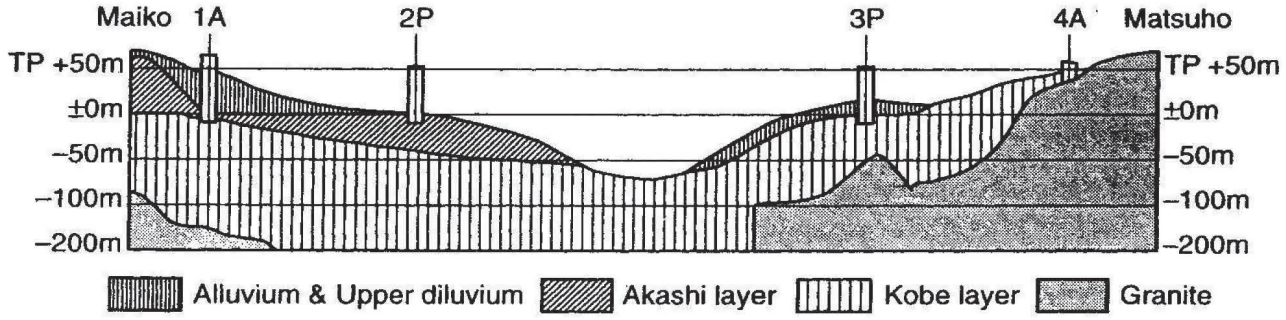


Figura 15 – Sezione Geologica dello Stretto di Akashi [42].
Figure 15 – Geological Section of the Akashi Strait [42].

Sebbene sia chiamato "cassone", una fondazione realizzata con questo metodo è una fondazione appoggiata sullo strato portante senza alcun incassamento.

Viene eseguito lo scavo fino allo strato portante giudicato sufficiente, contemporaneamente si procede alla costruzione a terra di una cassaforma circolare in acciaio (*Gravity base structures* - GBS), che nel caso del ponte Akashi Kaikyo è stata realizzata con un diametro di circa 80m.

Dopo il completamento dello scavo, il cassone viene rimorchiato in galleggiamento (Fig. 16), affondato con elevata precisione nella posizione specificata dal progetto, dopodiché il calcestruzzo speciale resistente all'acqua viene gettato all'interno della struttura GBS il più rapidamente possibile (Fig. 17), mentre il cemento armato ordinario viene utilizzato solo nella parte superiore del cassone, in modo da completare l'intero molo principale su cui costruire il pilone del ponte.

6.2. Le fondazioni dei piloni offshore del ponte Rion-Antirion

Il ponte Rion-Antirion [46][47] del 2004 attraversa il Golfo di Corinto. Lungo complessivamente 2252 m, è costituito da tre campate interne di 560 m e due campate laterali di 286 m sostenute da due piloni alti 141 m e da due piloni alti 164 m (Fig. 18). È largo 28 m, ha due corsie stradali per direzione, una corsia di emergenza e una passerella pedonale.

La profondità del mare lungo la direttrice del ponte in media è di 60 m, in alcuni punti supera i 65 m.

Il fondale è costituito da uno strato di argilla spesso da 20 a 30 m, coperto da uno strato di sabbia e ghiaia di diverso spessore. La roccia è stimata solo a circa 800 m di profondità.

È stato progettato per superare alcune problematiche particolari, che includono acque profonde, materiali insicuri per le fondazioni, attività sismica, la probabilità di tsunami e l'espansione del Golfo di Corinto a causa della tettonica a placche. La penisola del Peloponneso continua ad allontanarsi dalla Grecia continentale di alcuni millimetri ogni anno, di conseguenza, il ponte è stato progettato tenendo conto di uno spostamento tettonico differenziale di 2 m in qualsiasi direzione e tra due moli qualsiasi.

L'intera regione è soggetta a terremoti con un'intensità di 6,5 sulla scala Richter. Sebbene il traffico navale commerciale abbia una bassa densità, i moli sono stati dimensionati per resistere all'impatto di una petroliera da 180 000 t avente una velocità di 16 nodi.

came 1991m following a violent earthquake that caused the removal of the main pylons of the bridge still under construction, when the deck had not yet been installed [41]. The bridge design was then readjusted for the new length of 1991 meters of the main span, while the side spans remained 960m (Fig. 14). It entered service in April 1998, joining the city of Kobe on the island of Honshu to the island of Awaji, passing over the Akashi Strait. The arm of the sea crossed by the bridge has a maximum depth of 110 m, the free clearance for the passage of ships is 66 m. The two cable support towers, having a height of about 283 m (297 m at the attachment point of the suspension cables), are erected on depths of about 60 m.

The bridge is supported by two anchors (1A and 4A) and two pylons (2P and 3P).

The maximum speed of the sea current varies between 3.5 m/s 4 m/s, the average height of the waves is 51.4 cm and reaches values up to 6 m during a typhoon, while the variation of the tide level is about 1 m.

The foundations of the bridge pylons, designed to transmit approximately 120,000 t of load downwards from the huge main towers to the supporting ground, were sized to withstand strong earthquakes and were built in the sea at a depth of approximately 70 m (2P) and 57 m (3P) respectively.

Given the geological conformation of the subsoil (Fig. 15), which has a relatively soft and young rock, except for that of 4A, the foundations of the two main pylons (2P and 3P) were built with the caisson laying method used in many of the bridges in the Honshu-Shikoku project, including the

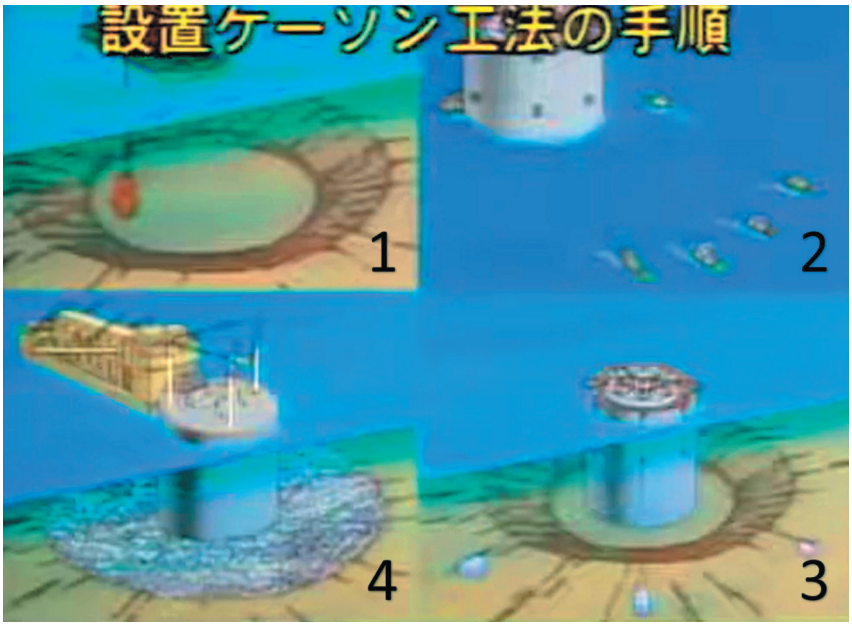


Figura 16 – Schema di realizzazione delle fondamenta del ponte Akashi Kaikyo [43].

Figure 16 – Scheme of the realization of the foundations of the Akashi Kaikyo bridge [43].

Figura 17 – Fasi di realizzazione delle fondazioni dell'Akashi-Kaikyo Bridge [44][45].
Figure 17 – Construction phases of the Akashi-Kaikyo Bridge foundations [44][45].

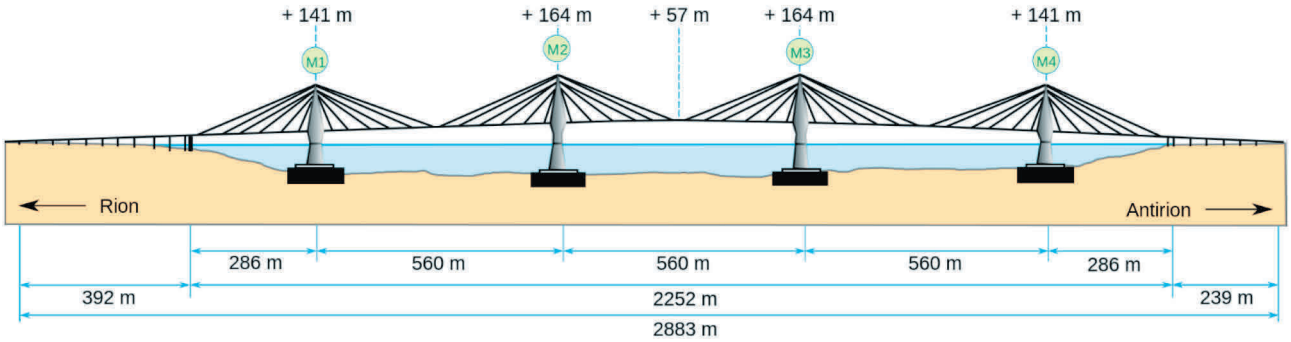


Figura 18 – Ponte Rion-Antirion [48].
Figure 18 – Rion-Antirion Bridge [48].

I lavori di fondazione delle torri sono iniziati con il dragaggio dello strato superiore del terreno e il posizionamento di uno strato di sabbia di 19 cm. Il terreno è stato quindi rinforzato da pali d'acciaio aventi diametro 2m, spessore di 20 mm, lunghi da 25 a 30 m conficcati su una griglia di 7 m per 7 m su un'area circolare di 130 m di diametro (Fig. 17). Il numero totale di pali conficcati in ciascuna fondazione è dell'ordine di 150-200. Sopra le pile d'acciaio, che sporgono dal terreno di 1,5 m, è stato posizionato uno strato di 3 m di ghiaia livellato con precisione, di granulometria via via decrescente dall'alto verso il basso per ottenere il comportamento plastico necessario a dissipare l'energia del terremoto.

I tubi in acciaio non sono direttamente portanti, ma aiutano a distribuire i carichi della torre nel terreno. Lo strato di ghiaia deve trasferire i carichi orizzontali dal ponte sulle pile di acciaio e sul terreno circostante in modo plastico. Non c'è connessione tra le pile d'acciaio a terra e la fondazione delle torri, che possono quindi muoversi contro lo strato di ghiaia rinforzato dalle pile d'acciaio.

Le fondazioni delle torri sono state realizzate utilizzando le più recenti tecnologie già collaudate per le piattaforme petrolifere offshore, che utilizzano *Gravity Based Structures* (GBS).

Costruite vicino alla città di Antirion e rimorchiate in galleggiamento sino alla loro posizione di progetto sulle fondazioni di ghiaia già predisposte, sono state affondate con precisione allagando la struttura di base (Fig. 19).

Il ponte Rion-Antirion, con il suo innovativo concetto di fondazioni, ha rappresentato una pietra miliare nella realizzazione di grandi ponti sospesi.

La verifica della bontà della soluzione adottata si è avuta l'8 giugno 2008 quando si è verificato un terremoto di magnitudo 6,5 Richter con epicentro localizzato ad una distanza di 36 km dal ponte. Dall'analisi dei dati di monitoraggio raccolti durante l'evento e dalle approfondite ispezioni effettuate successivamente, è stato confermato che il comportamento del ponte Rion-Antirion era conforme alle previsioni [50].

Seto-Ohashi bridges. This meant that the seismic design had to consider the non-linearity of the bearing layer.

Although it is called a "caisson", a foundation made with this method is a foundation resting on the load-bearing layer without any embedding.

The excavation is carried out up to the load-bearing layer judged sufficient, at the same time a circular steel formwork (Gravity base structures - GBS) is built on the ground, which in the case of the Akashi Kaikyo bridge was built with a diameter of about 80 m.

After completion of the excavation, the caisson is towed into the waterline (Fig. 16), sunk with high precision in the position specified by the project, after which the special water-resistant concrete is poured into the GBS structure as quickly as possible (Fig. 17), while ordinary reinforced concrete is used only in the upper part of the caisson, in order to complete the entire main pier on which to build the bridge pier.

6.2. The foundations of the offshore pylons of the Rion-Antirion bridge

The 2004 Rion-Antirion bridge [46][47] spans the Gulf of Corinth. Overall, 2252 m long, it consists of three internal spans of 560 m and two side spans of 286 m supported by two 141 m high pylons and two 164 m high pylons (Fig. 18). It is 28 m wide, has two road lanes in each direction, an emergency lane and a pedestrian walkway.

The depth of the sea along the bridge line is on average 60 m, in some places it exceeds 65 m.

The seabed consists of a layer of clay 20 to 30 m thick, covered by a layer of sand and gravel of different thickness. The rock is estimated to be only about 800 m deep.

It was designed to overcome some challenges, which include deep water, unsafe materials for foundations, seismic activity, the likelihood of tsunamis and the expansion of the Gulf of Corinth due to plate tectonics. The Peloponnese peninsula continues to move away from mainland Greece by a few millimeters every year, as a result, the bridge was designed considering a differential tectonic shift of 2 m in any direction and between any two piers.

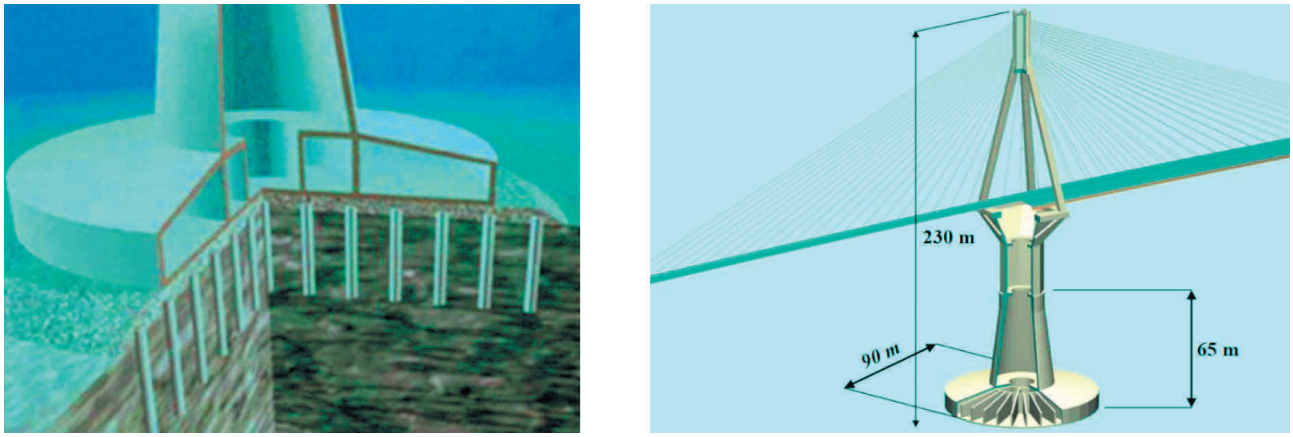


Figura 19 – Fondazioni e pilone del ponte Rion-Antirion [49].
Figure 19 – Foundations and pylon of the Rion-Antirion bridge [49].

6.3 Le fondazioni dei piloni offshore del ponte Osman Gazi

Utilizzando l'esperienza maturata nella realizzazione del ponte Rion-Antirion è stato progettato e realizzato nella baia di Izmit in Turchia il ponte sospeso Osman Gazi [51], a circa 50 km a sud-est di Istanbul in una zona altamente sismica.

La faglia dell'Anatolia settentrionale, che attraversa la baia di Izmit, determina un movimento tra le coste, di circa 2-2,5 cm (0,8-1,0 in) all'anno verso ovest.

Il 17 agosto 1999 si è verificato nella baia di Izmit un terremoto di magnitudine 7,6 Richter della durata di 37 secondi, che ha danneggiato gravemente la città di Izmit causando 17.000 morti e più di 250.000 senzatetto.

Negli anni 2009 e 2010 è stata condotta una campagna di indagine per individuare le faglie, la stratigrafia e le condizioni del terreno lungo l'allineamento stabilito per la realizzazione del ponte e nei luoghi dove avrebbero dovuto essere realizzate le fondazioni. Negli anni successivi, è stato progettato il ponte Osman Gazi i cui lavori di costruzione, iniziati il 30 marzo 2013, si sono conclusi il 30 giugno 2016.

Il ponte lungo 2,7 km ha tre corsie per direzione, è largo 35,40 m, le torri sono alte 250 m, ha due campate laterali di 566 m e una campata principale di 1550 m (Fig. 20) ovvero attualmente è il 6° ponte più grande del mondo (Tab. 4).

The entire region is subject to earthquakes with an intensity of 6.5 on the Richter scale. Although commercial shipping traffic has a low density, the piers have been sized to withstand the impact of a 180000 t tanker with a speed of 16 knots.

The foundation works of the towers began with the dredging of the upper soil layer and the placement of a 19 cm layer of sand. The ground was then reinforced by steel poles with a diameter of 2 m, thickness of 20 mm, 25 to 30 m long, driven into a 7 m-by-7 m grid on a circular area of 130 m in diameter (Fig. 17). The total number of poles driven into each foundation is of the order of 150-200. Above the steel piles, which protrude from the ground by 1.5 m, a 3 m layer of precisely leveled gravel was placed, with a gradually decreasing grain size from top to bottom to obtain the plastic behavior necessary to dissipate the energy of the earthquake.

The steel pipes are not directly load-bearing but help distribute the tower loads in the ground. The gravel layer must transfer the horizontal loads from the bridge onto the steel piles and surrounding ground in a plastic way. There is no connection between the ground steel piles and the tower foundation, which can then move against the gravel layer reinforced by the steel piles.

The foundations of the towers were built using the latest technologies already proven for offshore *oil platforms, which use* Gravity Based Structures *(GBS).*

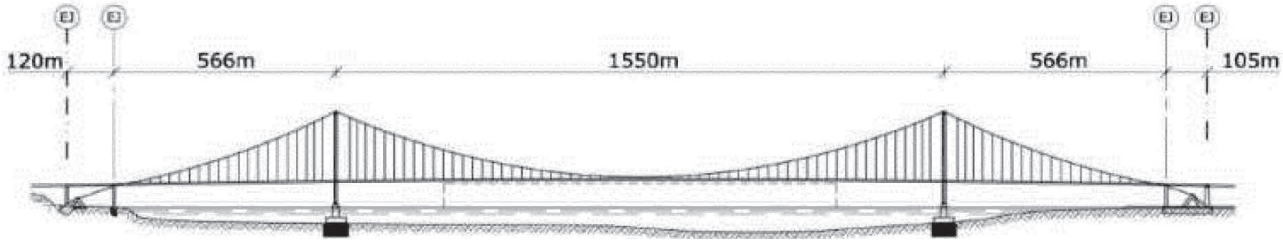


Figura 20 – Sezione longitudinale del ponte Osman Gazi [53].
Figure 20 – Longitudinal section of the Osman Gazi bridge [53].

Le fondazioni del ponte sono state realizzate [52] dove la profondità del mare è di circa 40 m. Inoltre, il terreno presenta strati di calcare dolomitico, sabbia e argilla; la roccia si trova a centinaia di metri sotto ai fondali marini.

Per realizzare le fondazioni del ponte è stata scelta una soluzione ibrida simile a quella adottata per il Rion-Antirion Bridge (v. "*Osman Gazi Bridge - Geotechnical challenges and innovative solutions*" [53] e "*The caissons of the tower foundations Izmit Bay Suspension Bridge Project*" [54]).

Dopo aver individuato l'area su cui realizzare le torri, si è proceduto a dragare il fondo del mare per portarlo uniformemente alla quota di progetto terreno, che è stato poi ricoperto con uno strato di sabbia di circa 20 cm. Dato che il terreno sottostante alle torri presenta basse proprietà di resistenza, il sottosuolo è stato migliorato con inclusioni di 195 pali tubolari d'acciaio di diametro 2,0 m con spessore della parete di 20 mm posti in una griglia 13 x 15 con interasse di 5 m con la parte superiore dei pali 0,75 m sotto la parte superiore della ghiaia spessa 3 m, che è stata realizzata per strati successivi uniformi di granulometria crescente dal basso verso l'alto.

Sopra al letto di ghiaia è stato appoggiato un cassone di cemento armato prefabbricato su cui sono stati preventivamente innestati i piloni di acciaio del ponte (Fig. 21).

Built near the town of Antirion and floated towed to their design location on the already prepared gravel foundations, they were precisely sunk by flooding the base structure (Fig. 19).

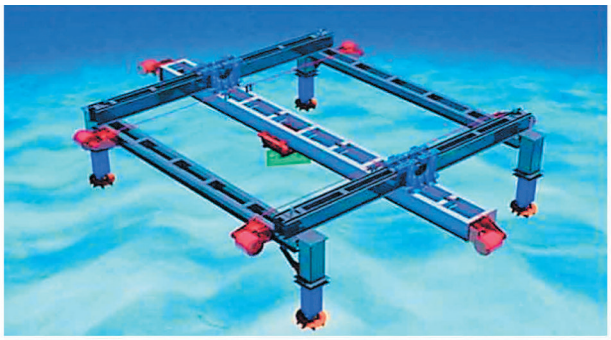
The Rion-Antirion bridge, with its innovative foundation concept, represented a milestone in the construction of large suspension bridges.

The validity of the solution adopted was verified on 8 June 2008 when an earthquake measuring 6.5 Richter occurred with an epicenter located at 36 km from the bridge. From the analysis of the monitoring data collected during the event and from the in-depth inspections carried out thereafter, it was confirmed that the behavior of the Rion-Antirion bridge was in accordance with forecasts [50].

6.3 The foundations of the offshore pylons of the Osman Gazi bridge

Using the experience gained in the construction of the Rion-Antirion bridge, the Osman Gazi suspension bridge [51] was designed and built in the Izmit bay in Turkey, about 50 km South-East of Istanbul in a highly seismic area.

The northern Anatolian fault, which crosses the Izmit



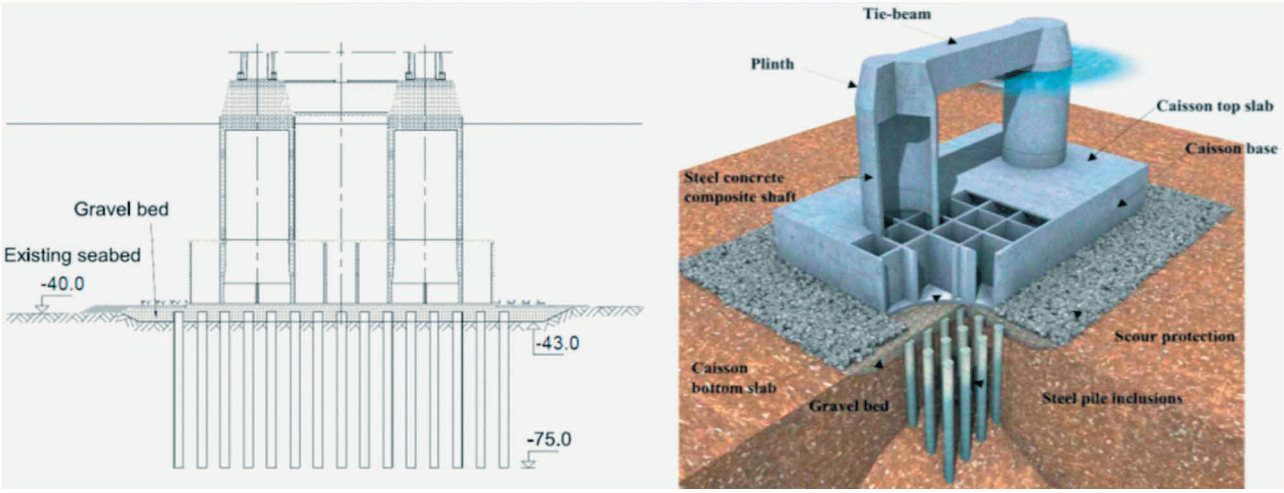


Figura 21 – Unità subacquea progettata per eseguire lavori di livellamento in acque profonde (*Underwater Leveling Equipment:* ULE) [54] e schema relativo alle fondazioni del ponte Osman Gazi [52].
*Figure 21 – Underwater unit designed to perform leveling work in deep water (*Underwater Leveling Equipment: *ULE) [54] and outline of the foundations of the Osman Gazi bridge [52].*

Figura 22 – Cassoni prima e dopo il loro posizionamento [54].
Figure 22 – Caissons before and after their placement [54].

Non esiste alcuna connessione strutturale tra il cassone e i pali di acciaio conficcati nel sottosuolo.

Dato che la baia di Izmit si trova in una delle zone più attive, dal punto di vista sismico, del mondo, il ponte è stato progettato per resistere a terremoti di magnitudo fino all'ottavo grado Richter.

I cassoni prefabbricati di entrambe le torri lunghi 54 m, larghi 67 m sono stati posti a -40 m.

I cassoni sono stati realizzati in un bacino di carenaggio appositamente costruito e successivamente sono stati resi galleggiati in una darsena per consentire il loro completamento [54].

La Fig. 22 mostra i due cassoni già galleggianti pronti per essere trainati da rimorchiatori che, dopo il loro corretto posizionamento, sporgeranno di +10.15 m sopra il livello del mare.

La Fig. 23 mostra una sezione del cassone con gli scomparti di zavorramento e la posizione degli alberi compositi di acciaio/calcestruzzo, su cui verranno montate le torri.

Solo dopo l'accurato monitoraggio per alcune settimane delle fondazioni della torre e la verifica della loro stabilizzazione nella posizione stabilita è stato possibile iniziare la costruzione delle torri d'acciaio.

6.4 Le fondazioni dei piloni offshore del ponte 1915 Çanakkale

Il 1915 Çanakkale Bridge [56], in costruzione nel nord-ovest della Turchia e la cui ultimazione è prevista per il 18 marzo 2022, si trova sullo stretto dei Dardanelli, a circa 10 km a sud del Mar di Marmara.

Con una campata principale di 2.023 m e due campate laterali di 770 m, il ponte supererà l'Akashi Kaikyo di 32 m per diventare il ponte stradale sospeso più lungo del mondo (Fig. 24).

Bay, causes a movement between the coasts of about 2-2.5 cm (0.8-1.0 in) per year towards the West.

On August 17, 1999, a magnitude 7.6 Richter earthquake lasting 37 seconds occurred in Izmit Bay, severely damaging the city of Izmit, causing 17,000 deaths and more than 250,000 homelessness.

In the years 2009 and 2010 an investigation campaign was conducted to identify the faults, the stratigraphy and the ground conditions along the alignment established for the construction of the bridge and in the places where the foundations should have been built. In the following years, the Osman Gazi bridge was designed whose construction works, which began on March 30, 2013, ended on June 30, 2016.

The 2.7 km long bridge has three lanes in each direction, is 35.40 m wide, the towers are 250 m high, has two side

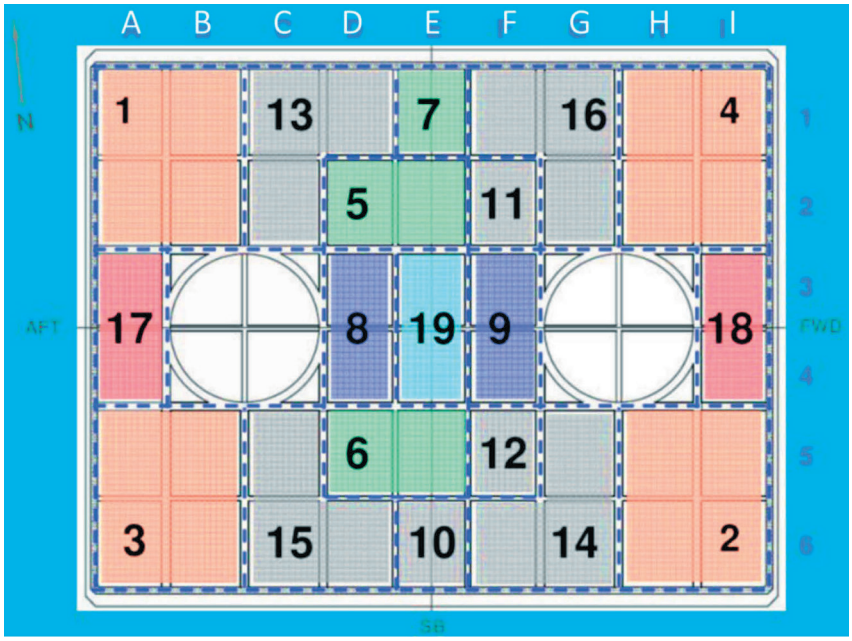


Figura 23 – Schema di suddivisione dei cassoni gravitazionali in scomparti di zavorramento [55].
Figure 23 – Diagram of subdivision of the gravitational caissons into ballasting compartments [55].

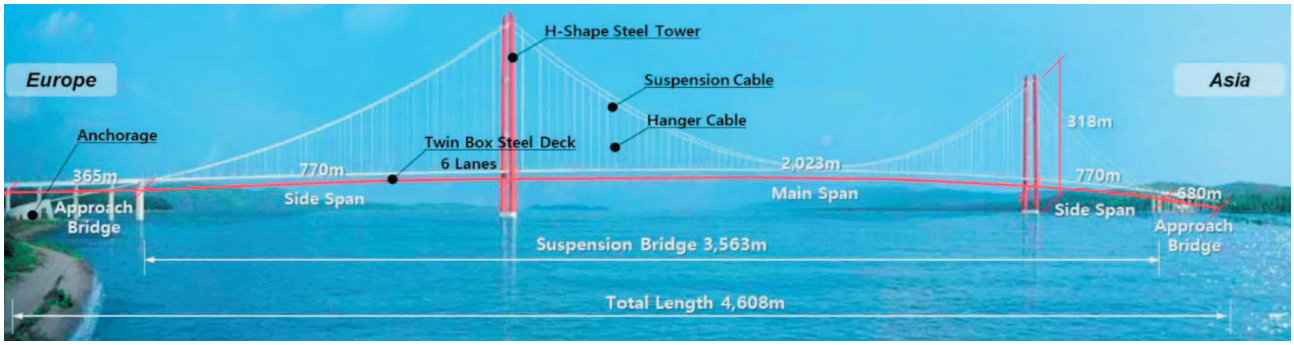


Figura 24 – 1915 Çanakkale Bridge [57].
Figure 24 – 1915 Çanakkale Bridge [57].

Le due carreggiate stradali, posate su sezioni di impalcato separate, distanti 9 m l'una dall'altra e connesse trasversalmente da setti intervallati, sono costituite da 3 corsie per senso di marcia, per una larghezza complessiva dell'impalcato di 45 m (Fig. 25). Le torri di sostegno dei cavi, fondate su cassoni, sono alte 318 m, il franco libero per il transito delle navi è di 69 m.

Il ponte si trova a circa 20 km dalla faglia dell'Anatolia settentrionale, un confine di placca tra la placca anatolica e la placca eurasiatica, e, come tale, ha il potenziale per sperimentare terremoti significativi.

Pertanto, le fondazioni del 1915 Çanakkale sono state progettate e realizzate utilizzando l'esperienza maturata nella costruzione dei ponti Rion-Antirion e Osman Gazi.

La fondazione di ciascuna torre è costituita da un cassone a gravità appoggiato sopra il fondo marino avendo rinforzato il suolo con inclusioni di pali in acciaio. Un letto di ghiaia è posto sotto la base del cassone (senza alcun collegamento strutturale tra il cassone e le teste dei pali) (Fig. 26).

La sequenza di realizzazione, di posizionamento e affondamento dei cassoni è analoga a quella del ponte Osman Gazi (Fig. 27).

7. Il pilone offshore del ponte progettato per superare il Sulafjorden

È opportuno anche citare il progetto del ponte sospeso multicampata da realizzare in Norvegia sul Sulafjorden,

spans of 566 m and a main span of 1550 m (Fig. 20) which is currently the 6th largest bridge in the world (Tab. 4).

The foundations of the bridge were built [52] where the sea depth is about 40 m. In addition, the soil has layers of dolomitic limestone, sand and clay; the rock is located hundreds of meters below the seabed.

*A hybrid solution like that adopted for the Rion-Antirion Bridge was chosen to build the foundations of the bridge (*v. "Osman Gazi Bridge - Geotechnical challenges and innovative solutions [53] and "The caissons of the tower foundations Izmit Bay Suspension Bridge Project" [54]*).*

After identifying the area on which to build the towers, the seabed was dredged to bring it uniformly to the level of the land project, which was then covered with a layer of sand of about 20 cm. Since the ground below the towers exhibits low strength properties, the subsoil has been improved with inclusions of 195 2.0 m diameter tubular steel piles with 20mm wall thickness placed in a 13 x 15 grid with spacing of 5 m with the top of the poles 0.75 m below the top of the 3 m thick gravel, which was made in successive uniform layers of increasing grain size from bottom to top.

A prefabricated reinforced concrete caisson was placed on top of the gravel bed onto which the steel pylons of the bridge were previously grafted (Fig. 21).

There is no structural connection between the caisson and the steel piles driven into the subsoil.

As Izmit Bay is in one of the most seismically active areas in the world, the bridge was designed to withstand earthquakes up to eighth Richter degree.

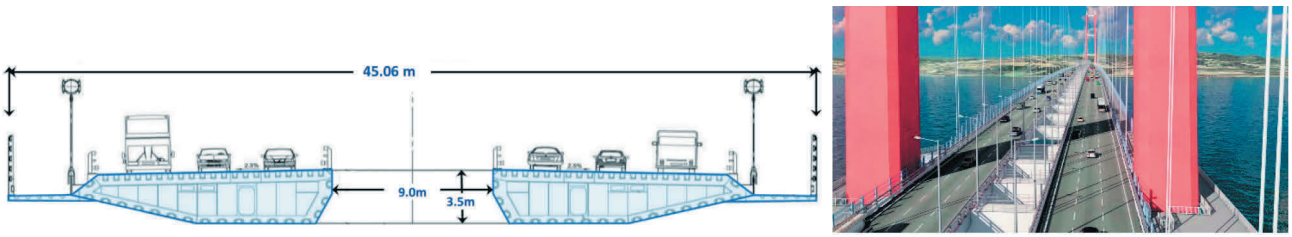


Figura 25 – 1915 Çanakkale Bridge: sezione trasversale dell'impalcato e rendering finale [57].
Figure 25 – 1915 Çanakkale Bridge: cross section of the deck and final rendering [57].

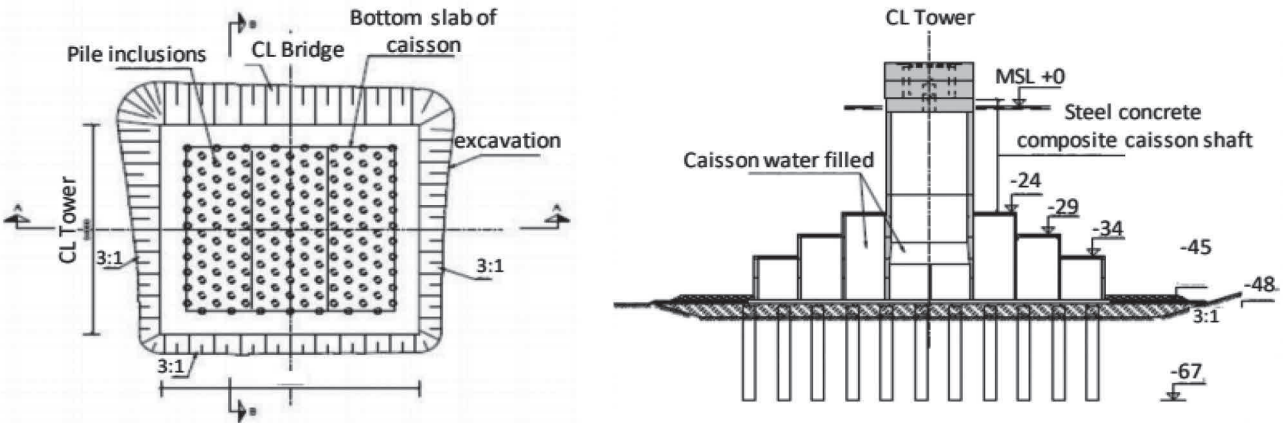


Figura 26 – Fondazioni del «1915 Çanakkale Bridge» [58].
Figure 26 – Foundations of «1915 Çanakkale Bridge» [58].

un fiordo lungo circa 9 km e largo circa 4-5 km che raggiunge una profondità massima di 445 m sotto il livello del mare.

Il progetto, predisposto tra il 2015 e il 2018 da RAMBOLL & SWECO per la Norwegian Public Roads Administration (Statensvegvesen), nell'ambito dell'adeguamento dell'autostrada E39 [60], si basa sulla lunga esperienza di successo nella realizzazione di grandi piattaforme *offshore* oceaniche oil & gas, che hanno fondazioni poste sino ad oltre 500 m di profondità.

Per l'attraversamento del Sulafiorden, tra le altre

The prefabricated caissons of both towers 54m long, 67m wide were placed at -40 m.

The caissons were made in a purpose-built dry dock and subsequently floated in a dock to allow for their completion [54].

Fig. 22 shows the two floating caissons ready to be towed by tugs which, after their correct positioning, will protrude +10.15 m above sea level.

Fig. 23 shows a section of the caisson with the ballast compartments and the location of the composite steel / concrete shafts on which the towers will be mounted.

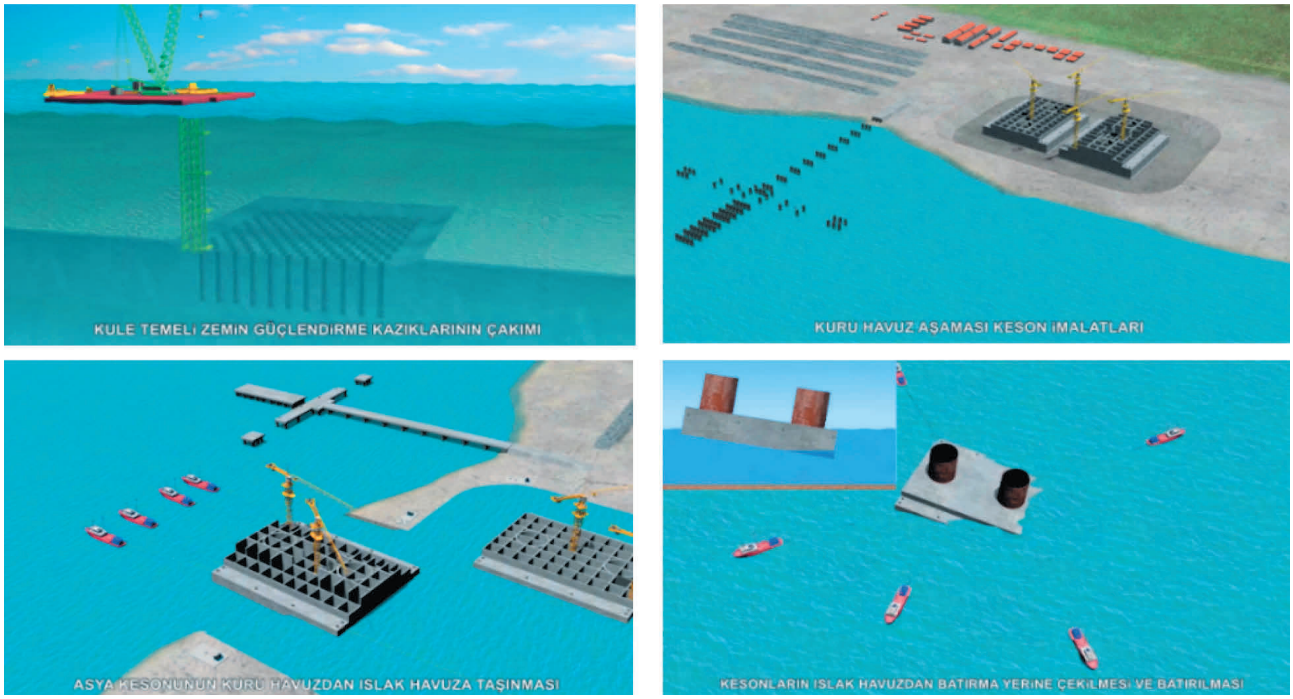


Figura 27 – Fasi di realizzazione delle fondazioni del «1915 Çanakkale Bridge» [59].
Figure 27 – Phases of construction of the foundations of the «1915 Çanakkale Bridge» [59].

ipotesi, è stata presa in considerazione la soluzione di ponte stradale sospeso a due campate da 2.000 m con fondazione della torre di sostegno del tipo GBS [61] (Fig. 28).

Per stabilizzare le fondazioni di questo ponte, che si trovano a profondità molto significative, anziché riempire gli scomparti di zavorramento con acqua o con cemento speciale, si è ipotizzato, analogamente a quanto avviene per gli impianti eolici offshore oceanici, di utilizzare un aggregato pesante derivato dalla magnetite (Fe_3O_4) che ha un peso specifico sino a 5,1 t/m³. Oltre ad essere un materiale che non viene corroso in ambiente marino, tale aggregato, a parità di volume inserito negli scomparti di zavorramento, consente di abbassare velocemente il baricentro dell'intera infrastruttura rendendola stabile in poco tempo e consente di ridurre il dimensionamento verticale dei silos/cassoni [62][63] in modo da offrire la minor superficie possibile alle spinte orizzontali dovute alle correnti marine. Quest'ultimo fattore è decisivo durante le fasi di posizionamento di precisione della struttura sul letto di elementi di ghiaia, soprattutto in presenza di correnti marine periodiche variabili. Nel calcolo del tempo di affondamento e stabilizzazione si deve tenere conto della possibilità di poter riempire più silos o elementi di cassone contemporaneamente.

A differenza delle fondazioni dei ponti realizzati in Turchia (Osman Gazi e 1915 Çanakkale) il cassone del ponte sul Sulafjorden è stato progettato con una struttura a celle cilindriche ad alveare (Fig. 29), anziché a celle piane a base quadrata, con la stessa tecnica utilizzata per le piattaforme oil & gas oceaniche, progettate per resistere alle maggiori pressioni dovute alla diversa profondità del mare.

Tutta la struttura posta in mare è prevista in cemento armato, mentre la torre di sostegno dei cavi principali è prevista in acciaio.

8. Elementi di riflessione per la progettazione del ponte a più campate

Il Progetto di Fattibilità del ponte a più campate nello stretto di Messina dovrà verificare innanzitutto in quali

Only after careful monitoring of the tower foundations for a few weeks and verifying their stabilization in the established position was it possible to begin construction of the steel towers.

6.4 The foundations of the offshore pylons of the 1915 Çanakkale bridge

The 1915 Çanakkale Bridge [56], under construction in northwestern Turkey and scheduled for completion on March 18, 2022, is located on the Dardanelles Strait, about 10 km south of the Sea of Marmara.

With a main span of 2,023 m and two side spans of 770 m, the bridge will cross the 32 m Akashi Kaikyo to become the longest suspension road bridge in the world (Fig. 24).

The two roadways laid on separate deck sections, 9 m away from each other and connected transversely by interspersed partitions, consist of 3 lanes in each direction of travel, for a total deck width of 45 m (Fig. 25). The cable support towers, founded on caissons, are 318 m high, the free clearance for the transit of ships is 69 m.

The bridge is located approximately 20 km from the Northern Anatolian Fault, a plate boundary between the Anatolian Plate and the Eurasian Plate, and, as such, has the potential to experience significant earthquakes.

Therefore, the 1915 Çanakkale foundations were designed and built using the experience gained in the construction of the Rion-Antirion and Osman Gazi bridges.

The foundation of each tower consists of a gravity caisson resting on the seabed having reinforced the ground with inclusions of steel poles. A gravel bed is placed under the base of the box (with no structural connection between the box and the pile heads) (Fig. 26).

The sequence of construction, positioning and sinking of the caissons is like that of the Osman Gazi bridge (Fig. 27).

7. The offshore pylon of the bridge designed to cross the Sulafjorden

It is also worth mentioning the project of the multi-span suspension bridge to be built in Norway on the Sulafjorden,

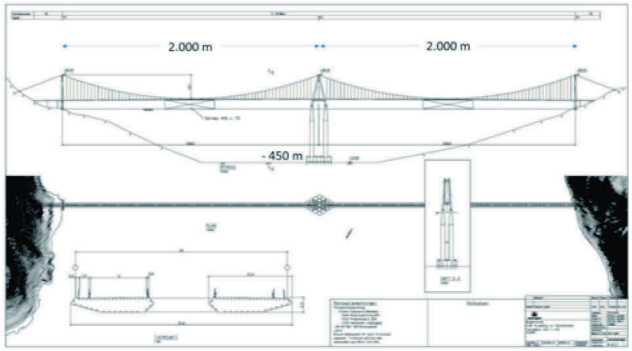


Figura 28 – Progetto del ponte stradale a due campate da 2000 m per l'attraversamento del Sulafjorden (Statens vegvesen).
Figure 28 – Project of the road bridge with two 2000 m spans for crossing the Sulafjorden (Statens vegvesen).

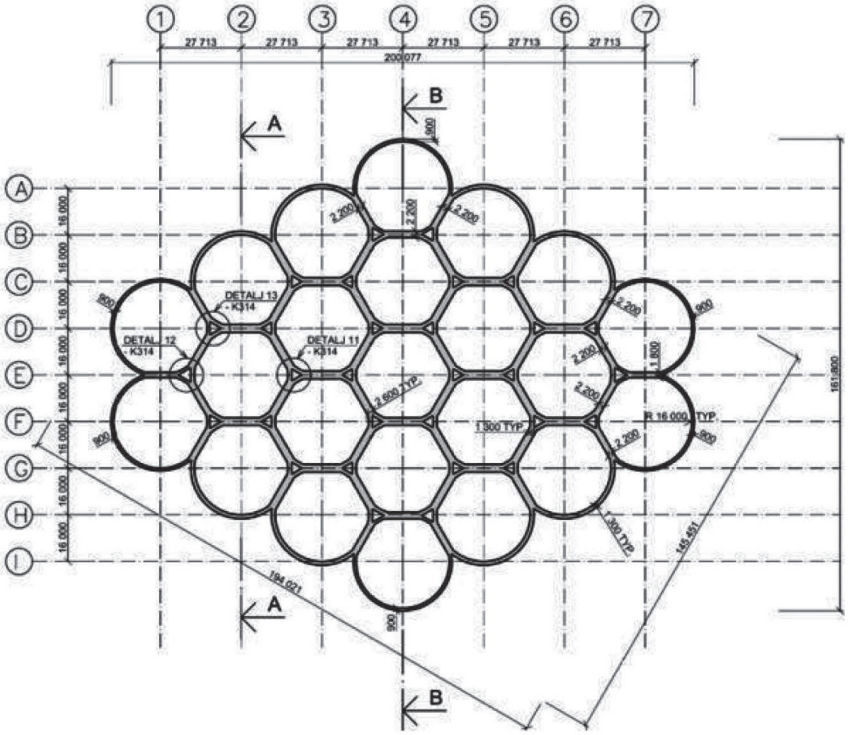


Figura 29 – Schema di suddivisione dei cassoni gravitazionali in scomparti di zavorramento (Statens vegvesen) [64].

Figure 29 – Diagram of subdivision of the gravitational caissons into ballasting compartments (Statens vegvesen) [64].

posizioni, con le tecnologie odierne, sia possibile progettare e realizzare piloni in mare.

A Nord di Messina esiste la Sella dello Stretto, una continuità montuosa sottomarina di limitata larghezza (tra uno e due km), appartenente all'arco calabro che, partendo dal Massiccio dell'Aspromonte in Calabria, prosegue nei Peloritani Settentrionali in Sicilia collegando le due regioni con una sorta di "cordone sottomarino". La Sella dello Stretto è l'unica area in cui è possibile progettare piloni di ponti a più campate ad una profondità compresa tra 100 e 120 m circa sotto al livello del mare.

Collocando la direttrice del ponte in modo da evitare di interessare la riserva naturale di Capo Peloro in Sicilia, la distanza tra Punta Pezzo sulla costa calabra e Contrada Arcieri sulla costa sicula è di circa 4 km.

Pertanto, nel rispetto del "principio dei progressi continui e graduali", la distanza tra i due piloni offshore potrebbe arrivare al massimo a 2000 m circa, se si volesse realizzare un ponte solo stradale a due o tre campate (Tab. 4) e non dovrebbe superare di molto i 1400 m nel caso in cui si volesse realizzare un ponte misto stradale e ferroviario (Tab. 3). Bisogna però tenere presente che i più grandi ponti ferroviari in grado di fare circolare treni lunghi e pe-

a fjord with about 9 km long and about 4-5 km wide that reaches a maximum depth of 445 m below sea level.

The project, prepared between 2015 and 2018 by RAMBOLL & SWECO for the Norwegian Public Roads Administration (Statensvegvesen), as part of the adaptation of the E39 [60] motorway, is based on the long and successful experience in the construction of large platforms offshore *ocean oil & gas, which have foundations placed up to over 500 m deep.*

For the crossing of the Sulafiorden, among other hypotheses, the solution of a suspension road bridge with two spans of 2,000 m with the foundation of the support tower of the GBS type was considered [61] (Fig. 28).

To stabilize the foundations of this bridge, which are located at very significant depths, instead of filling the ballast compartments with water or special cement, it was hypothesized, similar to what happens for oceanic offshore *wind farms, to use a derived heavy aggregate from magnetite (Fe_3O_4) which has a specific weight up to 5.1 t/m³. In addition to being a material that does not corrode in the marine environment, this aggregate, with the same volume inserted in the ballasting compartments, allows the center of gravity of the entire infrastructure to be quickly lowered, making it stable in a short time and allows to reduce the vertical sizing of the silos / caissons [62][63] in order to offer the smallest possible surface to the horizontal thrusts due to sea currents. This last factor is decisive during the phases of precision positioning of the structure on the bed of gravel elements, especially in the presence of variable periodic sea currents. When calculating the sinking and stabilization time, it is necessary to consider the possibility of being able to fill several silos or body elements at the same time.*

Unlike the foundations of the bridges made in Turkey (Osman Gazi and 1915 Çanakkale), the caisson of the bridge over the Sulafjorden was designed with a structure with cylindrical honeycomb cells (Fig. 29), instead of flat cells with a square base, with the same technique used for ocean oil & gas platforms, designed to withstand the increased pressures due to the different depths of the sea.

The whole structure placed in the sea is foreseen in reinforced concrete, while the supporting tower of the main cables is foreseen in steel.

8. Elements of reflection for the design of the multi-span bridge

The Feasibility Project of the multi-span bridge in the Strait of Messina will first have to verify in which positions,

santi attualmente non superano i 1100 m; il che richiederebbe la realizzazione di tre piloni offshore.

Basandosi sulle affermazioni del Prof. M. Virlogeux, FIP e FIB Honorary President, fatte durante il suo discorso del 9/7/2009 *"Long span bridges and Fritz Leaonhardt's heritage [65]"* attualmente dovrebbe essere possibile progettare ponti stradali e ferroviari ibridi (sospesi e strallati) con campate di 1500 m circa, così come si è verificato per lo Yavuz Sultan Selim Bridge.

Nella Relazione del GdL del MIMS viene reso noto che ad oggi "si dispone di informazioni geologiche e geotecniche abbastanza dettagliate – alla scala adeguata all'analisi delle opere di attraversamento – soltanto per la soluzione del progetto definitivo disponibile" (ovvero del ponte a campata unica da 3300 m).

Inoltre, "per soluzioni di attraversamento aereo diverse da quelle considerate nel progetto definitivo esistente, ovvero per ponti a più campate con pile in alveo, dovranno essere condotte indagini geofisiche, geologiche, geotecniche, fluidodinamiche. Si dovranno analizzare le azioni e gli effetti delle correnti marine, la presenza di faglie, frane sottomarine e di tutti i tipi di accumuli di sedimenti sommersi che possono subire deformazioni, spostamenti, rottura, liquefazione dinamica. Le indagini dovranno permettere di valutare il comportamento meccanico dei volumi di terreno che influenzano e sono influenzati dalle opere a terra e in alveo. Bisognerà inoltre considerare che nelle parti centrali dello Stretto, nella zona assiale del graben, è attesa una subsidenza cosismica superiore al metro in caso di attivazione di faglie ai margini dello Stretto per terremoti di magnitudo M > 6,5". Successivamente alla chiusura dei lavori del GdL del MIMS, è stata pubblicato sulla prestigiosa rivista internazionale «Earth-Science Reviews» l'articolo *"The Strait of Messina: Seismotectonics and the source of the 1908 earthquake"* (G. Barreca, F. Gross, L. Scarfì, M. Aloisi, C. Monaco, S. Krastele, 2021) [66][67], che fornisce nuovi significativi elementi di approfondimento sul tema.

Da non trascurare il rischio di collisione con le navi in transito nello Stretto, per il quale si dovranno studiare le opportune misure di protezione e adattare le norme di navigazione.

La collocazione dei piloni a terra dovrebbe essere tale da minimizzare l'impatto ambientale sia sull'assetto morfologico che sugli insediamenti delle due rive. Inoltre, i grandi blocchi di ancoraggio dei cavi di sostegno dovrebbero essere posti in luoghi ambientalmente meno invasivi e facilmente mimetizzabili.

Per le fondazioni *offshore* si dovrebbe tenere conto degli sviluppi relativi all'isolamento sismico e alla dissipazione di energia degli ultimi trent'anni e alle esperienze maturate durante la realizzazione di alcuni grandi ponti costruiti recentemente in zone altamente sismiche (Rion Antirion, Osman Gazi e 1915 Çanakkale).

with today's technologies, it is possible to design and build pylons at sea.

North of Messina there is the of Saddle of Strait, an underwater mountainous continuity of limited width (between one and two km), belonging to the Calabrian arc which, starting from the Aspromonte massif in Calabria, continues in the Northern Peloritani in Sicily, connecting the two regions with a sort of "submarine cordon". The Saddle of Strait is the only area in which it is possible to design multi-span bridge piers at a depth between about 100 and 120 meters below sea level.

Placing the bridge director in order to avoid affecting the Capo Peloro nature reserve in Sicily, the distance between Punta Pezzo on the Calabrian coast and Contrada Arcieri on the Sicilian coast is about 4 km.

Therefore, in compliance with "the principle of continuous and gradual progress", the distance between the two offshore *pylons could reach a maximum of about 2000 m, if a road-only bridge with two or three spans were to be built (Tab. 4) and should not exceed much the 1400 m in case you want to build a mixed road and rail bridge (Tab. 3). However, it must be borne in mind that the largest railway bridges capable of carrying long and heavy trains currently do not exceed 1100 m; which would require the construction of three* offshore *pylons.*

Based on the statements of Prof. M. Virlogeux, FIP and FIB Honorary President, made during his speech on 9 July 2009 "Long span bridges and Fritz Leaonhardt's heritage [65]" *it should now be possible to design hybrid road and rail bridges (suspended and cable-stayed) with spans of about 1500 meters, as occurred for the Yavuz Sultan Selim Bridge.*

In the Report of the WG of the MIMS it is disclosed that to date "we have quite detailed geological and geotechnical information – at the scale suitable for the analysis of the crossing works – only for the solution of the final project available" (ie the single-span bridge from 3300 m).

Furthermore, "for aerial crossing solutions other than those considered in the existing final project, or for bridges with multiple spans with piles in the riverbed, geophysical, geological, geotechnical and fluid dynamics surveys will have to be carried out. The actions and effects of sea currents, the presence of faults, submarine landslides and all types of submerged sediment accumulations that can undergo deformations, displacements, rupture, dynamic liquefaction will have to be analyzed. The investigations will have to make it possible to evaluate the mechanical behavior of the volumes of soil that influence and are influenced by the works on the ground and in the riverbed. It will also be necessary to consider that in the central parts of the Strait, in the axial zone of the graben, a cosismic subsidence greater than one meter is expected in the event of activation of faults at the edge of the Strait due to earthquakes of magnitude M> 6.5". After the closing of the work of the MIMS WG, the article "The Strait of Messina: Seismotectonics and the source of the 1908 earthquake" (G. Barreca, F. Gross, L. Scarfì, M. Aloisi, C. Monaco, S. Krastele, 2021) [66][67], which provides significant new elements for in-depth analysis on the subject.

La presenza nello Stretto di forti venti in diversi periodi dell'anno è un problema di notevole incidenza sulla percorribilità del ponte. Per ridurre le interazioni / vibrazioni vento treno si potrebbero tenere in considerazione le esperienze maturate per la realizzazione di ponti in zone dove si verificano i tifoni (es. Tsing Ma Bridge, sopra citato). Una soluzione di impalcato di tale tipo era stata prospettata per il ponte sullo stretto di Messina dal Gruppo Lambertini, che nel 1982 ha presentato una versione aggiornata del progetto del ponte premiato nel 1970. Il nuovo ponte, progettato dal Prof. F. Leonhardt, De Miranda e altri, prevedeva un impalcato simile a quello che è stato poi realizzato per il ponte ibrido H.R.S.B. Yavuz Sultan Selim, però con la possibilità di inserire la ferrovia dentro l'impalcato per proteggerla dai venti (Fig. 30), così come avvenuto per il ponte Tsing Ma.

Da ultimo va sottolineato che nella Relazione del GdL ministeriale si afferma che "tra la Sicilia e la terraferma … i maggiori tempi di viaggio sono dovuti non solo alla mancanza di un attraversamento stabile ma anche alle caratteristiche delle linee, in particolare per i limiti di modulo (che impediscono treni lunghi fino a 700 m) e di tracciato (curve e pendenze) oltre che di sagoma; il superamento di questi limiti necessita quindi non solo dell'attraversamento stabile ma anche di una completa sistemazione a standard europeo della rete."

Il ponte a campata unica è stato dimensionato per treni lunghi sino a 600 m, valore utilizzato in Sicilia anche per la progettazione delle nuove linee che faranno parte del corridoio europeo TEN-T Scandinavo-Mediterraneo [70]. Sarà quindi necessario effettuare un adeguamento alle STI europee attuali e prevedibili future (treni lunghi 750 m e oltre) del progetto definitivo per poter procedere al confronto, auspicato dal GdL Ministeriale, tra la soluzione ponte a campata unica e quella del ponte a più campate.

The risk of collision with ships in transit in the Strait should not be overlooked, for which appropriate protection measures must be studied and the navigation rules adapted.

The location of the pylons on the ground should be such as to minimize the environmental impact both on the morphological structure and on the settlements of the two banks. In addition, the large anchor blocks of the support cables should be placed in less environmentally invasive and easily camouflaged places.

For offshore *foundations, the developments relating to seismic isolation and energy dissipation of the last thirty years and the experiences gained during the construction of some large bridges recently built in highly seismic areas should be taken into account (Rion Antirion, Osman Gazi and 1915 Çanakkale).*

The presence of strong winds in the Strait at different times of the year is a problem with a strong impact on the practicability of the bridge. To reduce the interactions / vibrations of the wind train, the experiences gained for the construction of bridges in areas where typhoons occur (egg Tsing Ma Bridge) could be taken into consideration. A deck solution of this type had been proposed for the bridge over the Strait of Messina by the Lambertini Group, which in 1982 presented an updated version of the bridge project awarded in 1970. The new bridge, designed by Prof. F. Leonhardt, De Miranda and others, envisaged a deck like that which was later built for the HRSB hybrid bridge Yavuz Sultan Selim, but with the possibility of inserting the railway inside the deck to protect it from the winds (Fig. 30), as was the case for the Tsing Ma bridge.

Finally, it should be emphasized that in the Ministerial WG Report it is stated that "between Sicily and the mainland... the longer travel times are due not only to the lack of a stable crossing but also to the characteristics of the lines, in particular for the module limits (which prevent trains up to 700 m long) and of layout (curves and slopes) as well as of shape; exceeding these limits therefore requires not only stable crossing but also a complete European standard arrangement of the network."

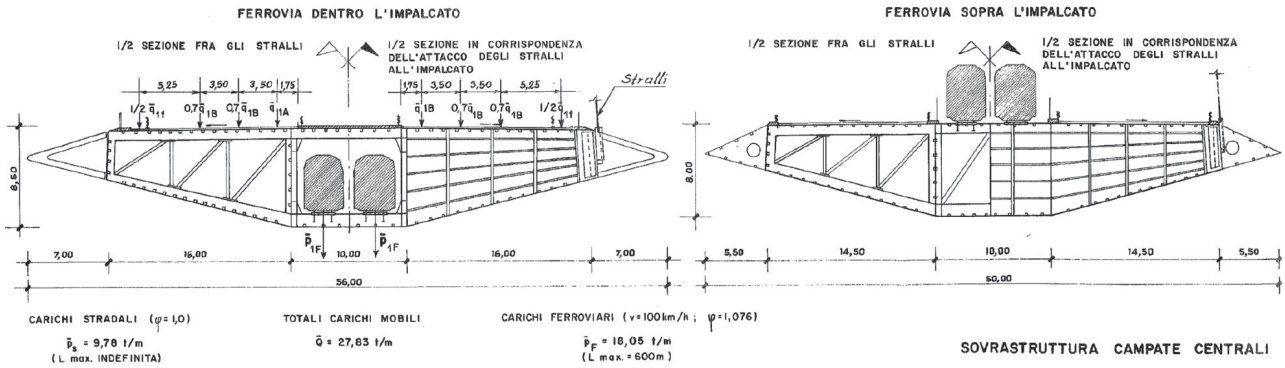


Figura 30 – Soluzione 1982 presentata dalla Società Lambertini (F. Leonhardt, De Miranda e altri) per l'attraversamento stabile dello stretto di Messina [68][69].

Figure 30 – 1982 solution presented by the Lambertini Company (F. Leonhardt, De Miranda and others) for the stable crossing of the Strait of Messina [68][69].

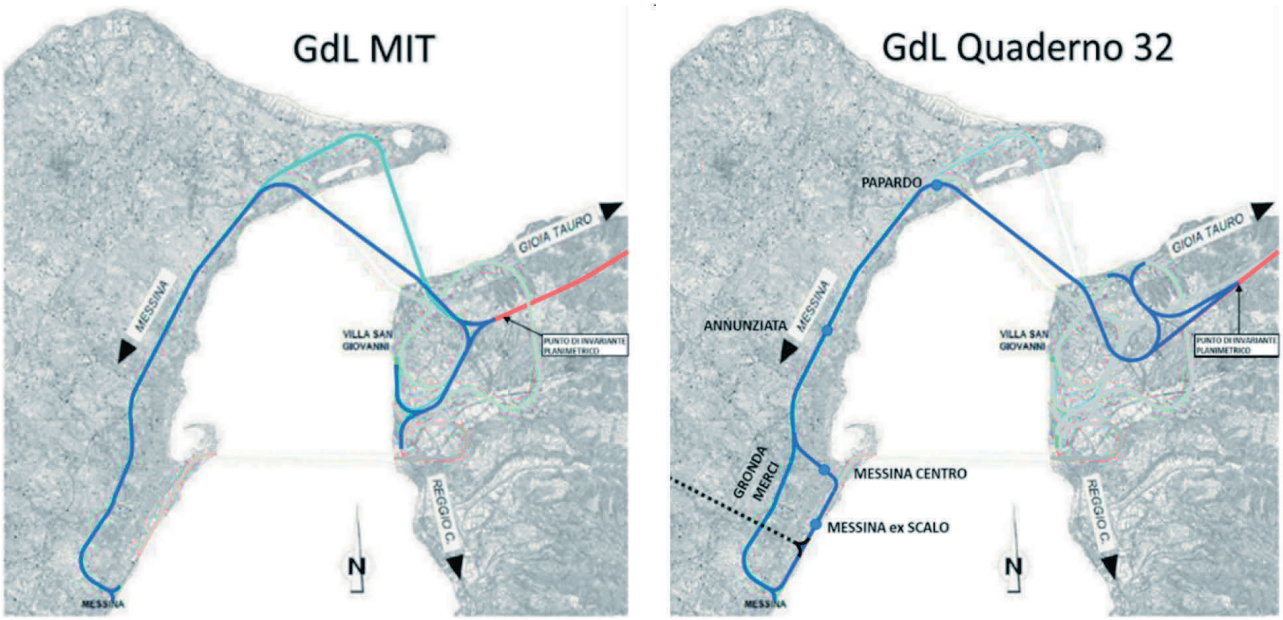


Figura 31 – Confronto tra i tracciati ferroviari del ponte a una (celeste) e a più campate (blu) presi in considerazione dal GdL ministeriale con quelli ipotizzati dal GdL del Quaderno 32 ALDAI (G. Saccà *et al.*, 2021) [80][81]. In rosso la linea AV Salerno-Reggio Calabria in progettazione.

Figure 31 – Comparison between the railway tracks of the bridge with one (light blue) and multiple spans (blue) taken into consideration by the ministerial WG with those hypothesized by the WG of ALDAI Quaderno 32 (G. Saccà et al.*, 2021) [80][81]. The high-speed Salerno-Reggio Calabria line is being planned in red.*

9. I tracciati ferroviari e autostradali

Per quanto riguarda la scelta della direttrice lungo cui realizzare il ponte, sarebbe opportuno tenere conto di alcune imprescindibili esigenze (Fig. 31).

Sulla costa calabra il ponte dovrebbe raccordarsi facilmente con l'autostrada A2 del Mediterraneo in località Piale, con la nuova linea AV Salerno-Reggio Calabria e con la linea ferroviaria storica a nord (e non a sud) di Villa San Giovanni in modo da servire tutte le stazioni esistenti. Questa soluzione sarebbe importante per consentire un servizio ferroviario totalitario tra tutte le località delle due sponde. Infatti, realizzando il raccordo con la linea ferroviaria esistente a Cannitello anziché a Concessa si eviterebbe di escludere, alla fine dei lavori, Villa San Giovanni sia dai percorsi ferroviari metropolitani (ME-RC), che da quelli interregionali e a lunga percorrenza aventi origine/destinazione Reggio di Calabria.

Sulla costa sicula, il ponte multi-campata pur se collocato in una posizione molto più a sud rispetto a quella prevista dal progetto del ponte a campata unica, dovrebbe comunque consentire la realizzazione della stazione Papardo, in un luogo non troppo lontano dagli istituti universitari e dall'omonimo ospedale, e poco più a sud lo svincolo autostradale Curcuraci, già previsto nel progetto del ponte a campata unica.

Il proseguimento sino alle autostrade siciliane (A18 e

The single-span bridge was designed for trains up to 600 m long, a value used in Sicily also for the design of the new lines that will be part of the European TEN-T Scandinavian-Mediterranean corridor [70]. It will therefore be necessary to adapt the final project to the current and foreseeable future European TSIs (trains 750 m long and over) in order to be able to proceed with the comparison, desired by the Ministerial WG, between the single-span bridge solution and that of the multi-span bridge.

9. The railway and motorway routes

As regards the choice of the route along which to build the bridge, it would be appropriate to consider some essential requirements (Fig. 31).

On the Calabrian coast, the bridge should easily connect with the A2 Mediterranean motorway in Piale, with the new HS Salerno-Reggio Calabria line and with the historic railway line north (and not south) of Villa San Giovanni to serve all existing stations. This solution would be important to allow a totalitarian railway service between all the localities of the two shores. In fact, making the connection with the existing railway line at Cannitello instead of Concessa would avoid excluding Villa San Giovanni from both metropolitan railway routes (ME-RC) and from inter-regional and long-distance ones having origin / destination Reggio di Calabria.

On the Sicilian coast, the multi-span bridge, even if lo-

A20) potrebbe essere mantenuto così come previsto dal Progetto Definitivo del Ponte a campata unica, mentre il collegamento con le linee ferroviarie dovrebbe tenere conto della separazione del traffico viaggiatori da quello merci in ambito urbano, in linea con le direttive di RFI. Realizzando la "Gronda merci" si potrebbero evitare inopportune interferenze e limitazioni di orario e velocità determinate dal transito di treni merci nelle nuove fermate e stazioni viaggiatori di Messina.

Inoltre, le nuove stazioni di Messina dovrebbero essere localizzate in luoghi strategici per favorire efficaci collegamenti intermodali.

La nuova stazione centrale di Messina potrebbe essere realizzata a Maregrosso (attuale Messina Scalo), così come già previsto da RFI e Italferr nel progetto preliminare del 2002 del ponte a campata unica. Per massimizzare la popolazione servita dovrebbero essere realizzate anche le stazioni Papardo e Annunziata (come già previsto nel progetto del ponte a campata unica) e la fermata Messina Centro.

Quest'ultima sarebbe collocata in una posizione strategica vicina al porto storico e ben interfacciata con il Trasporto Pubblico Locale, in quanto servita dalla linea tranviaria esistente oltre che essere vicina alla stazione delle autocorriere, prossima al porto, dove ormeggiano oltre alle navi veloci in servizio nello Stretto anche le navi da crociera. In tal modo tutti i viaggiatori, compresi i croceristi, potrebbero raggiungere velocemente e senza trasbordi anche l'aeroporto internazionale di Catania e l'aeroporto di Reggio Calabria.

Tenuto conto che la città di Messina storicamente è cresciuta intorno al suo porto, la scelta strategica di collocare la fermata a Messina Centro (Piazza Cairoli-Università) piuttosto che a Europa (vicino al ponte di Camàro), potrebbe rappresentare un efficace biglietto da visita non solo per la città ma per la Sicilia intera.

Collocando le nuove stazioni di Messina in periferia (Messina Gazzi e Europa), tra l'altro, non verrebbero rispettati gli obiettivi ONU 2030 in quanto verrebbe disincentivato l'uso del treno a favore dei mezzi privati su gomma e dei mezzi navali per l'attraversamento dello Stretto. In base ai dati pubblicati negli ultimi anni sui Documenti di Economia e Finanza solo l'8% degli spostamenti della popolazione di Messina e di Reggio Calabria avverrebbe tramite mezzi pubblici contro un obiettivo di almeno il 40% fissato per le città metropolitane [71]. I nuovi investimenti per essere sostenibili dovrebbero incentivare l'uso dei mezzi pubblici collocando le stazioni e le fermate in luoghi strategici, baricentrici e facilmente raggiungibili in modo da creare efficaci punti di interscambio intermodali, che siano centri di vita accoglienti rappresentativi del luogo.

In Fig. 32 è indicata una possibile direttrice tra Punta Pezzo (RC) e Contrada Arcieri (ME), lungo la quale poter realizzare un ponte stradale e ferroviario multi-campata (Fig. 33). Le linee batimetriche evidenziano che i piloni

cated in a much more southern position than that envisaged by the single-span bridge project, should still allow the construction of the Papardo station, in a place not too far from the universities and from the hospital of the same name, and a little further south the Curcuraci motorway junction, already foreseen in the single-span bridge project.

The continuation up to the Sicilian motorways (A18 and A20) could be maintained as foreseen by the Final Project of the single-span bridge, while the connection with the railway lines should consider the separation of passenger traffic from freight traffic in the urban area, in line with RFI directives. By creating the "Gronda merci", it would be possible to avoid undue interference and limitations of time and speed caused by the transit of freight trains in the new stops and passenger stations of Messina.

Furthermore, the new Messina stations should be in strategic places to favor effective intermodal connections.

The new Messina central station could be built in Maregrosso (current Messina Scalo), as already planned by RFI and Italferr in the 2002 preliminary design of the single-span bridge. To maximize the population served, the Papardo and Annunziata stations should also be built (as already foreseen in the single-span bridge project) and the Messina Centro stop.

The latter would be in a strategic position close to the historic port and well interfaced with Local Public Transport, as it is served by the existing tramway as well as being close to the bus station, next to the port, where they moor in addition to the fast ships in service. cruise ships are also in the Strait. In this way, all travelers, including cruise passengers, could also quickly and without transshipment reach the international airport of Catania and Reggio Calabria airport.

Considering that the city of Messina has historically grown around its port, the strategic choice of placing the stop in Messina Centro (Piazza Cairoli-Università) rather than in Europe (near the Camàro bridge), could represent an effective business card. not only for the city but for the whole of Sicily.

By placing the new Messina stations on the outskirts (Messina Gazzi and Europe), among other things, the UN 2030 objectives would not be respected as the use of the train would be discouraged in favor of private road vehicles and naval vehicles for transport. crossing of the Strait. According to data published in recent years in the Economic and Financial Documents, only 8% of the movements of the population of Messina and Reggio Calabria would take place by public transport against a target of at least 40% set for metropolitan cities [71]. To be sustainable, new investments should encourage the use of public transport by placing stations and stops in strategic, central and easily accessible places in order to create effective intermodal interchange points, which are welcoming life centers representative of the place.

Fig. 32 shows a possible route between Punta Pezzo (RC) and Contrada Arcieri (ME), along which a multi-span road and rail bridge can be built (Fig. 33). The bathymetric

Figura 32 – Direttrice ipotizzata per il ponte sospeso multicampata [72][73].
Figure 32 – Hypothesized director for the multi-span suspension bridge [72][73].

offshore sarebbero collocati su fondali profondi poco più di 100 m, in luoghi dove non sono presenti linee di faglia (Fig. 34).

Per ulteriori approfondimenti si rimanda al Quaderno n°32 ALDAI presentato il 7 giugno 2021 durante il webinar «Infrastrutture strategiche per l'Italia: L'attraversamento stabile dello Stretto di Messina» i cui atti sono stati pubblicati anche sul sito del CIFI [78][79]. Il Quaderno è stato ripresentato in versione aggiornata lunedì 11 ottobre 2021 durante il Festival dello Sviluppo Sostenibile ASviS 2021 [80][81].

lines show that the offshore pylons would be located on depths just over 100 m deep, in places where there are no fault lines (Fig. 34).

For further information, please refer to the Quaderno n ° 32 ALDAI presented on 7 June 2021 during the webinar "Strategic infrastructure for Italy: the stable crossing of the Strait of Messina" whose documents were also published on the CIFI website [78] [79]. The Quaderno was resubmitted in an updated version on Monday 11 October 2021 during the ASviS 2021 Sustainable Development Festival [80][81].

Figura 33 – Ipotesi di ponte sospeso multicampata con impalcato a due piani [74][75], che potrebbe essere anche ibrido H.R.S.B. per ridurre le flessioni dell'impalcato al passaggio dei treni [76].
Figure 33 – Hypothesis of multi-span suspension bridge with two-storey deck [74][75], which could also be hybrid H.R.S.B. to reduce the bending of the deck when trains pass [76].

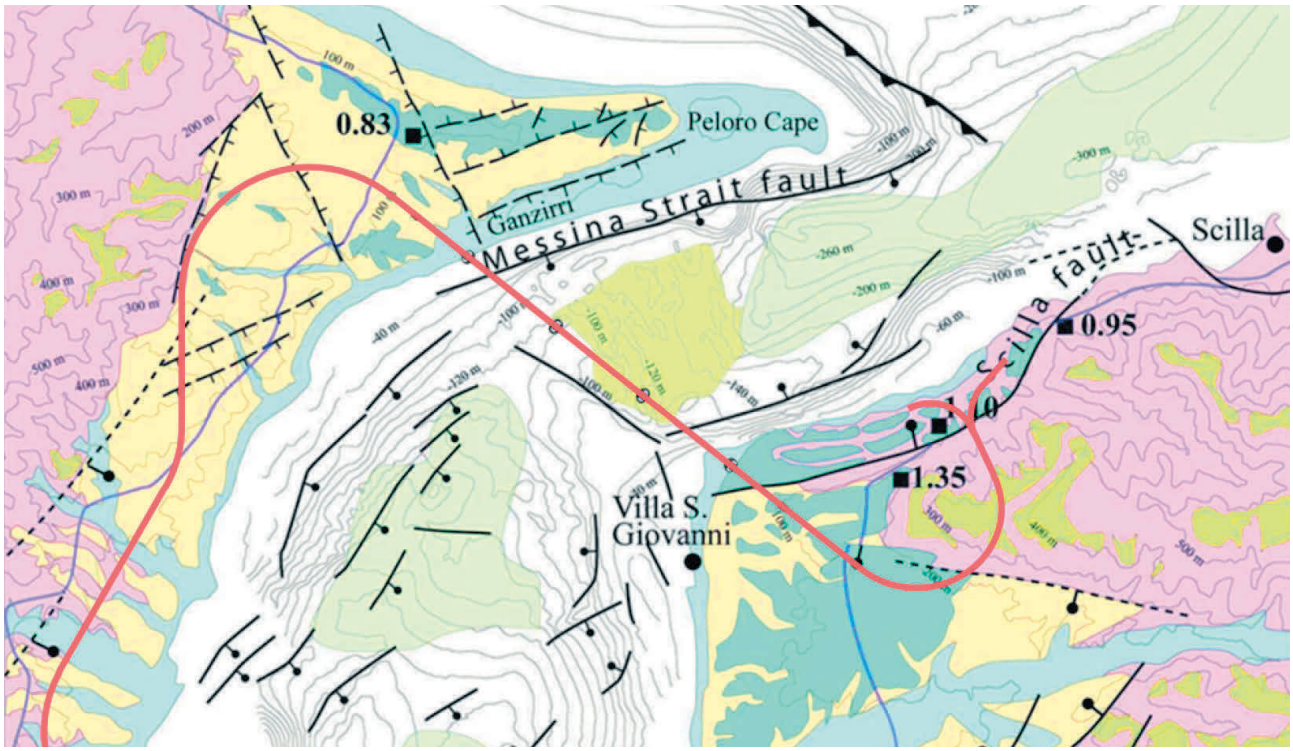


Figura 34 – Mappa geologica dell'area dello Stretto con sovrapposto il tracciato di massima del ponte a più campate [77].
Figure 34 – Geological map of the Strait area with the rough layout of the multi-span bridge superimposed [77].

10. Conclusioni

La soluzione "Ponte a più campate" per l'attraversamento dello stretto di Messina consentirà di realizzare piloni e campate di dimensioni confrontabili con quelle dei ponti stradali e ferroviari già realizzati.

Dovranno essere condotte indagini approfondite circa le caratteristiche geotecniche del fondale in corrispondenza dei piloni per individuare ed evitare eventuali faglie attive, zone franose, tenere in considerazione l'azione nel tempo delle correnti marine, ecc.

La larghezza di circa 4 km tra le coste dello Stretto in corrispondenza della Sella, zona con la minima profondità del fondale, permette di ipotizzare una struttura a 3 campate principali dell'ordine di 1.400 m (ibride) pari a quelle massime esistenti per ponti misti stradali e ferroviari, con due piloni intermedi in alveo e due piloni di estremità, ubicati in corrispondenza delle rive.

In conclusione, nel rispetto del principio dei progressi continui e graduali, oggi dovrebbe essere possibile progettare un ponte stradale e ferroviario a più campate confrontandolo, nella prima fase del progetto di fattibilità tecnico economica, con la soluzione a campata unica opportunamente adeguata, in linea con quanto stabilito dal Gruppo di Lavoro Ministeriale.

10. Conclusions

The "Multi-span bridge" solution for crossing the Strait of Messina will allow the construction of pylons and spans of comparable size with those of road and railway bridges already built.

In-depth investigations will have to be carried out on the geotechnical characteristics of the seabed at the pylons to identify and avoid any active faults, landslide areas, take into account the action of sea currents over time, etc.

The width of about 4 km between the coasts of the Strait in correspondence with the Sella, an area with the minimum depth of the seabed, allows us to hypothesize a structure with 3 main spans of the order of 1,400 m (hybrid) equal to the maximum existing for mixed road bridges and railways, with two intermediate pylons in the riverbed and two end pylons, located at the banks.

In conclusion, in compliance with the principle of continuous and gradual progress, today it should be possible to design a multi-span road and railway bridge by comparing it, in the first phase of the technical-economic feasibility project, with the suitably adequate single-span solution, in line with as established by the Ministerial Working Group.

BIBLIOGRAFIA - *REFERENCES*

[1] F. Brancaleoni *et al.* (2009), "*The Messina Strait Bridge. A challenge and a dream*", Stretto di Messina S.p.A., commercializzato anche in formato Kindle.

[2] Progetto Musmeci (2012), http://www.ingegneriaedintorni.com/2012/01/il-ponte-sulle-stretto-di-messina-di.html, ultimo accesso agosto 2021.

[3] Progetto Nervi (2011), http://www.ingegneriaedintorni.com/2011/12/il-ponte-sullo-stretto-di-pierluigi.html, ultimo accesso agosto 2021.

[4] Gazzetta Ufficiale 11 gennaio 1972 (1972), https://www.gazzettaufficiale.it/do/gazzetta/downloadPdf?dataPubblicazioneGazzetta=19720111&numeroGazzetta=8&tipoSerie=FO&tipoSupplemento=GU&numeroSupplemento=0&progressivo=0&estensione=pdf&edizione=0, ultimo accesso agosto 2021.

[5] Società Stretto di Messina (2012), https://www.stradeanas.it/it/lazienda/chi-siamo/struttura-del-gruppo/stretto-di-messina-spa, ultimo accesso agosto 2021.

[6] Ponte sullo stretto di Messina - Elaborato PG0020-F0 – Relazione Tecnica Generale (2011), pag. 344 di 671 https://va.minambiente.it/File/Documento/37121, ultimo accesso agosto 2021.

[7] Ponte sullo stretto di Messina (2011), https://va.minambiente.it/it-IT/Oggetti/Info/1, ultimo accesso agosto 2021.

[8] Ponte sullo stretto di Messina (2016), https://structurae.net/en/structures/messina-straits-bridge, ultimo accesso agosto 2021.

[9] SILOS scheda n. 65 – Ponte sullo Stretto, https://silos.infrastrutturestrategiche.it/Home/Scheda/1010, ultimo accesso agosto 2021.

[10] Stretto di Messina – Liquidazione (2013), https://www.stradeanas.it/it/lazienda/chi-siamo/struttura-del-gruppo/stretto-di-messina-spa, ultimo accesso agosto 2021.

[11] Relazione Gruppo di Lavoro (2021), https://www.mit.gov.it/sites/default/files/media/notizia/2021-05/Relazione%20-%20GdL%20Attraversamento%20stabile%20stretto%20%281%29.pdf, ultimo accesso febbraio 2022.

[12] Audizione del Ministro Giovannini, https://www.mit.gov.it/comunicazione/news/attraversamento-dello-stretto-di-messina-audizione-del-ministro-presso-le, ultimo accesso febbraio 2022.

[13] Video audizione del Ministro Giovannini (2021), https://webtv.camera.it/evento/18847, ultimo accesso agosto 2021.

[14] Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibile (2021 e 2022), https://www.infoparlamento.it/Pdf/ShowPdf/8417 https://www.mit.gov.it/comunicazione/news/ponte-messina-mims-avviata-la-procedura-per-la-realizzazione-di-uno-studio-di, ultimo accesso febbraio 2022.

[15] FERRMED, FMWG (2021), http://ferrmed.com/activity/newsandevents/presentation-progress-ferrmed-study-traffic-and-modal-shift-optimisation-eu, ultimo accesso ottobre 2021.

[16] *Railroad railway bridges* (2022), https://structurae.net/en/structures/bridges/railroad-railway-bridges, ultimo accesso agosto 2021.

[17] Atti convegno CIFI (2016), http://www.cifi.it/UplDocumenti/Roma30112016/08_CIFII_TO-LY.pdf, ultimo accesso dicembre 2021.

[18] Astaldi - Politecnico di Milano (2017), http://www.ingciv.polimi.it/wp-content/uploads/2017/10/Terzo-Ponte-Bosforo-POLIMI-17.10.2017.pdf, ultimo accesso agosto 2021.

[19] *Railly News* (2021), https://en.rayhaber.com/2021/02/adapazari-sabiha-gokcen-arasina-yuksek-hizli-tren-geliyor/, ultimo accesso ottobre 2021.

[20] Yavuz Sultan Selim bridge (2017), https://structurae.net/en/structures/yavuz-sultan-selim-bridge, ultimo accesso agosto 2021.

[21] https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Projeler/ABProjeleri/5-ICA%20SHMS%20Presentation%20Rev%2006.pdf, ultimo accesso ottobre 2021.

[22] *Tsing Ma Bridge:* https://structurae.net/en/structures/tsing-ma-bridge, ultimo accesso agosto 2021.

[23] ICA (2017), https://www.polyu.edu.hk/cnerc-steel/en/construction/hong-kong-engineering/tsing-ma-bridge/, ultimo accesso ottobre 2021.

[24] *MTR System Map Hong Kong,* http://www.mtr.com.hk/en/customer/services/system_map.html, ultimo accesso ottobre 2021.

[25] *Tsing Ma Control Area Regulation* (1997), https://www.elegislation.gov.hk/hk/cap498B, ultimo accesso agosto 2021.

[26] *Transport Department Hong Kong - Driving in the Tsing Ma Control Area,* https://www.td.gov.hk/en/publications_and_press_releases/publications/free_publications/driving_in_the_tsing_ma_control_area/index.html, ultimo accesso febbraio 2022.

[27] *Running safety analysis of a train on the Tsing Ma Bridge under turbulent winds* (2010), https://www.researchgate.net/publication/226514591_Running_safety_analysis_of_a_train_on_the_Tsing_Ma_Bridge_under_turbulent_winds, ultimo accesso agosto 2021.

[28] *Major bridge development in Hong Kong*, https://academic.hep.com.cn/fsce/article/2011/2095-2430/1990, ultimo accesso febbraio 2022.

[29] *The Bridge Engineering 2 Conference* (2017), https://silo.tips/download/the-bridge-engineering-2-conference#, ultimo accesso agosto 2021.

[30] International Database and Gallery of Structures, *Road and highway bridges*, https://structurae.net/en/structures/ bridges/road-bridges, ultimo accesso agosto 2021.

[31] Ponte sullo Stretto - Politecnico di Milano (2017), https://www.youtube.com/watch?v=MuXye_gSyMw&t=1177s, ultimo accesso dicembre 2021.

[32] Analisi di Percorribilità, Sicurezza e Comfort (2011), https://va.minambiente.it/File/Documento/36790, ultimo accesso dicembre 2021.

[33] *Runability, Safety and Comfort Analysis of the planned Messina Strait Bridge* (2011), https://bwk.kuleuven.be/ apps/bwm/eurodyn2011/papers/MS07-1368.pdf, ultimo accesso dicembre 2021.

[34] Progetto Definitivo - Schema di piano di gestione delle emergenze (2003), https://va.minambiente.it/File/Documento/36422, ultimo accesso dicembre 2021.

[35] Progetto Definitivo - Preliminary Operation and Emergency Manual (2003), https://va.minambiente.it/File/Documento/37142, ultimo accesso dicembre 2021.

[36] Progetto Definitivo dell'Attraversamento stabile dello Stretto di Messina, https://va.minambiente.it/it-IT/Oggetti/Documentazione/1/2, ultimo accesso febbraio 2022.

[37] SdM-Guida_alla_consultazione_del_Progetto Definitivo dell'attraversamento stabile dello Stretto di Messina, https://va.minambiente.it/File/Documento/42586, https://va.minambiente.it/it-IT/Oggetti/Documentazione/1/2?mode=export, ultimo accesso dicembre 2021. Tutti i documenti sono scaricabili inserendo la prima parte del "Codice elaborato" nel campo "Testo da ricercare" della pagina principale ministeriale del Progetto.

[38] Convegno Accademia dei Lincei (1978), "L'attraversamento dello Stretto di Messina e la sua fattibilità", Roma, 4 – 6 luglio (Libro "Atti dei Lincei n° 43" Ed. 1979 ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI) Aldo Cicala "L'ambiente atmosferico sullo Stretto di Messina" – pag. 23-41.

[39] *Through the Øresund bridge* (2014), https://www.youtube.com/watch?v=o8R8j0K08BU&t=690s ultimo accesso dicembre 2021.

[40] *IABSE Symposium Kobe 1998* (1998), https://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=bse-re-003%3A1998%3A79, ultimo accesso agosto 2021.

[41] *Technical Innovation for realization of Akashi-Kaikyo Bridge* (1994), https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/ 10.1680/istbu.1994.26779, ultimo accesso agosto 2021.

[42] *Foundations for Akashi Kaikyo Bridge* (1999), https://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=bse-re-003:1999:80::45#345, ultimo accesso agosto 2021.

[43] *YouTube Design Process and Construction of Akashi Kaikyo Bridge* (2017), https://www.youtube.com/watch?v=sOH64HsKyVc&t=128s, ultimo accesso agosto 2021.

[44] *YouTube Akashi Kaikyo Bridge Part 1* (2016), https://www.youtube.com/watch?v=eKsfIMej534&t=1s, ultimo accesso agosto 2021.

[45] *YouTube Akashi Kaikyo Bridge Part 2* (2016), https://www.youtube.com/watch?v=QCiiBRzPHHI, ultimo accesso agosto 2021.

[46] *The Rion-Antirion bridge* (2011), https://www.researchgate.net/publication/229009863_The_Rion-Antirion_bridge-when_a_dream_becomes_reality, ultimo accesso agosto 2021.

[47] *The Rion-Antirion bridge* (2005), https://www.academia.edu/13980804/The_Rion_Antirion_Bridge_Concept_Design_and_Construction?email_work_card=view-paper, ultimo accesso agosto 2021.

[48] *Design and Construction of the Rion-Antirion Bridge* (2004), https://www.researchgate.net/publication/268591718_Design_and_Construction_of_the_Rion_Antirion_Bridge, ultimo accesso agosto 2021.

[49] *Greek company Gefyra S.A.*, Il ponte Rion Antirion, https://www.gefyra.gr/en/, ultimo accesso agosto 2021.

[50] *Rion - Antirion Bridge and The Earthquake of 2008* (2010), https://www.researchgate.net/publication/233677791_The_Behavior_of_Rion_-_Antirion_Bridge_Seismic_Protection_System_During_The_Earthquake_of_Achaia-Ilia_on_June_8_2008, ultimo accesso agosto 2021.

[51] *Osman Gazi Bridge* (2017), https://structurae.net/en/structures/osman-gazi-bridge, ultimo accesso agosto 2021.

[52] *Suspension Bridge «Osman Gazi Bridge»* (2018), https://www.youtube.com/watch?v=pRl9oYeHkQI&t=248s, ultimo accesso agosto 2021.

[53] *Osman Gazi Bridge - Geotechnical challenges and innovative solutions* (2015), https://www.ijbe.net/issues/volumes/item/download/112_4375b9bbd3ae9f779d15c719e91f311a, ultimo accesso agosto 2021.

[54] *The caissons of the tower foundations zmit Bay Suspension Bridge Project* (2014), https://www.researchgate.net/publication/299510456, ultimo accesso agosto 2021.

[55] *Izmit Bay Bridge* (2014), http://www.brodag.dk/Synopsis/2014/11%20IZMIT.pdf, ultimo accesso agosto 2021.

[56] *1915 Çanakkale Bridge* (2018), https://structurae.net/en/structures/canakkale-1915-bridge, ultimo accesso agosto 2021.

[57] *Project description of 1915 Çanakkale Bridge* (2021), https://www.chryso.com/construction-trends-jobsite-stories/1915-canakkale-bridge/, ultimo accesso agosto 2021.

[58] *1915 anakkale Bridge tower foundation:* https://www.researchgate.net/publication/335890100_Assessment_of_lateral_spreading_demands_on_the_1915_anakkale_Bridge_tower_foundation, ultimo accesso febbraio 2022.

[59] Animation 1915 Çanakkale Bridge tower foundation: https://www.youtube.com/watch?v=7CEEFyCjHMo.

[60] *E39 Sulafjorden - Multispan suspension bridge om GBS - Staten Vegvesen*: https://concretestructures.no/wp-content/uploads/2016/09/16-Flerspenns-hengebru-p%C3%A5-fast-fundament-GBS_Jorn-Arve-Hasselo.pdf, ultimo accesso agosto 2021.

[61] *E39 Sulafjorden - Multispan suspension bridge documents - Staten Vegvesen*: https://www.vegvesen.no/vegprosjekter/europaveg/e39sulafjorden/dokumenter/, ultimo accesso agosto 2021.

[62] *Youtube «MagnaDense for offshore construction projects"* (2017), https://www.youtub/watch?v=SSKzElVkr4A, ultimo accesso agosto 2021.

[63] *Ballast for offshore wind turbines,* https://www.lkabminerals.com/en/industry-uses/offshore-energy/offshore-wind-structures/, ultimo accesso febbraio 2022.

[64] *E39 - Kryssing av Sulafjorden mulighetstudie - Staten Vegvesen:* https://www.vegvesen.no/globalassets/vegprosjekter/utbygging/e39sulafjorden/vedlegg/presentasjon-infomote-mulihetsstudie-bruer-sweco-ramboll-komplett-revidert-2018.pdf, ultimo accesso febbraio 2022.

[65] *The second Leonhardt's project for the bridge crossing the Messina Straights pag. 10 (???),* http://www.michelvirlogeuxconsultant.com/Long-Span-bridges-and-Fritz-Leonardt-s-heritage-9-7-2009.pdf ultimo accesso febbraio 2022.

[66] G. Barreca, F. Gross, L. Scarfì, M. Aloisi, C. Monaco, S. Krastel (2021), https://www.earth-prints.org/bitstream/2122/14751/1/Article.pdf, ultimo accesso dicembre 2021.

[67] "Identificata la faglia del terremoto di Messina del 1908" (2021), https://www.youtube.com/watch?v=4cJ9IdeTZ2A, ultimo accesso dicembre 2021.

[68] A. Mammino (2011), Università di Treviso, Atti e Memorie a.a. 2009/2010, "Il ponte come espressione di civiltà: dal primordiale attraversamento del corso d'acqua al ponte sullo stretto di Messina" http://www.ateneoditreviso.it/wp-content/uploads/2018/03/impaginato-atti-27.pdf, ultimo accesso dicembre 2021.

[69] F. De Miranda (1983), "Sulla fattibilità del ponte per l'attraversamento stradale e ferroviario dello Stretto di Messina", Costruzioni Metalliche n° 5.

[70] Progetto Definitivo Raddoppio della tratta Giampilieri-Fiumefreddo, https://va.minambiente.it/File/Documento/305354, ultimo accesso dicembre 2021.

[71] G. Saccà (2018), "Sistema di trasporto pubblico locale integrato tra mobilità metropolitana e collegamento stabile dello stretto di Messina", Ingegneria Ferroviaria n° 2/2018, pag. 95-123.

[72] *EMODnet Bathymetry:* Batimetria dei mari europei, https://www.emodnet-bathymetry.eu/, ultimo accesso agosto 2021.

[73] *QGIS*, Sistema di Informazione Geografica, https://qgis.org/it/site/, ultimo accesso agosto 2021.

[74] *Advanced analysis of multi-span suspension bridges* (2013), https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X13002058, ultimo accesso agosto 2021.

[75] YouTube "Stretto di Messina: Ipotesi di ponte sospeso a doppio piano con quello inferiore protetto dai venti" (2021) https://www.youtube.com/watch?v=VqD91irqj0E, ultimo accesso agosto 2021.

[76] YouTube "Ipotesi di massima di ponte ibrido a più campate (tipo H.R.S.B.) nello stretto di Messina" (2020), https://www.youtube.com/watch?v=DDJ5PqodiXw, ultimo accesso ottobre 2021.

[77] *Timing of the emergence of the Europe–Sicily bridge (40–17 cal ka BP) and its implications for the spread of modern humans* (2014), https://www.researchgate.net/publication/265591798_Timing_of_the_emergence_of_the_Europe-Sicily_bridge_40-17_cal_ka_BP_and_its_implications_for_the_spread_of_modern_humans ultimo accesso febbraio 2022.

[78] CIFI (2021), Presentazione del Quaderno 32 ALDAI http://www.cifi.it/UplDocumenti/Verona07062021.htm, ultimo accesso agosto 2021.

[79] Presentazione Quaderno 32 ALDAI (2021), "L'attraversamento stabile dello Stretto di Messina" https://www.youtube.com/watch?v=_td7lDBnCv8, ultimo accesso ottobre 2021.

[80] CIFI (2021), Presentazione del Quaderno 32 ALDAI aggiornato ottobre 2021: http://www.cifi.it/UplDocumenti/Verona11102021.htm, ultimo accesso ottobre 2021.

[81] Playlist ALDAI (2021), Festival ASviS ALDAI https://www.youtube.com/playlist?list=PLp9IKkOWQQj4ZZqkRXjKq-gJJbPt8mgQZ, ultimo accesso ottobre 2021.