

**OLTRE LO STRETTO:
Architettura e
Ingegneria per un
Ponte Possibile**



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea

A.a. 2025/2026

Sessione di Laurea Febbraio 2026

Oltre lo Stretto: Architettura e Ingegneria per un Ponte Possibile

Relatrice:

Prof.ssa Luciana Restuccia

Candidata:

Caterina Agù

Mat. 328607

Correlatori:

Ing. Davide Masera

Ing. Mattia Mairone

A me stessa,
non importa quanto buio vedi intorno a te,
se tu continui a brillare,
nessuno ti può spegnere.

ABSTRACT

Il dibattito sulla realizzazione di un collegamento stabile tra la Sicilia e la Calabria ha acquisito negli ultimi anni una rinnovata centralità nel panorama infrastrutturale italiano. La presente tesi si propone di analizzare il progetto definitivo del Ponte sullo Stretto elaborato dalla società Stretto di Messina S.p.A., mettendo in evidenza le principali criticità di natura tecnica, ambientale, sociale e urbanistica. L'obiettivo della ricerca è l'elaborazione di una proposta progettuale alternativa, capace di integrare in modo organico e unitario le diverse dimensioni sopra citate, nel rispetto delle specificità e delle fragilità del contesto territoriale di riferimento.

Il Capitolo 1 è dedicato all'inquadramento storico e geografico dell'opera e presenta un'analisi dei due fronti territoriali coinvolti. In tale contesto vengono esaminate sia le motivazioni economiche che hanno orientato le scelte progettuali, sia il ruolo assunto dall'opinione pubblica nel dibattito sul collegamento stabile tra le due sponde dello Stretto.

Nel Capitolo 2 la ricerca si concentra sulle principali "zone d'ombra" della proposta progettuale ufficiale, spesso percepita come un'opera di carattere monumentale, poco integrata con le reali esigenze infrastrutturali del territorio e con le fragilità intrinseche – ambientali e geomorfologiche in primis – dell'area in cui si inserisce.

Nel tentativo di rispondere a tali criticità, il Capitolo 3 sviluppa, progetta e verifica una proposta di ponte in grado di garantire il mantenimento della linea ferroviaria per l'Alta Velocità. La soluzione proposta si configura come un ponte a tre campate, con due pile in mare, caratterizzato da un sistema integrato di pendini e stralli a sostegno di un impalcato aerodinamicamente efficiente. Un elemento di forte discontinuità rispetto alle soluzioni tradizionali analizzate nel Capitolo 2, è orientato a una prospettiva di innovazione progettuale, è rappresentato dalla scelta dei materiali costruttivi. In particolare, per la realizzazione delle fondazioni, si prevede l'impiego di materiali cementizi innovativi a base di ceneri vulcaniche dell'Etna, caratterizzati da proprietà meccaniche comparabili a quelle dei cementi tradizionali ma con un ridotto contenuto di clinker. Tali materiali sono stati selezionati per le loro elevate prestazioni in termini di resistenza e durabilità in ambiente marino, nonché per i benefici in termini di sostenibilità ambientale, legati sia alla riduzione dell'impronta di carbonio sia alla disponibilità locale delle risorse.

L'efficacia della proposta progettuale è stata validata mediante una modellazione agli elementi finiti realizzata con il software MIDAS Civil NX. La progettazione ha riguardato lo studio delle geometrie strutturali in risposta alle azioni del vento, del sisma e della neve, la corretta individuazione dei carichi (strutturali, permanenti, variabili e accidentali) e la definizione delle strategie progettuali più performanti.

Nel Capitolo 4, attraverso un'analisi SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats), viene confrontata la fattibilità tecnica e l'impatto territoriale della soluzione proposta con il progetto elaborato dalla società Stretto di Messina S.p.A. A supporto della solidità della proposta progettuale, e in continuità con quanto sviluppato nel Capitolo 3, è presente un'appendice dedicata alla consultazione dei calcoli strutturali.

SOMMARIO

1 INTRODUZIONE 15

1.1 Inquadramento Storico e Geografico 15

1.1.1 Origini dell'idea: i primi progetti..... 15

1.1.2 La Geopolitica dello Stretto: analisi dei due fronti 27

1.1.3 Aspetti geologici e sismici dell'area dello Stretto 29

1.2 La Rilevanza del Tema e la Necessità di un Collegamento 33

1.2.1 Motivazioni economiche: impatto sui flussi commerciali e sul turismo..... 33

1.2.2 Motivazioni sociali e infrastrutturali: connettività e mobilità 37

1.2.3 Il dibattito pubblico e politico: pro e contro della costruzione 40

2 IL PROGETTO DEFINITIVO: LUCI E OMBRE..... 45

2.1 Descrizione Tecnica Ponte A Campata Unica 45

2.1.1 Il progetto esecutivo: geometria, struttura e materiali 45

2.1.2 Il sistema di sospensione e i cavi portanti 54

2.1.3 Le torri e le loro fondazioni 59

2.1.4	Questioni economiche e finanziarie: costi di costruzione	63
2.2	Le Complessità a Maggiore Componente Ingegneristica	65
2.2.1	La resistenza al vento: studi aerodinamici e modelli	65
2.2.2	La risposta sismica: dispositivi di isolamento e ammortizzatori	68
2.2.3	L'integrazione del traffico stradale e ferroviario	72
2.3	Criticità e Impatti	76
2.3.1	Criticità legate al territorio	76
2.3.2	Impatto sul territorio: espropri e gestione dei cantieri	82
3	IL PROGETTO DIVISO IN TRE: 3 CAMPATE, TRE CASSONI, UN OBIETTIVO	87
3.1	Concetto Strutturale e Vantaggi	87
3.1.1	La scelta delle più campate: vantaggi in termini di stabilità e manutenzione	87
3.1.2	Descrizione generale del nuovo modello proposto	94
3.2	L'Utilizzo di Materiali Cementizi Innovativi	107
3.2.1	Proprietà e caratteristiche dei materiali vulcanici	107
3.2.2	Vantaggi strutturali: resistenza e durabilità	112

3.2.3	Aspetti di sostenibilità e innovazione	116
3.2.4	Scelta dei materiali impiegati per gli elementi strutturali	118
3.3	Modellazione Strutturale e Output della proposta	121
3.3.1	Presenza della ferrovia: un'analisi di questo nuovo scenario progettuale	121
3.3.2	Scelta del software di calcolo e dei modelli di analisi	124
3.3.3	Modellazione del ponte	126
3.3.4	Carichi permanenti	130
3.3.5	Carichi variabili	134
3.3.6	Carichi eccezionali: azione del vento, del sisma e della neve	137
3.4	Verifiche e Progettazione	143
3.4.1	Combinazione delle azioni	143
3.4.2	Verifiche SLU	149
3.4.3	Verifiche SLE	151
4	STIMA COMPARATIVA DELLE DUE SOLUZIONI	153
4.1	SWOT progetto campata unica	155

4.2 SWOT progetto proposto..... 157

CONCLUSIONI 159

Riflessioni e Prospettive Future159

L'importanza della ricerca e dell'innovazione ingegneristica159

Proposte per futuri studi e approfondimenti.....161

L'eredità del dibattito sul Ponte dello Stretto.....163

BIBLIOGRAFIA 166

APPENDICE 179



1 INTRODUZIONE

1.1 Inquadramento Storico e Geografico

1.1.1 Origini dell'idea: i primi progetti

L'idea della realizzazione del Ponte sullo Stretto di Messina risale storicamente a circa ventitré secoli fa, quando il console Lucio Cecilio Metello fece attraversare lo Stretto di Messina agli elefanti con un attraversamento temporaneo realizzato mediante barche e botti.

Se ne sono occupati in tanti, da Carlo Magno fino a Mussolini: nel dopoguerra sono stati portati avanti studi, prima dalla Società privata del Gruppo Ponte di Messina, poi dalla società a capitale pubblico Stretto di Messina, passando per il Concorso Internazionale di idee bandito dall'Anas nel 1969 (Averardi Ripari, 2023).

Risalgono al 1866 i primi studi di fattibilità di un ponte metallico sullo Stretto di Messina da parte di Alfredo Cottrau, su incarico del Ministro dei Lavori Pubblici Jacini: era evidente che il tema dell'attraversamento avrebbe rappresentato da una parte un momento di sperimentazione tecnica. Durante i numerosi convegni post-bellici, tenutisi dal 1947 al 1951, si iniziava a considerare il Ponte di Messina come un elemento di connessione che si inseriva in un ampio progetto infrastrutturale, che

avrebbe avuto un impatto non solo sul piano dello sviluppo tecnologico, ma soprattutto sulla realtà socioeconomica (Caruso, 2023).

“È ben noto che le navi-traghetto dalla Calabria alla Sicilia paralizzano il porto di Messina per gran parte delle banchine; inoltre, sono ormai così inadeguate all’intenso traffico che, nei periodi di punta, i treni-merci attendono per intere giornate di essere inoltrati; per giunta, incrociano la rotta dei traghetti aggravandone le difficoltà. La costruzione di un ponte appare dunque indilazionabile e tutti i tecnici lo riconoscono” così scriveva Bruno Zevi, storico e critico dell’architettura del Novecento, su L’Espresso, presentando alcune riflessioni in merito al concorso per il Piano Regolatore di Messina, pubblicato sul volume numero 265 di Casabella del 1962.

Il Piano regolatore anticipa quello che poi verrà sancito nel “Concorso Internazionale di idee per un attraversamento stabile viario e ferroviario fra la Sicilia e il continente”, prevedendo un sistema di comunicazioni territoriale che avrebbe interessato la costa calabrese e la costa siciliana (Tunzi, 1969, p. 305).

Il Concorso venne bandito il 28 maggio 1969 da Giacomo Mancini, Ministro per i lavori pubblici: si chiedeva l’illustrazione dell’ubicazione, lo schema strutturale essenziale, con le dimensioni e i particolari di maggior rilievo, nonché i materiali da impiegare, accompagnati da una relazione generale e da elaborati grafici nei quali dovevano essere visualizzati l’ubicazione dell’opera e le reti infrastrutturali di raccordo.

Vennero presentati 143 progetti¹ dei quali la giuria ne selezionò dodici: in questa lista troviamo progetti di figure di spicco come Sergio Musumeci, l’équipe di Guido Lambertini, il Gruppo Ponte Messina S.p.A., lo Studio Montuori-Calini insieme all’ingegnere Lionel Pavlo, il gruppo di Alan Grant e la Technital S.p.A.

Questi progetti presentavano, rispettivamente, soluzioni differenti: disegni per un ponte sospeso di 3000 m, un ponte strallato a tre campate di cui la centrale di 1300 m, due versioni di un ponte sospeso a luce unica a tre campate, un ponte sospeso a quattro campate, un ponte sospeso a cinque campate, e un tunnel a mezz’acqua ancorato al fondo.

L’intervento di Musumeci (Fig.1) confermava il suo percorso di ricerca, secondo cui la forma non era innescata da un atto intuitivo o capriccioso, ma da un processo che ricerca la necessaria configurazione della materia nello spazio, atta a risolvere un determinato compito strutturale impiegando il minimo indispensabile delle risorse. In questo progetto si parte dall’idea della campata unica per svincolarsi da una serie di questioni troppo complesse legate ad opere marittime dall’esito incerto, e di segnare con un gesto elegante lo spazio aereo tra due terre, ben esplicitato nel plastico e nei disegni

¹ Dei 153 disegni elaborati dai 143 gruppi, composti da progettisti prevalentemente italiani, 8 americani, 3 inglesi, 3 francesi, 1 tedesco, 1 svedese, 1 argentino e 1 somalo, si ebbero 71 ponti, 27 gallerie subacquee, 18 istmi, 2 gallerie subalvee, 35 strutture viarie.

prospettici.

Il progetto di Musumeci si distingue per un approccio volto a minimizzare l'impatto sul contesto naturale, limitando le opere marittime e concentrando l'intervento nella sola campata centrale. Tale impostazione riduce le interferenze con la morfologia del fondale e con l'ecosistema dello Stretto, privilegiando una soluzione strutturale essenziale e fortemente integrata dal punto di vista formale. Dalla consultazione dei progetti, però, si ha come l'impressione che il progetto si allontani dall'idea di area metropolitana, per affrontare la struttura in sé come un attraversamento, che possa scavalcare un'ampia e profonda depressione morfologica.

La tensostruttura proposta da Musumeci era integrale e del tutto inedita e trovava rigidità nella sua forma spaziale adatta ad affrontare ed esprimere tecnicamente e architettonicamente l'eccezionalità del tema (Caruso, 2023). In questo progetto i progettisti confidano nelle potenzialità dei nuovi materiali e di tecnologie alternative, avvalorate da saldi principi di Tecnica delle Costruzioni (Tunzi, 1969, p. 307).

Musumeci aveva preso come spunto il ponte sul Severn (1964): gli impalcati non sono a trave reticolare ma a cassone saldato in acciaio, a sezione aerodinamica per ridurre l'azione del vento; i tiranti di

sospensione non sono paralleli e nei piloni abbiamo acciaio moderno di caratteristiche doppie.

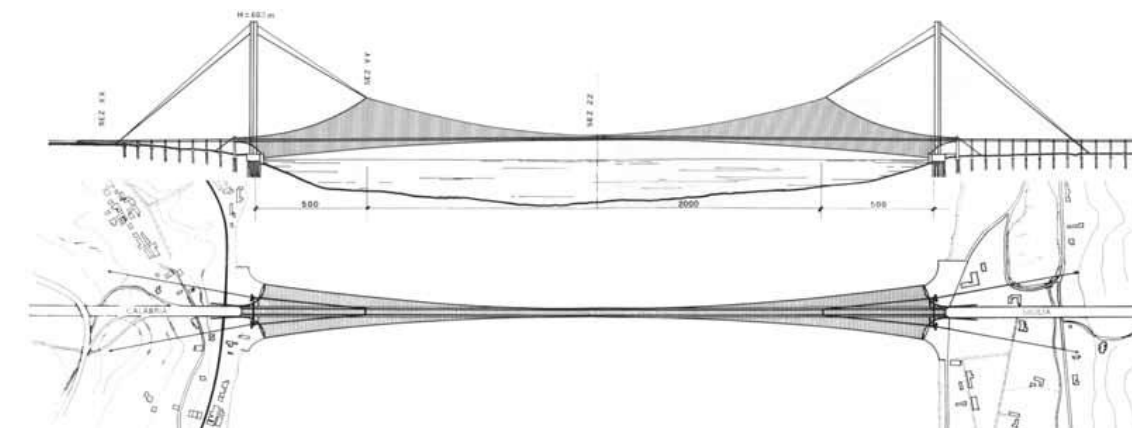


Figura 1: Progetto del gruppo Sergio Musumeci: Ponte sospeso a luce unica di 3000 m, con piloni alti 600 m localizzato nel tratto di minore larghezza dello Stretto di Messina (tra Ganzirri e Cannitello)

Diverso atteggiamento lo si ha con l'equipe di Guido Lambertini² (Fig. 2) in quanto afferma che il manufatto riguardava anche il suo inserimento nel contesto, con il presupposto che non dovrà deturpare nel modo più assoluto la bellezza del luogo o la precaria situazione geomorfologica; in secondo luogo, il ponte avrebbe avuto l'obiettivo di regolare la viabilità della zona locale (Caruso, 2023).

L'iter progettuale si avvicina molto allo studio analitico dell'ing. Michele Maugeri: vengono scartate le soluzioni di galleria sottomarina sia per le incognite riguardanti le pressioni, sia per la difficoltà di cantiere. Rispetto al progetto precedente affrontano in modo differente il problema delle fondazioni sulla base di esperienze pregresse, da cui nasce la proposta di un ponte strallato a tre luci, la centrale di 1300 m e

² Costituito da: Ing. Enzo Beneo, Ing. Gianguido Borghese, Prof. Pietro Caloi, Prof. Ing. Giulio Ceradini, Prof. Ing. Fabrizio de Miranda, Amm. Luigi di Paola, Ing. Guido Lambertini, Prof. Ing. Fritz Leonhardt, Prog. Ing. Carlo Lotti, Ing. Carlo Pandolfi.

le laterali di 540 m. Tuttavia, la scelta di un ponte strallato si pone in alternativa agli altri tipi di ponte presentati in concorso, risultando innovativa e aderente alla tradizione dei primi ponti sospesi, inoltre particolarmente idoneo al traffico ferroviario, in quanto meno deformabile (Tunzi, 1969, p. 309).

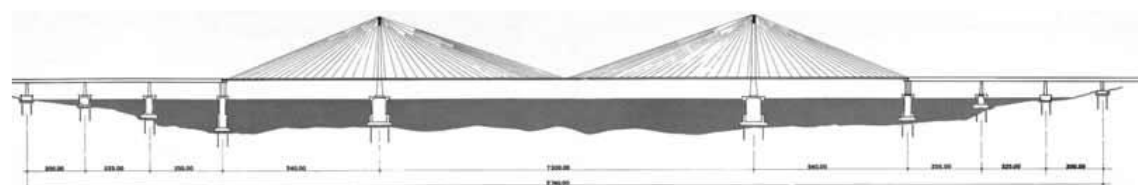


Figura 2: Ponte strallato con tre grandi luci (540 m + 1300 m + 540 m) più alcune campate di riva localizzato in corrispondenza della “Sella dello Stretto” tra Ganzirri e Punta Pezzo

Il Gruppo Ponte Messina S.p.A.³ presentò un lavoro impostato sugli studi per l’elaborazione del progetto, lavorando per fasi, in modo da effettuare un rapporto sulla fattibilità tecnico-economica-finanziaria, per dimostrarne la fattibilità.

Il progetto era quello di un ponte sospeso di tipo classico a tre campate su progetto di una società americana, derivato dall’idea di progetto dell’ingegnere Steinmann. Anche questi progettisti si soffermano a definire le questioni che ruotano intorno alla tecnica e alle metodologie d’intervento, e poco spazio dedicano all’effetto urbano che susciterà

³ I componenti del gruppo di lavoro sono: dott. Aldo Cicala, Consorzio Impresit-Girola-Lodigiani, la I.O.M. - COF - CEMA IFP, Micoperi S.p.A., Techniques Ménard, prof. Luigi Solaini della Fondazione ing. C.M. Lerici, Compagnia Generale di Geofisica, prof. Rittmann, ing. A. Gervaso, arch. M. Nicoletti, Sverdrup &, National Physical Laboratory.

l’opera sul territorio. La scelta della struttura era stata determinata principalmente dalle considerazioni del flusso del traffico, tenendo in considerazione anche i fattori economici legati alla realizzazione dell’infrastruttura e delle connessioni con il territorio. “La soluzione del ponte sospeso era favorita rispetto a quella del tunnel in quanto l’esame dei modelli matematici sull’evoluzione del traffico ha messo in evidenza dei poli urbani di movimento legati a Messina ed a Reggio, più che alle lontane zone in cui gli accessi di una galleria avrebbero dovuto essere localizzati” (Caruso, 2023).

Il lavoro del Gruppo Ponte Stretto di Messina S.p.A. fu fondamentale ai fini della progettazione dell’opera di attraversamento: notevoli furono anche i loro dati raccolti per quanto riguarda i venti, che avevano come obiettivo quello di riproporre contemporaneamente la situazione che si sarebbe riprodotta sia in funzione dei moti ondosi sia dei venti di raffica di velocità istantanea.

Lo Studio Montuori-Calini insieme all’ingegnere Lionel Pavlo, proponeva due varianti della stessa idea. La proposta del gruppo consisteva in due diverse soluzioni, un attraversamento esclusivamente viario, a tre luci, e uno che comprendeva anche la ferrovia. Nel descrivere il progetto i componenti del gruppo avevano evidenziato alcune analogie con il ponte giapponese di Seikan. Per quest’ultimo la massima profondità di zona era di 250 m; la massima profondità della striscia prescelta era di 140 m, contro il 130 m della “sella” dello Stretto.

La soluzione del ponte sospeso rispetto alla galleria subacquea o subalvea appariva la migliore perché la tecnica, oltre che la struttura. Può risolvere anche i non trascurabili problemi relativi al più opportuno inserimento ambientale. La soluzione a tre campate aveva quattro cavi portanti e piloni a portale: la parte sommersa dei piloni sarebbe stata di 100 m con 40 m di fondazioni.

La soluzione a quattro campate (Fig. 3) aveva una torre centrale a V rovescia con l'obiettivo di fornire maggiore rigidità alla struttura. I binari si sarebbero trovati in mezzo alle carreggiate stradali, con ai lati tre corsie di emergenza.

Nonostante la doppia soluzione presentata, il gruppo era maggiormente favorevole alla soluzione limitata al traffico viario in quanto il traffico sui traghetti avrebbe avuto un notevole smaltimento.

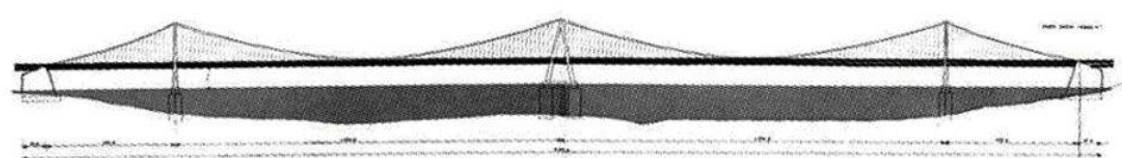


Figura 3: Ponte sospeso di tipo classico a quattro campate (465m+1360m+1360m+465m=3650m) localizzato in corrispondenza della "Sella dello Stretto" tra Ganzirri e Punta Pezzo

Il quinto progetto (Fig. 4) presente nella lista è un progetto totalmente differente rispetto ai precedenti, soprannominato in seguito Ponte di Archimede, realizzato dal gruppo di Alan Grant, progettano un tunnel a mezz'acqua ancorato al fondo mediante cavi di acciaio: tale struttura

avrebbe dovuto essere posizionata a venti metri di profondità con un peso inferiore alla spinta di Archimede che tenderebbe a farlo galleggiare. In questo caso la struttura smorzerebbe le sollecitazioni sismiche e anche le onde di maremoto non rappresenterebbero un problema. Discorso simile anche per le correnti: la loro intensità, sarebbe comunque di ordini di grandezza inferiore alle sollecitazioni sopportabili dalla struttura (Tunzi, 1969, p. 313).

Il gruppo si era anche interrogato sulla migliore collocazione del tunnel allontanandosi dall'area di progetto selezionata dalla maggior parte dei vincitori: il motivo era duplice. Da una parte sarebbe stato possibile realizzare il tunnel in acque più profonde, dall'altra bisognava scegliere un'area non limitata da alture per non complicare gli accessi.

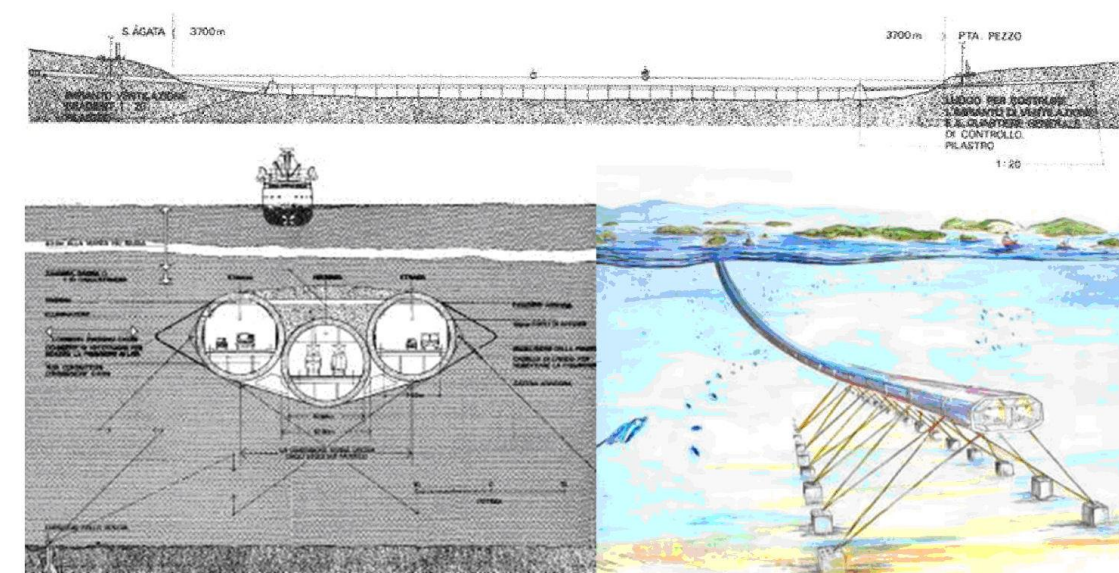


Figura 4: Progetto Grant Alan and Partners, Covell and Partners, Inbucon international: Tunnel a mezz'acqua ancorato al fondo mediante cavi in acciaio lungo 3700, localizzato in corrispondenza della "Sella dello Stretto" tra Sant'Agata e Punta Pezzo

Il sesto e ultimo progetto inserito nella lista dei vincitori è quello presentato dal gruppo Technital S.p.A.⁴ che fornisce un progetto completo di ponte a tipologia mista, strallato sospeso a cinque luci, con tre campate centrali di 1000 m comprese tra due esterne di 500 m (Fig. 5). Le campate sono ottenute mediante quattro grandi torri cavalletto che sembrano volare sull'acqua: tali torri saranno l'ancoraggio di una serie di cavi atti a sorreggere l'impalcato metallico (Tunzi, 1969, p. 312).

Le campate da 1000 metri erano costituite da una travata centrale di 700 m sospesa a una coppia di cavi e da due sbalzi laterali di 150 m muniti di appositi tiranti-stralli, staticamente indipendenti dalla parte sospesa. La particolarità del progetto consisteva nello schema statico: un ibrido tra il ponte sospeso di tipo tradizionale e quello strallato. L'orientamento del gruppo era rivolto allo studio di una struttura che consentiva di rendere l'opera atta a resistere oltre agli eventi sismici anche alle sollecitazioni anomale.

⁴ I componenti del gruppo, autori dello studio, sono: ing. Giulio Trevisan, ing. Mario Petrangeli, prof. Matteo Maternini, prof. Innocenzo Gasparini, arch. Laura Anversa Ferretti: è una società di ingegneri che opera nei settori del trasporto e lavori marittimi e portuali, lavori ambientali ed idraulici, pianificazione del territorio urbano e regionale, architettura e edilizia pubblica, ingegneria civile, informatica, pianificazione progettuale.

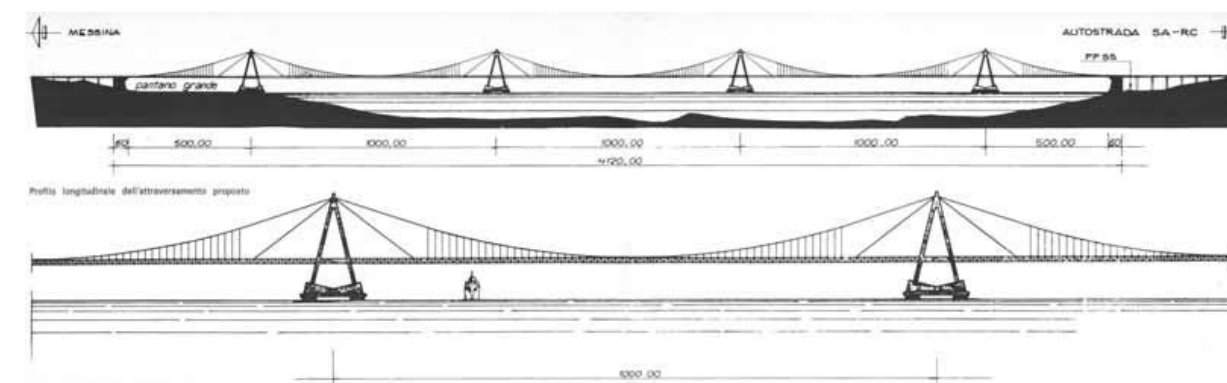


Figura 5: Technital S.p.a.: Ponte sospeso a cinque campate (500+1000+1000+1000+500 m= 4000 m) localizzato in corrispondenza della “Sella dello Stretto” tra Ganzirri e Punta Pezzo

Nel 1988 ANAS, FS, Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, con concorde parere favorevole del Governo, deliberavano in favore della soluzione del ponte sospeso a campata unica di 3300 m sulla direttrice Cannitello-Ganzirri, soluzione di cui si parla tuttora.

Nel 2002 viene approvato il progetto preliminare e lo studio di impatto ambientale - aggiornati e resi noti nel luglio del 2025 sul sito web “Stretto di Messina”- e nel 2005 viene bandita la gara internazionale per il Contraente Generale ed il Project Management Consultant, i cui contratti vennero firmati nel 2006 (Averardi Ripari, 2023).

Nel 2006 lo stesso Governo Prodi bloccò l'opera, poi ripresa dal Governo Berlusconi IV: sembrava tutto avviato. Nel 2013 il Governo Monti bloccò di nuovo tutto e il progetto, che sembrava destinato a svanire. Un segno di rinascita lo si ha con il Governo Conti nel 2020, per giungere a piena approvazione con il Governo Meloni, insediatosi a fine 2022, che

concretizza la Legge Finanziaria del 2023, che sancisce il riavvio dell'opera⁵ (Averardi Ripari, 2023, p. 2).

⁵ Legge 29 dicembre 2022, n.197, Legge di Bilancio 2023: legge dello Stato italiano che definisce il bilancio annuale, le entrate e le spese, e stanza risorse per progetti pubblici e infrastrutture, inclusi investimenti strategici come il riavvio dell'opera.

1.1.2 La Geopolitica dello Stretto: analisi dei due fronti

Lo Stretto di Sicilia è uno degli spazi più rilevanti al mondo, non molto meno dello Stretto di Taiwan. Nel triangolo della competizione fra Stati Uniti, Cina e Russia il controllo di questo braccio di mare al centro del Mediterraneo è essenziale, in quanto negli ultimi decenni il mare nostro è assunto a Medioceano: connettore fra Oceano Atlantico, marchio dell'Occidente euroamericano, e Indo-Pacifico, epicentro dello scontro sino-americano per il controllo delle rotte marittime, l'altro nome del potere globale" (Caracciolo, 2022).

Messina -sulla costa siciliana- e Villa San Giovanni - su quella calabrese- costituiscono i punti di approdo previsti per il ponte sullo Stretto di Messina, ma sono centri ben documentati di attività criminali organizzate, in particolare della Mafia siciliana e della 'Ndrangheta calabrese, storicamente infiltrati negli appalti pubblici e nei progetti infrastrutturali per ricavarne profitti attraverso collusioni, coercizione e società di comodo.

Il progetto ha riaperto l'opposizione locale, in particolare da parte del movimento "No Bridge", una coalizione civica e ambientalista da tempo contraria al ponte per motivi ecologici, finanziari e sociali. È probabile che la rinascita dell'attivismo locale sia rafforzata dal sostegno di

movimenti ambientalisti nazionali e transnazionali, come Greenpeace o Friday for Future, tutti con una solida storia di attacchi a grandi progetti infrastrutturali percepiti come dannosi per l'ambiente.

Se si analizza più da vicino la questione relativa alla Sicilia si può notare come l'isola si trovi a metà del naturale crocevia tra lo Stretto di Gibilterra e il Canale di Suez, a metà di un flusso incessante di merci, persone e capitali dalla Cina e dall'India, fino in Europa. L'appartenenza però della Sicilia all'Italia, la regione più grande e popolosa, ha rappresentato un freno allo sviluppo delle potenzialità geopolitiche dell'isola, che, se fosse indipendente potrebbe rivendicare, non senza fondamento, la sovranità su Malta (Eurasia, 2014).

Per quanto riguarda la Calabria la situazione è un po' diversa. La Calabria non è mai stata percepita come regione compatta, ma come Calabrie, con differenze storiche, culturali, economiche e morfologiche; questa pluralità ha reso debole la coesione politica e identitaria, alimentando rivalità tra province. Lo stesso sviluppo della Calabria è stato legato a decisioni e risorse provenienti dall'esterno: ciò ha quindi generato un modello di potere basato sulla distribuzione delle risorse dall'alto rafforzando particolarismi locali, come la 'ndrangheta, piuttosto che una progettualità regionale condivisa. L'area dello Stretto da un valore strategico particolare alla regione: non solo margine della Calabria ma anche porta verso la Sicilia, il Mediterraneo e di unità (Ambrosi, 2014)

1.1.3 Aspetti geologici e sismici dell'area dello Stretto

Per capire i comportamenti dello Stretto, occorre prima capire e classificare lo strato litologico sottostante le due regioni: il lato siciliano è caratterizzato prevalentemente da rocce metamorfiche - quali gneiss, micascisti e graniti- localmente ricoperti da depositi sabbiosi e limosi costieri. Di base roccia molto compatta che ci permette di ottenere delle buone capacità portanti. Nella zona di Torre Faro abbiamo quindi una classificazione di categoria NTC⁶ pari ad A.

Il fronte calabrese presenta formazioni di tipo cristallino-metamorfico con uno strato superficiale che presenta una copertura detritica o sabbioso-ghiaiosa: qui la roccia è sana in profondità, ma con fratturazione diffusa, che ci porta ad avere una classificazione NTC pari anche qui ad A, con zone localizzate tendenti a B.

Situazione differente la troviamo nel fondo dello Stretto, qui abbiamo la presenza di un tipo di fondo con depositi sabbiosi e limosi determinati da pendenze elevate: ciò comporta quindi instabilità potenziale dei versanti sottomarini, con il rischio di possibili frane.

⁶ NTC: Norme Tecniche per le Costruzioni

Come descritto nel video di Giovanni Saccà del 2022, pubblicato da Geopop⁷, lo Stretto di Messina può assimilarsi ad un canale a forma di imbuto che collega il mare Ionio al Tirreno: la parte Sud dello Stretto ha il fondale caratterizzato da ripide scarpate, mentre procedendo verso nord il fondale si solleva rapidamente determinando una sella nella sezione compresa tra Punta Pezzo in Calabria e Ganzirri in Sicilia, per poi degradare a Nord verso il mar Tirreno.

La sella è una continuità montuosa sottomarina di limitata larghezza, tra uno o due chilometri, appartenente all'arco calabro che partendo dal massiccio dell'Aspromonte in Calabria, prosegue nei Peloritani in Sicilia, collegando le due regioni con una sorta di cordone marino. Nell'area dello Stretto esistono molte faglie attive e non attive: nel 2021, per esempio, è stata individuata quella che ha determinato il terremoto del 1908.

La sella dello Stretto sarebbe l'unica area in cui potrebbe essere possibile progettare le fondazioni dei piloni del ponte a più campate a una profondità di 100 m sotto il livello del mare.

Per rispondere al quesito posto dal geologo Andrea Moccia in un'intervista a Geopop- "Dal punto di vista geologico, questo ponte si può realizzare o no?" – è necessario innanzitutto inquadrare il contesto geologico dell'area, analizzando i movimenti delle placche tettoniche,

⁷ Geopop è un progetto di divulgazione scientifica che tratta temi legati a geologia, ambiente, energia e scienza applicata con approccio divulgativo basato su fonti scientifiche.

la tipologia di faglie presenti e le caratteristiche della geologia strutturale che interessano i tre chilometri dello Stretto di Messina.

Il territorio siciliano fa parte della placca africana e quest'ultima spinge verso Nord, Nord-Ovest, contro l'Eurasia. Parallelamente, il bacino tirreno esercita una spinta verso Est. L'interazione di queste dinamiche tettoniche determina un'area di dimensione proprio in corrispondenza dello Stretto di Messina: in termini geologici, tale fenomeno è definito come zona di estensione. Secondo recenti studi, tale fenomeno determina un progressivo allontanamento delle due sponde dello Stretto, quantificabile in circa 0,8 mm all'anno, pari a 80 mm in un decennio e circa 80 cm in un millennio. Considerando che la vita utile di un ponte, secondo i criteri dell'ingegneria moderna, risulta notevolmente inferiore a tale arco temporale, uno spostamento inferiore al metro può essere ritenuto pienamente gestibile dal punto di vista tecnico-strutturale.

Un ulteriore interrogativo riguarda la capacità del ponte- che diventerebbe il più lungo del mondo- di resistere agli effetti sismici caratteristici dell'area. Se si considera il massimo terremoto avvenuto in Italia, il margine a cui far riferimento è pari a 7.1 sulla scala Richter. Alcuni studiosi, applicando l'approccio neo-deterministico e i parametri

della pericolosità sismica locale- PGA, PGD, PGV⁸- hanno calcolato in maniera conservativa la Magnitudo di progetto con la relazione

$$M_{\text{design}} = M_{\text{max}} + M_{\text{ME}\theta\text{M}}$$

dove M_{max} è la Magnitudo Massima e il secondo termine rappresenta multipli della deviazione standard. Tramite questi calcoli si è giunti ad avere un massimo livello di rischio sismico pari a 7.7 sulla scala Richter (Mandaglio & Mandaglio, 2023, p. 6).

⁸ Accelerazione di Picco, Spostamento, Velocità.

1.2 La Rilevanza del Tema e la Necessità di un Collegamento

1.2.1 Motivazioni economiche: impatto sui flussi commerciali e sul turismo

Lo Stretto di Messina è attraversato quasi ogni anno da quasi 100.000 corse di traghetti su cui transitano 11 milioni di passeggeri e 5 milioni di tonnellate di merci, 1,8 milioni di veicoli leggeri, 0,8 milioni di veicoli pesanti, oltre 60.000 carri ferroviari e quasi 6 milioni di tonnellate di merci (Averardi Ripari, 2023).

“La mancanza di un collegamento stabile è una forte penalizzazione per il trasporto ferroviario, sia passeggeri che merci, in quanto il traghettamento dei treni comporta la loro segmentazione, le necessarie manovre per l’imbarco e la ricomposizione allo sbarco. Con riferimento ai tempi di viaggio di lunga percorrenza, da Messina a Roma, ad esempio, un treno viaggiatori impiega dalle 7.5 alle 8.5 ore a seconda del servizio ferroviario prescelto (senza o con traghettamento del treno), quando da Roma a Torino, a parità di distanza (circa 700 km), un treno AV impiega meno di 5 ore. Per quanto riguarda il traffico merci, questi limiti hanno, nel tempo, fatto diminuire in maniera

importante la massa di merci trasportata attraverso lo Stretto con modalità ferroviaria. Nonostante ciò, la ferrovia continua a fornire un significativo contributo al trasporto da e per l'isola: non si deve dimenticare, infatti, che la marginalità geografica comporta la necessità di compiere lunghi viaggi e quindi il "prodotto del trasporto", tonnellate per chilometro, assume valori di particolare importanza. Complessivamente, la Sicilia produce traffico ferroviario per 2,1 milioni di treni*chilometro l'anno e un prodotto del trasporto di 1,5 miliardi di tonnellate*km². Sono dati molto rilevanti, soprattutto se si tiene conto delle difficoltà che caratterizzano l'attraversamento dello Stretto, ma anche delle condizioni delle linee ferroviarie sia in Sicilia sia nelle regioni meridionali." (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili – Struttura Tecnica di Missione, 2021, 30 aprile).

Analizzando i dati in tabella n.13 pp. 30 e n.21 pp. 35 di *"La valutazione di soluzioni alternative per il sistema di attraversamento stabile dello Stretto di Messina: Relazione del Gruppo di Lavoro."*, la quantità di merci movimentate via mare è stata pari a circa 5,7 milioni di tonnellate annue, di cui oltre 5 milioni sulla rotta principale, Villa San Giovanni-Messina, e circa 690.000 tonnellate su quella Reggio Calabria-Messina. Se si considera il traffico marittimo "Ro-Ro"⁹ che collega la Sicilia al resto della penisola al di fuori dello Stretto, il peso economico del trasporto

⁹ Ro-Ro: roll-on/roll-off

marittimo è ancora più rilevante: 620.000 mezzi pesanti tra i porti siciliani e quelli del Centro e Nord Italia.

Guardando oltre il settore commerciale, una delle principali fonti di ricchezza – e di conseguenti introiti economici – per entrambe le regioni è rappresentata dal turismo.

Facendo riferimento al documento pubblicato nel 2024 dall'Osservatorio Turistico Regionale della Regione Sicilia – dal 2019 al 2023 – il turismo della città di Messina ha mostrato un'evoluzione particolarmente significativa, con un netto incremento nel 2023, rispetto ai dati del periodo pre-pandemico. Nel 2023 si ha avuto un aumento di arrivi complessivi pari al 28,85% rispetto al 2019 e del 10,9% rispetto al 2022, segnalando un pieno recupero e una fase di crescita stabile dopo la crisi sanitaria. Questa analisi quindi ci mostra per Messina un quadro turistico in forte ripresa e trasformazione strutturale: cresce la domanda, si amplia l'offerta. Sono tutti segnali positivi che, se accompagnati da strategie di promozione integrate e da investimenti nelle infrastrutture di accesso, quali collegamenti diretti e portuali, possono consolidare la città come polo turistico strategico per il turismo regionale.

Da questa analisi si nota una tendenza di crescita costante in termini di arrivi e di presenze, evidenziando come Messina, e più in generale l'area dello Stretto, stiano assumendo un ruolo sempre più centrale: affinché tale crescita possa però consolidarsi e tradursi in uno sviluppo

economico duraturo, è necessario un miglioramento dell'accessibilità territoriale.

Alla luce di queste considerazioni la presenza di un collegamento stabile tra Sicilia e Calabria assume un significato strategico non solo dal punto di vista infrastrutturale, ma anche economico, logistico e turistico. Un'infrastruttura fissa consentirebbe di ridurre i tempi di attraversamento, aumentare la capacità di trasporto e migliorare la continuità territoriale, favorendo la competitività del sistema produttivo.

1.2.2 Motivazioni sociali e infrastrutturali: connettività e mobilità

Lo Stretto di Messina è il punto più critico dell'intera area infrastrutturale italiana, con tempi medi complessivi di attraversamento di circa due ore per i mezzi gommati e molto superiori per il traffico ferroviario, essendo inoltre impossibile, per motivi tecnici, il traghettamento di treni AV.

L'ammodernamento dell'autostrada Salerno-Reggio Calabria, ha ridotto i tempi di percorrenza sulla tratta di circa 1 ora, mentre la realizzazione dell'intera tratta ferroviaria AV, sempre Sa-RC, ridurrebbe i tempi di 2 ore, la realizzazione del ponte ridurrebbe quindi da sola i tempi di percorrenza da e per la Sicilia in misura molto superiore e a un costo nettamente inferiore." (Averardi Ripari, 2023)

Dalle analisi contenute nella Relazione del Gruppo di Lavoro sull'Attraversamento stabile (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili – Struttura Tecnica di Missione, 2021, 30 aprile; Eurolink S.c.p.A., 2011) si nota come la mancanza di un'infrastruttura fissa incida negativamente sull'accessibilità ferroviaria che risulta pari al 51% rispetto a quelle delle regioni settentrionali. L'attuale sistema di traghettamento comporta tempi di percorrenza, come già sottolineato in precedenza, di oltre due ore e mezza, determinando una

discontinuità strutturale che limita la competitività del trasporto ferroviario e rallenta la circolazione delle merci.

Il traffico marino è inoltre particolarmente intenso. Come sottolineato anche nella Relazione per la verifica di mercato, predisposta dalla società Stretto di Messina S.p.A. (2020), questa domanda di mobilità si confronta con un'offerta di trasporto frammentata e soggetta a frequenti congestioni, nelle aree portuali di Messina, Reggio Calabria e Villa San Giovanni (Messina, Società Stretto di Messina S.p.A, 2020, p. 47-49).

Dal punto di vista sociale, tali condizioni generano tempi di spostamento elevati e disagi quotidiani per pendolari, studenti e lavoratori che attraversano regolarmente lo Stretto. La scarsa integrazione tra i diversi sistemi di trasporto penalizza inoltre la mobilità interna delle due regioni ostacolando l'accesso ai servizi essenziali e riducendo le opportunità di lavoro e istruzione. (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili – Struttura Tecnica di Missione, 2021, 30 aprile, p. 147-149).

In questa prospettiva, il miglioramento della connettività non deve essere considerato solo in termini tecnici, ma come una leva di coesione sociale e territoriale. Una rete di trasporti efficiente favorisce l'inclusione, l'accesso ai servizi e la mobilità lavorativa, elementi fondamentali per contrastare l'isolamento economico-demografico della Sicilia. Questo collegamento, quindi, rappresenterebbe una

risposta concreta alle esigenze di mobilità e accessibilità, ma anche un passo decisivo verso un'integrazione infrastrutturale e sociale più equilibrata tra Nord e Sud del Paese.

1.2.3 Il dibattito pubblico e politico: pro e contro della costruzione

Il Ponte sullo Stretto rappresenta l'opera infrastrutturale che più di ogni altra ha catalizzato un dibattito pubblico aspro e persistente. A prescindere dagli avvicendamenti governativi, a partire dal 2011 il nucleo della discussione è rimasto sostanzialmente cristallizzato sulla dicotomia riguardante l'opportunità o meno della sua realizzazione.

Secondo sondaggi diffusi da istituti di ricerca nazionali (tra cui SWG, Ipsos e Demon&Pi), il consenso verso la costruzione del ponte oscilla in funzione del contesto territoriale e del periodo storico. A livello nazionale, il sostegno dell'opera ha subito grosse variazioni nel corso degli anni: originariamente il sostegno rivolto all'infrastruttura tendeva a collocarsi attorno a una maggioranza relativa, seppur non schiacciante, con una quota significativa di indecisi. Quando il campione viene ristretto però all'area circoscritta alle zone direttamente interessate, il quadro appare più complesso e meno polarizzato.

In Sicilia, diverse rilevazioni mostrano come una parte consistente della popolazione si dichiari favorevole alla linea di principio del ponte, ma con un livello di convinzione debole, dettato principalmente dalla paura. Il sostegno aumenta tra i cittadini che percepiscono

direttamente i disagi del sistema traghetto: i pendolari, i lavoratori del settore trasporti e gli studenti universitari.

Come sottolineato dall'inchiesta condotta da parte di RaiPlay, un dato sottolineato in modo ricorrente è l'elevata percentuale di cittadini che subordinano il proprio consenso alla realizzazione contestuale di altre infrastrutture, in particolare ferroviarie e per quanto riguarda le reti viarie interne.

In Calabria i sondaggi evidenziano una parziale distribuzione delle opinioni a favore, spesso motivata dalla speranza di un rilancio economico, ma emerge una notevole quota di cittadini a sfavore del progetto, in quanto viene percepito come un'opera pensata prevalentemente per la Sicilia con benefici indiretti per il territorio calabrese.

Il dibattito pubblico, oltre al timore suscitato dall'ammontare totale dei costi di costruzione affiancato alla poca fiducia riposta nella burocrazia italiana è inoltre fortemente influenzato dall'azione di movimento civici e ambientalisti: studi di carattere sociologico hanno dimostrato come tale movimento abbia suscitato grande consenso nelle aree urbane di Messina, Reggio Calabria e Villa San Giovanni.

Questa avversione nei confronti del progetto è particolarmente evidente tra i più giovani che tendono a esprimere maggiore attenzione alle questioni ambientali e sociali.

Per rafforzare la validità delle informazioni, soprattutto per avere un aggiornamento dei dati, nel corso del lavoro di tesi è stata condotta un'indagine esplorativa tramite questionario, fatta circolare all'interno dell'ambiente universitario, con l'obiettivo di raccogliere dati preliminari sulla percezione dell'opinione pubblica in merito alla realizzazione del ponte sullo Stretto. Per ottenere varietà di dati si è deciso di espandere l'analisi al di fuori della comunità politecnica.

I dati raccolti, premettendo che toccavano un range della popolazione proveniente prevalente dal nord Italia, hanno portato ad avere il pubblico diviso tra favorevole, al 45%, sfavorevole al 30% e indeciso al 25%. All'interno del questionario erano presenti sia domande a risposta multipla, ma alcune con la possibilità di argomentare la risposta. È stato interessante valutare le risposte sia in ambito giuridico, le quali hanno sottolineato come le leggi servano ad aiutare la decisione quando importante e irreversibile, ma anche quelle più economiche improntate a mettere in luci i benefici monetari.

2 IL PROGETTO DEFINITIVO: LUCI E OMBRE

2.1 Descrizione Tecnica Ponte A Campata Unica

2.1.1 Il progetto esecutivo: geometria, struttura e materiali

Nel 2024 viene emanato il documento che descrive le cosiddette prestazioni autorizzate, che recita: «Per prestazioni anticipate si intendono tutte quelle attività da eseguirsi in campo che possono essere avviate immediatamente a valle della determinazione conclusiva CIPESS approvata con voto favorevole, senza richiedere l'approvazione del Progetto Esecutivo». Nell'elenco delle operazioni e servizi di cui è prevista l'esecuzione anticipata, compaiono le indagini geotecniche, geognostiche e topografiche, che, secondo prassi ordinaria, sarebbero svolte in fase preliminare, ma anche le stesse procedure espropriative, demolizioni, allestimento cantieri operativi e campi base (de Miranda, Rizzo, & Mazzolani, 2025). Questa disposizione accelera i tempi di avvio dell'opera, non tenendo però conto delle criticità legate alla gestione del rischio amministrativo ed economico: l'avvio, infatti, di opere di grande scala prima della

completa approvazione del progetto esecutivo può generare varianti progettuali in corso d'opera.

Il progetto del 2011 approvato è stato elaborato da un gruppo internazionale guidato da Parson Transportation Group (USA) come lead designer: dopo la riattivazione della società Stretto di Messina S.p.A. nel 2023, il progetto è stato aggiornato tecnicamente da Eurolink per adeguarlo alla normativa europea vigente, ai nuovi standard antisismici e aerodinamici e alle tecnologie di costruzione moderne.

L'impalcato del Ponte sullo Stretto di Messina costituisce una delle più grandi sfide strutturali mai affrontate in Europa. Si tratta di una trave metallica sospesa a sezione aerodinamica multi cassone, progettata per garantire stabilità e resistenza in condizioni ambientali estreme, tra forti venti, elevata sismicità, intensa esposizione marina (Stretto di Messina S.p.A., 2024). Questa riattualizzazione tecnica presenta un lato positivo dal punto di vista della sicurezza, ma economicamente comporta un incremento dei costi. Inoltre, le verifiche sull'effettiva conformità alle norme europee non risultano, ad oggi, pubblicamente disponibili.

Dal punto di vista tecnologico, l'impalcato è concepito come un profilo alare in acciaio sospeso a due coppie di cavi principali, mediante pendini verticali. La campata centrale misura 3300 metri, rendendola il ponte sospeso più lungo al mondo per traffico stradale e ferroviario (Webuild Group, 2024). La lunghezza complessiva del ponte,

considerando anche le porzioni di ancoraggio. Raggiunge i 3666 metri per una larghezza totale dell'impalcato di 60 metri, considerando un ingombro di corsia stradale per ciascuna parte di 14,2 metri e altrettanti 7,5 per quanto riguarda la ferrovia.

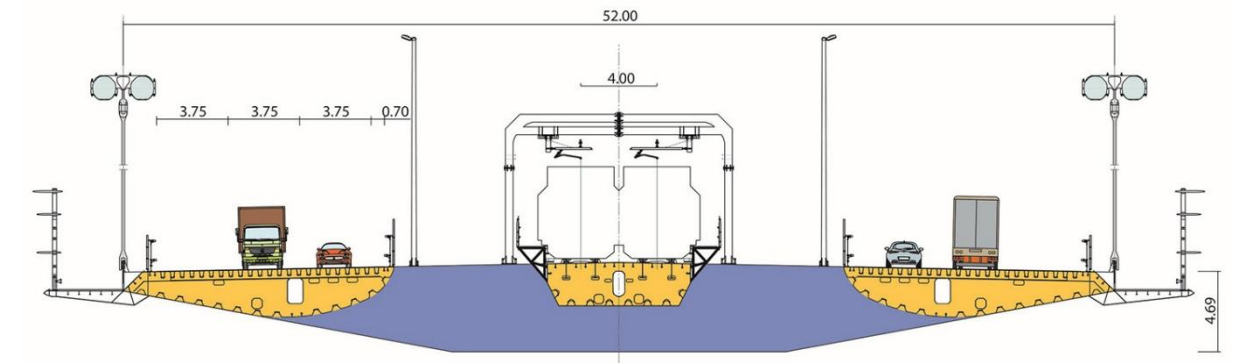


Figura 6: Sezione trasversale dell'impalcato del Ponte sullo Stretto di Messina, con tre corsie stradali per ciascun lato e al centro una coppia di binari per la ferrovia

La sezione trasversale è costituita da tre cassoni longitudinali principali, completamente realizzati in acciaio strutturale. Quelli laterali, rispettivamente di 14,2 metri di larghezza, su cui appoggiano le carreggiate stradali, con rispettivamente tre corsie, due di marcia e una di emergenza; quello centrale, di 7,5 metri è un doppio binario destinato alla ferrovia (Stretto di Messina S.p.A., 2024).

Le tre unità sono collegate tra loro mediante travi trasversali poste ogni 30 metri, che ripartiscono le sollecitazioni assicurando il comportamento monolitico della sezione (Pontesullostrettonews.it, 2023). Gli spazi tra i cassoni creano due vuoti aerodinamici studiati per

migliorare la stabilità del ponte sotto l'azione del vento e prevenire fenomeni di *flutter* e distacco dei vortici.

Le simulazioni aeroelastiche, condotte in galleria del vento in Danimarca e in Canada, hanno confermato la stabilità fino a venti di 216 km/h, con prove di sicurezza fino a 270 km/h.

Il profilo alare dell'impalcato e i vuoti laterali sono stati ottimizzati per favorire la penetrazione del vento, riducendo la portanza e migliorando la stabilità. Le barriere laterali frangivento consentono il passaggio controllato dell'aria, diminuendo la pressione differenziale sui veicoli e sulla struttura.

La trave sospesa presenta un rapporto di snellezza di circa 1:1250, valore estremo che impone un controllo accurato delle deformazioni (Webuild Group, 2024). Il peso complessivo dell'impalcato è stimato in circa 54.000 tonnellate: tale parametro aumenta la complessità di montaggio e la necessità di un monitoraggio continuo, con costi manutentivi incrementati rispetto ad altri grandi ponti sospesi, come ad esempio l'Akashi Kaikyō Bridge, in Giappone, in cui la trave presenta un rapporto di snellezza 1:1100, inferiore rispetto a quello previsto per il ponte sullo Stretto di Messina.

Dal punto di vista sismico, il ponte è dimensionato per resistere a un terremoto di magnitudo 7.1, compatibile con le condizioni geologiche del bacino dello Stretto di Messina (Ministero delle Infrastrutture e dei

Trasporti, 2024). L'intero sistema acciaio-cavi-torri è progettato per rispondere in modo flessibile, dissipando energia attraverso deformazioni controllate.

In termini critici, la soluzione strutturale adottata per l'impalcato presenta un elevato grado di innovazione ingegneristica, accompagnato da un livello di complessità che richiede sistemi avanzati di controllo, monitoraggio e manutenzione; infatti, la combinazione di campata di lunghezza eccezionale, ambiente marino unico al mondo e sismicità elevata richiedono una sorveglianza attenta: eventuali errori o sbalzi termici minimi comprometterebbero l'allineamento aerodinamico totale. Alcuni esperti però hanno ribattuto affermando che le incertezze nella modellazione sismotettonica locale potrebbero rendere le previsioni meno affidabili. È doveroso, inoltre, prendere in considerazione ponti analoghi come il Golden Gate Bridge in America, o l'Akashi Kaikyō Bridge in Giappone. Entrambe le strutture, di dimensioni ridotte ma dal punto di vista strutturale simili, sono situate in zone ad alto rischio sismico, specialmente il secondo, eppure sono regolarmente aperte alla circolazione veicolare.

L'impalcato è realizzato in acciaio ad alta resistenza, caratterizzato da ottima durabilità, capacità dissipativa e resistenza alla fatica. Le saldature e le connessioni bullonate sono progettate per garantire continuità e tolleranza alle deformazioni (de Miranda, Rizzo, & Mazzolani, 2025).

Le superfici sono protette- come da progetto- da rivestimenti anticorrosione multistrato, idonei per un ambiente marino, garantendo quindi una vita utile di 200 anni.

L’impalcato sarà costruito tramite conci metallici prefabbricati di circa 60 metri di lunghezza, assemblati in officine e trasportati via mare su chiatte. In fase di montaggio, ogni concio sarà sollevato mediante gru galleggianti e fissato progressivamente ai cavi portanti. L’assemblaggio seguirà una sequenza simmetrica rispetto al centro della campata per bilanciare i carichi (Webuild Group, 2024).

Le tolleranze geometriche sono estremamente ridotte: un errore di pochi millimetri nella posa di un concio potrebbe compromettere l’allineamento aerodinamico complessivo dell’impalcato. Per tale motivo l’intera operazione verrà monitorata da sistemi di controllo laser e sensori GPS di precisione sub-millimetrica (Stretto di Messina S.p.A., 2024).

L’esecuzione dei paramenti laterali viene realizzata mediante trivellazione nella parte entro terra, mentre la parte fuori terra prosegue con un getto in opera in c.a. Le armature sono quindi uniformi lungo tutto lo sviluppo della paratia/parete. I pali sono solidarizzati mediante una trave di correa in c.a. dello spessore di 1,5 m che fungerà anche da sella d’appoggio per la sovrastruttura.

Attraverso uno studio più dettagliato delle caratteristiche dei materiali, i conglomerati cementizi vengono realizzati in accordo con le normative UNI 11104 e UNI EN 206-1. Ciascun elemento strutturale, però, dovrà possedere determinate caratteristiche specifiche di resistenza in relazione alla funzione svolta (Stretto di Messina S.p.A., 2011).

CONGLOMERATO CEMENTIZIO

Conglomerato cementizio per	Classe	fck,cube	fck,cyl	fcd	fctm	fctk0,05	fctd	CE	CC
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
SF	C12/15	15	12	/	/	/	/	X0	S4/S5
PF	C25/30	30	25	14,167	2,565	1,795	1,197	XC2	S4-S5
F	C25/30	30	25	14,167	2,565	1,795	1,197	XC2	S4
EL	C32/40	40	32	18,133	3,024	2,117	1,411	XC4-XS1- XF2	S4
IM/COR	C32/40	40	32	18,133	3,024	2,117	1,411	XF4	S4
TP e TPF	C45/55	55	45	25,500	3,795	2,657	1,711	XS1-XF1	S4
LT ¹⁰	C35/45	45	35	19,833	3,210	2,247	1,498	XS1-XF2	S4

Classe → $C_{fck,cyl}/f_{ck,cube}$

¹⁰ **SF**: sottofondazioni; **PF**: pali fondazione; **F**: fondazione; **EL**: elevazioni; **IM/COR**: soletta d’impalcato e cordoli; **TP e TPF**: travi precomprese e travi precomprese prefabbricate; **LT**: lastre tralicciate.

Resistenza di calcolo a compressione $\rightarrow f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck,cyl} / \gamma_c = 0,85 \cdot f_{ck,cyl} / 1,5$

Resistenza a trazione media $\rightarrow f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck,cyl}^{2/3}$

Resistenza a trazione trattile (frattile 5%) $\rightarrow f_{ctk,0,05} = 0,7 \cdot f_{ctm}$

Resistenza a trazione di calcolo $\rightarrow f_{ctd} = f_{ctk,0,05} / \gamma_c$

Classe di esposizione CE

Classe di consistenza CC

Per le armature metalliche si adottano tondini in acciaio del tipo b450C, per i trefoli invece si adottano quelli da 0.6" in acciaio, entrambi controllati in stabilimento.

ACCIAIO PER CEMENTO ARMATO

	f_{yk} N/mm ²	f_{tk} N/mm ²	f_{yd} N/mm ²	ϵ_{uk} %	ϵ_{ud} %
ACA	≥ 450	≥ 540	391,30	7,5	6,75

Tensione di snervamento caratteristica $\rightarrow f_{yk}$

Tensione caratteristica a rottura $\rightarrow f_{tk}$

Resistenza di calcolo $\rightarrow f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = f_{yk} / 1,15$

Deformazione caratteristica al carico massimo $\rightarrow \epsilon_{uk}$

Deformazione di progetto $\rightarrow \epsilon_{ud}$

ACCIAIO PER TREFOLI DA PRECOMPRESSIONE (TPC)

	$f_{p(0,1)k}$ N/mm ²	$f_{p(1)k}$ N/mm ²	f_{tk} N/mm ²	f_{yd}	ϵ_{uk} %	A_{nom} mm ²
TPC	≥ 1.600	≥ 1.670	1.860	1391,30	3,5	139

Tensione caratteristica allo 0.1% di deformazione residua $\rightarrow f_{p(0,1)k}$

Tensione caratteristica allo 1% di deformazione totale $\rightarrow f_{p(1)k}$

Tensione caratteristica a rottura $\rightarrow f_{tk}$

Resistenza di calcolo $\rightarrow f_{yd} = f_{p(0,1)k} / \gamma_s = f_{p(0,1)k} / 1,15$

Deformazione caratteristica al carico massimo $\rightarrow \epsilon_{uk}$

Area nominale $\rightarrow A_{nom}$

2.1.2 Il sistema di sospensione e i cavi portanti

Il ponte è inteso come una struttura sospesa a tre campate, dove la centrale misura 3.300 metri, mentre le due laterali 183. Le due torri principali, con un'altezza di 399 metri, sosterranno l'intero implacato sospeso tramite 4 cavi portanti. La discussione però sulla realizzazione del Ponte si scontra con questioni tecniche, tecnologiche e logistiche che ne mettono in dubbio la fattibilità: uno dei maggiori ambiti riguarda il sistema di sospensione e i cavi portanti.

Un punto focale della criticità risiede nel sistema di sospensione, come afferma lo stesso Antonino Risitano, ingegnere specializzato in tematiche legate a materiali, fatica, progettazione strutturale e componenti meccanici, che ha manifestato forti perplessità tecniche in merito alla fattibilità del progetto.

Riportando quanto letto sulla relazione di progetto diffusa dalla società Eurolink, i cavi portanti hanno un diametro di 1,24 metri e sono formati da 349 trefoli, i quali a loro volta contengono 127 fili d'acciaio ciascuno, per un totale di 44.000 fili di acciaio zincato ad altissima resistenza, capaci di sostenere circa 150.000 tonnellate. La lunghezza complessiva di ciascun cavo, considerando il passaggio sopra le torri e gli ancoraggi alle estremità è pari a 5300 metri. (Stretto di Messina S.p.A., 2024). Tutti i materiali sono conformi agli Eurocodici strutturali (EN 1990-1999) e alle

norme UIC per le infrastrutture ferroviarie. Ciascun cavo portante è previsto essere costituito da funi preformate (n. 347 funi/cavo) a fili paralleli (n. 127 fili/fune, $\Phi = 5,4$ mm, filo di acciaio galvanizzato Classe A), sezione resistente $A=1,015$ m², valori di tensione: a snervamento (yielding) $\min f_y = 1.350$ MPa (13,766 kgf/cm²); e a rottura (ultimate) $\min f_u = 1.860$ MPa (18,967 kgf/cm²). Le prove di stabilità aerodinamica sono state effettuate presso la galleria del vento del laboratorio DLR (Germania), su un modello costituito da due tubi rigidi accoppiati di diametro pari a 38 mm, in scala Froude non dichiarata ma stimata pari a 1/33. (de Miranda, Rizzo, & Mazzolani, 2025)

Nel progetto definitivo del 2011, come già sottolineato in precedenza, è stata presa la decisione di avere cavi secondo la tecnologia PPWS¹¹ da 127 fili ciascuna. La concezione generale è stata in quella seduta mantenuta sia confermando il doppio cavo sia la innovativa sella a celle, con la differenza che in una cella sono tipicamente ospitate quattro funi da 127 fili, per un totale di 508 fili, molto simile a quello di ciascuna delle funi previste nel Progetto di Massima (Eurolink Consorzio, settembre 2024).

Il principio di funzionamento è classico del ponte sospeso: i cavi principali sostengono l'impalcato mediante una serie di pendini

¹¹ PPWS: Prefabricated Parallel Wire Strand

verticali che collegano i cavi all'impalcato a intervalli regolari di circa 30 metri (Stretto di Messina S.p.A., 2024).

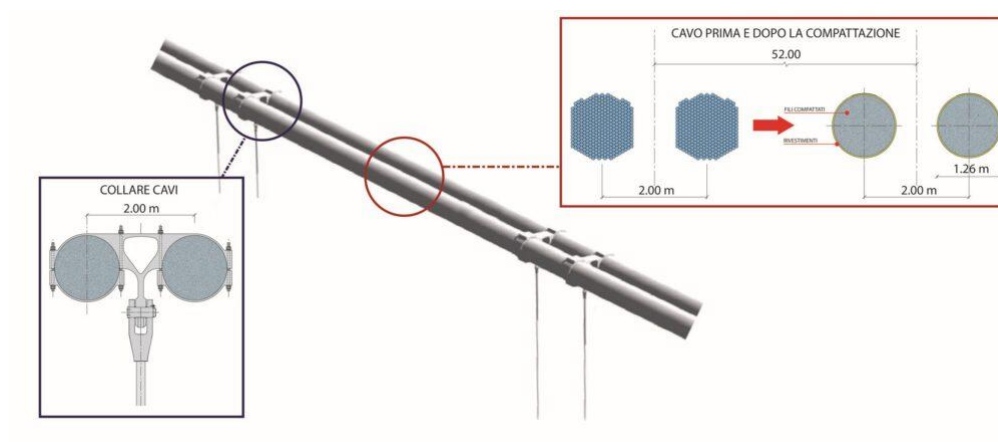


Figura 7: Schema del sistema di sospensione del Ponte Stretto di Messina

Il progetto adottando la tecnologia PPWS, offre una scelta vantaggiosa che ha permesso di ridurre il diametro del cavo, però questo sistema su cavi gemelli è ancora inedito a livello mondiale, non avendo precedenti di applicazione in nessun ponte (Risitano, GENERALE AMBIENTE PROCEDURA DI VALUTAZIONE DI IMPATTO AMBIENTALE, 2024).

Altro problema portato in causa dall'Ing. Risitano riguarda il problema della fatica e scorrimento, il cosiddetto *fretting* (usura da fatica causata da scorrimento). La stessa azienda, Eurolink nel documento ufficiale rintracciabile con codice PS0043_F0, afferma la necessità di eseguire prove di fatica sui cavi principali, in quanto ritenuta indispensabile prima di passare alla fase esecutiva, però la mancanza di dati codificati

e la riduzione prevista della resistenza a fatica a causa del *fretting*, rendono **l'attività di collaudo critica**.

Prendendo sempre in considerazione le affermazioni e le disamine analizzate dall'ingegnere, supportando il ragionamento anche grazie alla figura 8, possiamo sottolineare l'irrealizzabilità tecnica delle prove come originariamente concepite per i cavi in scala reale (1:1), le quali richiederebbero macchine di colossali dimensioni. Inoltre i tempi stimati per la sperimentazione necessaria per ciascun provino si protrarrebbero per almeno 25 anni, rendendo il progetto non fattibile nei prossimi decenni. (Risitano, Nota sull'irrealizzabilità tecnica del Ponte sullo Stretto di Messina: impossibilità tecnica di passare dall'attuale progetto definitivo al progetto esecutivo, 2024)

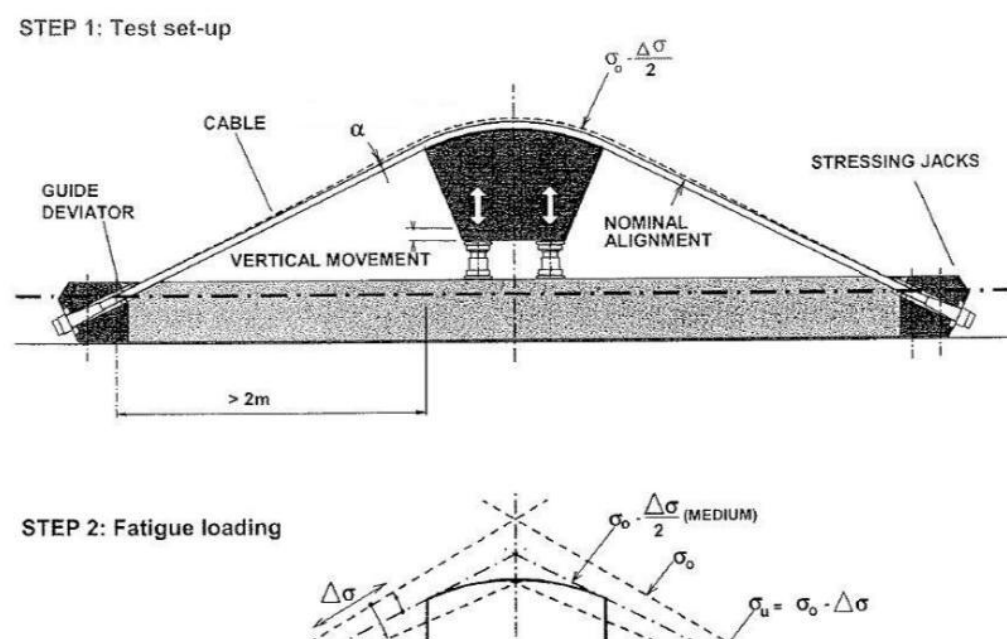


Figura 8: una disposizione alternativa con un unico PPWS posizionato su una sella di prova con un raggio pari alla metà di quello sulla torre

2.1.3 Le torri e le loro fondazioni

Le torri principali del Ponte sullo Stretto di Messina, che dobbiamo ricordare poggiano su terra ferma e non sono immerse in mare, rappresentano gli elementi verticali portanti del sistema di sospensione e sono realizzate interamente in acciaio ad alta resistenza, come spiegato nel documento nel 2025 dall'azienda WeBuild: ogni torre presenta una configurazione a due gambe collegate tra loro mediante tre traversi, a forma di clessidra, posizionati a quote differenti per garantire la rigidezza trasversale necessaria e la stabilità complessiva della struttura.

L'altezza di ciascuna torre è pari a 399 metri, il che ne fa una delle più alte strutture metalliche mai realizzate in Europa: il peso complessivo di una torre è di circa 55000 tonnellate, distribuito in modo uniforme lungo le due gambe principali. (Stretto di Messina S.p.A., 2024)

Ogni gamba della torre è costituita da 22 conci metallici prefabbricati, di altezza variabile, che vengono progressivamente assemblati in opera. I conci presentano una sezione trasversale di forma ottagonale, con dimensioni planimetriche pari a 20x12 metri e un'altezza massima di 20, dove il peso medio di ciascun concio equivale a circa 1.200 tonnellate.

I conci sono interamente realizzati in officina: qui vengono completate le operazioni di saldatura, montaggio e protezione anticorrosiva. Successivamente, i moduli vengono trasportati via mare fino al cantiere, per poi essere assemblati in sito mediante un sistema di montaggio rampante indipendente per ciascuna gamba: questa tecnica costruttiva consente di sollevare e posizionare i conci in modo progressivo (Eurolink Consorzio, settembre 2024).

Benché le dimensioni e la tecnologia siano molto ambiziose e rappresentino un livello di progettazione di alto profilo ingegneristico, permangono incognite riguardo la logistica di montaggio, l'allineamento dei conci di elevate dimensioni e la gestione delle tolleranze in un contesto così complicato, come sottolineato dal divulgatore scientifico Andrea Moccia in un video YouTube, in cui ricostruisce l'intero Ponte in 3D, utilizzando i documenti pubblici e progetti originali.

Continuando con l'analisi si arriva a parlare delle fondazioni delle torri. Esse sono costituite da due plinti circolari in cemento armato a forma di tronco di cono, con una altezza di 33 metri, collegati alla base da un traverso rigido: esse differiscono leggermente nelle dimensioni tra le due sponde: la torre di Sicilia ha un diametro di 55 metri, mentre la torre della Calabria misura 48. Tale differenza è dovuta alle specifiche condizioni geotecniche e morfologiche dei terreni di imposta (Stretto di Messina S.p.A., 2024).

La differenza tra i diametri dei plinti, determinata dalle differenze geotecniche del fondale marino, segnala che il progetto non è completamente standardizzato, il che potrebbe comportare aumento dei costi e della complessità costruttiva. Inoltre questa discontinuità simmetrica tra le due sponde potrebbe minare l'uniformità delle sponde strutturali.



Figura 9: Schema delle Torri Principali del Ponte sullo Stretto di Messina

«I blocchi d'ancoraggio invece hanno dimensioni poderose ma impatto visivo minimo. Il volume totale è di 533.000 m³, ovvero solo il 17% del volume è costruito fuori terra. I cavi principali sono collegati al blocco mediante piastre d'acciaio che sono ancorate al calcestruzzo tramite tirante post-tesi a cappio.» (Stretto di Messina S.p.A., 2024)

Data la descrizione dei blocchi di ancoraggio, appare come una forte dichiarazione che non esclude, però, un forte impatto ambientale e paesaggistico: l'enorme volume totale comporta una massiccia opera di scavo e cemento, che non preclude nuovi piani ambientali e spese di fattibilità.

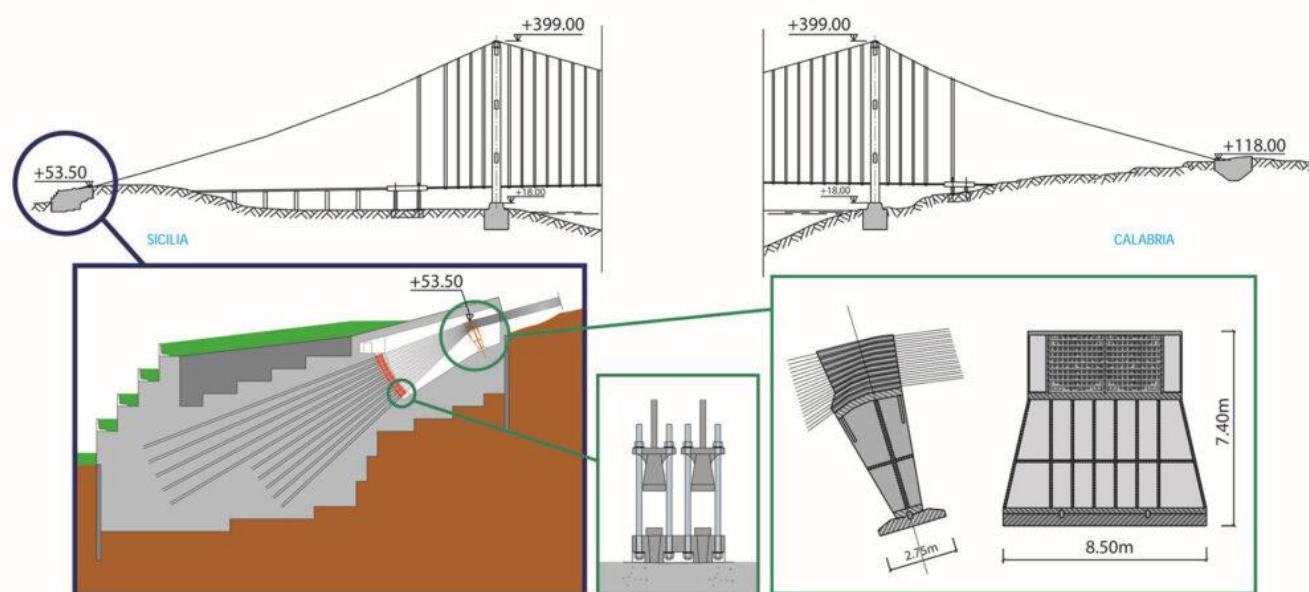


Figura 10: Esempio di Blocchi di Ancoraggio

2.1.4 Questioni economiche e finanziarie: costi di costruzione

Secondo quanto riporta *Il Sole 24 Ore*, il costo totale del progetto ammonta a 13 miliardi e 532 milioni di euro. Una parte consistente, 10 miliardi e 508 milioni, è destinata al contraente generale: 9 miliardi e 242 milioni per i lavori veri e propri, soggetti a possibili sconti; 1 miliardo e 266 milioni per voci di spesa non trattabili, come i **costi per la sicurezza, i servizi di ingegneria e monitoraggio e le opere per mitigare l'impatto sociale e territoriale**. A questi importi si aggiungono quasi tre miliardi di euro per altre spese che riguardano la direzione dei lavori, il controllo ambientale, la bonifica delle aree da materiali inquinanti, le ispezioni antisabotaggio, la sorveglianza e le indagini archeologiche.

La stima dei costi operativi annuali di gestione per il periodo 2033-2062 si aggira intorno agli 80 milioni di euro, divisi in: manutenzione ordinaria circa 6 milioni di euro, 24 milioni destinati alle spese per il personale più altri 50 milioni di euro sotto la voce "altri costi".

Nel bilancio precedente non viene calcolata la manutenzione straordinaria, stimata in 1,64 miliardi di euro tra il 2034 e il 2060. Questa cifra si basa sull'esperienza di operatori internazionali che si occupano di grandi ponti sospesi in Danimarca, Turchia e Giappone. Questo totale

viene adibito per il rifacimento della pavimentazione ogni 5 anni sostituzione del 20% delle barriere stradali ogni 15 anni; rifacimento del 50% della verniciatura ogni 15 anni e sostituzione dei sistemi meccanici e degli impianti ogni 15 anni.

Il valore complessivo dell'investimento, compresa la manutenzione straordinaria, supera i 15,3 miliardi di euro, a cui si aggiungono 189,7 milioni di euro in investimenti netti per beni reversibili della società Stretto di Messina.

Il reddito generato secondo le previsioni si dovrebbe aggirare sui 300 milioni entro il 2062: i proventi dell'opera, durante la fase operativa, sono stimati a 162.8 milioni di euro nel 2033 per poi salire a 336.4 nel 2062. Di questo totale finale, 300 milioni deriveranno da pedaggi per l'attraversamento stradale, mentre il restante sarà costruito dagli introiti del canone ferroviario (Sky TG24, 2025).

Si potrebbe pensare che i costi siano esagerati e considerati un investimento inutile.

Prendiamo però in considerazione il Ponte dello Stretto di Akashi: inaugurato il 5 aprile 1998, è costato al Giappone 500 miliardi di yen, che con il cambio valuta nello stesso anno equivaleva 3.79 miliardi di euro. L'inflazione cumulata dal 1998 al 2025 è circa del 65% in più, portando quindi il totale a 6.25 miliardi: sapendo che le dimensioni del Ponte dello Stretto sono il doppio dell'Akashi Kaikyō Bridge, il costo finale è proporzionato all'impresa ingegneristica.

2.2 Le Complessità a Maggiore Componente Ingegneristica

2.2.1 La resistenza al vento: studi aerodinamici e modelli

Le misure effettuate dal Centro Meteorologico di Torre Faro, per un periodo di quasi 30 anni, hanno permesso il monitoraggio diretto dei fenomeni ventosi nel sito di interesse, mostrando come non sia mai stato misurato alla quota dell'impalcato, ovvero 70 m.s.l.m., un vento con velocità superiore a 30 m/s, ovvero 108 km/h. Tali dati hanno costituito un importante strumento per la definizione del vento di progetto agente sull'opera. I valori di progetto della distribuzione spaziale della velocità e della turbolenza del vento fanno parte delle specifiche progettuali del ponte sospeso poste a base della progettazione definitiva (Devitofranceschi, Piccarreta, & Mele, 2025). Grazie a questi dati, il profilo dell'impalcato è stato progettato per resistere a venti con velocità fino a 216 km/h: gli studi e le numerose prove in galleria del vento hanno inoltre permesso di portare il comfort di attraversamento a livelli ottimali consentendo un regolare svolgimento del traffico stradale e ferroviario 24 ore su 24 per 365 giorni l'anno (IAReSP OdV, 2024).

Durante la progettazione vanno considerati: gli effetti statici, ovvero quelli che determinano il carico eolico dal punto di vista del dimensionamento; dinamici, quelli che contribuiscono a determinare la stabilità e la percorribilità; eccitazione da distacco di vortici e l'effetto del vento laterale sui veicoli.

Al Politecnico di Milano, dove è presente la galleria del vento più grande d'Italia, sono state condotte delle attività sperimentali in risposta al vento: sono stati riprodotti modelli sezionali per caratterizzare e ottimizzare il ponte, e modelli completi per la verifica globale del comportamento aerodinamico, in risposta agli studi accertati dalla società Stretto di Messina S.p.A.

La stabilità aerodinamica dipende dall'ottimizzazione dei coefficienti aerodinamici e dalla rigidità strutturale del ponte. Lo stesso equilibrio del cassone del Ponte è stato studiato per angoli di attacco compresi fra -4° e $+4^\circ$. Vengono considerati tre gradi di libertà: movimento verticale, movimento orizzontale e movimento torsionale.

Viene applicato il modello di analisi *flutter di Theodorsen*¹², ma esteso per comprendere tre gradi di libertà e i 18 derivati *flutter*: questo modello genera il punto di *flutter* (fenomeno di instabilità aeroelastica), ovvero la velocità critica del vento e la frequenza di *flutter* risultante. Il modello AMC, che si basa sullo stesso gruppo di equazioni del metodo di

¹² modello di analisi *flutter* di Theodorsen: serve per studiare il fenomeno di instabilità aeroelastica di un profilo alare. Ovvero l'instabilità che nasce dall'interazione tra flusso aerodinamico e vibrazioni strutturali

Theodorsen, è usato con la sola presenza di una equazione per una variabile complessa, in tal modo lo smorzamento composto viene ottenuto in funzione della velocità del vento.

Le derivate aerodinamiche vengono invece ottenute dalle prove sul modello sezionale di Force¹³, a flusso smorzato.

Per la condizione di progetto con vento orizzontale, 0° , viene usata la forma deformata del cassone: viene traslato fino a 23 m in direzione del vento, ruotato col naso verso il basso (ca. $0,55^\circ$ della campata centrale) e abbassato di quasi 1 m. In questo modo, l'effetto combinato del vento fa ruotare la sezione col naso verso l'alto per effetto del momento aerodinamico sulla forma della sezione stessa ed il complesso sistema elastico della struttura del ponte fa sì che vi sia una leggera rotazione del cassone col naso verso il basso. (Webuild S.p.A., 2025)

Questi studi e risultati per la verifica di risposta dinamica, distacco di vortici e stabilità sono stati testati sul prototipo presentato in galleria del vento a Milano, una replica esatta 1/300 del progetto del ponte effettivo, con una lunghezza di 13.8 m, provato per esposizioni da 0 a 90 deg (gradi angolari) e fino a 90 m/s.

¹³ Il modello sezionale di Force descrive le forze e i movimenti aerodinamici che agiscono su una sezione bidimensionale di un'ala in funzione del moto locale della sezione stessa e delle condizioni del flusso.

2.2.2 La risposta sismica: dispositivi di isolamento e ammortizzatori

Il progetto prevede l'inclusione di tecnologie antisismiche avanzate a causa dell'elevato rischio sismico nella zona dello Stretto. Questa regione è soggetta a una delle attività più intense del Mediterraneo, rendendo la protezione sismica una priorità assoluta per il progetto. Gli accorgimenti adottati, su modello del Ponte Akashi-Kaikyo¹⁴, per rendere il ponte resistente ai terremoti, riguardano l'utilizzo di isolatori sismici, struttura flessibile, fondazioni rinforzate, test dinamici associati a simulazioni dinamiche e smorzatori a massa mobile.

Il riferimento al modello giapponese è certamente autorevole, ma va evidenziato che esso poggia su un terreno con caratteristiche di compattezza ed elementi rocciosi differenti. Ciò implica che l'applicazione diretta delle soluzioni potrebbe richiedere adattamenti sostanziali alle condizioni locali.

Gli isolatori sismici, previsti nel progetto, hanno lo scopo di ridurre la trasmissione delle onde sismiche dalle fondazioni del ponte alla struttura stessa. Questi dispositivi permettono al ponte di scivolare

¹⁴ Il Ponte Akashi-Kaikyo, noto anche come Ponte Perla, è il ponte sospeso più lungo al mondo. Durante la sua costruzione, fu colpito da un terremoto magnitudo 7.3: la scossa fu talmente potente da spostare le torri di un metro, ma grazie alla flessibilità della struttura e alla tecnologia impiegata (1995), la costruzione non subì danni significativi, ma venne terminata apportando alcune modifiche per migliorarne la resistenza

leggermente rispetto alla terra sottostante, assorbendo l'energia del terremoto e riducendo lo stress sulle strutture portanti. Questo principio è certamente collaudato ma rimane tuttavia il rischio di sfasamento dinamico tra gli appoggi che non è assolutamente trascurabile e rappresenta una sfida ingegneristica ancora aperta (Vulcanologia, 2024).

In progetto vengono inoltre previsti materiali e tecnologie che rendono il ponte **flessibile**, permettendogli di oscillare in modo controllato durante un terremoto senza subire danni strutturali.

Di particolare importanza nel progetto sono le torri, le quali dovranno essere costruite su fondazioni molto profonde e rinforzate, utilizzando tecniche di consolidamento del suolo e trivellazioni profonde per garantire che le strutture non si spostino o collassino in caso di terremoti. La particolare geologia dello Stretto, con il suo particolare fondale marino soggetto a forti correnti, richiede soluzioni innovative per le fondazioni.

Come per il vento, per il quale sono stati effettuati test in galleria del vento, durante la fase progettuale sono stati eseguiti modelli di simulazione, su prototipi in scala, per verificare il comportamento in caso di terremoti di forte magnitudo (simulate scosse pari a 7.1 su scala Richter per replicare l'evento sismico più disastroso avvenuto a Messina nel 1908).

Gli smorzatori dinamici a massa mobile invece, simili a quelli utilizzati in grattacieli e altre infrastrutture importanti, hanno il compito di assorbire e disperdere l'energia generata dai movimenti sismici.

Tutti questi accorgimenti fanno parte di un approccio moderno che unisce l'ingegneria civile avanzata alla geotecnica e alla sismologia. Il ponte è progettato per resistere a terremoti di intensità significativa, con l'obiettivo di minimizzare i danni e garantire la sicurezza delle persone e della struttura stessa. (IARESP OdV, 2024)

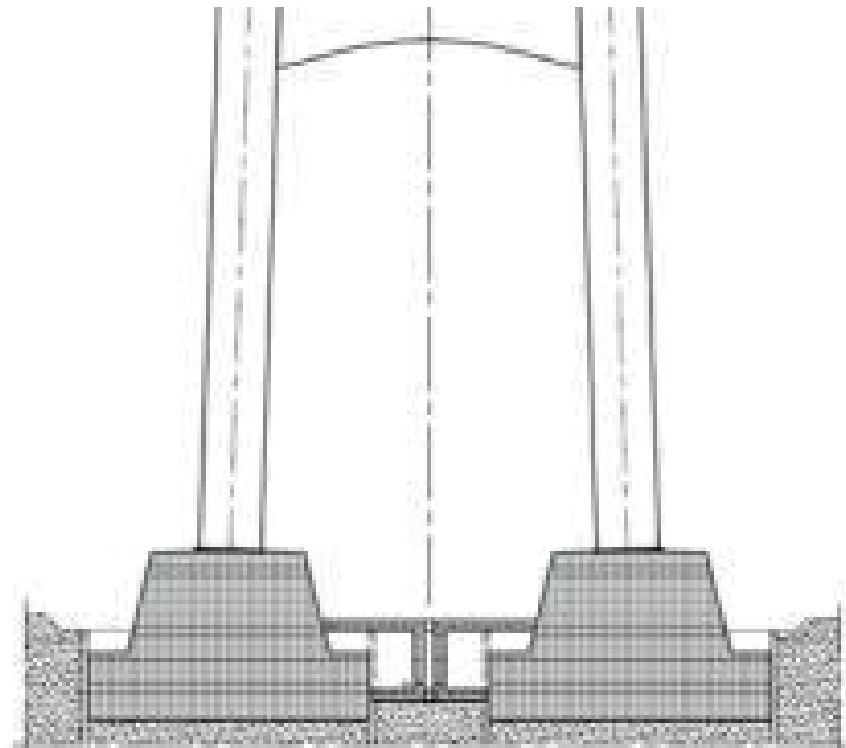


Figura 11: Disposizione proposta per n. 16 smorzatori a massa accordata (TMD) sul secondo traverso sulla torre

Le soluzioni previste dimostrano una notevole ambizione tecnologica e un approccio multidisciplinare, ma la reale efficacia di tali sistemi potrà essere confermata solo dopo verifiche sperimentali su scala reale e l'implementazione di un piano di monitoraggio strutturale continuo.

2.2.3 L'integrazione del traffico stradale e ferroviario

Il sistema di attraversamento stabile dello Stretto di Messina, insieme ai collegamenti stradali e ferroviari sui versanti calabresi e siciliani costituisce un'infrastruttura prioritaria e di preminente interesse nazionale.

Oltre al ponte, l'infrastruttura comprende le opere stradali e ferroviarie di collegamento al territorio calabrese e siciliano. Queste comprendono 40,5 km complessivi di nuovi raccordi che collegheranno al ponte sospeso, sul lato calabrese, l'autostrada del Mediterraneo (A2) e la stazione RFI di Villa San Giovanni e le autostrade Messina-Catania (A18) e Messina-Palermo (A20) nonché la nuova stazione RFI di Messina.

Le infrastrutture stradali sono state concepite per garantire un accesso efficiente e ben distribuito al ponte, minimizzando il traffico e facilitando gli spostamenti tra le due sponde dello Stretto.

Si denota che il progetto non è solamente focalizzato sull'area dello Stretto, ma coinvolge anche tutto il territorio circostante sottolineando l'importanza di un'infrastruttura capace di connettere due grandi aree del paese. L'impatto strutturale è volto quindi ad ottimizzare la mobilità e a prevenire congestioni con benefici tangibili per la gestione del traffico e la qualità della vita urbana, dimostrando un'eccellente capacità di integrazione con la rete esistente.

È tuttavia necessario distinguere tra versante calabrese e versante siciliano.

In Calabria, gli ambiti territoriali direttamente interessati dalle opere stradali ricadono nei territori di Villa S. Giovanni e Campo Calabro: la rete esistente è costituita principalmente dall'autostrada A2 Salerno-Reggio Calabria, dalla S.S.18 Tirrenica e dalla rete stradale locale. Il nuovo progetto prevede la realizzazione dei quattro rami di connessione tra l'A2 e il Ponte mediante una sistema di rampe monodirezionali, e da una rete di viabilità complementari di riconnessione. Nelle due rampe di connessione, con direzione da e per Salerno, sono previsti maggiori flussi di traffico, quindi presentano tre corsie, di cui una di emergenza. Le rampe invece da e per Reggio Calabria sono formate solamente da due corsie, dove una è sempre adibita a emergenza.

Il progetto dei collegamenti stradali sul versante calabrese comprende anche 13 opere d'arte tra ponti e viadotti con uno sviluppo complessivo di 850 m, oltre ad alcuni cavalcavia destinati alla interconnessione delle nuove rampe con la rete stradale locale.

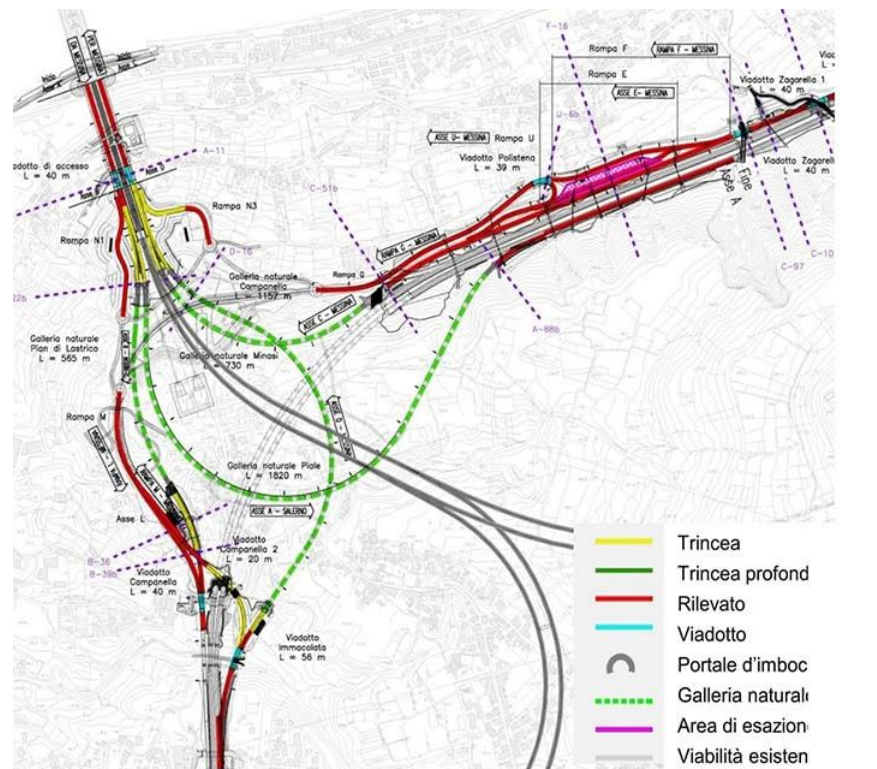


Figura 12: Sistema dei collegamenti sul versante Calabria

Per quanto riguarda il versante siciliano le infrastrutture stradali di collegamento dell'opera si sviluppano per 10,4 km, partendo da Messina e arrivando fino a **all'Annunziata**.

Avrà così avvio un collegamento veloce tra il ponte, l'area urbana di Messina e anche il collegamento con la rete autostradale esistente.

Il nuovo asse è dotato di tre svincoli distribuiti in posizioni strategiche lungo tutto il tracciato: mini-svincolo Ganzirri che permetterà un rapido accesso al ponte per gli utenti provenienti dalla parte Nord del territorio comunale di Messina; svincolo Curcuraci, punto di raccordo con la

Strada Panoramica e svincolo di Annunziata-Giostra, sulla tangenziale che consentirà una distribuzione del traffico in entrata e in uscita dal ponte.

Verranno anche utilizzate le gallerie naturali presenti lungo il tracciato che saranno realizzate con scavo tradizionale e la sagoma interna manterrà le dimensioni della piattaforma stradale; saranno inoltre dotate di piazzole di sosta ogni 600 m, by-pass pedonali e by-pass carrabili.

Il progetto dei collegamenti stradali sul versante siciliano comprende anche 11 opere tra cui ponti, viadotti e cavalcavia, con uno sviluppo complessivo di 1200 m, con prevalente tipologia costruttiva dell'impalcato acciaio-calcestruzzo. (Lucangeli, Gandolfo , Cuni, & Micheli, 2025).

2.3 Criticità e Impatti

2.3.1 Criticità legate al territorio

“La Commissione Tecnica di Valutazione dell’Impatto Ambientale (VIA-VAS) del Ministero dell’Ambiente ha dato il via libera al progetto del Ponte sullo Stretto di Messina, stabilendo una serie di prescrizioni da rispettare nel corso della presentazione del progetto esecutivo.

La decisione è stata comunicata ufficialmente dal Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica, segnando un passo importante verso la realizzazione dell’infrastruttura che collegherà Calabria e Sicilia.

La Commissione ha dovuto risolvere 239 osservazioni tecniche, ereditate dalla precedente commissione VIA, scaduta a maggio e rinnovata a luglio. Le criticità sollevate riguardavano questioni ambientali e procedurali, tra cui la valutazione d’impatto ecologico sull’ambiente marino e terrestre, la gestione delle terre e dei materiali, il contenimento del rumore e delle vibrazioni e le verifiche sismologiche.

Conclusa la fase preliminare della VIA, il progetto si avvia ora verso l’approvazione definitiva da parte del Comitato Interministeriale per la Programmazione Economica e lo Sviluppo Sostenibile (Cipess), attesa tra dicembre e i primi mesi del prossimo anno.” (Redazione INGENIO, 2024)

In obiezione, l’europarlamentare di Avs Leoluca Orlando, durante l’incontro a Bruxelles con Jessika Roswall, commissario europeo per l’ambiente, ha affermato che il progetto del ponte sullo Stretto di Messina è in aperta ripetuta violazione delle normative europee sull’ambiente e di quelle in materia di appalti delle opere pubbliche.

Nel corso dell’incontro è stata denunciata a carico della procedura la mancanza di fondatezza e anche l’inesistenza di elementi fondamentali richiesti su impatto ambientale dell’opera e dei relativi lavori con ripercussioni sulla sicurezza pubblica, sulla normativa di protezione civile e la salute delle comunità interessate. (Redazione Gazzetta del Sud, 15). La procedura progettuale deve quindi rappresentare un modello di riferimento per la corretta integrazione tra infrastruttura e tutela ambientale, riguardando aspetti legati sì alla tutela ma anche alla sicurezza pubblica e delle comunità in maniera preventiva e strutturata.

Nell’area vasta dello Stretto di Messina è presente un ecosistema ricchissimo di biodiversità: acque, correnti, venti, caratteristiche geomorfologiche, presenze faunistiche, ricchezze botaniche e

naturalistiche fanno unico questo luogo: in pochi chilometri è contenuto uno scrigno naturalistico rappresentativo dell'intero Mediterraneo, in un contesto tra i più importanti delle culture mitologiche del mondo classico. Non è un caso che l'intera area dello Stretto sia il punto focale di un importantissimo sistema naturale oggi costituito da riserve naturali e parchi naturalistici.

L'area è cruciale per la migrazione afro-euroasiatica in cui transitano centinaia di specie diverse di uccelli, con passaggi stagionali nell'ordine delle decine di migliaia di individui di rapaci e nell'ordine dei milioni di individui per molte altre specie, sia durante il giorno che la notte. Il ponte potrebbe sembrare quindi una barriera di ingenti dimensioni, posta peraltro trasversalmente rispetto alla direttrice migratoria, provocando un elevatissimo rischio di collisione, amplificato dall'illuminazione della struttura, dalla presenza di frequenti condizioni meteorologiche avverse (Ziparo, 2023).

Il confronto con grandi opere europee evidenzia come sia possibile conciliare mobilità e tutela ambientale: il Tunnel della Manica. Quest'ultimo rappresenta il chiaro esempio di come si possano conciliare esigenze di mobilità, innovazione ingegneristica e tutela del territorio. Per compensare l'impatto ecologico delle aree occupate dai cantieri è stata realizzata la riserva naturale di *Samphire Hoe*, un'area di 30 ettari: un ecosistema che ospita oltre 200 specie vegetali e

numeroso specie di uccelli: questa struttura può servire come modelli o riferimento di opera collaterale di valorizzazione ambientale.

Come già esaminato poco prima, l'inquinamento luminoso potrebbe disorientare la migrazione notturna in quanto molti uccelli si orientano con stelle, luna e campo magnetico terrestre: la luce artificiale induce gli uccelli a cambiare rotta o a collidere con strutture illuminate, perché attratti dalla luce soprattutto bianca e blu.

Per capire meglio il problema prendiamo in considerazione due ponti, il Ponte di Øresund: la progettazione ha tenuto conto della necessità di ridurre la dispersione verso il cielo, contribuendo a preservare l'oscurità naturale e a proteggere la fauna notturna, non intralciando così i flussi migratori (European Parliament, 2001).

Si può quindi trarre la conclusione che per ottimizzare l'inquinamento luminoso si può fare e abbiamo un caso di riferimento significativo riscontrabile in Danimarca: si possono utilizzare luci LED con proiettori a fascio stretto per garantire una luce uniforme e ridurre al minimo la luce dispersa.

Dal punto di vista paesaggistico, il Progetto Definitivo del Ponte effettua una compilazione tendenzialmente accettabile degli strumenti di pianificazione. Vengono riportati sintesi e stralci delle Linee Guida del Piano Territoriale Paesaggistico Regionale della Sicilia, con valenza strategica e di indirizzo, nonché del Piano d'ambito 9 "del Messinese"

con normativa anche prescrittiva di dettaglio per l'area oggetto degli interventi. Per la sponda calabra viene ampiamente sintetizzato il Quadro Territoriale Regionale a valenza Paesaggistica con ripresa delle indicazioni strategiche e normative, nonché del documento preliminare del Piano Territoriale Provinciale Paesaggistico (Ziparo, 2023).

Dal punto di vista ambientale, l'analisi mostra come il progetto definitivo del Ponte sullo Stretto di Messina sia in netto contrasto con i requisiti delineati negli attuali strumenti di pianificazione paesaggistica, sia sul versante siciliano che su quello calabrese. I problemi derivano principalmente dalla mancata integrazione dei quadri eco-paesaggistici dei Piani Paesaggistici Regionali e dei Piani Territoriali con Valore Paesaggistico: questi elementi costituiscono il vero quadro ecologico e paesaggistico dello Stretto, formando un territorio fortemente caratterizzato da un delicato equilibrio tra sistemi montuosi, corsi d'acqua torrenziali e zone costiere. L'approccio progettuale mostra una mancanza di interazione tra analisi e progettazione, con conseguente discontinuità metodologica e concettuale.

Dal punto di vista morfologico e percettivo, l'inserimento dei piloni principali e della trave di collegamento comporterebbe una trasformazione irreversibile del paesaggio naturale dello Stretto, alterando la continuità visiva e la percezione unificata del paesaggio costiero.

Tutte queste criticità portano alla conclusione che il progetto definitivo del Ponte possa rappresentare un modello progettuale insostenibile dal punto di vista ecologico e paesaggistico, qualora non vengano adottate e applicate le corrette norme vigenti in materia di salvaguardia del paesaggio e dell'ambiente.

2.3.2 *Impatto sul territorio: espropri e gestione dei cantieri*

I comuni coinvolti negli espropri riguardano entrambe le regioni, in numero maggiore in Calabria.

Nella prima regione, si parte da Campo Calabro fino ad arrivare a Villa San Giovanni, comprendendo altri sei centri abitati; in Sicilia invece si parte da Messina e si arriva a Villafranca Tirrena, includendo i quattro centri abitati di mezzo. Le unità immobiliari interessate dalla procedura arrivano a un totale di 443 unità, di cui 152 nel versante calabro (e di cui circa un terzo costituito da prime case) e 291 nel versante siculo (delle quali circa il 60% è costituito da prime case).

Basandosi sulle informazioni ufficiali, ricavate dalla "Relazione generale Espropri", dal punto di vista amministrativo, la metodologia adottata per la stima e l'individuazione dei beni risulta puntuale: la georeferenziazione su base catastale, la classificazione delle aree e la redazione di piani particellari che consentono la tracciabilità completa degli immobili interessati; inoltre, di particolare importanza è l'orientamento espresso verso il riconoscimento del valore reale di mercato.

La relazione mostra un'indagine minuziosa per quanto riguarda le aree agricole e quelle non identificabili: risulta difficile reperire valori di mercato attendibili, ma si è dimostrato come grazie alla trasparenza valutativa e all'applicazione di parametri oggettivi, si riesce a ridurre il margine di discrezionalità (Eurolink S.C.p.A., 22 marzo 2024) (Eurolink S.C.p.A., 22 marzo 2024).

Uno dei punti di domanda che rimane ancora irrisolto riguarda gli indennizzi: il criterio non è ancora stato totalmente definito: al valore reale dell'immobile si potrebbe aggiungere un bonus, frutto di accordi tra i diversi comuni e lo Stretto di Messina.

Come già sottolineato nei paragrafi precedenti il progetto del ponte è affidato in concessione alla società Stretto di Messina in quanto committente dell'opera, che affida al Contraente Generale, in questo caso Eurolink S.C.p.A- che ha vinto l'appalto- la responsabilità della costruzione dell'opera.

A questa società spetta quindi anche la gestione del cantiere, ovvero l'articolazione delle fasi distinte nel tempo e nel contenuto.

La prima fase comprende la creazione dei campi base, le bonifiche del territorio, gli spostamenti infrastrutturali, la viabilità dei cantieri e anche gli espropri.

Successivamente, il via libera del CIPESS¹⁵ prevede una pianificazione teorica dei lavori suddivisa in tre fasi: fase A, fase B, fase C. Nella fase A- indicativamente maggio 2026- vengono trattati i collegamenti stradali e ferroviari; nella B- indicativamente settembre 2026- si discute riguardo gallerie, svincoli e tre nuove stazioni ferroviarie; infine, la fase C- indicativamente marzo 2027- riguarda l'opera di attraversamento vera e propria. Questa sequenza rappresenta un cronoprogramma teorico e orientativo delle attività, considerando che subirà delle variazioni in base alle necessità tecniche e logistiche, ma è stato preso come termine ultimo, per portare a termine il progetto, il 2032 (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2025).

Completate le procedure burocratiche, si passa alla gestione operativa dei cantieri, ciascuno dei quali sarà gestito come un sotto progetto autonomo. Si deve tenere a mente che si ha la presenza di due modelli di cantiere molto distinti, uno sulla terra ferma e uno in mare.

¹⁵ Il giorno 30 ottobre 2025 però la Corte dei conti ha annunciato di non avere approvato la delibera con cui ad agosto il Comitato interministeriale per la programmazione economica e lo sviluppo sostenibile (CIPESS) aveva dato il via libera al progetto definitivo del ponte sullo Stretto di Messina.

3 IL PROGETTO DIVISO IN TRE: 3 CAMPATE, TRE CASSONI, UN OBIETTIVO

3.1 Concetto Strutturale e Vantaggi

3.1.1 *La scelta delle più campate: vantaggi in termini di stabilità e manutenzione*

Le scelte progettuali e dimensionali illustrate nel presente capitolo non si limitano ad un'impostazione di tipo concettuale, ma sono state approfondite attraverso una modellazione strutturale sviluppata in Midas Civil Nx: il modello 3D è stato utilizzato per il predimensionamento delle principali componenti strutturali, per la valutazione dei carichi permanenti e variabili e per l'analisi del comportamento strutturale complessivo dell'opera.

Non è mai troppo tardi per ammettere di aver fatto un errore e correre ai ripari, magari con una soluzione migliore. Il riesame richiesto dalla Corte dei conti per il progetto del ponte sullo Stretto di Messina dovrebbe però esser esteso alle premesse con cui all'inizio stato deciso di impostarlo e che non sono più attuali.



Un ponte a campata unica della lunghezza di 3300 m risulterebbe teoricamente realizzabile; tuttavia, qualora venisse costruito, non sarebbe funzionalmente idoneo a soddisfare gli scopi per cui l'opera è concepita, ovvero il collegamento per il trasporto stradale e ferroviario. (Cuneo, 2025)

Le scelte di impostazione assunte a priori – e quindi raramente riesaminate in modo neutrale – sono state essenzialmente due: (i) prevedere, oltre alle corsie autostradali, anche due binari ferroviari; (ii) perseguire comunque l'obiettivo di una campata sospesa unica da primato. Con tali premesse, diventa quasi automatico assumere che le torri principali debbano essere impostate a terra e che la luce della campata centrale debba coincidere con la larghezza dello Stretto, come nella configurazione oggi descritta per il progetto (campata unica da 3.300 m, due binari e torri sulle sponde).

In alternativa, l'arretramento/inoltro delle torri in mare di alcune centinaia di metri – soluzione adottata in grandi ponti sospesi con pilette in acqua (ad es. Akashi Kaikyō in Giappone e 1915 Çanakkale sui Dardanelli) – consentirebbe di ridurre la luce principale e, a parità di prestazioni, diminuire le sollecitazioni globali su impalcato e cavi; tale opzione può inoltre facilitare alcune verifiche di stabilità globale, pur introducendo complessità e costi specifici legati a fondazioni e cantierizzazione in ambiente marino.

Un ponte a tre campate risulterebbe di più agevole realizzazione e, soprattutto, potrebbe essere adottato con costi complessivi – al netto di quelli di impianto – non superiori a quelli di una soluzione a campata unica. Gli ingegneri civili sanno che, a parità di materiale e di schema strutturale, le sollecitazioni e le deformazioni crescono rapidamente con l'aumentare della luce, rendendo le strutture di grande campata intrinsecamente più sensibili ai carichi e alle azioni dinamiche. È inoltre noto che, in determinati periodi dell'anno – stimabili in circa 70 giorni – una struttura particolarmente leggera e flessibile può entrare in regime di oscillazioni significative indotte dal vento. Tali fenomeni dinamici possono generare effetti di fatica sui materiali e sui componenti strutturali, analogamente a quanto avviene nelle strutture aeronautiche, imponendo quindi programmi di manutenzione specifici, continui e pianificati.

In conclusione, un ponte sospeso a tre campate risulta tecnicamente realizzabile, purché la sua collocazione sia esterna alla zona di massima accelerazione dei flussi aerodinamici riconducibile all'effetto "tubo di Venturi"¹⁶ (Abramo, 2023).

Considerando che il progetto del ponte è nato più di un paio di decenni fa, occorre implementare il suo design con una nuova concezione:

¹⁶ Lo Stretto di Messina data la sua conformazione geografica, la quale genera un effetto aerodinamico, può essere assimilato al tubo di Venturi, il quale prevede che in una strettoia la velocità di un fluido aumenti a scapito della pressione. In questo caso si traduce in correnti e fenomeni ventosi canalizzati.

ponte sospeso ma con la presenza delle pile ancorate al fondale marino.

La soluzione qui discussa integra in modo sinergico principi di ingegneria e architettura, configurandosi come un ponte sospeso a tre campate. In tale schema strutturale, una grande fune principale svolge la funzione portante primaria, alla quale sono collegati i pendini che hanno il compito di sostenere l'impalcato. Gli stralli sono presenti, ma assumono una funzione strutturale secondaria rispetto alle funi principali. L'idea progettuale si fonda su una logica di ottimizzazione strutturale, nella quale a ciascun sistema viene assegnata la funzione per la quale risulta maggiormente efficiente.

Questo approccio, nato dall'esigenza di coniugare i vantaggi tipici dei ponti sospesi e supportato dalla verifica effettuata attraverso il modello FEM globale, ha consentito di valutare la risposta strutturale sotto carichi asimmetrici e dinamici. L'adozione del sistema già attuato nel progetto originale costituisce una scelta progettuale fondata su criteri strutturali consolidati e ampiamente documentati, non rappresentando una soluzione arbitraria o esclusivamente formale.

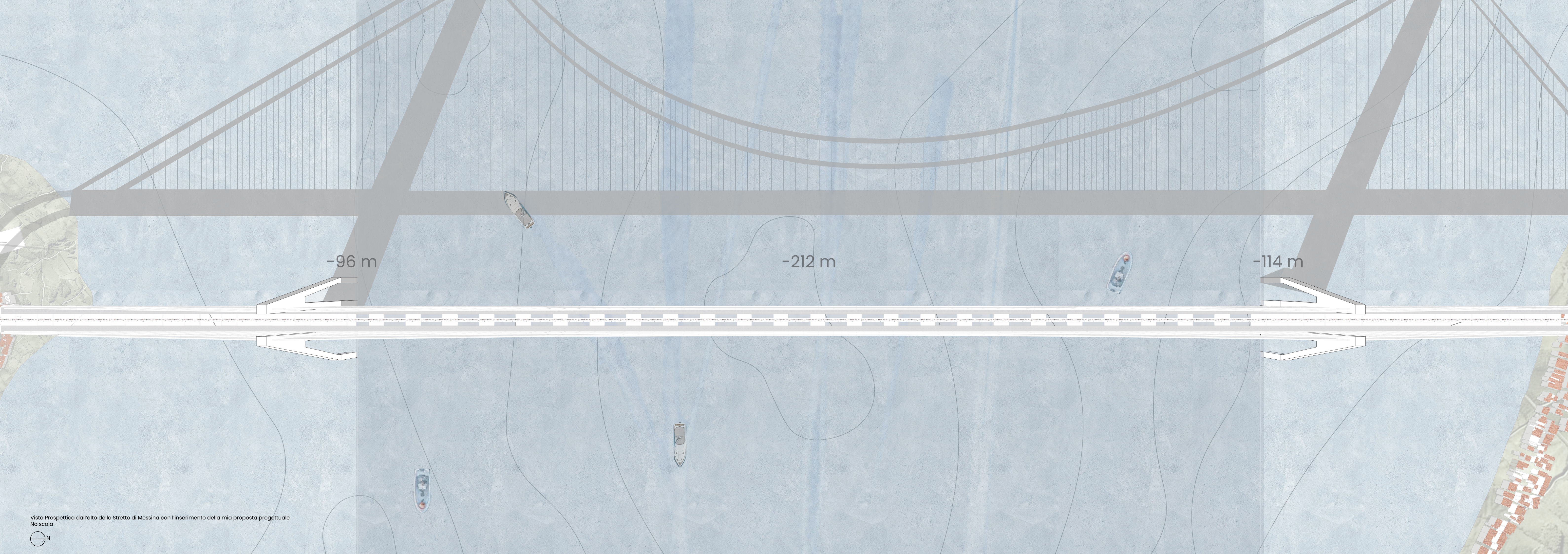
La suddivisione dell'attraversamento in tre campate consente di ridurre le tensioni massime nelle funi principali e le deformazioni verticali dell'impalcato, migliorando la distribuzione globale delle sollecitazioni e aumentando il margine di sicurezza strutturale. Tale configurazione risulta adatta in presenza di torri intermedie, in questo contesto su

fondazioni immerse in acqua, che permettono di articolare lo schema statico mantenendo la continuità del sistema sospeso limitando gli effetti negativi legati a luci eccessivamente estese.

Il principio fondamentale che sta alla base di questo sistema risiede nell'efficienza delle funi, in quanto l'impalcato che porta il carico stradale risulta appeso. Questi cavi sono i membri portanti primari: questa configurazione permette di ridurre notevolmente il peso morto della struttura ed allevia problemi di instabilità legati alla compressione, in quanto, i pendini lavorando a trazione, consentono una trasmissione diretta dei carichi alle funi principali evitando ridondanze strutturali (Weiwei & Teruhiko, 2017).

Un aspetto frequente di dibattito riguarda il presunto svantaggio in termini di rigidità: si sottolinea però che per ponti di grande luce, per di più in una zona caratterizzata da condizioni anemometriche complesse e da una significativa attività sismica, la capacità della struttura di assecondare le deformazioni assume un ruolo centrale.

La presenza delle tre campate inoltre consente di ridurre le ampiezze delle oscillazioni e a migliorare la stabilità aerodinamica globale.



-96 m

-212 m

-114 m

Vista Prospettica dall'alto dello Stretto di Messina con l'inserimento della mia proposta progettuale
No scala



3.1.2 Descrizione generale del nuovo modello proposto

L'idea progettuale alla base del ponte si sviluppa a partire dall'obiettivo di cercare di dare una risposta ai problemi dell'attuale progetto del Ponte sullo Stretto di Messina. La progettazione del nuovo ponte è finalizzata ad affrontare e risolvere le principali criticità dell'area dello Stretto, mediante interventi mirati sugli aspetti strutturali, ambientali e infrastrutturali che attualmente ne costituiscono le maggiori problematiche. La porzione interessata è sempre la stessa, zona Ganzirri – Punta Faro nella spalla siciliana e comune di Villa San Giovanni nella spalla calabrese. L'idea di progetto parte dall'idea di passare da una sola campata a tre: spostare i piloni in mare e mantenere lo schema sospeso.

Con questa idea, si è pensato di avere la campata centrale di 2.000 m e le due campate strallate laterali di 650 m ciascuna.

Le pile

Per giustificare la scelta di adottare una struttura parzialmente – e cioè sospesa e strallata – è necessario innanzitutto analizzare le motivazioni che hanno portato al posizionamento dei due piloni in mare.

Per quanto riguarda la configurazione strutturale delle torri, una variazione dello schema statico comporta inevitabilmente una

modifica della loro altezza. Al fine di avviare una prima fase di predimensionamento, si può assumere come riferimento un dato fondamentale del progetto preliminare, ossia la lunghezza complessiva del ponte, pari a 3.300 m. Considerando che il rapporto tra l'altezza delle torri e la lunghezza totale dell'opera è pari a 0,12090, applicando tale coefficiente alla lunghezza maggiore della campata sospesa si ottiene un'altezza massima delle torri pari a circa 241 m.

$$c_h = \frac{h}{l} = 0,12090$$

$$h_2 = c_h * l_2 = 241 \text{ m}$$

dove:

h= altezza torre iniziale pari a 399 m;

l= luce iniziale pari a 3.300 m;

c_h= valore ottenuto dal rapporto tra la l'altezza da progetto e la luce totale della sezione sospesa;

l₂= luce nuova di progetto pari a 2.000 m;

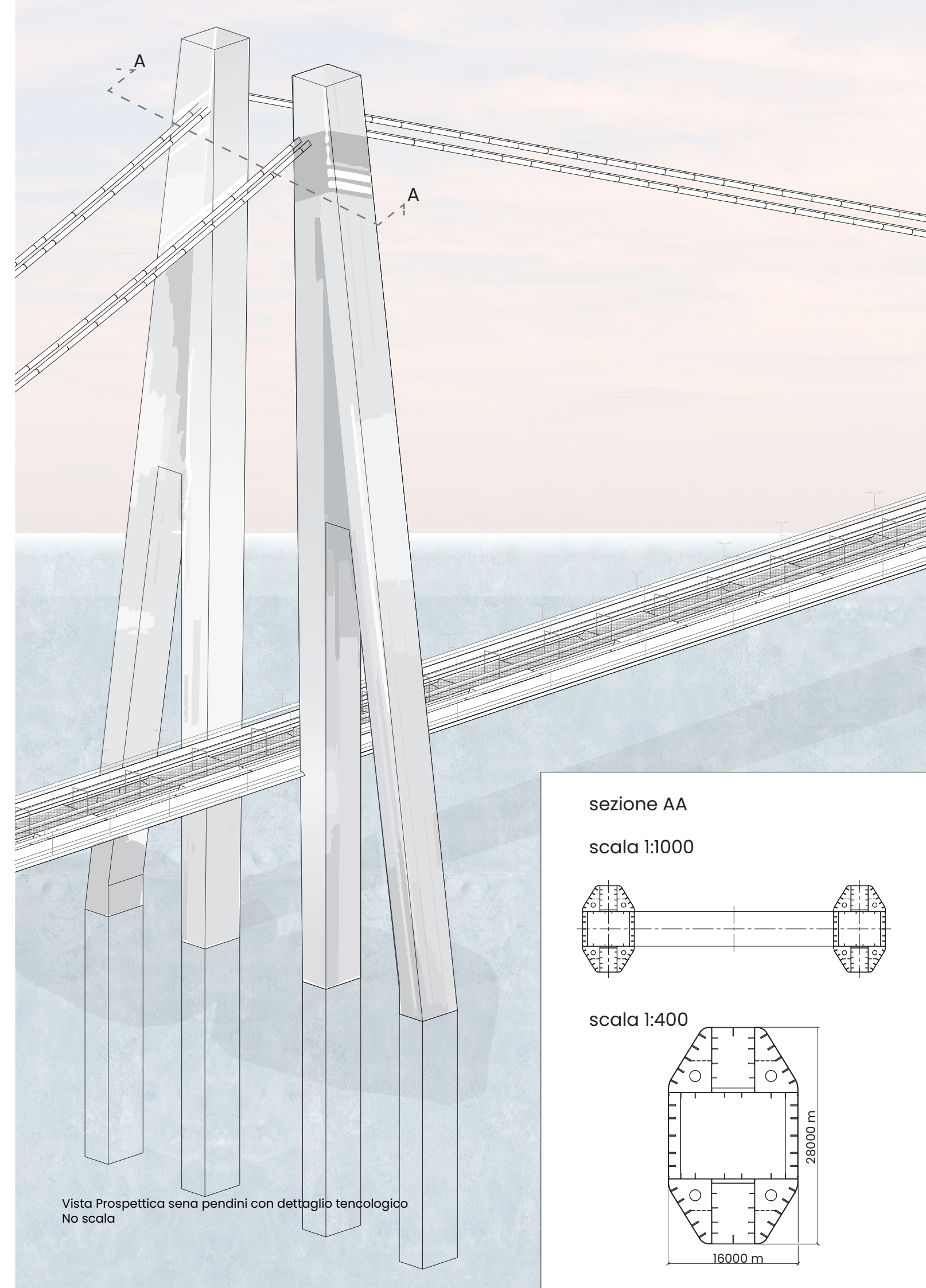
h₂= altezza torre finale.

Questa altezza, come si può vedere nel disegno sopra mostrato, non include il franco navigabile, fissato a 80 m, valore superiore ai 72 m previsti nel progetto originario. L'incremento di 8 m è stato adottato sulla base dei dati pubblicati da ShippingItaly, quotidiano specializzato

nel trasporto marittimo, secondo i quali nel 2024 sono state registrate 20 navi con altezza fuori acqua superiore a 65 m. Considerando pertanto l'intera altezza misurata a partire dal livello medio del mare, si ottiene un valore complessivo pari a 320 m. Per ragioni di sicurezza e in un'ottica di maggiore affidabilità progettuale, si è deciso di incrementare ulteriormente tale valore, fissando l'altezza massima delle torri a 350 m.

Al fine di semplificare le verifiche e i calcoli di progetto, come visibile nell'immagine restituita dal software di modellazione, le pile sono state schematizzate come parallelepipedi rastremati verso la sommità, con una base di dimensioni 16×28 m che si riduce progressivamente fino a raggiungere una sezione in sommità pari a 9×16 m.

Coerentemente con l'impostazione adottata dai progettisti del progetto originario del Ponte sullo Stretto, sono state mantenute, su entrambi i lati, due pile affiancate e collegate tra loro mediante cinque tiranti intermedi di sezione 9×12 m, al fine di garantire una distribuzione uniforme dei carichi tra le due strutture.



La struttura del ponte è stata modellata mediante un modello tridimensionale globale in ambiente MIDAS Civil NX. L'impalcato è stato schematizzato mediante elementi beam¹⁷ equivalenti, mentre i cavi principali, gli stralli e i pendini sono stati modellati come elementi truss con comportamento puramente assiale. Le torri sono state modellate come elementi beam tridimensionali, tenendo conto della variazione di sezione lungo l'altezza. Il modello ha consentito di valutare il comportamento globale della struttura, la distribuzione delle sollecitazioni e l'efficacia della configurazione progettuale ibrida sospesa-strallata.

Le campate

Proseguendo con l'analisi dell'opera, l'attenzione viene posta sul sistema delle campate, caratterizzate da uno schema strutturale puramente sospeso. In questa configurazione, il funzionamento statico è affidato alla collaborazione tra le funi portanti principali e gli elementi di connessione verticali.

Le azioni verticali, a differenza di quanto accade nelle soluzioni strallate o ibride, vengono trasferite interamente alle funi principali, definite anche cavi portanti, tramite una serie di pendini verticali, che

costituiscono gli elementi prevalentemente sollecitati a trazione, collegati a un sistema di cavi principali continui a sviluppo parabolico, i quali trasferiscono il carico verticale alle due torri. Questa scelta progettuale privilegia la chiarezza dello schema statico e l'eleganza formale tipica dei ponti sospesi. Inoltre, analogamente per come avviene nei ponti strallati, si ha l'utilizzo di pendini ad alta resistenza in modo da garantire la posa in opera ma successivamente eventuali eventi di sostituzione del singolo elemento. Considerata quindi la natura sospesa dell'opera si è scelto di disporre i pendini con un'interdistanza costante pari a 30 m.

Un elemento fondamentale del progetto è rappresentato dalla configurazione del sistema strallato portante: in difformità rispetto all'impostazione originaria, e al fine di rispondere alle criticità sulla resistenza evidenziate dall'Ing. Risitano e richiamate nel Capitolo 2, il numero delle funi principali è stato incrementato da due a quattro. La presenza di quattro funi indipendenti consente un significativo aumento della ridondanza strutturale, offrendo maggiori garanzie in termini di robustezza e sicurezza globale dell'opera.

¹⁷ Quando si parla di elementi *beam* nella modellazione strutturale, si intendono elementi monodimensionali che vengono utilizzati per schematizzare a semplificare il modello. Il loro utilizzo serve a rendere il modello computazionalmente gestibile per l'analisi globale.

L'impalcato

Per quanto concerne la struttura dell'impalcato, essa risulta invariata sotto il profilo dimensionale rispetto a quanto previsto nel progetto di base redatto da Stretto S.p.A., illustrato nel paragrafo 2.1.1.

In considerazione dell'elevata complessità strutturale dell'opera, si è optato per l'adozione di una configurazione direttamente ispirata al cosiddetto *Messina Type Deck*. Tale scelta è motivata dai numerosi studi condotti in letteratura, dai quali emerge come questa soluzione rappresenti, allo stato attuale delle conoscenze e delle tecnologie disponibili, la configurazione aerodinamicamente più efficiente.

In sintesi, il modello è concepito per strutture di grande luce che richiedono elevate prestazioni sia dal punto di vista aerodinamico sia strutturale. Esso si caratterizza per la capacità di coniugare elevata rigidità e leggerezza con un adeguato livello di stabilità, anche in presenza di carichi variabili e in condizioni ambientali particolarmente severe. L'impalcato è concepito come una sezione a più cassoni longitudinali, due laterali dalla medesima configurazione- adibiti al passaggio dell'asse stradale- e uno centrale che serve al passaggio della linea ferroviaria, punto cardine di questo progetto che, come detto in precedenza, si è voluto conservare in quanto, fiore all'occhiello del progetto. Questa scelta permette di suddividere i flussi di carico e di ottimizzare il comportamento globale, garantendo al contempo una significativa rigidità torsionale, inoltre i tre cassoni separati

permettono una distribuzione equilibrata delle masse, riducendo gli effetti dinamici indotti dal traffico e dal vento.

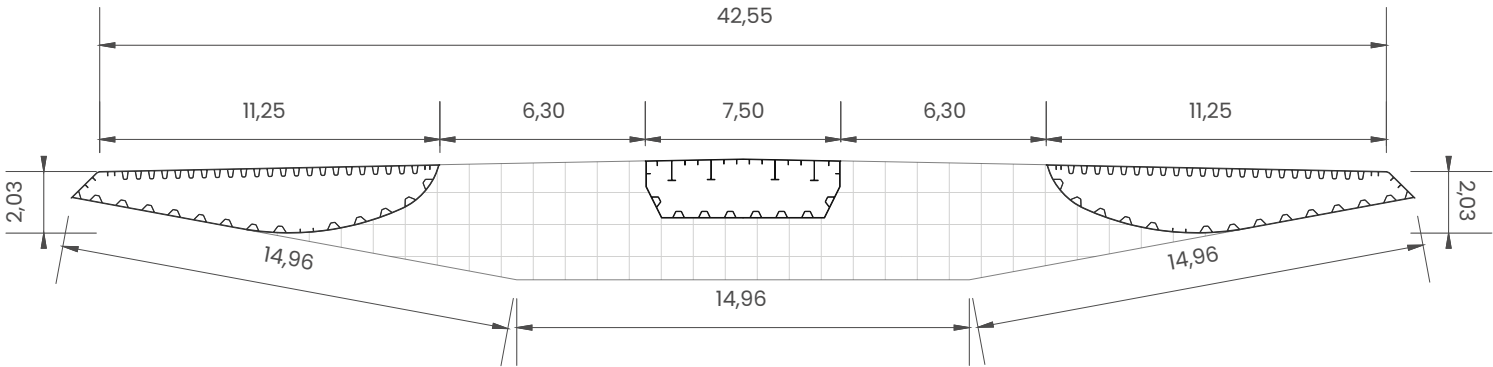
I cassoni laterali e quello centrale presentano infatti una sagoma assimilabile a un profilo alare, studiata per minimizzare la resistenza aerodinamica e prevenire fenomeni di instabilità come il *flutter*¹⁸ e il *galloping*¹⁹: tale configurazione geometrica favorisce inoltre la canalizzazione dei flussi d'aria, consentendo al vento di attraversare la struttura e riducendo la pressione aerodinamica complessiva sulla campata sospesa. Come si può osservare nella struttura riportata nella figura a fondo paragrafo, i tre cassoni risultano apparentemente separati; tuttavia, essi sono intervallati, a distanza costante pari a 30 m, da traversi trasversali irrigidenti che sorreggono la struttura e che danno continuità al ponte, assicurando un comportamento monolitico e un maggiore controllo delle deformazioni sotto carichi concentrati e/o distribuiti.

L'impalcato combina aerodinamicità e leggerezza strutturale, combinando una soluzione strutturale favorevole e l'impiego di materiali innovativi, che permettono di avere al contempo rigidità e leggerezza.

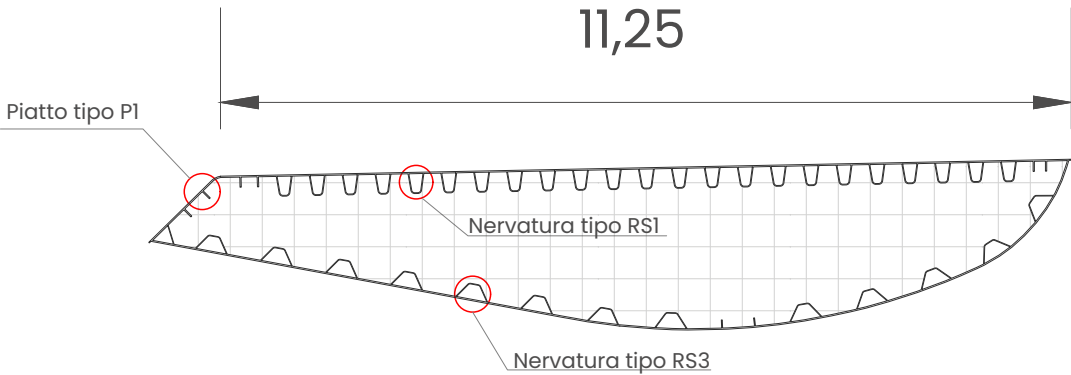
¹⁸ Fenomeno aeroelastico complesso e pericoloso. Si verifica quando le forze aerodinamiche si accoppiano con due o più modi di vibrare della struttura, tipicamente flessione e torsione dell'impalcato.

¹⁹ Fenomeno che si manifesta quando il vento investe elementi strutturali snelli con una sezione non perfettamente simmetrica. In presenza di una piccola oscillazione iniziale, il vento genera forze aerodinamiche che non contrastano il movimento, ma lo amplificano progressivamente.

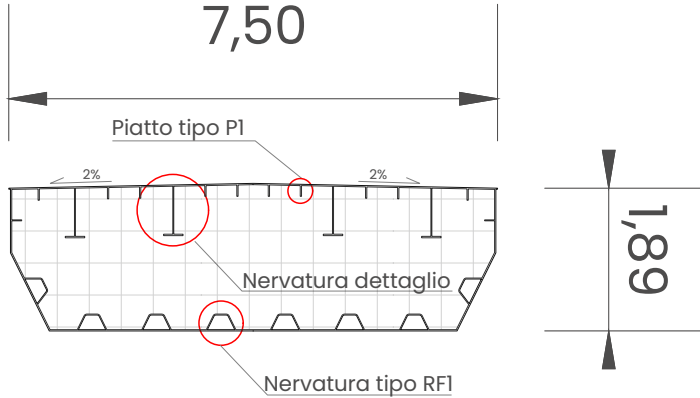
L’adozione quindi di un impalcato ispirato al modello sviluppato per il ponte sullo Stretto di Messina consente di ottenere una struttura ad alte prestazioni, capace di rispondere alle esigenze contemporanee di sicurezza, efficienza e integrazione ambientale, ma rappresenta anche una soluzione tecnologicamente avanzata, che unisce criteri ingegneristici consolidati- con innovazioni derivate dalla ricerca aerodinamica e strutturale più recente- e interessi funzionali con le opere di sviluppo che circondano il progetto per il Ponte sullo Stretto di Messina.



Sezione dettaglio impalcato
1:250



Dettaglio impalcato ala sinistra - ala destra
1:250



Dettaglio impalcato ala centrale
1:100

Le Fondazioni

Oltre alle pile, un altro elemento cardine di distacco dal progetto definitivo, riguarda le fondazioni: come già accennato precedentemente, la loro profondità varia a causa della diversa profondità del fondale marino, leggermente più profondo in corrispondenza della costa calabrese.

In tale scenario le tecnologie convenzionali – fondazioni su pali – risulterebbero impraticabili a causa dell'eccessiva snellezza strutturale richiesta da progetto. La soluzione che si sceglie quindi di utilizzare ricade sull'adozione di fondazioni a cassone a gravità – *Gravity Caissons*. Come documentato da Ben C. Gerwick Jr. nel suo libro, *Construction of Marine and Offshore Structure*, con particolare attenzione nel capitolo 3, la stabilità finale non deriva dall'infissione nel substrato ma dalla mobilitazione della massa inerziale del manufatto stesso il quale, in grado di opporsi alle forze idrodinamiche e sismiche attraverso il peso proprio.

Elemento distintivo e innovativo della presente proposta progettuale non risiede solamente nell'avvicinamento delle pile e quindi della presenza in mare delle fondazioni, ma si cerca di puntare lo sguardo al futuro tecnologico.

Data l'aggressività chimica dell'ambiente marino – da Eurocodice classe XS3 – e la grandezza delle fondazioni, si è optato per un mix-

design ad alta durabilità basato sulle ceneri vulcani naturali – *come spiegato accuratamente nel sottocapitolo successivo*. La realizzazione di questi colossi ingegneristici segue un rigoroso protocollo di prefabbricazione *off-site*: l'irregolarità morfologica e la presenza di sedimenti impongono un intervento tramite l'ausilio di draghe e regolarizzazione eseguito da robot sottomarini.

Prendendo spunto dal progetto del 2011, fondamentale in seguito a questa fase, è la stesura del *bedding layer*, ovvero la presenza di un cuscino granulare che ha il compito di distribuire uniformemente i carichi verticali al cassone evitando sforzi che potrebbero fratturare le pile.

L'operazione viene portata a termine con l'affondamento controllato del cassone attraverso l'immissione graduale di acqua nelle celle interne: raggiunto il contatto definitivo con il *bedding layer* si procede allo zavorramento, immettendo all'interno delle cavità sabbie dense e calcestruzzo magro. (Gerwick, 2007, p. 176-235)

Illuminazione

Un ulteriore elemento cardine emerso dalla fase di analisi preliminare riguarda la progettazione dell'illuminazione artificiale.

Al fine di contenere l'inquinamento luminoso – potenzialmente responsabile del disorientamento della fauna locale e dell'alterazione

dei flussi migratori — si è optato per l'impiego di apparecchi illuminanti a fascio stretto e accuratamente orientato, basati su tecnologia LED. Tali dispositivi sono integrati in un sistema di smart lighting ad alta efficienza, in grado di modulare automaticamente l'intensità luminosa nelle ore notturne, con riduzioni progressive a partire dalla mezzanotte. Il sistema, supportato da sensori di monitoraggio del traffico, consente inoltre l'abbassamento dei livelli di illuminazione in condizioni di scarso utilizzo dell'infrastruttura, fino allo spegnimento parziale nelle fasce orarie caratterizzate da bassi volumi di transito.

Pur nella necessità di limitare l'impatto luminoso sull'ambiente circostante, non risulta tuttavia possibile prescindere completamente dalla dimensione scenica dell'illuminazione, che contribuisce in modo significativo alla percezione simbolica e identitaria dell'opera. In quest'ottica, il progetto prevede l'inserimento selettivo di sistemi LED a emissione controllata e cromaticamente modulabile in punti strategici dell'infrastruttura — quali torri e cavi principali — al fine di costruire una scena luminosa capace di valorizzare l'opera senza compromettere l'equilibrio ambientale complessivo.

3.2 L'Utilizzo di Materiali Cementizi Innovativi

3.2.1 *Proprietà e caratteristiche dei materiali vulcanici*

In base ai dati forniti dai documenti ufficiali redatti dalla società Stretto di Messina- e come già affermato nel capitolo 2.2.1- nei documenti tecnici e nelle specifiche di progetto è previsto l'utilizzo di calcestruzzi con caratteristiche differenziate in base alla parte dell'opera da realizzare. La costruzione di un ponte moderno richiede però l'impiego di materiali che non solo garantiscano eccellenti prestazioni meccaniche e durabilità a lungo termine, ma che rispondano anche alle crescenti esigenze di sostenibilità ambientale.

L'impiego di materiali cementizi supplementari (SCMs) rappresenta oggi uno dei pilastri fondamentali per ridurre l'impatto ambientale delle infrastrutture complesse. L'esperienza storica del calcestruzzo romano dimostra come l'integrazione dei materiali pozzolanici possa migliorare la durabilità delle strutture, incrementando la resistenza alla corrosione marina e la stabilità nel lungo periodo. Nei recenti studi divulgativi viene evidenziato come le ceneri vulcaniche ricche di silice reattiva, abbiano contribuito alla formazione di leganti stabili nel tempo grazie ai processi di idratazione secondaria e alla presenza di strati di tobermorite che ne aumentano la coesione interna.

Oggi tali principi sono confermati dai recenti studi sperimentali condotti sull'Etna, i quali dimostrano che le ceneri vulcaniche possono essere efficacemente impiegate come materiali cementizi supplementari all'interno di cementi pozzolanici, sostituendo completamente o parzialmente materiali naturali come la pozzolana cava. L'articolo "*Etna volcanic ash as new sustainable supplementary cementitious material*" sottolinea come il materiale piroclastico presenta un comportamento pozzolanico conforme alla norma EN 196-5, che mostra un'attività reattiva sufficiente a produrre cementi *blended* con prestazioni meccaniche comparabili ai cementi tradizionali e con un minore contenuto di *clinker* (Calderoni, et al., 2024).

Analoghe conclusioni emergono dal lavoro dedicato allo studio del riutilizzo dei piroclasti etnei, dove la cenere – come spiegato nel capitolo "Un nuovo cemento contenente la cenere vulcanica dell'Etna" della tesi di dottorato di Daniele Calderoni dell'Università di Catania- viene qualificata come sottoprodotto dal punto di vista normativo italiano, ma valorizzata come materia in grado di sostituire pozzolane naturali e parte del clinker. Le prove effettuate in laboratorio confermano che il materiale vulcanico soddisfa i requisiti chimico-fisici e meccanici previsti dagli standard europei e internazionali, i quali mostrano una reattività pozzolanica adeguata e una significativa riduzione delle emissioni associate alla produzione del cemento finale (Calderoni D. , 2024).

Sorge pertanto la necessità di chiarire le motivazioni per cui tali materiali non trovino ancora ampia applicazione anche se le loro prestazioni risultano ottime nel campo della scienza e della tecnica delle costruzioni. Spesso c'è un divario tra ciò che è la ricerca scientifica e ciò che viene effettivamente implementato in grandi opere pubbliche: le motivazioni alla base sono principalmente legate a prudenza normativa, logistica e storico dei materiali.

Il principio di "*Proven Track Record*" è uno dei motivi principali in quanto il Ponte sullo Stretto è progettato per una vita utile di 200 anni e gli studi sulle ceneri vulcaniche attivate come nano-additivi²⁰ riguardano tecnologie relativamente recenti, studiate approfonditamente negli ultimi 15-20 anni. Gli ingegneri italiani hanno quindi preferito usare materiali con uno storico decennale consolidato come le loppe d'alto forno di cui si conosce il comportamento a lungo termine. Inoltre, le opere pubbliche devono sottostare rigorosamente alle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018) italiane e gli Eurocodici.

In sintesi, non vengono utilizzati questi nuovi materiali perché nel mondo delle grandi infrastrutture, l'affidabilità storica batte l'innovazione pura. Tuttavia, prendendo in considerazione l'Akashi Bridge, già citato più volte, realizzato alla fine degli anni '90, possiamo osservare una scelta di materiali che anticipa un approccio fortemente

²⁰ Le ceneri vulcaniche non sono nano-additivi in senso stretto: contengono frazioni fini ma non rientrano pienamente nella categoria delle nanotecnologie.

proiettato al futuro. Poiché la presente tesi adotta una visione orientata all'innovazione, l'opera analizzata dimostra come tali materiali, già sperimentati con esiti positivi, siano in grado di garantire prestazioni strutturali affidabili e di confermare la loro piena efficacia anche in una prospettiva futura.

Altra domanda da porsi riguarda il consumo di acciaio. Secondo i dati più recenti forniti da Federacciai, la produzione annua di acciaio in Italia si attesta intorno ai 15,5 milioni di tonnellate, pari a circa il 2,5% della produzione annua nazionale complessiva, pur tenendo conto che solo una parte di essa è destinata al settore delle costruzioni. In base a quanto approssimato nei calcoli, la quantità necessaria e utilizzata per la costruzione del ponte si aggirerebbe intorno alle 500 mila tonnellate, comprendendo anche opere d'accesso e armature nel calcestruzzo, con una percentuale del 2,5% sulla produzione annua.

Gli aggiornamenti progettuali 2024–2025 hanno sostanzialmente confermato le scelte strutturali e gli ordini di grandezza dei materiali già definiti nel progetto del 2011:

- **Cavi principali:** quattro funi portanti, dal diametro ciascuna di 1,2 m, con un totale complessivo di circa 170.000 tonnellate.
- **Torri metalliche:** due torri in carpenteria alte 399 m, 55.000 tonnellate ciascuna.

- **Impalcato “Messina Type Deck”:** peso complessivo stimato tra 55 kt (dato sintetico) e 76–77 kt, qualora si assuma il peso lineare di circa 23 t/m indicato nella documentazione tecnica.
- **Pendini:** funi verticali di sospensione ogni 30 m lungo la campata, con un peso di 1 500/3 000 tonnellate.
- **Ferramenta e accessori:** circa 2.000/5.000 tonnellate. (Lorenzini, 2025)

3.2.2 Vantaggi strutturali: resistenza e durabilità

La presenza della cenere vulcanica, per quanto riguarda la resistenza meccanica, favorisce la formazione di composti C-S-H²¹ grazie alla reazione pozzolanica con l'idrossido di calcio. Le ricerche mostrano come benché nei primi 50 giorni le resistenze iniziali possono essere inferiori, ma superati i 56-90 giorni, le prestazioni possono superare quelle dei cementi Portland ordinari, grazie a una microstruttura più densa (Siddif, 2011).

La resistenza a trazione risulta migliorata dall'impiego della cenere vulcanica: la finezza e la capacità del materiale di densificare la matrice cementizia, incrementano l'adesione tra pasta e aggreganti. Ciò contribuisce a una migliore resistenza a trazione indiretta e a una riduzione delle microfessurazioni: tale miglioramento è legato non solo alla reazione pozzolanica ma soprattutto alla reattività della cenere vulcanica in quanto riduce il rapporto acqua/legante aumentando la lavorabilità e la coesione (Ekaputri, Triwulan, Aji, & Baihaqi, 6 dicembre 2011).

Un ulteriore aspetto rilevante riguarda le caratteristiche elastiche e deformative del materiale. I calcestruzzi contenenti una percentuale di

²¹ I composti C-S-H indicano i calcio-silicato-idrati (Calcium-Silicate-Hydrate) ovvero i principali prodotti di idratazione del cemento. Questo composito fornisce resistenza meccanica, contribuisce alla coesione tra i granuli e riduce la porosità.

cenere vulcanica presentano, nelle fasi iniziali, un modulo elastico mediamente inferiore rispetto ai calcestruzzi tradizionali; tale comportamento non costituisce tuttavia un elemento critico. Con il progredire della maturazione, infatti, la frazione di clinker inizialmente meno reattiva sviluppa prestazioni meccaniche superiori grazie alla densificazione della microstruttura indotta dalla reazione pozzolanica. Inoltre, la riduzione del calore di idratazione contribuisce a limitare i fenomeni di "creep"²² e le deformazioni da ritiro, con benefici complessivi sul comportamento a lungo termine del materiale (Siddif, 2011).

L'impiego della cenere vulcanica permette una considerevole riduzione del calore di idratazione, come già detto precedentemente, limitando il rischio di fessurazioni: per quanto riguarda le proprietà termiche questo rappresenta uno degli aspetti di maggiore interesse. Inoltre, la riduzione di idrossido di calcio e la presenza di fasi stabili, garantiscono una migliore integrità strutturale dopo l'esposizione al fuoco.

Infine, la reazione pozzolanica, riducendo la quantità di portlandite e la porosità capillare, limita la penetrazione dei cloruri responsabili dei fenomeni di corrosione delle armature. La maggiore resistenza all'attacco dei solfati contribuisce inoltre a incrementare la durabilità e la longevità delle strutture esposte ad ambienti marini. Alla luce di tali caratteristiche, questo materiale cementizio supplementare (SCM) può

²² Fenomeno delle deformazioni viscosi

essere associato, secondo la normativa europea, alle classi di esposizione marina **XS1–XS3**, in virtù della maggiore resistenza all'ingresso dei cloruri e ai conseguenti meccanismi di degrado. Prendendo in considerazione l'analisi fatta al capitolo 2.1.1 in cui si sono analizzate le caratteristiche del cemento impiegato per ogni componente, occorre fare la medesima analisi, provvisoria, con le nuove formulazioni.

Come già affermato in precedenza queste nuove miscele cementizie offrono una serie di benefici che si traducono in vantaggi per le sottofondazioni e fondazioni superficiali, pali di fondazione, fondazioni profonde e impermeabilizzate, elevazioni ed elementi fuori terra, soletta di impalcato e cordoli, travi precomprese e prefabbricate.

- **sottofondazioni e fondazioni superficiali:** i problemi principali sono il controllo del calore di idratazione. Questo problema viene risolto dai cementi a base di VA (*Volcanic Ash*) che riduce significativamente il calore di idratazione diminuendo lo sviluppo termico interno; inoltre, la ridotta permeabilità aumenta la resistenza alla penetrazione dei fluidi aggressivi e la protezione delle armature nelle strutture in terreno salino (Calderoni, et al., 2024).
- **pali di fondazione:** le esigenze chiave sono resistenza a compressione e controllo della fessurazione da ritiro. Il VA come SCM in un cemento, implementa lo sviluppo di resistenza a lungo

termine superiore ai calcestruzzi ordinari e una minore diffusività di cloruri, ciò implica maggiore vita utile per pali esposti in condizioni aggressive (Siddif, 2011).

- **fondazioni profonde e impermeabilizzate:** è essenziale utilizzare miscele con bassa tendenza al dilavamento ed elevata coesione. Le miscele con VA, opportunamente dilavate, permettono di ottenere paste coese e compatte che conservano proprietà meccaniche anche in ambienti sommersi.
- **elevazioni ed elementi fuori terra:** si richiede una resistenza a compressione e scarsa suscettibilità a ritiro e *creep*. Il VA, nei primi giorni, comporta un rallentamento dello sviluppo della resistenza, ma a lungo termine fornisce una migliore stabilità volumetrica che migliora la capacità portante nel tempo (Siddif, 2011).
- **soletta di impalcato e cordoli:** anche qui la maggiore criticità è la penetrazione di cloruri e il ciclico degrado della superficie. Con l'inserimento della cenere vulcanica si ha quindi la riduzione della diffusività dei cloruri, il che rende questi calcestruzzi adatti a situazioni di elevata salinità (Calderoni, et al., 2024)

3.2.3 Aspetti di sostenibilità e innovazione

L'integrazione della VA come legante permette la formazione di C-S-H che consolidano la microstruttura del CLS e ne incrementano le performance nel lungo periodo, come spiegato nello studio di Rafat Saddif *"Effect of volcanic ash on the properties of cement paste and mortar"*. Viene inoltre evidenziato come la presenza delle particelle fini di cenere vulcanica contribuisca al miglioramento del comportamento a trazione del materiale; la maggiore coesione della matrice cementizia riduce infatti l'insorgenza di microfessurazioni e determina un incremento della resistenza a trazione indiretta. Parallelamente, le proprietà elastiche mostrano una progressiva evoluzione: il modulo elastico aumenta a maturazione del materiale e tale comportamento contribuisce alla riduzione di fenomeni viscosi e delle deformazioni da ritiro che migliorano la stabilità volumetrica. Inoltre, come è possibile leggere nella tesi di dottorato di Daniele Calderoni - già citata precedentemente - sussiste anche il fattore della circolarità: dal punto di vista della sostenibilità ambientale, l'utilizzo della cenere vulcanica permette di ridurre la produzione di CO₂ di circa il 20-40%. Un ulteriore fattore cardine è rappresentato dalla disponibilità locale del materiale, che non richiede processi di produzione energivori; l'unico consumo energetico significativo è infatti associato alla semplice fase di macinazione, necessaria per il raggiungimento della

finezza desiderata. Inoltre, come riportato nell'articolo di Daniele Calderoni pubblicato sul Journal of Building Engineering - già citato in precedenza - emerge anche il tema della circolarità delle polveri vulcaniche, che consente la valorizzazione di materiali naturali inutilizzati presenti nei territori vulcanici. Tale approccio permette di ridurre i volumi destinati a deposito e, al contempo, di sviluppare leganti a basso impatto ambientale.

3.2.4 Scelta dei materiali impiegati per gli elementi strutturali

La scelta dei materiali da costruzione, come già illustrato nei sottocapitoli precedenti, è stata guidata non solo dal contesto progettuale — caratterizzato da un ambiente costiero ad elevata aggressività corrosiva — ma anche dalle prestazioni strutturali richieste in termini di resistenza alle azioni del vento e agli eventi sismici.

Per la realizzazione degli elementi tesi del ponte — funi portanti, pendini e stralli — la scelta è ricaduta sull'acciaio armonico ad altissima resistenza in trefoli stabilizzati²³, classe **Y1860S7**. Tale selezione è dettata dalla necessità di massimizzare il rapporto resistenza/peso, fattore critico per un'opera di grande luce. Grazie a una tensione caratteristica di rottura f_{yk} pari a **1860 MPa**, questa tipologia di acciaio offre prestazioni meccaniche molto superiori ai comuni acciai strutturali, consentendo una drastica riduzione delle sezioni e quindi del peso proprio del sistema di sospensione. La tipologia di acciaio a basso rilassamento garantisce il mantenimento dello stato tensionale nel lungo periodo, minimizzando le perdite di tiro dovute a fenomeni viscosi, assicurando un'elevata resistenza a fatica nei confronti dei carichi ciclici indotti dal traffico e dall'azione del vento.

²³ La dicitura “stabilizzato” indica che il materiale ha subito un processo termomeccanico di stiramento a caldo subito dopo la trafilatura che consente di ridurre drasticamente le deformazioni plastiche nel tempo.

Per l'impalcato, la scelta ricade sull'acciaio inossidabile duplex **LDX 2404**, in quanto l'elevato contenuto di cromo (circa 24%) conferisce al materiale un'ottima resistenza alla corrosione localizzata (pitting) e ai fenomeni corrosivi in ambiente marino. Inoltre, l'elevata resistenza meccanica, con un valore di resistenza ultima pari a circa **550 MPa**, consente di ridurre il peso complessivo sospeso dell'impalcato.

Infine, per i piloni e le strutture massicce si può ipotizzare l'impiego dell'acciaio duplex **LDX 2101**, caratterizzato da un ridotto contenuto di nichel e molibdeno, compensato dall'aggiunta di manganese e azoto. Tale composizione chimica lo rende un'alternativa economicamente vantaggiosa e tecnicamente competitiva rispetto agli acciai inossidabili tradizionali. Il principale punto di forza di questo materiale risiede nell'elevata resistenza meccanica — circa doppia rispetto agli acciai inossidabili austenitici convenzionali — mantenendo al contempo un adeguato livello di duttilità.

MATERIALI	PESO UNITÀ DI VOLUME [kN/m³]
Calcestruzzi cementizi e malte	
Calcestruzzo ordinario	24,0
Calcestruzzo armato (e/o precompresso)	25,0
Calcestruzzi "leggeri": da determinarsi caso per caso	14,0 ÷ 20,0
Calcestruzzi "pesanti": da determinarsi caso per caso	28,0 ÷ 50,0
Malta di calce	18,0
Malta di cemento	21,0
Calce in polvere	10,0
Cemento in polvere	14,0
Sabbia	17,0
Metalli e leghe	
Acciaio	78,5
Ghisa	72,5
Alluminio	27,0
Materiale lapideo	
Tufo vulcanico	17,0
Calcere compatto	26,0
Calcere tenero	22,0
Gesso	13,0
Granito	27,0
Laterizio (pieno)	18,0
Legnami	
Conifere e pioppo	4,0 ÷ 6,0
Latifoglie (escluso pioppo)	6,0 ÷ 8,0
Sostanze varie	
Acqua dolce (chiara)	9,81
Acqua di mare (chiara)	10,1
Carta	10,0
Vetro	25,0

Figura 13: Tab 3.1.I, Pesì dell'unità di volume dei principali materiali

3.3 Modellazione Strutturale e Output della proposta

3.3.1 Presenza della ferrovia: un'analisi di questo nuovo scenario progettuale

La presenza della ferrovia costituisce un elemento centrale nel concetto di ponte ibrido proposto in questa tesi.

La soluzione progettuale prevede una campata centrale di 2.000 m in configurazione sospesa, affiancata da due campate laterali di 650 m ciascuna in configurazione strallata. Tale schema strutturale consente di integrare, in maniera strutturalmente coerente, sia il traffico veicolare sia il traffico ferroviario, ampliando le funzionalità dell'opera rispetto a soluzioni esclusivamente stradali.

Come già discusso nel Capitolo 2, paragrafo 2.2.3, la ferrovia non deve essere interpretata unicamente come un carico aggiuntivo, bensì come un vero e proprio *driver* strutturale e funzionale del progetto. L'inserimento del traffico ferroviario ad Alta Velocità all'interno di una configurazione ibrida sospeso-strallata non risponde a una mera ambizione dimensionale, ma rappresenta una scelta progettuale mirata a garantire la fattibilità strutturale di un ponte a grande luce, in particolare sotto il profilo della risposta dinamica e aerodinamica.

In ponti ferroviari di grandissima campata, infatti, i requisiti imposti dall'esercizio ferroviario in termini di rigidezza, controllo delle deformazioni e limitazione delle vibrazioni risultano particolarmente stringenti. Studi recenti dimostrano che strutture ferroviarie a campata molto lunga sono tecnicamente realizzabili, a condizione che l'interazione tra ponte e binario venga attentamente modellata e controllata. In particolare, lo studio *"Track-bridge deformation relation and interaction of long-span railway suspension bridges"* evidenzia come la progettazione debba tenere conto congiuntamente di deformazioni, rigidezza globale e comportamento dinamico del sistema treno-ponte (Jia H. , Chen, Guo, & Zheng, 2024).

La validità di configurazioni strutturali di questo tipo è confermata anche dallo studio *"Feasibility Study for Large Span Railway Suspension Bridge in China"* (Tang, Gong , & Liu, 2018) pubblicato nel 2018 su ResaerchGate da He quiang Tang, Gong yi Xu e Han shun Liu, nel quale una campata centrale di ordine chilometrico viene considerata coerente con i criteri di progettazione dei ponti ferroviari di nuova generazione. In tale contesto, l'adozione di campate laterali strallate consente di incrementare la rigidezza complessiva del sistema, migliorando la distribuzione delle sollecitazioni e il comportamento in esercizio sia per il traffico ferroviario sia per quello stradale.

Le più recenti ricerche mostrano come la combinazione di sistemi sospesi e strallati permetta un migliore controllo delle deformazioni e

una riduzione delle amplificazioni dinamiche indotte dal passaggio dei convogli. L'elevata rigidezza dell'impalcato, in particolare nei ponti ferroviari a lunghissima campata, risulta essenziale per limitare la deformazione del binario e contenere l'interazione dinamica treno-ponte, garantendo condizioni di sicurezza e comfort compatibili con l'esercizio dell'Alta Velocità (Jia H. , Chen, Guo, & Zheng, 2024).

Ulteriori conferme emergono da uno studio pubblicato sul *Journal of Railway Science and Technology*, reperito tramite la piattaforma Science Direct, nel quale viene analizzata la sicurezza operativa di un ponte ibrido ferro-stradale con campata principale di 1.488 m. Attraverso un modello agli elementi finiti (FEM), gli autori valutano il comportamento dinamico del sistema durante il transito dei treni ad Alta Velocità, dimostrando la stabilità strutturale e l'adeguatezza della configurazione proposta sotto carico mobile.

3.3.2 Scelta del software di calcolo e dei modelli di analisi

La scelta del software di calcolo strutturale e dei modelli di analisi rappresenta una fase fondamentale nel processo progettuale, in quanto influisce in modo diretto sull'affidabilità dei risultati e sulla corretta interpretazione del comportamento dell'opera. Considerata la complessità strutturale del ponte in esame, caratterizzato da luci elevate, sistemi di sospensione e strallatura e da una marcata interazione tra impalcato, cavi e pile, si è reso necessario l'impiego di un software in grado di gestire modelli tridimensionali avanzati e analisi di tipo lineare e non lineare.

A tal fine è stato scelto il software Midas Civil NX, ampiamente utilizzato nella progettazione e verifica di grandi opere infrastrutturali, in particolare ponti sospesi e strallati. Tale ambiente di calcolo consente la modellazione mediante elementi finiti di diversa tipologia, quali elementi *beam* per le strutture principali, elementi *cable* per i sistemi di sospensione e strallatura ed elementi *shell* per la rappresentazione dell'impalcato, permettendo una descrizione accurata del comportamento globale e locale della struttura.

Il modello di analisi adottato è di tipo tridimensionale, con comportamento elastico lineare dei materiali nella fase preliminare di studio, al fine di valutare la distribuzione delle sollecitazioni, gli

spostamenti e la risposta globale dell'opera sotto le principali combinazioni di carico. Tale approccio risulta adeguato a una prima fase di verifica e di calibrazione del modello, consentendo l'individuazione di eventuali criticità strutturali e l'ottimizzazione delle scelte progettuali.

La combinazione tra il software di calcolo scelto e il modello di analisi adottato ha permesso di ottenere una rappresentazione affidabile del comportamento strutturale del ponte, mantenendo al contempo un buon equilibrio tra livello di dettaglio, complessità computazionale e chiarezza interpretativa dei risultati

3.3.3 Modellazione del ponte

La modellazione del ponte è stata inizialmente sviluppata mediante il software AutoCAD. Dopo una fase di studio preliminare e di dimensionamento della struttura, si è proceduto alla definizione geometrica dell'opera e alla realizzazione dei principali elementi strutturali, quali le pile, i sistemi di sospensione e strallatura e l'impalcato, quest'ultimo costituito da tre elementi distinti.

Come già anticipato nei capitoli precedenti, l'altezza delle pile era stata assunta pari a 241 m sul livello del mare, senza aggiungere il franco navigabile, posto a 80 m.s.l.m.: dopo successive verifiche, si è portata l'altezza totale a 350 m, per garantire stabilità e sicurezza. Le torri risultano collegate tra loro mediante un sistema di tiranti interni, mentre i pendini sono disposti con interasse costante pari a 30,30 m, al fine di garantire una distribuzione uniforme dei carichi lungo l'impalcato.

Successivamente si è proceduto alla modellazione dell'impalcato principale, che rappresenta l'elemento strutturalmente più rilevante dell'opera. L'impalcato è composto da tre elementi distinti modellati separatamente: i due cassoni laterali per la circolazione stradale e il cassone centrale per la ferrovia. Nel modello FEM, i cassoni sono stati realizzati mediante elementi di piastra ortotropa equivalente²⁴. Tale

²⁴ Schematizzazione bidimensionale di un elemento strutturale complesso, ottenuto mediante l'attribuzione di rigidezze ortotrope calibrate al fine di riprodurre il comportamento globale

scelta consente di descrivere in modo appropriato il comportamento globale dei cassoni, tenendo conto delle diverse rigidezze strutturali nelle tre direzioni principali, mantenendo comunque un livello di complessità computazionale compatibile con l'analisi dell'intero sistema strutturale del ponte.

Per quanto riguarda le quattro funi principali, si è stato assunto un diametro di $\varnothing = 2 \text{ m}$; per i pendini si è mantenuta la stessa sezione, avente diametro pari a $\varnothing = 20 \text{ cm}$.

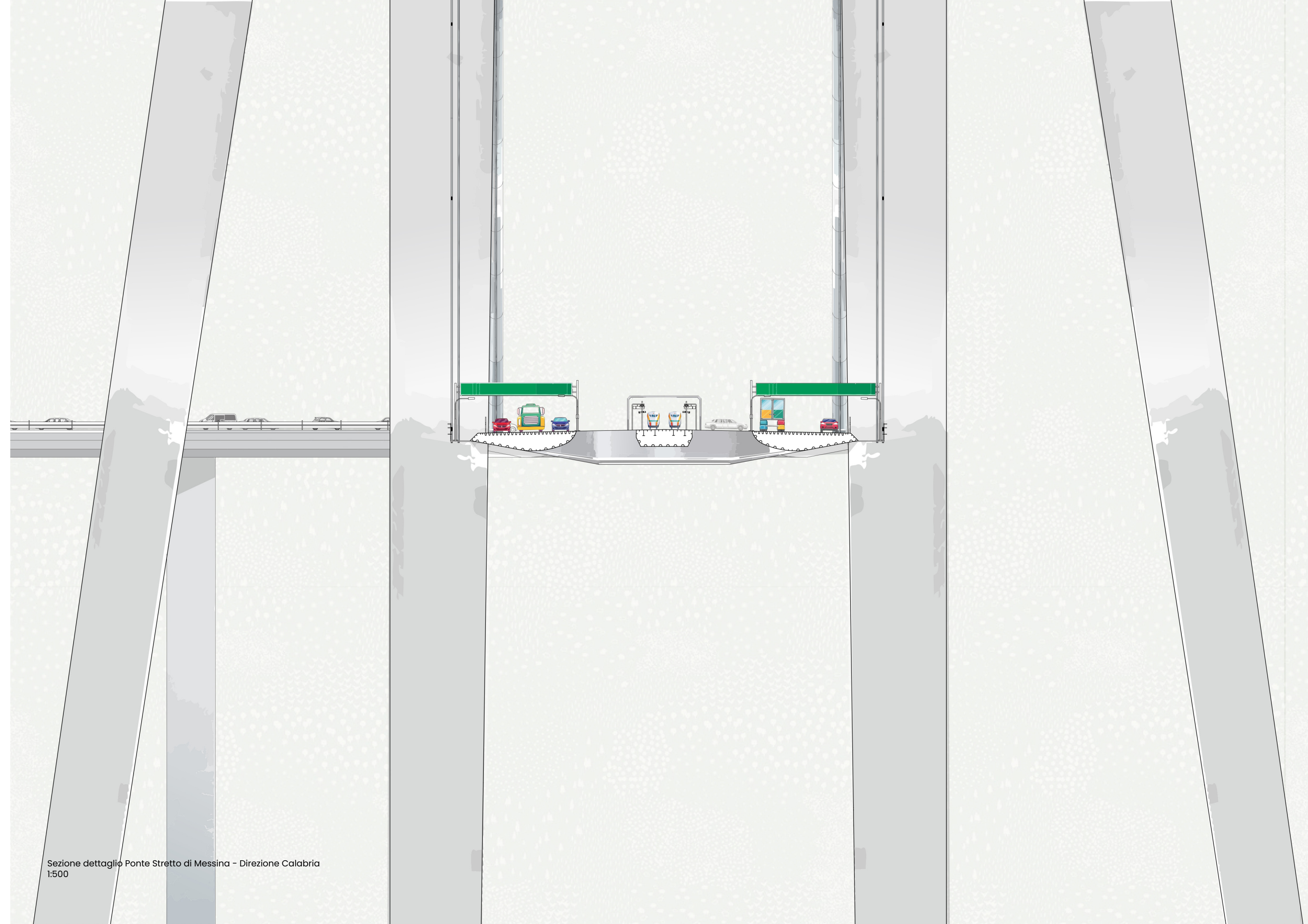
Il cassone è stato modellato considerando le sezioni strutturali pubblicate sul sito "Società Stretto di Messina" variando solamente la larghezza degli impalcati laterali: 11,25 m per i cassoni laterali, 7,5 m per quello centrale, per una larghezza finale, considerando anche il giunto trasversale di 52 m, con un'altezza totale pari a 4,85 m.

Una volta completata la modellazione geometrica di tutti i componenti, il modello è stato importato all'interno del software di calcolo strutturale Midas Civil NX, dove è stato sviluppato il modello tridimensionale per l'analisi strutturale. In questa fase sono state introdotte le proprietà meccaniche dei materiali, già elencate in precedenza, le caratteristiche delle sezioni e le condizioni di vincolo, procedendo quindi all'applicazione delle azioni di progetto.

In particolare, sono stati considerati i carichi permanenti di tipo G_1 e G_2 , le azioni da neve e da vento, i carichi verticali di esercizio, nonché le

azioni longitudinali dovute a frenamento e accelerazione e l'azione centrifuga, in conformità alle normative vigenti.

Infine, si è proceduto all'avvio delle analisi strutturali preliminari, finalizzate alla verifica della corretta impostazione del modello e all'individuazione di eventuali errori prima delle successive fasi di approfondimento e verifica.



Sezione dettaglio Ponte Stretto di Messina - Direzione Calabria
1:500

3.3.4 Carichi permanenti

3.3.4.1 *Peso Proprio (G_i)*

Il carico permanente strutturale G_i rappresenta il peso proprio di tutti gli elementi portanti della struttura, come in questo caso impalcato, pendini sospesi, funi strallate e pile. Per determinare G_i si è fatto affidamento al software Midas, che consente il carico automatico del peso proprio a partire dalle caratteristiche geometriche e meccaniche della struttura: il software inoltre ha consentito di verificare la distribuzione delle masse lungo l'impalcato e il contributo dei diversi sottosistemi al comportamento dinamico complessivo.

La regola di base per definire il G_i è data dalla relazione:

$$G_i = \sum \gamma_i * V_i \text{ [kN]}$$

In cui

- γ è il peso specifico per unità di volume del materiale [kN/m³]
- V è il volume dell'elemento strutturale

Nel caso di elementi monodimensionali, quali le travi, il volume si ottiene come

$$V = A * L$$

In cui

- A è l'area della sezione trasversale
- L la lunghezza dell'elemento

Il peso proprio quindi è determinato nel seguente modo:

$$G_i = \gamma * A \text{ [kN/m]}$$

$$G_{\text{tot}} = 13,80 * 10^6 \text{ kN}$$

3.3.4.2 Carico Permanente non Strutturale (G_2)

Il carico permanente non strutturale G_2 comprende tutti quei carichi che gravano in modo permanente sulla struttura del ponte ma che non svolgono funzione portante primaria: rientrano gli strati di finitura e gli elementi accessori come pavimentazioni, ringhiere e impianti di illuminazione che contribuiscono al carico verticale senza influenzare in maniera significativa la rigidità globale della struttura.

Soletta in asfalto

L'impalcato prevede la presenza di due solette in asfalto ciascuna destinata a una piattaforma di transito: ogni soletta ha uno spessore h di 0.15 m per una larghezza di 11,25, con 3 corsie ciascuna di 3,5 m. Assumendo la lunghezza complessiva del ponte pari a 3.300 m, il carico totale dovuto dalla soletta è pari a:

$$G_{2, \text{asfalto}} = 135 * 3.300 = 44,55 * 10^4 \text{ kN}$$

Ringhiere

Sono state considerate nei calcoli, senza però essere rappresentate, anche due ringhiere longitudinali, una per ciascun lato del ponte estese per l'intera luce: si è ipotizzato l'utilizzo di una ringhiera metallica, per tutta la lunghezza complessiva del ponte pari a 3.300 m. Il carico totale dovuto dalla soletta è pari a:

$$G_{2, \text{ringhiere}} = 4 * 0,7 * 3.300 = 9.240 \text{ kN}$$

Impianto di illuminazione

Come peso non strutturale viene inserito anche il carico puntuale dell'illuminazione artificiale posto su tutta la lunghezza a un intervallo di 12 metri, portando ad avere in tutta la struttura 4 disposizioni di lampioni.

$$G_{2, \text{lampioni}} = 1.100 * 0,80 = 880 \text{ kN}$$

Considerando tutte le forze non strutturali, il totale della forza G_2 è pari a:

$$G_{2, \text{TOT}} = G_{2, \text{asfalto}} + G_{2, \text{ringhiere}} + G_{2, \text{lampioni}} = 44,55 * 10^4 \text{ kN}$$

3.3.5 Carichi variabili

3.3.5.1 Carichi verticali: $Q_{1,V}$

Per la determinazione delle azioni variabili sulla struttura si è fatto riferimento alle prescrizioni della NTC2018. In conformità con il paragrafo 5.1.3.3, sono stati definiti i modelli di carico verticali ($Q_{1,V}$) per le piattaforme stradali e ferroviarie. La tabella seguente riepiloga i parametri geometrici adottati per la suddivisione delle carreggiate in corsie convenzionali e i relativi valori di carico lineare equivalente e distribuito utilizzati per le successive analisi di carico.

$$Q_{1,V, \text{strada}} = q_{1,V, \text{strada}} * 3.300 = 94,5 * 3.300 = 31,19 * 10^4 \text{ kN}$$

$$Q_{1,V, \text{ferrovia}} = q_{1,V, \text{ferrovia}} * 3.300 = 80 * 3.300 = 26,4 * 10^4 \text{ kN}$$

Il carico totale è quindi dato da:

$$Q_{1,V, \text{TOT}} = (Q_{1,V, \text{strada}} * 2) + Q_{1,V, \text{ferrovia}} = 88,77 * 10^4 \text{ kN}$$

3.3.5.2 Azione longitudinale di frenamento o di accelerazione: Q_2

L'azione longitudinale di frenamento è stata valutata conformemente al paragrafo 5.1.3.5 del D.M. 17/01/2018. La forza di frenamento o di accelerazione è funzione del carico verticale totale agente sulla corsia convenzionale n.1, e risulta quindi pari a:

$$180 \text{ kN} \leq q_3 = 0,6 \cdot (2Q_{1k}) + 0,10 \cdot q_{1k} \cdot w_1 \cdot L \leq 900 \text{ kN}$$

L'azione longitudinale di frenamento o accelerazione si calcola come forza iniziale dovuta all'accelerazione dei veicoli ripartita lungo il ponte dove:

$$F_{\text{TOT}} = Q_{1,V, \text{TOT}} * (a_i / g)$$

Occorre fare una distinzione primaria tra accelerazione dovuta al traffico stradale e accelerazione dovuta al traffico ferroviario:

$$F_{\text{strada}} = (Q_{1,V, \text{strada}} * 2) * (a_s / g) = 62,37 * 10^4 * (0,5 / 9,81) = 31,78 * 10^3 \text{ kN}$$

$$F_{\text{ferrovia}} = Q_{1,V, \text{ferrovia}} * (a_f / g) = 26,4 * 10^4 * (0,5 / 9,81) = 26,91 * 10^3 \text{ kN}$$

$$Q_2 = F_{\text{TOT}} = F_{\text{strada}} + F_{\text{ferrovia}} = 3,18 * 10^4 + 2,69 * 10^4 = 58,70 * 10^3 \text{ kN}$$

3.3.5.3 Azione centrifuga: Q_3

L'azione centrifuga è un'azione orizzontale trasversale che si manifesta quando i veicoli percorrono un tratto in curva del ponte: è dovuta alla forza inerziale e va considerata secondo le NTC2018, sia per traffico stradale che per quello ferroviario.

L'azione centrifuga viene valutata come:

$$F_c = Q * (v^2 / g * R)$$

Poiché il tracciato del ponte è rettilineo, non si sviluppa alcuna forza centrifuga, quindi F_c è nulla.

3.3.6 Carichi eccezionali: azione del vento, del sisma e della neve

Per la progettazione di qualsiasi struttura, in base alla normativa tecnica vigente, occorre individuare e definire la vita nominale di progetto V_N dell'opera in quanto essa rappresenta il numero di anni nel quale è previsto che l'opera, purché soggetta alla necessaria manutenzione, mantenga specifici livelli prestazionali. I valori minimi di V_N da adottare per i diversi tipi di costruzione sono riportati nella Tab. 2.4.I. della **NTC2018**. Tali valori possono essere anche impiegati per definire le azioni dipendenti dal tempo. Secondo la tabella l'opera può essere inserita nella categoria 3 con un valore nominale pari a 100 anni.

3.3.6.1 Vento

Il vento, la cui direzione si considera generalmente orizzontale, esercita sulle costruzioni azioni che variano nel tempo e nello spazio provocando, in generale, effetti dinamici. Per le costruzioni usuali tali azioni sono convenzionalmente ricondotte alle azioni statiche equivalenti definite al § 3.3.3. della NTC 2018. Per le costruzioni di forma o tipologia inusuale, oppure di grande altezza o lunghezza, o di rilevante snellezza e leggerezza, o di notevole flessibilità e ridotte capacità

dissipative, il vento può dare luogo ad effetti la cui valutazione richiede l'uso di metodologie di calcolo e sperimentali adeguate allo stato dell'arte.

In primo luogo si procede alla determinazione della **velocità di riferimento v_b** , definita come il valore medio su 10 minuti, misurato a 10 m di altezza dal suolo su un terreno pianeggiante e omogeneo di categoria di esposizione II. Tale definizione non risulta tuttavia direttamente applicabile al caso in esame, poiché, come indicato nella Tabella 3.3.II, la Sicilia e la provincia di Reggio Calabria rientrano in una diversa categoria di esposizione. In assenza di indicazioni più specifiche, la velocità di riferimento v_b viene pertanto assunta mediante la seguente formulazione:

$$V_b = v_{b,0} * c_a$$

Dove $v_{b,0}$ è la velocità di riferimento al livello del mare, assegnata nella tabella 3.3.I e c_a è il coefficiente di altitudine fornito dalla relazione:

$$c_a = 1, \text{ se } a_s \leq a_0$$

$$c_a = 1 + k_s \left(\frac{a_s}{a_0} - 1 \right), \text{ se } a_0 < a_s \leq 1500$$

a_0 , k_s sono parametri forniti nella Tab. 3.3.I e a_s è l'altitudine sul livello del mare del sito ove sorge la costruzione.

Secondo le informazioni fornite dalla tabella 3.3.I, è possibile collocare il progetto nella zona 4, con i rispettivi valori che susseguono.

Si passa poi a calcolare la **pressione del vento p** che è data dall'espressione:

$$p = q_r * c_e * c_p * c_d$$

dove

q_r è la pressione cinetica di riferimento di cui al § 3.3.6;

c_e è il coefficiente di esposizione di cui al § 3.3.7;

c_p è il coefficiente di pressione di cui al § 3.3.8;

c_d è il coefficiente dinamico di cui al § 3.3.9.

Si passa in seguito a calcolare la **pressione cinetica di riferimento q_r** , che è data dall'espressione:

$$q_r = \frac{1}{2} * \rho * v_r^2$$

dove v_r è la velocità di riferimento del vento di cui al § 3.3.2 e ρ è la densità dell'aria assunta convenzionalmente costante e pari a 1,25 kg/m³. Esprimendo p in kg/m³ e v_r in m/s, q_r risulta espresso in N/m²

Uno degli ultimi fattori che influenzano la potenza del vento riguarda il **coefficiente di esposizione c_e** , che dipende dall'altezza z sul suolo del punto considerato, dalla topografia del terreno e dalla categoria di esposizione del sito ove sorge la costruzione. In assenza di analisi specifiche che tengano in conto la direzione di provenienza del vento e l'effettiva scabrezza e topografia del terreno che circonda la

costruzione, per altezze sul suolo non maggiori di $z = 200$ m, esso è dato dalla formula:

$$c_e = (k_r^2) * c_t * \ln(z/z_0) * [7 + c_t * \ln(z/z_0)], \text{ se } z \geq z_0$$

$$c_e = c_e(z_{\min}), \text{ se } z < z_{\min}$$

Sulla base dei dati ricavati dalla consultazione delle tabelle normative, è possibile affermare che il sito di progetto rientra nella classe D per quanto concerne la rugosità del terreno; tale classificazione conduce pertanto all'adozione dei parametri corrispondenti alla categoria di esposizione II.

Alla luce dei valori così determinati, si procede quindi al calcolo della forza totale del vento agente sulla struttura, risultante pari a:

$$F_{wTOT} = F_{w,i} + F_{w,t} = 9,26 * 10^4 \text{ kN}$$

Si sottolinea, data la snellezza dell'opera e la sua scala, che le valutazioni normative sono state integrate con l'analisi FEM che ha permesso di valutare la risposta della distribuzione delle azioni interne in risposta al vento.

3.3.6.2 Sisma

L'azione sismica viene modellata come un'accelerazione della base trasmessa alla struttura, da trasformare in un sistema di forze equivalenti agenti sulle masse partecipanti. Pur trattandosi di un'azione variabile nel tempo, ai fini della progettazione si fa riferimento allo spettro di risposta elastico. Questa accelerazione viene calcolata come:

$$a_s = S * (a_g/q)$$

$$a_s = (S * a_g)/q = (1 * 0,25g)/q = 0,083g \approx 0,82 \text{ m/s}^2$$

$$F_s = m * a_s = 15,10 * 10^5 * 0,82 = 1,75 * 10^6 \text{ kN}$$

3.3.6.3 Neve

L'azione della neve costituisce un carico variabile verticale che agisce sull'impalcato e sugli elementi strutturali del ponte. Sebbene questa incidenza sia significativa soprattutto nelle aree montane, è opportuno valutarla anche in zone con bassa probabilità di nevicate per garantire una progettazione completa e sicura.

Il carico caratteristico della neve al suolo è determinato dalla

relazione:

$$s_k = s_{k,0} \cdot [1 \cdot (z/1.000)]$$

in seguito viene applicato il coefficiente di forma $\mu_i = 0,9$, determinato

dal cassone chiuso per poi essere moltiplicato per la larghezza

dell'impalcato, ottenendo un carico neve pari a:

$$Q_{neve} = q_{neve} \cdot L = 48,11 \cdot 10^3 \text{ kN}$$

3.4 Verifiche e Progettazione

3.4.1 Combinazione delle azioni

Gli **Stati Limite Ultimi (SLU)** rappresentano le condizioni oltre le quali la struttura perde la propria capacità portante o la stabilità globale, dando luogo a fenomeni di collasso, rottura o meccanismi strutturali non compatibili con la sicurezza dell'opera.

- Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (SLU):

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.1]
 - Combinazione caratteristica, cosiddetta rara, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili:

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.2]
 - Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.3]
 - Combinazione quasi permanente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.4]
 - Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E:

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$
 [2.5.5]
 - Combinazione eccezionale, impiegata per gli stati limite ultimi connessi alle azioni eccezionali A:

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$
 [2.5.6]
- Gli effetti dell'azione sismica saranno valutati tenendo conto delle masse associate ai seguenti carichi gravitazionali:
- $$G_1 + G_3 + \sum_j \psi_{2j} Q_{kj}$$
- [2.5.7]

Figura 14 : Combinazioni delle azioni – § 2.5.3 del D.M. 17/01/2018.

Ai fini della determinazione dei valori caratteristici delle azioni dovute al traffico, si devono considerare, generalmente, le combinazioni riportate in Tabella 5.1.IV del D.M. 17/01/2018:

Gruppo di azioni	Carichi sulla superficie carrabile					Carichi su marciapiedi e piste ciclabili non sormontabili
	Carichi verticali			Carichi orizzontali		Carichi verticali
	Modello principale (schemi di carico 1, 2, 3, 4 e 6)	Veicoli speciali	Folla (Schema di carico 5)	Frenatura	Forza centrifuga	Carico uniformemente distribuito
1	Valore caratteristico					Schema di carico 5 con valore di combinazione 2,5kN/m²
2a	Valore frequente			Valore caratteristico		
2b	Valore frequente				Valore caratteristico	
3 (*)						Schema di carico 5 con valore caratteristico 5,0kN/m²
4 (**)			Schema di carico 5 con valore caratteristico 5,0kN/m²			Schema di carico 5 con valore caratteristico 5,0kN/m²
5 (***)	Da definirsi per il singolo progetto	Valore caratteristico o nominale				
(*) Ponti pedonali (**) Da considerare solo se richiesto dal particolare progetto (ad es. ponti in zona urbana) (***) Da considerare solo se si considerano veicoli speciali						

Figura 15 : Tab. 5.1.IV del D.M. 17/01/2018 – Valori caratteristici delle azioni dovute al traffico.

I valori dei coefficienti parziali delle azioni da assumere nell’analisi per la determinazione degli effetti delle azioni nelle verifiche agli stati limite ultimi sono forniti in Tabella 5.1.V del D.M. 17/01/2018.

		Coefficiente	EQU ⁽¹⁾	A1	A2
Azioni permanenti g ₁ e g ₃	favorevoli	γ _{G1} e γ _{G3}	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,10	1,35	1,00
Azioni permanenti non strutturali ⁽²⁾ g ₂	favorevoli	γ _{G2}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Azioni variabili da traffico	favorevoli	γ _Q	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,35	1,35	1,15
Azioni variabili	favorevoli	γ _{Qi}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Distorsioni e presollecitazioni di progetto	favorevoli	γ _{e1}	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,00 ⁽³⁾	1,00 ⁽⁴⁾	1,00
Ritiro e viscosità, Cedimenti vincolari	favorevoli	γ _{e2} , γ _{e3} , γ _{e4}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,20	1,20	1,00

Figura 16: Tab. 5.1.V del D.M. 17/01/2018 – Coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni di carico agli SLU.

Nel caso di verifiche di transitabilità e operatività, si possono assumere i valori dei fattori parziali dei carichi permanenti, dei carichi da traffico

e del vento riferiti ad un tempo di riferimento ridotto: **t_{ref} = 30 anni** per le verifiche di operatività e **t_{ref} = 5 anni** per le verifiche di transitabilità. I fattori parziali vengono riportati nelle seguenti tabelle:

CLASSE DI CONSEGUENZA	(1) CONDIZIONI STANDARD	(2) CON ACCURATO CONTROLLO STATISTICO DI MATERIALI E GEOMETRIA E COV<0,05	(3) COME (2) E CON ABBATTIMENTO INCERTEZZE DI MODELLO (§ 6.3.3.5)
CC3	1.26	1.16	1.10

Figura 17: Tabella 6.3.2 delle L.G.20 del 17/04/2020 del C.S.LL.PP. – Fattori parziali di sicurezza per i carichi permanenti, γ_G, per verifiche di transitabilità e operatività

Nel caso di verifica di ponte adeguato, i valori dei fattori parziali da impiegare sono riportati nella seguente tabella, per le tre condizioni sopra citate.

CLASSE DI CONSEGUENZA	(1) CONDIZIONI STANDARD	(2) CON ACCURATO CONTROLLO STATISTICO DI MATERIALI E GEOMETRIA E COV<0,05	(3) COME (2) E CON ABBATTIMENTO INCERTEZZE DI MODELLO (§ 6.3.3.5)
CC3	1.35	1.25	1.20

Figura 18: Tabella 6.3.3 delle L.G.20 del 17/04/2020 del C.S.LL.PP. – Fattori parziali di sicurezza per i carichi permanenti, γ_G, per verifiche di adeguamento

Classe di conseguenza	Tempo di riferimento t _{ref}	Fattori parziali per le azioni variabili da traffico, γ _Q
CC3	5 anni (ponte TRANSITABILE, § 6.1.5.3)	1.20
	30 anni (ponte OPERATIVO, § 6.1.5.2)	1.20

Figura 19: Tabella 6.3.4 delle L.G.20 del 17/04/2020 del C.S.LL.PP.- Fattori parziali di sicurezza considerando come azioni principali le azioni variabili da traffico

Classe di conseguenza	Tempo di riferimento t _{ref}	Fattori parziali per l’azione del vento, γ _Q
CC3	5 anni (ponte TRANSITABILE, § 6.1.5.3)	1.26
	30 anni (ponte OPERATIVO, § 6.1.5.2)	1.50

Figura 20: Tabella 6.3.3 delle L.G.20 del 17/04/2020 del C.S.LL.PP.- Fattori parziali di sicurezza considerando come azione principale l’azione del vento

Ai fini delle verifiche agli SLU, le azioni agenti sulla struttura vengono combinate secondo un'espressione generale che tiene conto dei carichi permanenti, di quelli variabili principali e dei carichi secondari opportunamente ponderati mediante coefficienti parziali di sicurezza:

$$SLU = \Sigma \gamma_G * G + \Sigma \gamma_Q * Q + \Sigma \gamma_Q * \psi_0 * Q_{secondario},$$

dove:

$$\gamma_{G1} = 1,35$$

$$\gamma_{G2} = 1,50$$

$$\gamma_{Qt} = 1,35$$

$$\gamma_{G_{neve}} = 1,50 - \psi_{neve} = 0,5$$

$$\gamma_{G_{vento}} = 1,50 - \psi_{vento} = 0,6$$

$$\psi_{1,Q1} = 0,2$$

La combinazione fondamentale è quella traffico dominante.

Traffico dominante:

$$SLU_1 = 1,35 * (G_1 + G_2) + 1,35 * Q_1 + 1,5 * 0,6 * F_w + 1,5 * 0,5 * Q_{neve} =$$

$$1,35 * (13,95 * 10^6 + 45,56 * 10^4) + 1,35 * 88,77 * 10^4 + 1,50 * 0,6 * 9,26 * 10^4 + 1,5 * 0,5 * 48,11 * 10^3$$

$$= 21,50 * 10^6 \text{ kN}$$

$$N_{ed} = SLU_1 = 21,50 * 10^6 \text{ kN}$$

Sisma dominante:

$$SLU_2 = G_1 + G_2 + F_s + 0,2 * Q_1 = 13,95 * 10^6 + 45,56 * 10^4 + 18,84 * 10^5 + 0,2 * 88,77 * 10^4 =$$

$$16,97 * 10^6 \text{ kN}$$

$$\text{Totale carico verticale} = N_{ed, sisma} = SLU_2 = 16,98 * 10^6 \text{ kN}$$

$$\text{Taglio sismico orizzontale} = V_{ed, sisma} = F_s * 1,00 = 18,47 * 10^5$$

Gli **Stati Limite di Esercizio (SLE)** descrivono le condizioni di normale utilizzo della struttura, tenendo conto di deformazioni, vibrazioni, fessurazioni e di altri fenomeni che possono compromettere la funzionalità dell'opera o il comfort degli utenti. Tali azioni vengono combinate mediante coefficienti parziali meno gravosi rispetto a quelli adottati per gli Stati Limite Ultimi (SLU), al fine di verificare che la struttura mantenga adeguati livelli di prestazione durante la fase di esercizio.

Ai fini delle verifiche agli SLU, le azioni agenti sulla struttura vengono combinate secondo un'espressione generale che tiene conto dei carichi permanenti, di quelli variabili principali e dei carichi secondari opportunamente ridotte mediante coefficienti di combinazione:

$$SLU = \Sigma G_k + P + Q_{k,1} + \Sigma \psi_{0,i} * Q_{k,i}$$

Combinazione rara, dove:

$$\psi_{0,w}: 0,6$$

$$\psi_{0,neve}: 0,5$$

$$SLE = G_1 + G_2 + Q_1 + \psi_{0,w} * F_w + \psi_{0,neve} * F_{neve} = 13,95 * 10^6 + 45,56 * 10^4 + 88,77 * 10^4 +$$

$$0,6 * 9,26 * 10^4 + 0,5 * 4,81 * 10^4 = 15,92 * 10^6 \text{ kN}$$

$$F_{SLE, rara} = 15,92 * 10^6 \text{ kN}$$

Combinazione frequente, dove:

$$\psi_{0,w}: 0,0$$

$$\psi_{0,neve}: 0,4$$

$$SLE = G1 + G2 + \psi_{1,w} * F_w + \psi_{1,neve} * Q_{neve} = 13,95 * 10^6 + 45,56 * 10^4 + 0,0 * 8,7 * 10^5 + 0,4 * 4,81 * 10^4 = 15,31 * 10^6 \text{ kN}$$

$$F_{SLE, frequente} = 15,31 * 10^6 \text{ kN}$$

3.4.2 Verifiche SLU

VERIFICA A TRAZIONE – Funi

$$N_{Ed} = 3,5 * 10^6 \text{ kN}$$

$$N_{Rd} = 5,32 * 10^9 \text{ kN}$$

Se $N_{Ed} < N_{Rd}$, lo sforzo assiale è verificato

$$3,5 * 10^6 < 5,32 * 10^9 \rightarrow \text{VERIFICATO}$$

VERIFICA A TRAZIONE – Pendini

$$N_{Ed} = 6,22 * 10^5 \text{ kN}$$

$$N_{Rd} = 7,65 * 10^7 \text{ kN}$$

Se $N_{Ed} < N_{Rd}$, lo sforzo assiale è verificato

$$6,22 * 10^5 < 7,65 * 10^7 \rightarrow \text{VERIFICATO}$$

VERIFICA A PRESSOFLESSIONE – Torri

$$N_{Ed} = 8,46 * 10^9 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = 4,96 * 10^9 \text{ kN}$$

$$N_{Rd} = 3,67 * 10^{10} \text{ kN}$$

$$M_{Rd} = 2,01 * 10^{10} \text{ kN}$$

Se $(N_{Ed}/N_{Rd}) + (M_{Ed}/M_{Rd}) < 1$, la pressoflessione è verificata

$$0,48 < 1 \rightarrow \text{VERIFICATO}$$

VERIFICA A PRESSOFLESSIONE – Impalcato

$$N_{Ed} = 3,67 \cdot 10^6 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = 7,13 \cdot 10^6 \text{ kN}$$

$$N_{Rd} = 2,75 \cdot 10^7 \text{ kN}$$

$$M_{Rd} = 1,47 \cdot 10^7 \text{ kN}$$

Se $(N_{Ed}/N_{Rd}) + (M_{Ed}/M_{Rd}) < 1$, la pressoflessione è verificata

$$0,62 < 1 \rightarrow \text{VERIFICATO}$$

TENSIONE COMBINATA MASSIMA

$$\sigma_{Ed} = 5,17 \cdot 10^5 \text{ kN}$$

$$f_{yd} = 5,23 \cdot 10^5 \text{ kN}$$

Se $\sigma_{Ed} < f_{yd}$, la tensione combinata massima è verificato

$$5,17 \cdot 10^5 < 5,23 \cdot 10^5 \rightarrow \text{VERIFICATO}$$

TENSIONE TAGLIO MASSIMA

$$\tau_{Ed} = 6,31 \cdot 10^4 \text{ kN}$$

$$\tau_{Rd} = 1,02 \cdot 10^6 \text{ kN}$$

Se $\tau_{Ed} < \tau_{Rd}$ la tensione combinata massima è verificato

$$6,31 \cdot 10^4 < 1,02 \cdot 10^6 \rightarrow \text{VERIFICATO}$$

3.4.3 Verifiche SLE

VERIFICA DELLA DEFORAZIONE – Controllo Frecce

$$dz = 6,38 \text{ m}$$

$$\delta_{max} = 8,25 \text{ m}$$

Se $dz < \delta_{max}$, la deformazione è verificata

$$6,38 < 8,25 \rightarrow \text{VERIFICATO}$$

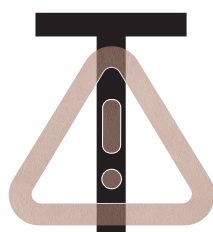
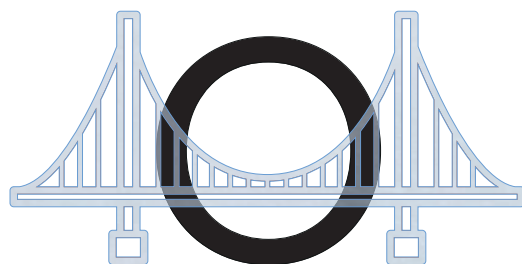
VERIFICA DELLA TENSIONI – Tensione massima

$$\sigma_{Ed} = 3,76 \cdot 10^5 \text{ kN}$$

$$\sigma_{amm} = 1,48 \cdot 10^6 \text{ kN}$$

Se $\sigma_{Ed} < \sigma_{amm}$, la deformazione è verificata

$$3,76 \cdot 10^5 < 1,48 \cdot 10^6 \rightarrow \text{VERIFICATO}$$



4 STIMA COMPARATIVA DELLE DUE SOLUZIONI

Il presente capitolo si propone di analizzare criticamente le strategie progettuali per l'attraversamento stabile dello Stretto di Messina, adottando un approccio comparativo basato sulla metodologia SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*). L'indagine è stata strutturata in due fasi distinte, corrispondenti ai due sottocapitoli, al fine di evidenziare il percorso logico che conduce dalla valutazione delle criticità dell'attuale progetto a campata unica verso la definizione di una nuova proposta a tre campate. Nel primo sottocapitolo, l'analisi si concentra sul progetto ufficiale a campata unica da 3.300 metri. Sebbene tale soluzione garantisca l'assenza di interferenze con la navigazione e rappresenti un indiscusso primato ingegneristico di alto valore simbolico.

Il secondo sottocapitolo introduce e valuta la proposta alternativa oggetto di tesi: un sistema ibrido a tre campate con pile in mare e utilizzo di materiali innovativi. La seconda analisi SWOT evidenzia come questa configurazione risponda direttamente alle debolezze del modello precedente, offrendo una maggiore rigidità strutturale che garantisce la *runnability* ideale per l'Alta Velocità ferroviaria e riduce le esigenze di manutenzione straordinaria.

S
t
r
e
n
g
t
h
s

- **PRIMATO INGEGNERISTICO:** la realizzazione di una campata sospesa di 3.300 m costituirebbe un record mondiale, conferendo all'opera un elevato valore simbolico e tecnologico nel panorama dell'ingegneria civile internazionale
- **ASSENZA DI INTERFERENZE CON LA NAVIGAZIONE:** l'assenza totale di pile in acqua garantisce la completa libertà di transito navale nello Stretto, eliminando il rischio di collisione e le limitazioni alla navigazione.
- **CONTINUITÀ INFRASTRUTTURALE STRADALE E FERROVIARIA:** la configurazione a campata unica consente un collegamento diretto e continuo tra le due sponde, senza interruzioni operative per il traffico stradale e ferroviario.

W
e
a
k
n
e
s
s
e
s

- **LIMITAZIONI FERROVIARIE:** l'elevata snellezza della campata centrale (rapporto luce/freccia estremamente elevato) comporta deformazioni verticali significative sotto carichi mobili, imponendo limitazioni alla velocità dei convogli ferroviari e l'adozione di dispositivi di dilatazione di eccezionale complessità
- **DURABILITA' DEI CAVI:** il comportamento a fatica dei cavi portanti di grande diametro, soggetti a fenomeni di fretting tra i fili, presenta ancora margini di incertezza sperimentale, rendendo complessa la stima affidabile della vita utile.
- **CONSUMO DI SUOLO E IMPATTO PAESAGGISTICO:** la necessità di blocchi di ancoraggio comporta scavi di grandi dimensioni e l'impiego massivo di calcestruzzo, con conseguenze rilevanti sul paesaggio costiero e sugli equilibri territoriali.
- **COSTI DI MANUTENZIONE ELEVATI:** la combinazione di grande luce, ambiente marino aggressivo e sollecitazioni dinamiche comporta un'intensa attività manutentiva programmata e straordinaria, con incremento dei costi lungo l'intera vita utile dell'opera.

Analisi SWOT

- **INTEGRAZIONE TERRITORIALE E CONTINUITÀ NAZIONALE:** la presenza di un collegamento stabile favorirebbe una maggiore integrazione infrastrutturale tra Sicilia e continente.

O
p
p
o
r
t
u
n
i
t
i
e
s

T
h
r
e
a
t
s

- **RISCHI DI INSTABILITA' AEROELASTICA:** nonostante l'adozione del profilo alare "Messina Type", la stabilità aeroelastica per campate superiori a 3000 m rimane una sfida sfida progettuale notevole.
- **INCERTEZZA DEI COSTI E DEI TEMPI:** l'elevata complessità costruttivo/esecutiva e la possibile necessità di varianti in corso d'opera espongono il progetto a significativi rischi di slittamento temporale e lievitazione dei costi complessivi.

Analisi SWOT

S
t
r
e
n
g
t
h
s

- **MIGLIORAMENTO DELLE PRESTAZIONI FERROVIARIE:** la riduzione della luce libera mediante l'inserimento di pile in mare comporta una significativa diminuzione della flessibilità verticale dell'impalcato, garantendo condizioni di esercizio compatibili con il traffico ferroviario ad alta velocità (runnability ideale per la AV).
- **FUNI CON FUNZIONE DI STRALLO:** le funi principali lavorano come grandi stralli stabilizzanti che, ancorandosi all'impalcato, permettono di limitare gli spostamenti longitudinali e migliorare la stabilità globale del ponte.
- **DURABILITA':** l'impiego di calcestruzzi pozzolanici ad elevata resistenza alla penetrazione dei cloruri (classe XS3) assicura prestazioni di durabilità superiori per le fondazioni in ambiente marino
- **SOSTENIBILITA':** Riduzione della CO₂ di circa il 40% rispetto alla soluzione di cui prima, grazie anche all'uso di (alcuni) materiali a km0.

W
e
a
k
n
e
s
s
e
s

- **OPERAZIONI OFFSHORE:** la realizzazione delle pile sulla "Sella dello Stretto" mediante fondazioni a cassone richiede operazioni off-shore complesse in presenza di forti correnti, con un aumento dei rischi esecutivi rispetto a interventi su terraferma.
- **VALIDAZIONE NORMATIVA DEI MATERIALI INNOVATIVI:** l'impiego strutturale su larga scala di materiali cementizi a base di ceneri vulcaniche richiede specifici percorsi di validazione scientifica e normativa, in particolare per quanto riguarda la costanza volumica e il comportamento a lungo termine.

O
p
p
o
r
t
u
n
i
t
i
e
s

- **COLLEGAMENTO STABILE:** la presenza di un collegamento stabile creerebbe una continuità territoriale tra Sicilia e continente.
- **MANUTENZIONE RIDOTTA:** la struttura più rigida del ponte rispetto al "Messina Type", subisce meno cicli di fatica e oscillazioni, abbattendo i costi di manutenzione straordinaria rispetto al progetto ufficiale.
- **GREEN DEAL INFRASTRUTTURALE:** il progetto diventa un manifesto di economia circolare (riuso delle ceneri vulcaniche) e rispetto territoriale (niente ancoraggi).

T
h
r
e
a
t
s

- **GEOTECNICA SOTTOMARINA:** Le fondazioni sulla Sella richiedono indagini approfondite per escludere instabilità locali o faglie attive sottomarine.
- **SICUREZZA NAVALE:** La presenza fisica delle pile in mare, benché a distanza di 2 km, potrebbe richiedere sistemi di protezione contro il rischio di collisione navale

CONCLUSIONI

Riflessioni e Prospettive Future

L'importanza della ricerca e dell'innovazione ingegneristica

Il lavoro di tesi ha messo in evidenza come l'attività di ricerca e l'innovazione ingegneristica rappresentino elementi fondamentali nella progettazione di grandi infrastrutture caratterizzate da elevata complessità strutturale e territoriale, quali il collegamento stabile dello Stretto di Messina. L'adozione di strumenti di analisi avanzati consente infatti di valutare in modo oggettivo l'efficacia reale delle alternative progettuali proposte.

Si è analizzata la soluzione mediante un modello tridimensionale agli elementi finiti, FEM, con il software MIDAS Civil NX, il quale ha permesso di simulare il comportamento globale della struttura sotto l'azione dei carichi permanenti - G_1 e G_2 , dei carichi variabili - $Q_{1,v}$, Q_2 , delle azioni ambientali ed eccezionali - Q_{vento} , Q_{simso} , Q_{neve} , in accordo con le prescrizioni delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018) e i relativi Eurocodici.

La modellazione ha incluso l'impalcato, le torri, il sistema di sospensione e, in maniera marginale, le fondazioni, consentendo una valutazione complessiva delle sollecitazioni e delle deformazioni dell'intero organismo strutturale.

Le verifiche agli **Stati Limite Ultimi** (SLU) hanno confermato il rispetto dei requisiti di sicurezza nei confronti dei meccanismi di collasso e di perdita di stabilità; le verifiche agli **Stati Limite di Esercizio** (SLE) hanno invece evidenziato il contenimento degli spostamenti per via delle deformazioni e sollecitazioni entro i limiti normativi previsti.

Attraverso la simulazione strutturale e numerica del ponte, si è dimostrato come la configurazione progettuale proposta garantisca prestazioni adeguate sia per il traffico stradale sia per quello ferroviario, risultando compatibile con le esigenze di esercizio dell'Alta Velocità (AV).

L'aspetto peculiare del ponte proposto in questo lavoro di tesi riguarda l'aumento della rigidità globale dovuto alla presenza delle pile in mare: tale configurazione determina infatti una risposta strutturale più controllata nei confronti delle azioni dinamiche, riducendo le criticità legate a deformazioni eccessive e a fenomeni di vibrazione.

L'innovazione proposta non si limita alla sola configurazione strutturale – pendini con funzione strutturale e stralli con un ruolo strutturale secondario – ma si riflette anche nella scelta dei materiali, come l'impiego di calcestruzzi pozzolanici a base di ceneri vulcaniche per la realizzazione delle fondazioni, in un'ottica di maggiore sostenibilità e durabilità dell'opera.

Proposte per futuri studi e approfondimenti

Pur avendo raggiunto un livello di dettaglio avanzato sotto il profilo progettuale e delle verifiche strutturali, il presente lavoro lascia aperti ulteriori ambiti di sviluppo e approfondimento.

Un primo filone di ricerca potrebbe riguardare l'analisi aeroelastica della struttura mediante modelli più complessi, affiancando alle verifiche normative anche le simulazioni fluidodinamiche o prove sperimentali in galleria del vento al fine di valutare in maniera più approfondita l'interazione fluido-struttura.

Un ulteriore ambito di ricerca potrebbe riguardare il comportamento a lungo termine dell'opera, includendo l'analisi della fatica degli elementi strutturali maggiormente sollecitati e la risposta delle fondazioni alle sollecitazioni. Tali approfondimenti consentirebbero di stimare i costi di manutenzione nell'arco della vita utile di progetto, fornendo indicazioni significative sulla sostenibilità economica complessiva dell'infrastruttura.

Per quanto riguarda i materiali innovativi impiegati, potrebbe essere interessante svolgere un approfondimento sperimentale dei calcestruzzi additivati con cenere vulcanica, con riferimento alla costanza volumica, alla durabilità in ambiente marino e al comportamento dinamico, al fine di valutarne l'effettiva idoneità all'impiego in opere di grande scala.

Infine, sviluppi futuri potrebbero riguardare l'analisi strutturale con studi di pianificazione infrastrutturale e territoriale, valutando il ruolo del ponte all'interno del sistema complessivo dei trasporti e il suo rapporto con le infrastrutture stradali e ferroviarie esistenti. Questo tipo di approccio consentirebbe di collocare l'opera all'interno di una visione sistemica, coerente con le esigenze di mobilità e sviluppo dei territori interessati.

L'eredità del dibattito sul Ponte dello Stretto

Il Ponte sullo Stretto di Messina rappresenta da lungo tempo uno dei temi più discussi nel panorama infrastrutturale italiano, caratterizzato da un acceso confronto tra posizioni favorevoli e contrarie alla realizzazione dell'opera.

Il contributo offerto dalla presente tesi si inserisce in tale contesto con l'obiettivo di riportare l'attenzione sugli aspetti ingegneristici e sulle possibilità offerte da soluzioni alternative rispetto al progetto ufficiale a campata unica. Il confronto tra le due configurazioni strutturali, supportato da un'analisi quantitativa basata su un modello numerico verificato agli SLU e SLE, evidenzia come scelte progettuali differenti possano condurre a risposte strutturali più equilibrate, controllabili e coerenti con le condizioni al contorno dell'opera.

L'eredità principale del dibattito sul Ponte dello Stretto risiede nella consapevolezza che opere infrastrutturali di tale scala debbano essere affrontate attraverso un approccio multidisciplinare e rigoroso, in grado di integrare in modo coerente gli aspetti strutturali, ambientali e territoriali.

Il lavoro di tesi dimostra come l'ingegneria strutturale possa fornire strumenti concreti e oggettivi per la valutazione della fattibilità e della coerenza delle soluzioni progettuali, contribuendo a una discussione

più consapevole e fondata su dati verificabili, piuttosto che su posizioni ideologiche.

In conclusione, il collegamento stabile dello Stretto di Messina continua a rappresentare una sfida aperta; tuttavia, l'analisi sviluppata mostra come l'evoluzione del progetto non debba necessariamente passare attraverso soluzioni estreme, bensì configurazioni strutturali verificate, razionali e coerenti con il contesto complesso in cui l'opera è chiamata a inserirsi.

BIBLIOGRAFIA

Abramo, E. (2023, aprile 7). *Ponte, l'ingegnere Risitano risponde alle critiche con una relazione: "Ecco perchè la campata unica non si può fare"*. Tratto il giorno novembre 10, 2025 da TGMessina: <https://tgmessina.it/ponte-lingegnere-risitano-risponde-alle-critiche-con-una-relazione-ecco-perche-la-campata-unica-non-si-puo-fare/>

Ambrosi, L. (2014). Rivista Calabrese di Storia del '900. *La regione frammentata*, 1, 15-34.

Averardi Ripari, F. (2023, aprile 12). *Il riavvio del Ponte sullo Stretto di Messina: vantaggi dell'opera, dettagli del progetto e dello stato dell'arte*. Tratto da <https://www.ingenio-web.it/articoli/il-riavvio-del-ponte-sullo-stretto-di-messina-vantaggi-dell-opera-dettagli-del-progetto-e-stato-dell-arte/>

Billington, D. (1985). *The Tower and the Bridge: The New Art of Structural Engineering*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press. Tratto il giorno dicembre 18, 2025

Calderoni, D. (2024). *Sperimentazione di nuovi leganti e prodotti sostenibili per l'edilizia basati sul riuso di ceneri e frammenti piroclastici del vulcano Etna*. Dottorato in Valutazione e Mitigazione dei Rischi Urbani e Territoriali XXXVII Ciclo, Università

degli studi di Catania, Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura (DICAR), Catania. Tratto il giorno novembre 22, 2025

Calderoni, D., Gastaldi, D., Merlo, V., Pellino, L., Canonico, F., & Contrafatto, L. (2024). Etna volcanic ash as new sustainable supplementary cementitious. *Journal of Building Engineering*, 95, 15. Tratto il giorno novembre 18, 2025 da <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224018321>

Caracciolo, L. (2022, dicembre 7). *Perché il ponte sullo Stretto stavolta è opera strategica*. Tratto il giorno settembre 28, 2025 da La Stampa: https://www.lastampa.it/editoriali/lettere-e-idee/2022/12/07/news/perche_il_ponte_sullo_stretto_stavolta_e_opera_strategica-12398216/

Caruso, R. M. (2023). Il concorso nazionale di idee del 1969 per il ponte sullo Stretto di Messina: le premesse e i progetti. *Tesi di dottorato*. Roma: Sapienza Università di Roma. Tratto il giorno settembre 26, 2025

Cuneo, G. (2025, novembre 12). Una soluzione più sostenibile per il ponte sullo Stretto di Messina. *Il Sole 24 Ore*, 1. Tratto il giorno novembre 12, 2025 da <https://www.ilsole24ore.com/art/una-soluzione-piu-sostenibile-il-ponte-stretto-messina-AHcrDreD>

de Miranda, M., Rizzo, S., & Mazzolani, F. (2025). Un ponte “sospeso” sullo Stretto di Messina: realtà o utopia? Rilevanti criticità osservate sulla fattibilità del Ponte a luce unica progettato. In *Costruzioni Metalliche* (Vol. 1, p. 14-23). Milano: AICAP – Associazione Italiana Calcestruzzo Armato e Precompresso.

Devitofranceschi, A., Piccarreta, A., & Mele, V. (2025, 16 luglio). Ponte sullo Stretto di Messina: progettazione e vento. *Strade e Autostrade - Rivista tecnica, economica e politica della mobilità*. Tratto il giorno ottobre 26, 2025 da <https://www.stradeeautostrade.it/ponti-e-viadotti/ponte-sullo-stretto-di-messina-progettazione-e-vento/>

Ekaputri, J. J., Triwulan, Aji, P., & Baihaqi, A. (6 dicembre 2011). Mechanical Properties of Volcanic Ash Based Concrete. *Proceedings of the International Seminar on Applied Technology, Science, and Arts (3rd APTECS)*, (p. 6). Surabaya, Indonesia. Tratto il giorno novembre 2025, 19

Eurasia. (2014, luglio 07). *Sicilia: la geopolitica di un'isola al centro del mondo*. Tratto il giorno settembre 30, 2025 da Eurasia - rivista di studi politici: <https://www.eurasia-rivista.com/sicilia-geopolitica-di-unisola-al-centro-del-mondo/>

Eurolink. (2011). *OPERA DI ATTRAVERSAMENTO - SISTEMA DI SOSPENSIONE - Cable System*. Milano: Eurolink S.C.p.A. Tratto il giorno ottobre 28, 2025

Eurolink Consorzio. (settembre 2024). *Considerazioni sul sistema di sospensione del ponte e sulle osservazioni ricevute in proposito nell'ambito del procedimento MASE-69882/2024 (7-VIA-Osservazioni dei cittadini)*. Roma: Eurolink Consorzio (per Stretto di Messina S.p.A). Tratto il giorno ottobre 20, 2025

Eurolink S.c.p.A. (2011). *Ponte sullo Stretto di Messina - Progetto definitivo. Relazione di calcolo (CS0330_F0, rev.FO, 20/06/2011)*. Roma/Messina: Stretto di Messina S.p.A. Tratto da <https://strettodimessina.it>

Eurolink S.C.p.A. (22 marzo 2024). *Relazione generale espropri - Versante Calabria*. Relazione tecnica amministrativa, Messina. Tratto il giorno ottobre 31, 2025

Eurolink S.C.p.A. (22 marzo 2024). *Relazione generale espropri - Versante Sicilia*. Relazione tecnica amministrativa, Messina. Tratto il giorno ottobre 31, 2025

European Parliament. (2001, settembre 26). *Death of migratory birds on the Øresund Bridge*. Tratto il giorno ottobre 27, 2025 da Parliamentary question:

https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/E-5-2001-2788_EN.html?redirect=&utm_source

Geriwick, B. (2007). *Construction of Marine and Offshore Structure* (3rd Edition ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.

Gimsing, N., & Georgakis, C. (2011). *Cable Supported Bridges, concept and design* (3rd ed.). Wiley. Tratto il giorno 12 07, 2025

Hozint. (2025, agosto 07). *The Messina Strait Bridge Project: A Preliminary Risk Assessment*. Tratto il giorno settembre 26, 2025 da HOZINT: Horizont Intelligence: <https://www.hozint.com/2025/08/the-messina-strait-bridge-project-a-preliminary-risk-assessment/>

IAResP OdV. (2024, settembre 30). *Progetto Ponte sullo Stretto di Messina e Tecnologie Antisismiche*. (IAResP) Tratto il giorno ottobre 28, 2025 da IAResP, centro di ricerca precursori sismici: <https://www.iaresp.it/14-scienze/147-progetto-ponte-sullo-stretto-di-messina-e-tecnologie-antisismiche.html>

Jia, H., Chen, S., Guo, D., & Zheng, S. (2024). *Analytical algorithm for the full-bridge response of hybrid cable-stayed suspension bridges under a horizontal transverse live load*. Tratto il giorno novembre 13, 2025 da ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012423005210?>

Jia, H., Chen, Z., Guo, T., & Zheng, S. (2024). *Track-bridge deformation relation and interaction of long-span railway suspension bridges subject to strike-slip faulting*. Tratto il giorno novembre 14, 2025 da ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029623016310>

Lei, H., Zhang, Y., & Feng, H. (2025, novembre 14). Running Safety of High-speed Railway Cable-Stayed-Suspension Hybrid System Bridges under Seismic Action. *Journal of Railway Science and Technology*, 33. Tratto il giorno novembre 18, 2025 da <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S3050814225000329>

Lorenzini, D. (2025, agosto 29). *Quanto acciaio sarà utilizzato per il Ponte sullo Stretto?* Tratto il giorno dicembre 02, 2025 da LinkedIn: <https://www.linkedin.com/pulse/quanto-acciaio-sar%C3%A0-utilizzato-per-il-ponte-sullo-davide-lorenzini-5e5jf/>

Lucangeli, G., Gandolfo, R., Cuni, A., & Micheli, A. (2025, ottobre 3). *Ponte sullo Stretto di Messina: collegamenti stradali*. (E.-C. S.r.l, Produttore) Tratto il giorno ottobre 29, 2025 da Strade&Autostrade: <https://www.stradeeautostrade.it/strade-e-autostrade/ponte-sullo-stretto-di-messina-collegamenti-stradali/>

Mandaglio, G., & Mandaglio, M. C. (2023). *Il ponte sullo Stretto di Messina. Problematiche geo-sismotettoniche*. Consiglio Nazionale dei Geologi (CNGeologi). Tratto da chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.cnggeologi.it/wp-content/uploads/2023/05/Problematiche-geosismotettoniche.-Sintesi.pdf

Martin, B. T. (2016). Highway bridges. In A. Pipinato, *Innovative Bridge Design Handbook* (p. 483-508). Elsevier Inc. Tratto il giorno novembre 12, 2025 da <https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/pii/B9780128000588000189>

Messina, Società Stretto di Messina S.p.A. (2020). *Relazione per la verifica di mercato*. Messina.

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. (2024). *Il progetto definitivo del Ponte sullo Stretto*. Roma: MIT. Tratto il giorno ottobre 17, 2025

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. (2025, agosto 6). *Ponte sullo Stretto: il CIPESS approva il progetto definitivo*. Tratto il giorno novembre 01, 2025 da Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti: <https://www.mit.gov.it/comunicazione/news/ponte-sullo-stretto-il-cipess-approva-il-progetto-definitivo>

Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili – Struttura Tecnica di Missione. (2021, 30 aprile). *La valutazione di soluzioni*

alternative per il sistema di attraversamento stabile dello Stretto di Messina: Relazione del Gruppo di Lavoro. Roma: MIMS. Tratto il giorno ottobre 06, 2025

Moccia, A. (2020, luglio 06). Ponte sullo stretto di Messina: sarebbe un'assurdità dal punto di vista geologico ? *Geopop*. YouTube. Tratto da <https://www.youtube.com/watch?v=-Jcz-q5tih4>

Osservatorio Turistico Regionale della Regione Siciliana. (2024). *Analisi statistica dei flussi turistici stanziali a Messina 2019-2023*. Regione Sicilia. Tratto il giorno ottobre 08, 2025

PontesulloStrettoNews.it. (2023, maggio 23). *L'impalcato de ponte: una sezione a tre cassoni aerodinamici*. Tratto il giorno ottobre 16, 2025 da PontesulloStretto: <https://www.pontesulloStrettoNews.it/website/>

Redazione Gazzetta del Sud. (15, ottobre 2025). *Leoluca Orlando al commissario per l'Ambiente: "Il Ponte sullo Stretto viola norme Ue"*. (La Gazzetta del Sud - Messina) Tratto il giorno ottobre 22, 2025 da La Gazzetta del Sud: <https://messina.gazzettadelsud.it/articoli/ponte-sullo-stretto/2025/10/15/leoluca-orlando-al-commissario-per-lambiente-il-ponte-sullo-stretto-viola-norme-ue-55134eba-b34f-4a0a-aa82-4c344b91efdd/>

Redazione INGENIO. (2024, novembre 11). *Ponte sullo Stretto: Via libera della Commissione all'Impatto Ambientale*. (anonimo, A cura di, & INGENIO) Tratto il giorno 09 novembre, 2025 da INGENIO: <https://www.ingenio-web.it/articoli/ponte-sullo-stretto-via-libera-della-commissione-all-impatto-ambientale/>

Risitano, A. (2024). *GENERALE AMBIENTE PROCEDURA DI VALUTAZIONE DI IMPATTO AMBIENTALE*. Riconcontro Osservazioni del Pubblico, Messina. Tratto il giorno ottobre 30, 2025

Risitano, A. (2024). *Nota sull'irrealizzabilità tecnica del Ponte sullo Stretto di Messina: impossibilità tecnica di passare dall'attuale progetto definitivo al progetto esecutivo*. Università degli Studi di Catania. Catania: non specificato. Tratto il giorno ottobre 27, 2025

Saccà, G. (2013, giugno 30). *L'attraversamento stabile dello Stretto di Messina: ipotesi e progetti dal 1870 al 1970*. Tratto il giorno settembre 27, 2025 da Sicilia in treno: <http://www.siciliaintreno.org/index.php/temi/attraversamento-stabile-stretto-messina/559-ipotesi-e-progetti-dal-1870-al-1970>

Saccà, G. (2022, dicembre 18). *Alternative progettuali dell'attraversamento stabile dello Stretto di Messina*. Tratto da YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=Np2zy6MS03c&t=346s>

Siddif, R. (2011, Novembre). Effect of volcanic ash on the properties of cement paste and mortar. *Resources, Conservation and Recycling*, 56(1), 66-70. Tratto il giorno Novembre 15, 2025 da <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344911001765>

Sky TG24. (2025, ottobre 30). *Ponte sullo Stretto di Messina, tutti i numeri: dalla struttura ai costi*. Tratto il giorno 2025 da Sky TG24: <https://tg24.sky.it/economia/2025/10/30/ponte-stretto-messina-costi>

Stretto di Messina S.p.A. (2011). *Progetto definitivo del Ponte sullo Stretto di Messina*. Roma: Stretto di Messina S.p.A. Tratto il giorno ottobre 19, 2025

Stretto di Messina S.p.A. (2024). *Il progetto definitivo - il ponte*. Tratto il giorno 2025 da Stretto di Messina: <https://strettodimessina.it/web/il-ponte/>

Stretto di Messina S.p.A. (2025, luglio 10). *PONTE STRETTO, AD CIUCCI: VALUTAZIONI AMBIENTALI CONCLUSE CON ESITO POSITIVO. OPERA È GIÀ PROGETTATA PER DUAL USE IN LINEA CON PROGRAMMA EUROPEO*. Tratto da Stretto di Messina: <https://strettodimessina.it/web/ponte-stretto-ad-ciucci-valutazioni-ambientali-concluse-con-esito-positivo-opera-e->

gia-progettata-per-dual-use-in-linea-con-programma-europeo/

Tang, H., Gong, Y., & Liu, H. (2018). *Feasibility Study for Large Span Railway Suspension Bridge in China*. Tratto il giorno novembre 13, 2025 da ResearchGate:

https://www.researchgate.net/publication/349300308_Feasibility_Study_for_Large_Span_Railway_Suspension_Bridge_in_China

Tunzi, P. (1969). *Acqua & Architettura Rappresentazioni* (Vol. II Concorso del Ponte sullo Stretto di Messina). (C. Mezzetti, & M. Unali, A cura di) Roma: Edizioni kappa. Tratto il giorno Settembre 2025

Vailati, L. (2023). Flutter instability of long-span suspension bridges: The case-study of the 1915Canakkale Bridge in Turkey. *Tesi Laurea Magistrale*. Torino. Tratto da <https://webthesis.biblio.polito.it/28886/>

Vulcanologia, I. n. (2024, marzo 22). *PONTE SULLO STRETTO | Chiarimenti sull'estraneità dell'INGV a valutazioni sul rischio sismico*. (INGV) Tratto il giorno ottobre 2025, 30 da INGV: <https://www.ingv.it/stampa-urp/ufficio-stampa/comunicati-stampa/ponte-sullo-stretto-chiarimenti-sull-estraneita-dell-ingv-a-valutazioni-sul-rischio-sismico>

Webuild Group. (2024). *Ponte sullo Stretto di Messina - Il Ponte che unisce l'Italia*. Tratto il giorno 2025 da Webuild: <https://www.webuildgroup.com/it/ponte-sullo-stretto/>

Webuild S.p.A. (2025). *PB0037_F0_ITA - Brochure tecnica del ponte sullo Stretto di Messina*. Milano: Webuild S.p.A. per Stretto di Messina S.p.A. Tratto il giorno ottobre 26, 2025

Weiwei, L., & Teruhiko, Y. (2017). Chapter Eleven, Suspension Bridges. In L. Weiwei, & Y. Teruhiko, *Bridge Engineering* (p. 195-211). Elsevier Inc. Tratto il giorno novembre 12, 2025 da <https://www.sciencedirect.com/science/chapter/monograph/pii/B9780128044322000116>

Ziparo, A. (2023). Lo Stretto di Messina e le ombre sul rilancio del ponte. (A. Ziparo, A cura di) *ossier Ponte sullo Stretto di Messina: Impatti su paesaggio e ambiente e conflitti con la pianificazione paesaggistica*, 21. Tratto il giorno novembre 2, 2025

APPENDICE

CARICHI PERMANENTI

G₁

Peso Proprio (G₁): il peso proprio della struttura rappresenta il peso proprio di tutti gli elementi portanti: la sovrastruttura ferroviaria è stata modellata ome carico permanente strutturale in quanto elemento integrante e non removibile dell’implacato. Tale scelta è coerente con le indicazioni normative delle NTC2018.

Esportando i valori da Midas Civil NX, considerando una γ pari a 76,98 kN/m3, valore unico per l’acciaio da costruzione, abbiamo ottenuto un valore pari a:

$G_1 = 13,76 \cdot 10^6 \text{ kN}$

All’interno del software questo carico viene applicato in modo automatico ponendo la condizione “Z=-1” quando parliamo degli “Static Load Case”.

Come carico strutturale dobbiamo considerare anche l’armamento ferroviario a doppio binario: la ferrovia è da considerarsi parte del carico strutturale in quanto gli elementi fissi dell’armamento contribuiscono direttamente alla massa che grava sull’impalcato e quindi alle sollecitazione degli elementi portanti. Per una ferrovia a doppio binario, il peso permanente è composto dalle rotaie UIC60, dai traversi e dagli attacchi: il binario ipotizzato per il nuovo progetto è stato considerato come un binario su soletta.

La larghezza totale della soletta, della medesima larghezza dell’impalcato centrale, è di 7,5 m, dove lo spessore è di 0,30 m in calcestruzzo con esso stesso peso specifico pari a 25 kN/m³. Le rotaie sono state considerate con un carico lineare pari a 0,60 kN/m, valore comunemente adottato nella modellazione delle strutture ferroviarie.

G ₁	13,76*10 ⁶	kN
DOPPIA ROTATORIA		
rotatoria UIC60	60,12	kg/m
q _{rotatoria}	1,18	kN
g	9,81	kg/m
g _{1rotatoria}	0,6	kN
g _{1rotaie}	1,2	kN
g _{1traverse}	1,8	kN
s _{soletta}	0,25	m
l _{soletta}	3,5	m
p cls	25	kN/m ³
g _{soletta}	21,88	kN/m
g _{soletta eff}	4	kN/m
massetto	1,5	kN/m
g ₁	8,5	kN/m
G _{1ferrovia}	28*10 ³	kN
G _{1tot}	13,80*10 ⁶	kN

G2 – CARICO PERMANENTE NON STRUTTURALE

Il carico permanente non strutturale G_2 comprende tutti quei carichi che gravano in modo permanente sulla struttura del ponte ma che non svolgono funzione portante primaria: rientrano gli strati di finitura e gli elementi accessori come pavimentazioni, ringhiere e impianti di illuminazione che contribuiscono al carico verticale senza influenzare in maniera significativa la rigidità globale della struttura.

Il modello Midas è stato semplificato omettendo la rappresentazione grafica di illuminazione e ringhiere; tuttavia, il peso proprio e i carichi permanenti derivanti da tali elementi sono stati integrati nei calcoli manuali per assicurare l'accuratezza dell'analisi strutturale.

Da considerare come carichi strutturali non portanti abbiamo:

- 1. SOLETTA IN ASFALTO;
- 2. RINGHIERE;
- 3. GUARDRAIL;
- 4. IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE.

1.L'impalcato richiede una pavimentazione specifica ad alta resistenza e flessibilità, capace di seguire le deformazioni della lastra metallica senza fessurarsi: si ha l'utilizzo di una pavimentazione speciale a doppio strato in conglomerato epossidico, steso direttamente sulla lastra ortotropa previo strato di impermeabilizzazione e aggrappo.

SOLETTA IN ASFALTO		
γ_{asfalto}	24	kN
h_{asfalto}	0,15	m
g_{asfalto}	6	kN/m ²
l_{soletta}	11,25	m
$g_{\text{asfalto},l}$	67,5	kN/m
n	2	-
$g_{\text{asfalto},TOT}$	135	kN/m
L	3.300	m
$G_{2,\text{asfalto}}$	$44,55 \cdot 10^4$	kN

2.Per la delimitazione delle sedi stradali e la sicurezza manutentiva, si prevede l'installazione di barriere metalliche lungo i bordi esterni dell'impalcato, ove necessario, a separazione delle sede ferroviaria. Il carico lineare è stato determinato analizzando una sezione tipo fi un parapetto in acciaio zincato di classe H2/H3 composto dai seguenti elementi: montanti posti a interasse di 1,50 m, correnti longitudinali, corrimano con $\varnothing = 70$ mm e piastre di base e bulloneria.

RINGHIERA METALLICA		
γ_{acciaio}	78,50	kN/m ³
$g_{\text{ringhiera}}$	0,70	kN/m
$n_{\text{ringhiere}}$	4	-
L	3.300	m
$G_{2,\text{asfalto}}$	9.240	kN

4.Come peso non strutturale viene inserito anche il carico puntuale dell'illuminazione artificiale posto su tutta la lunghezza a un intervallo di 12 metri, portando ad avere in tutta la struttura 4 disposizioni di lampioni, per un totale di 1100 corpi illuminanti.

IMPIANTO DI ILLUMINAZIONE		
g_{lampioni}	0,80	kN
n	1.100	-
L	3.300	m
G_{2, lampioni}	880	kN

G2 TOTALE		
G_{2, TOT}	27*10 ⁴	kN

CARICHI VARIABILI

CARICHI VERTICALI Q_{1,v}

Per la determinazione delle azioni variabili sulla struttura si è fatto riferimento alla prescrizioni della NTC2018. In conformità con il paragrafo 5.1.3.3, sono stati definiti i modelli di carico verticali (Q_{1,v}) per le piattaforme stradali e ferroviarie. La tabella seguente riepiloga i parametri geometrici adottati per la suddivisione delle carreggiate in corsie convenzionali e i relativi valori di carico lineare equivalente e distribuito utilizzati per le successive analisi di carico.

CARICHI VARIABILI, Q _{1,v}		
w_s	10,5	m
n_i	3	-
w_i	3,50	m
w_{ar}	0,75	m
q_k	9,00	kN/m ²
NUMERO E LARGHEZZA DELLE CORSIE FERROVIARIE		
w_f	7,5	m
n_{binari}	2	-
q_{LM71}	40	kN/m ²
q_{1,v, strada}	94,5	kN/m
Q_{1,v, strada}	31,19*10 ⁴	kN
q_{1,v, ferrovia}	80	kN/m
Q_{1,v, ferrovia}	26,40*10 ⁴	kN
Q_{1,v, TOTALE}	88,77*10 ⁴	kN

CARICHI VARIABILI

CARICHI VARIABILI DA TRAFFICO Q₂

Nell’ambito della progettazione strutturale di ponti e viadotti, l’azione longitudinale di frenamento e accelerazione rappresenta una delle principali azioni variabili da traffico (Q₂). Questa azione simula la forza orizzontale che i veicoli trasferiscono all’impalcato nel momento in cui modificano la loro velocità. Secondo il principio di azione-reazione, se un veicolo frena dissipando energia, scarica sulla pavimentazione una forza tangenziale parallela all’asse stradale. La struttura deve essere in grado di trasmettere questa forza agli elementi di fondazione senza subire spostamenti eccessivi o danni agli appoggi. Come evidenziato, il calco fa riferimento alla NTC2018, al paragrafo 5.1.3.5. La normativa impone di considerare queste forze come significative, specialmente per impalcati di grande lunghezza o ponti ferroviari, dove le masse in gioco sono elevate.

CARICHI VARIABILI, Q ₂		
L	3.300	m
w ₁	3,5	m
n	2	-
n _c	3	-
b	2	-
w _s	0,5	m/s ²
a _f	1	m/s ²
a _i	0,5	m/s ²
g	9,81	kg/m
F _{strada}	31,78*10 ³	kN
F _{ferrovia}	26,91*10 ³	kN
Q _{2,TOTALE}	58,70*10 ³	kN/m

CARICHI VARIABILI

VENTO

Nell’ambito della progettazione strutturale, il vento viene definito come un’azione variabile di natura ambientale, caratterizzata da una elevata aleatorietà sia nel tempo che nello spazio. Essa nasce dal movimento di masse d’aria nell’atmosfera e si manifesta sulle costruzioni attraverso un campo di pressioni e depressioni che agiscono sulle superfici esposte, generando forze globali e locali. Secondo le NTC2018 e l’Eurocodice 1, l’azione del vento è convenzionalmente modellata come un insieme di forze statiche equivalenti o attraverso analisi dinamiche che tengano conto dell’interazione fluido-struttura.

Tab. 3.3.I -Valori dei parametri v_{b,0} a₀ k_s

Zona	Descrizione	v _{b,0} [m/s]	a ₀ [m]	k _s
1	Valle d’Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia (con l’eccezione della provincia di Trieste)	25	1000	0,40
2	Emilia Romagna	25	750	0,45
3	Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Puglia, Campania, Basilicata, Calabria (esclusa la provincia di Reggio Calabria)	27	500	0,37
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria	28	500	0,36
5	Sardegna (zona a oriente della retta congiungente Capo Teulada con l’Isola di Maddalena)	28	750	0,40
6	Sardegna (zona a occidente della retta congiungente Capo Teulada con l’Isola di Maddalena)	28	500	0,36
7	Liguria	28	1000	0,54
8	Provincia di Trieste	30	1500	0,50
9	Isole (con l’eccezione di Sicilia e Sardegna) e mare aperto	31	500	0,32

Tabella 3.3.I delle NTC2018: Valori dei parametri fondamentali (v_{b,0} a₀ k_s) per la determinazione della velocità di riferimento del vento sul territorio italiano.

Tab. 3.3.III - Classi di rugosità del terreno

Classe di rugosità del terreno	Descrizione
A	Aree urbane in cui almeno il 15% della superficie sia coperto da edifici la cui altezza media superi i 15 m
B	Aree urbane (non di classe A), suburbane, industriali e boschive
C	Aree con ostacoli diffusi (alberi, case, muri, recinzioni,...); aree con rugosità non riconducibile alle classi A, B, D
D	a) Mare e relativa fascia costiera (entro 2 km dalla costa); b) Lago (con larghezza massima pari ad almeno 1 km) e relativa fascia costiera (entro 1 km dalla costa) c) Aree prive di ostacoli o con al più rari ostacoli isolati (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, pascoli, zone paludose o sabbiose, superfici innestate o ghiacciate,)

Tabella 3.3.III delle NTC2018: Definizione della rugosità del terreno.

Tab. 3.3.II - Parametri per la definizione del coefficiente di esposizione

Categoria di esposizione del sito	K_r	z_0 [m]	z_{min} [m]
I	0,17	0,01	2
II	0,19	0,05	4
III	0,20	0,10	5
IV	0,22	0,30	8
V	0,23	0,70	12

Tabella 3.3.III delle NTC2018: Parametri per la definizione del coefficiente di esposizione.

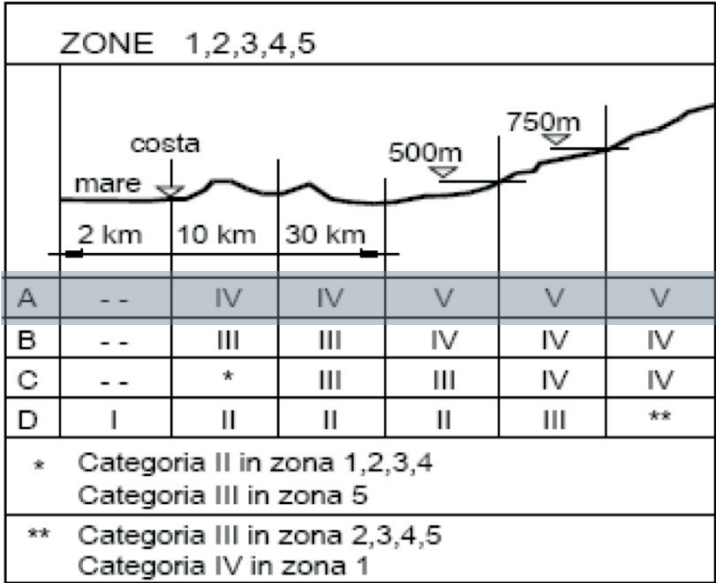


Tabella 3.3.III delle NTC2018: Definizione delle categorie di esposizione

VENTO		
zona	4	-
classe rugosità	D	-
categoria esposizione	II	-
$v_{b,0}$	28	m/s
p	1,25	kN/m ²
$c_{e, \text{impalcato}}$	3,83	-
$c_{e, \text{torri}}$	5,07	5,07
$q_{r, \text{impalcato}}$	1,87	kN/m ²
$q_{r, \text{torri}}$	2,40	kN/m ²
k_r	0,19	-
c_t	1,00	-
$c_{f, \text{impalcato}}$	1,30	-
$c_{f, \text{torri}}$	1,20	-
z_1	80	m
z_2	350	m
z_0	0,05	-
z_{min}	4	-
$v_{z, \text{impalcato}}$	54,79	-
$v_{z, \text{torri}}$	63,03	-

IMPALCATO		
$w_{k, \text{impalcato}}$	2,43	kN/m ²
$q_{w, \text{impalcato}}$	9,76	kN/m
L	3.300	m
$F_{w, \text{impalcato}}$	32,20	kN
TORRI		
$w_{k, \text{torri}}$	2,97	kN/m ²
$q_{w, \text{torri}}$	2,88	kN/m
$F_{w, \text{torri}}$	6,05*10 ⁴	kN
A_{torri}	21.000	m ³
$F_{\text{TOT, torri}}$	9,26*10 ⁴	kN

CARICHI VARIABILI

SISMA

La definizione dell’azione sismica, è stata condotta in conformità alle NTC2018, assumendo il sito di costruzione ricadente in Zona 1 (alta sismicità). L’azione del terremoto è modellata come un insieme di forze d’inerzia generale dall’eccitazione delle masse strutturali (G1) e non strutturali (G2), oltre a un’aliquota delle masse variabili (Q), secondo la relazione fondamentale $F=m*a$. Per la determinazione dell’accelerazione di calcolo, si è fatto riferimento allo spettro di risposta elastico specifico per il sito, considerando una Vita Nominale (V_N) dell’opera e la sua Classe d’Uso (Classe IV - Costruzioni Strategiche), al fine di determinare l’accelerazione spettrale $S_a(T)$ corrispondente al periodo fondamentale della struttura.

SISMA		
a_s	0,81	m/s ²
m	14,37*10 ⁵	t
G	13,78*10 ⁶	kN
Q_{stradale}	31,19*10 ⁴	kN
g	9,81	m/s ²
s	1	-
a_g	0,25	-
q	3	-
F_s	1,75*10 ⁶	kN

CARICHI VARIABILI

NEVE

L'azione della neve costituisce un carico variabile verticale che agisce sull'impalcato e sugli elementi strutturali esposti. Sebbene nel contesto climatico dell'area della costiera dello Stretto di Messina le precipitazioni nevose rappresentino eventi meteorologici di scarsa frequenza rispetto alle zone montane o continentali, la normativa vigente, la NTC2018 ed Eurocodice 1, impone la valutazione di tale azione per garantire la sicurezza strutturale anche a fronte di scenari climatici eccezionali. Il carico neve è determinato in funzione di appartenenza, dell'altitudine del sito e della conformazione geometrica della copertura (coefficiente di forma μ_i), considerando il deposito nevoso come un carico statico uniformemente distribuito sulla superficie dell'impalcato.

NEVE		
μ_i	0,90	-
$s_{k,0}$	0,5	kN/m ²
b_s	11,25	m
b_t	7,5	m
z	80	m
s_k	0,54	kN/m ²
L	3300	m
s_{neve}	0,49	kN/m ²
q_{neve}	14,58	kN/m
$I_1=I_3$	11,25	m
I_2	7,5	m
Q_{neve}	48,11*10 ³	kN

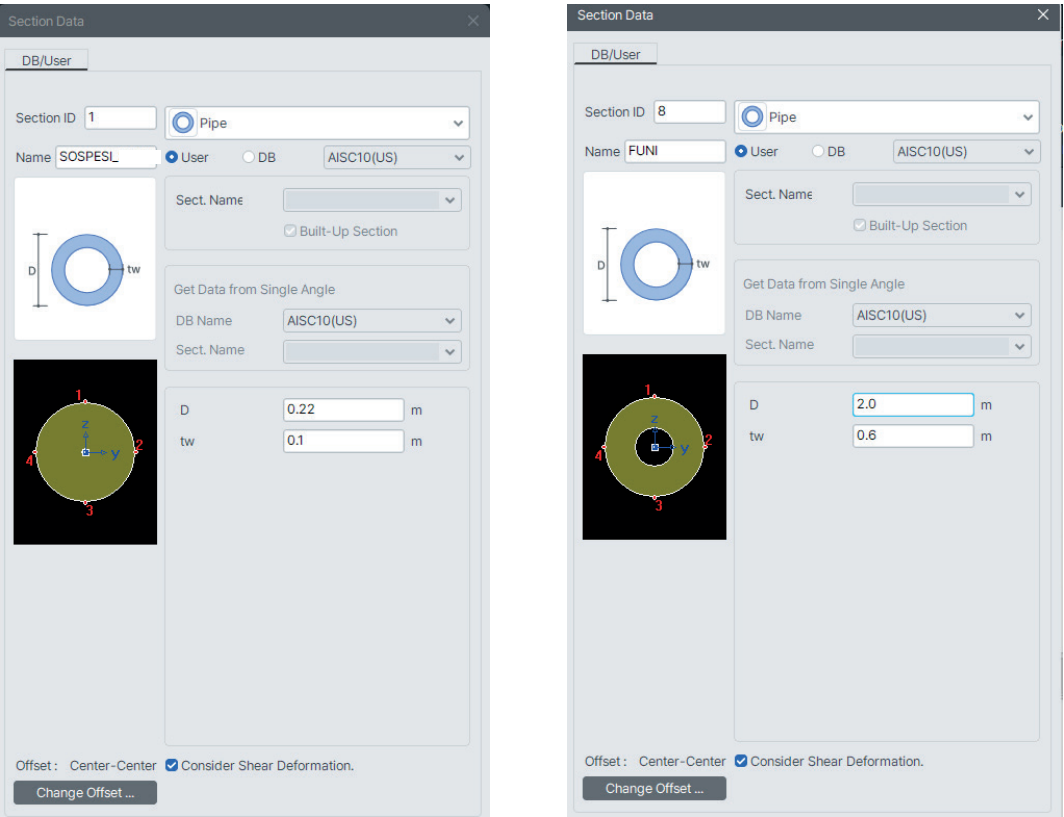
CONSTRUCTION STAGE

La costruzione del modello numerico finale è passata attraverso una rigorosa fase di definizione delle proprietà geometriche e inerziali degli elementi finiti. L'obiettivo era tradurre la complessa geometria architettonica e strutturale dell'opera in parametri di input (sezioni) che il software di calcolo potesse interpretare correttamente per la valutazione delle rigidzze globali. Attraverso il modulo di gestione delle sezioni (Section Data), si sono adottate strategie differenziate per le tre parti fondamentali dell'opera: la torre, l'impalcato e il sistema di sospensione. Per quanto riguarda la struttura di elevazione, identificata come "TORRE FINALE", la necessità primaria era rappresentare la variazione di sezione lungo l'asse verticale, caratteristica distintiva dell'opera. Anziché utilizzare una sezione prismatica costante, ho implementato una sezione di tipo Tapered (a variazione parametrica). Come si evince dai pannelli di input, si sono definite le due estremità geometriche del pilone: una base massiccia (i-Node) con dimensioni esterne di 28x16 m e una sommità più snella (j-Node) di 12x9 m. Il software ha interpolato linearmente le proprietà tra questi due estremi, garantendo una distribuzione delle rigidzze e delle masse fedele alla realtà fisica del pilone. Per l'impalcato, la strategia è stata necessariamente diversa a causa della forma aerodinamica e non standard della sezione trasversale. Non potendo ricorrere a geometrie di libreria predefinite, si è modellato l'impalcato scomponendolo in tre macro-elementi longitudinali: le due ali laterali (ALA SX e ALA DX) e la spina centrale (ALA C). Per questi componenti come si evince dalle immagini si è utilizzato l'approccio General Section (o Value Mode), che ha permesso di inserire direttamente le proprietà inerziali esatte (Area, Costante Torsionale I_{xx} , Momenti d'inerzia I_{yy} e I_{zz}) calcolate in fase di

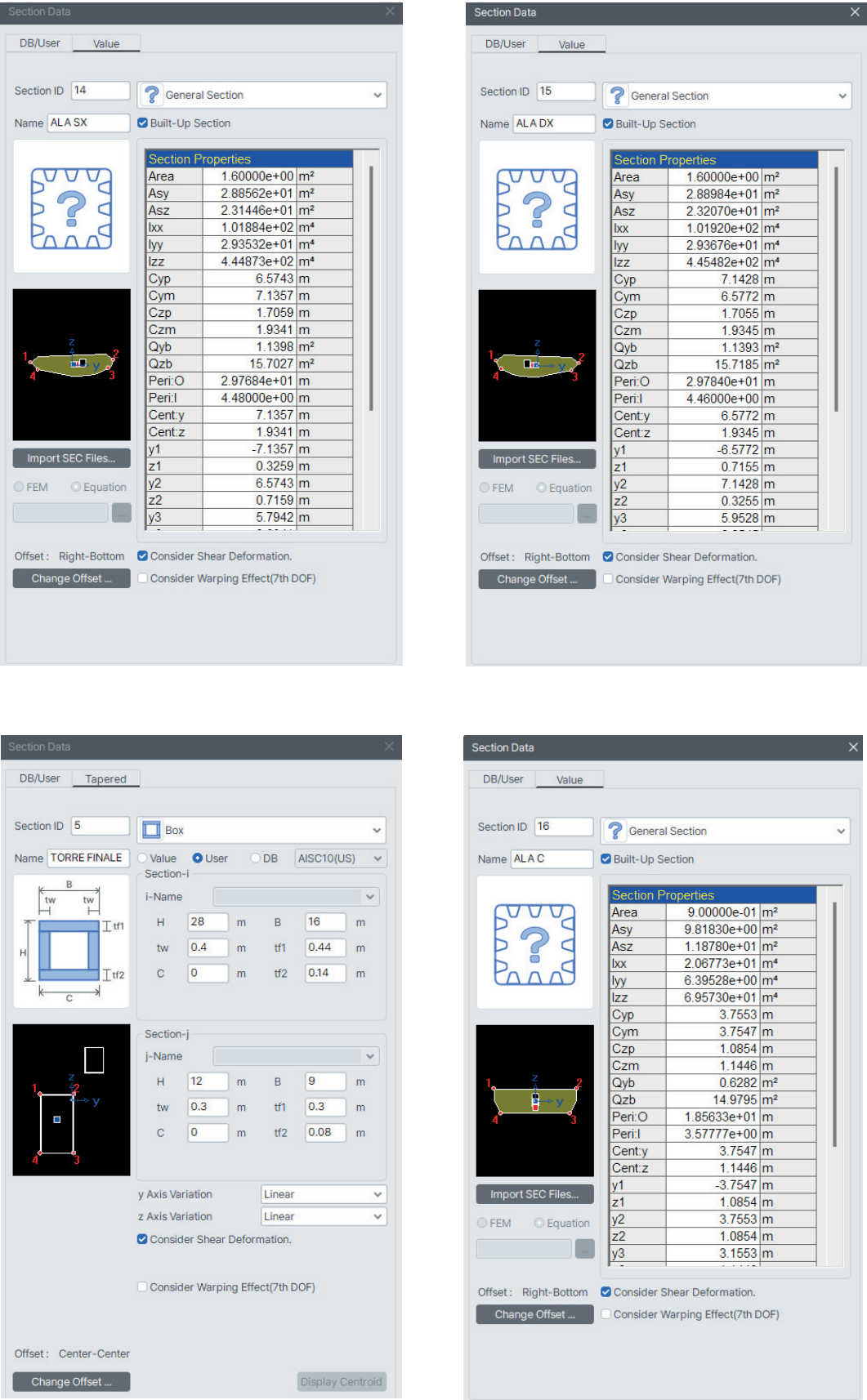
pre-processing. Particolare attenzione è stata posta alla definizione dei baricentri e degli offset, visibili nelle figure, essenziali per assicurare che i tre elementi lavorino congiuntamente come un unico corpo rigido torsionale.

Infine, per il sistema di sospensione, si è cercato una modellazione che privilegiasse la chiarezza del comportamento assiale.

Sia per le funi principali ("FUNI") che per gli elementi di sospensione secondari (SOSPESI), si sono adottate sezioni tubolari (Pipe). Questa scelta operativa ha permesso di assegnare l'area resistente equivalente corretta (rispettivamente con $\varnothing = 2,0$ m e $\varnothing = 0,22$ m), semplificando la geometria ma mantenendo intatta la capacità portante e la rigidezza estensionale degli elementi tesi.

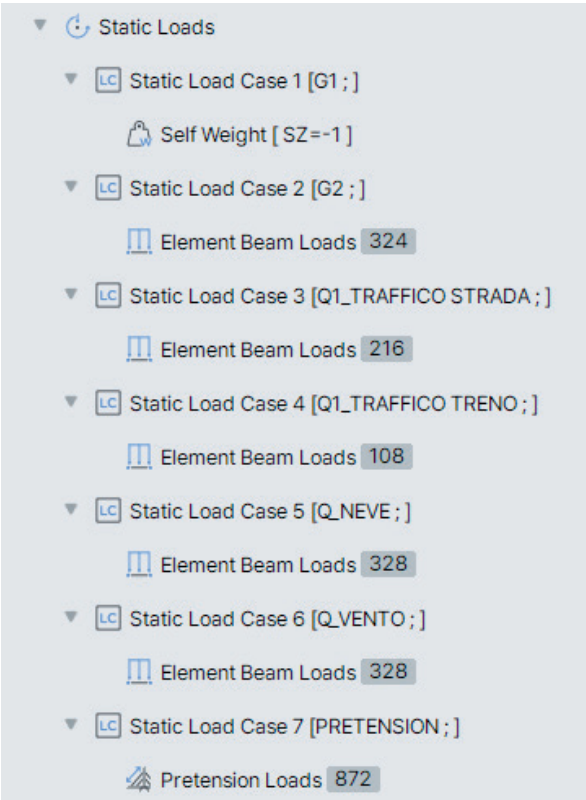


a15



a16

In seguito alla modellazione si è passati all'applicazione dei carichi utilizzando i valori trovati in precedenza.



La “pretension” – non calcolata manualmente – riveste un ruolo fondamentale, necessaria all'**attivazione della rigidezza geometrica** e per il **controllo delle configurazioni della deformata**. L'applicazione di tale carico è inoltre propedeutica all'analisi non lineare geometrica (P-Delta), poiché garantisce che la matrice di rigidezza tangente iniziale sia correttamente formata e stabile prima dell'applicazione dei carichi variabili da traffico e ambientali. Essa viene differenziata tra le funi principali con una forza pari a 15.000 kN e i pendini con una forza pari a 2500 kN.

STATI LIMITE ULTIMI (SLU)

Gli **Stati Limite Ultimi (SLU)** rappresentano le condizioni oltre le quali la struttura perde la propria capacità portante o la stabilità globale, dando luogo a fenomeni di collasso, rottura o meccanismi strutturali non compatibili con la sicurezza dell'opera.

- Ai fini delle verifiche degli stati limite, si definiscono le seguenti combinazioni delle azioni.
- Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (SLU):
$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.1]
 - Combinazione caratteristica, cosiddetta rara, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili:
$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.2]
 - Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:
$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{12} \cdot Q_{k2} + \psi_{13} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.3]
 - Combinazione quasi permanente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine:
$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$
 [2.5.4]
 - Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E:
$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$
 [2.5.5]
 - Combinazione eccezionale, impiegata per gli stati limite ultimi connessi alle azioni eccezionali A:
$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$
 [2.5.6]
- Gli effetti dell'azione sismica saranno valutati tenendo conto delle masse associate ai seguenti carichi gravitazionali:
- $$G_1 + G_2 + \sum_j \psi_{2j} Q_{kj} \quad [2.5.7]$$

SLU		
γ_{G_1}	1,35	–
γ_{G_2}	1,35	–
γ_{Q_1}	1,35	–
$\gamma_{G_{neve}}$	1,5	–
ψ_{neve}	0,5	–
$\gamma_{G_{vento}}$	1,5	–
ψ_{vento}	0,5	–
$\psi_{1,Q1}$	0,2	–

TRAFFICO DOMINANTE

$SLU = \gamma G1 * (G1 + G2) + \gamma Q1 * Q1 + (\gamma G_{vento} * \psi_{vento} * Q_{vento}) + (\gamma G_{neve} * \psi_{neve} * Q_{neve})$

$SLU = 21,49 * 10^6 \text{ kN}$

$N_{ed} = SLU = 21,49 * 10^6 \text{ kN}$

SISMA DOMINANTE

$SLU_2 = G1 + G2 + Q_{sisma} + (0,2 * Q1)$

$SLU_2 = 16,98 * 10^6 \text{ kN}$

SLU - PARAMETRI FONDAMENTALI		
diametro fune principale	2.000	mm
diametro pendini	240	mm
fyk	1.860.000	kN/m²
fyk impalcato	550.000	kN/m²
fyk torre	450.000	kN/m²
γM	1,1	-
Luce totale	3.300	m

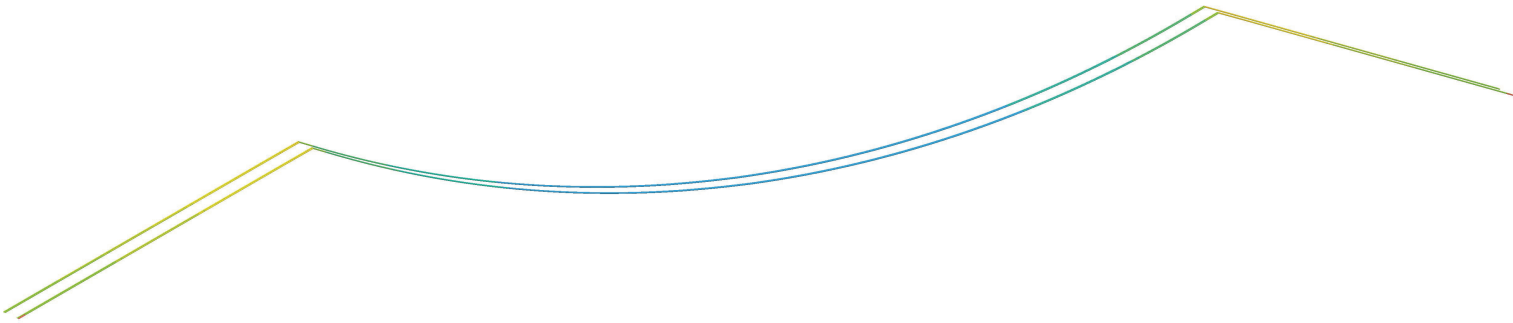
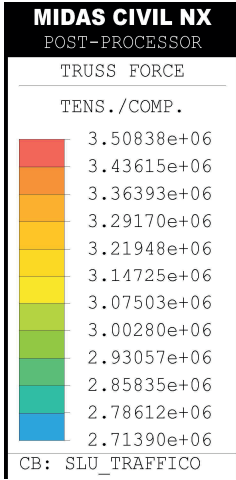
VERIFICA A TRAZIONE - Cavi

$N_{Ed} = 3,5 * 10^6 \text{ kN}$

$N_{Rd} = (3,14 * r^2) * f_{yk} / \gamma M = 5,31 * 10^9 \text{ kN}$

$N_{Ed} < N_{Rd}$

VERIFICATO

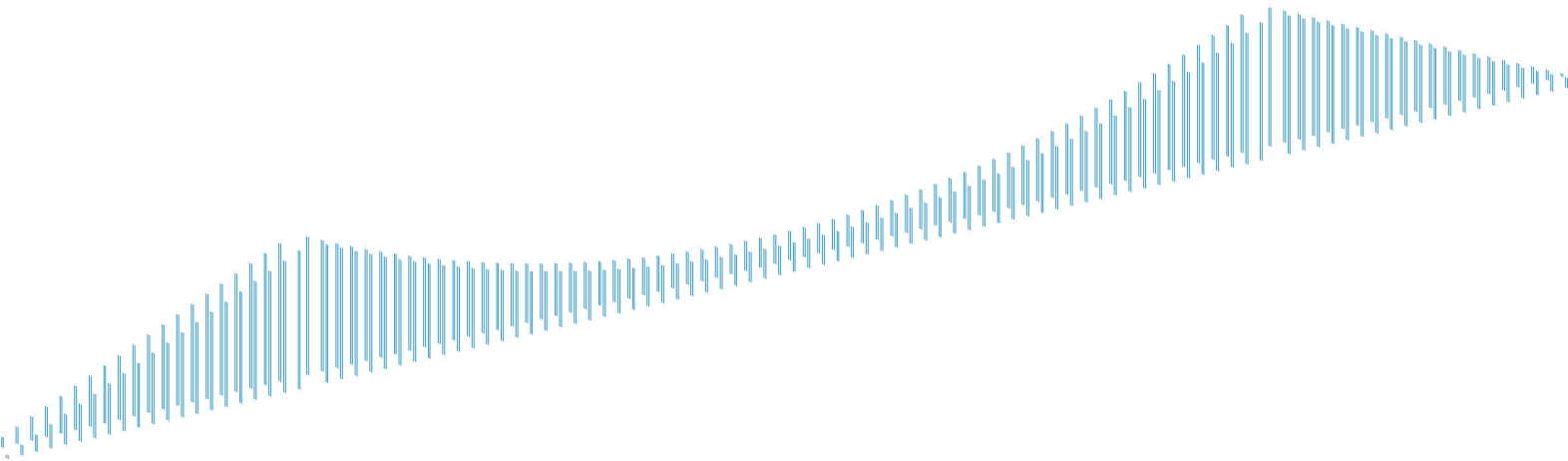
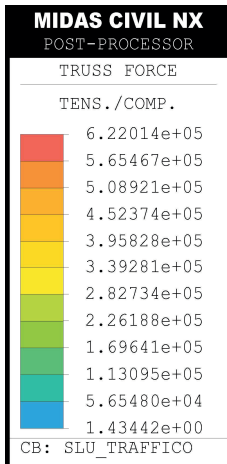


Sforzo dei tralicci (stralli maggiori) in condizione di SLU - Forza Assiale

VERIFICA A TRAZIONE – Pendini

$$N_{Ed}=6,22\cdot10^5\text{ kN}$$
$$N_{Rd}=(3,14\cdot r^2)\cdot f_{yk})/\gamma_M = 7,65\cdot10^7\text{ kN}$$
$$N_{Ed} < N_{Rd}$$

VERIFICATO



Sforzo dei tralicci (pendini) in condizione di SLU – Forza Assiale

VERIFICA A PRESSOFLESSIONE – Torri

$$N_{Ed}=8,46\cdot10^9\text{ kN}$$
$$N_{Rd}=A\cdot(f_{yk}_{torre}/\gamma_M)\cdot1000 = 3,67\cdot10^{10}\text{ kN}$$
$$M_{Ed}=4,96\cdot10^9\text{ kN}$$
$$M_{Rd}=W_{el}\cdot(f_{yk}_{torre}/\gamma_M)\cdot1000 = 2,01\cdot10^{10}\text{ kN}$$

$$I_{yy}=3,94\cdot10^3\text{ m}^4$$

dato midas

$$z_{max}=8\text{ m}$$

dato midas

$$A=89,6\text{ m}^2$$

dato midas

$$W_{el}=I_{yy}/z_{max}=4,93\cdot10^2\text{ m}^3$$

$$(N_{Ed}/N_{Rd}) + (M_{Ed}/M_{Rd}) < 1$$

VERIFICATO

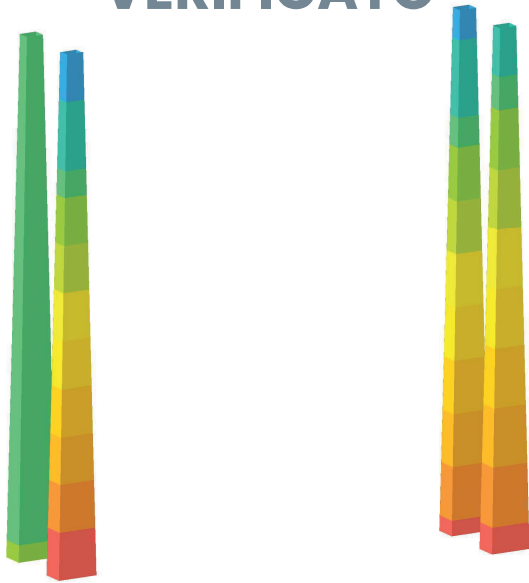
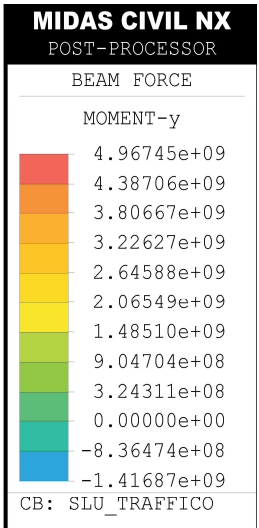


Diagramma delle deformazioni dell’impalcato in condizione di SLU – Forza Assiale



VERIFICA A PRESSOFLESSIONE - Impalcato

$N_{Ed}=3,67 \cdot 10^6 \text{ kN}$

$N_{Rd}=A_{tot} \cdot (f_{yk_{torre}}/\gamma_M) \cdot 1000 = 2,75 \cdot 10^7 \text{ kN}$

$M_{Ed}=7,13 \cdot 10^6 \text{ kN}$

$M_{Rd}=W_{el} \cdot (f_{yk_{impalcato}}/\gamma_M) \cdot 1000 = 1,47 \cdot 10^7 \text{ kN}$

$I_{yy}=29,36 \text{ m}^4$
dato midas

$z_{max}=2 \text{ m}$
dato midas

$A=20+20+15= 55 \text{ m}^2$
dato midas dato da area cassone di destra, cassone di sinistra e cassone centrale

$W_{el}=I_{yy}/z_{max}/2=29,36 \text{ m}^3$

$(N_{Ed}/N_{Rd}) + (M_{Ed}/M_{Rd}) < 1$

VERIFICATO

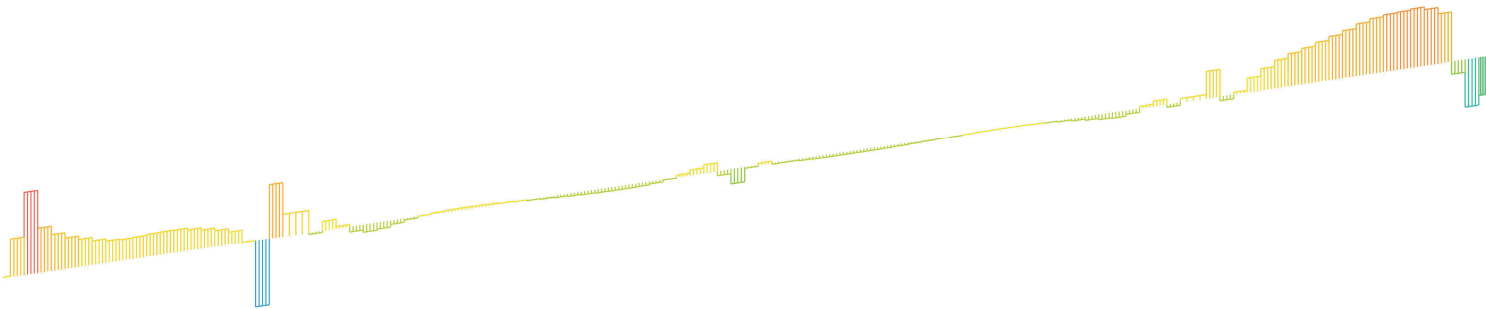


Diagramma delle deformazioni dell'impalcato in condizione di SLU - Forza Assiale

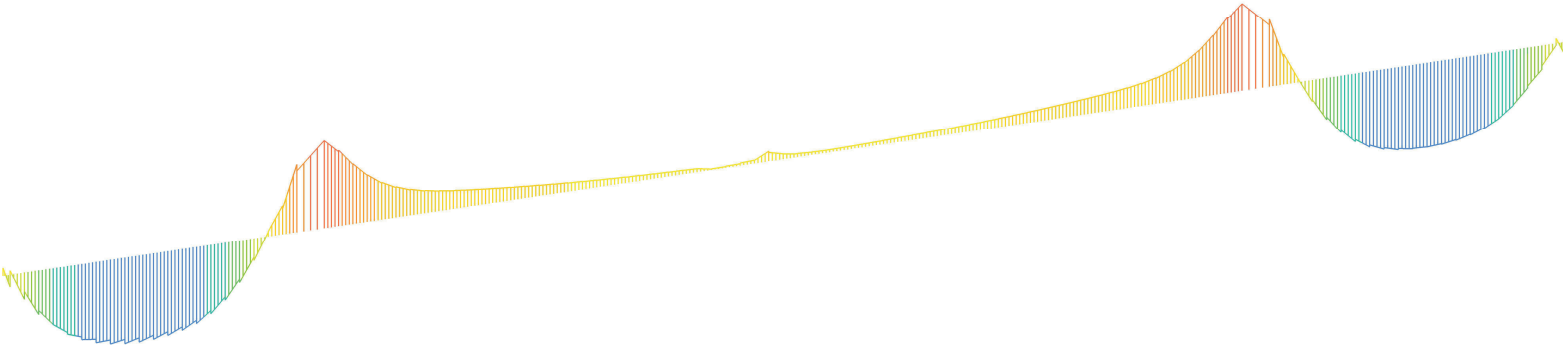


Diagramma delle deformazioni dell'impalcato in condizione di SLU - Momento

Flettente

VERIFICA DELLA TENSIONI

SLE – RARA		
fyk	1.860.000	kN
fyd	523.809,52	kN
γM	1,05	–
τRd	1.022.734,76	kN

TENSIONE COMBINATA MASSIMA

$\sigma_{Ed} = 5,17 \cdot 10^5 \text{ kN}$

$\sigma_{Ed} < f_{yd}$

VERIFICATO

Tensione combinata massima su impalcato per SLU

TENSIONE TAGLIO MASSIMA

$\tau_{Ed} = 6,31 \cdot 10^4 \text{ kN}$

$\tau_{Ed} < \tau_{Rd}$

VERIFICATO

Tensione taglio massima su impalcato per SLU

STATI LIMITE DI ESERCIZIO (SLE)

Gli **Stati Limite di Esercizio (SLE)** descrivono invece le condizioni di normale utilizzo della struttura, considerando deformazioni, vibrazioni, fessurazioni e altri fenomeni che possono compromettere la funzionalità o il comfort degli utenti: queste azioni sono combinate con meno fattori rispetto agli SLU, in modo da verificare che la struttura resti adeguatamente performante durante l’esercizio.

SLE – RARA		
ψ_{neve}	0,5	–
ψ_{vento}	1,5	–
SLE – FREQUENTE		
ψ_{neve}	0,0	–
ψ_{vento}	0,4	–

COMBINAZIONE RARA

SLE= G1 + G2 + Q1+ $\psi_{0,w}$ *Fw + $\psi_{0,neve}$ *Fneve

SLE= 15.92*10⁶ kN

F_{SLE} = SLE= 15.92*10⁶ kN

COMBINAZIONE FREQUENTE

SLE= G1 + G2 + $\psi_{1,w}$ *Fw + $\psi_{1,neve}$ * Qneve

SLE= 15.31*10⁶ kN

F_{SLE} = SLE= 15.31*10⁶ kN

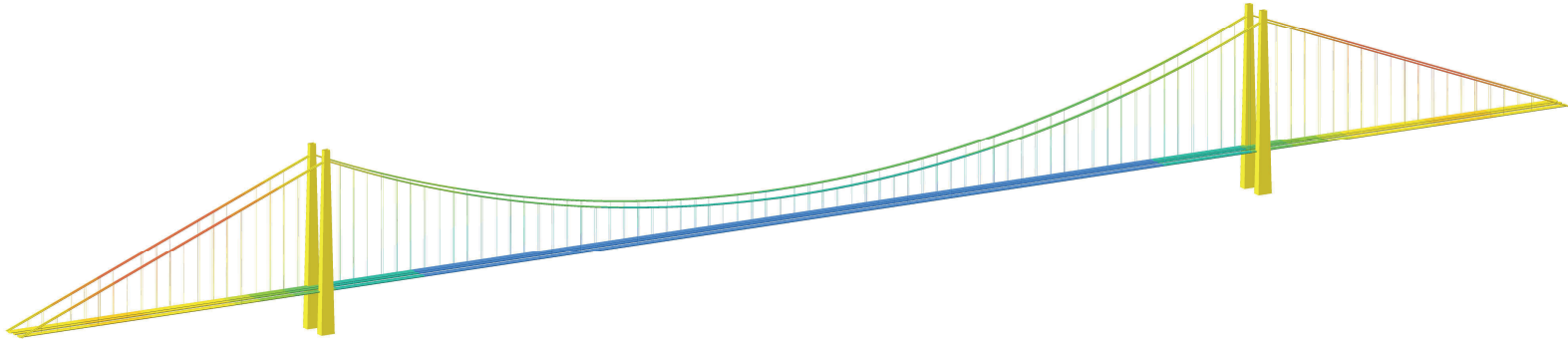
VERIFICA DELLA DEFORAZIONE – Controllo Frecce

d_z=6,38 m

δ_{max} = 8,25 m

d_z < δ_{max}

VERIFICATO



Deformazioni struttura per SLE – Rara

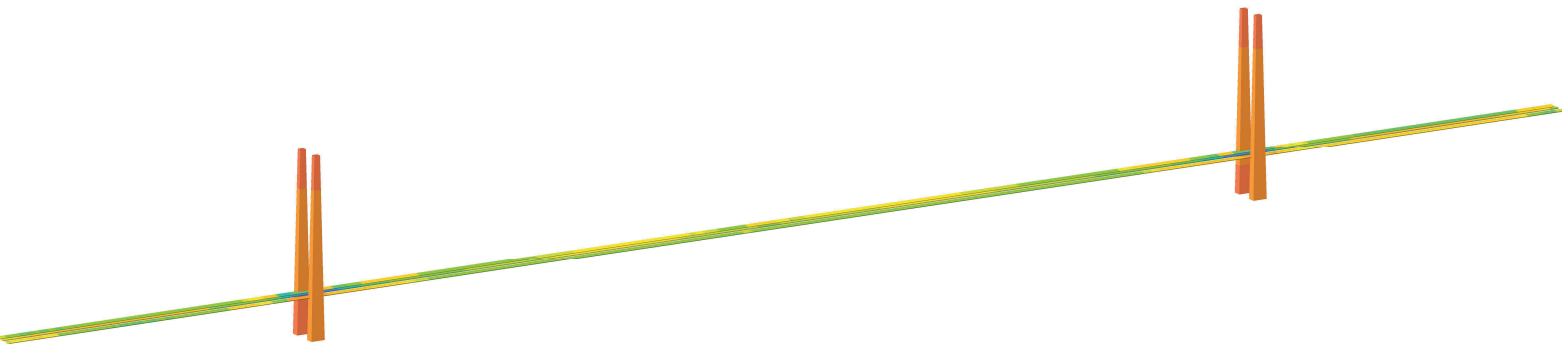
VERIFICA DELLA TENSIONI – Tensione massima

$d_{Ed} = 3,76 \cdot 10^5 \text{ kN}$

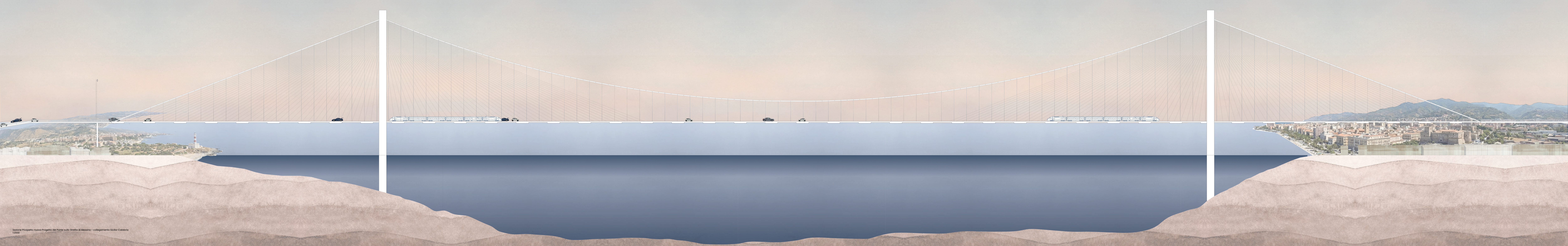
$\sigma_{amm} = 1,48 \cdot 10^6 \text{ kN}$

$d_z < \sigma_{amm}$

VERIFICATO



Deformazioni elementi trave per SLE – Rara



15.04.25
02.02.26