

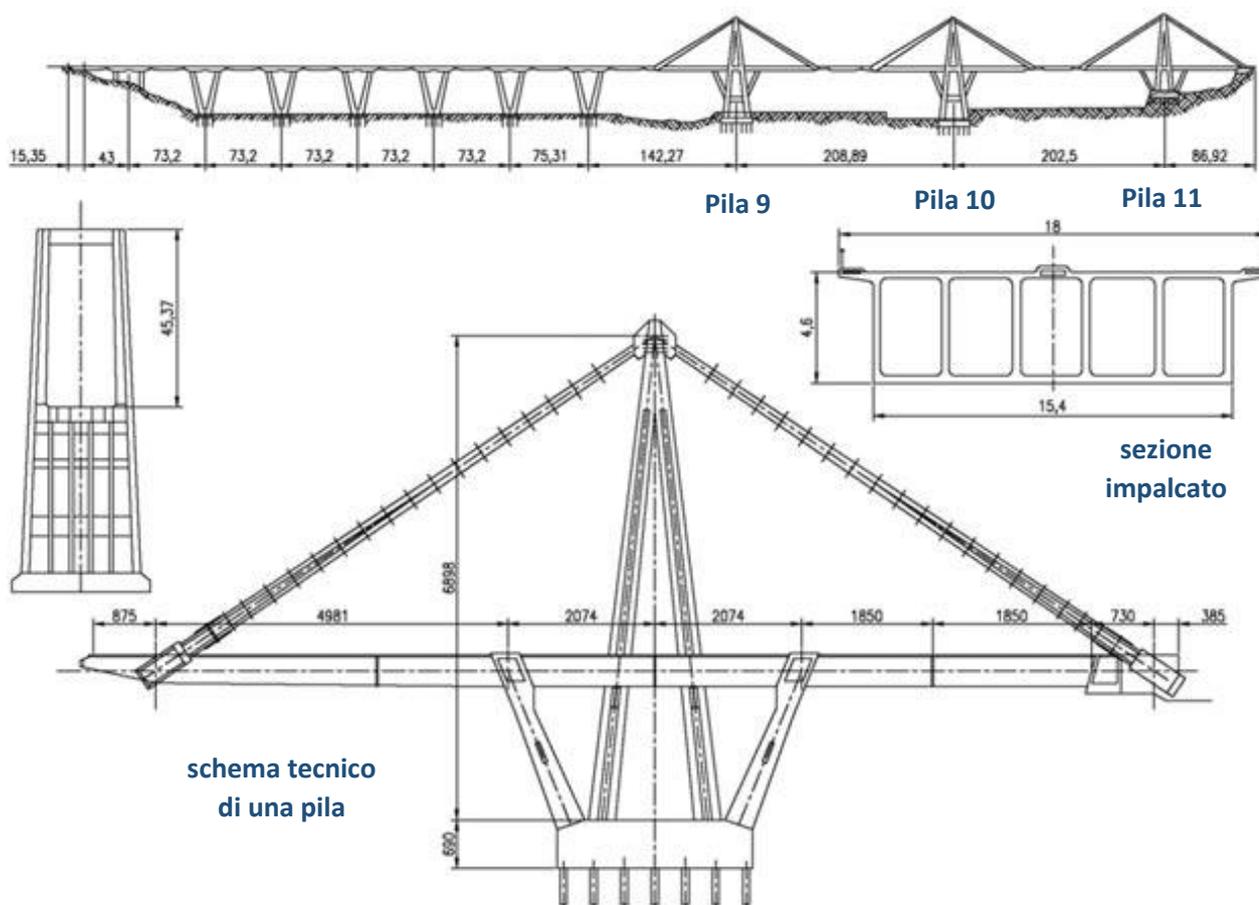
Il meccanismo di rottura del Ponte Morandi di Genova

(revisione febbraio 2020)

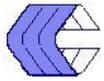
Il ponte era in esercizio dal 1967, ed aveva subito nel tempo opportuni interventi di manutenzione, tra i quali la completa ristrutturazione dei tiranti della Pila n. 11, a compensare il deterioramento avanzato dell'armatura metallica interna al calcestruzzo.

Per formulare una ipotesi sul meccanismo del crollo del Ponte Morandi di Genova, avvenuto il 14 agosto del 2018, mi sono avvalso di documenti ed immagini facilmente reperibili sul web, citandone il relativo indirizzo.

Al seguente link <https://www.ingenio-web.it/20897-crolla-il-ponte-morandi-a-genova-problema-strutturale-ma-perche> ho trovato uno schema di progetto del ponte, utile a visualizzarne le caratteristiche dimensionali principali.

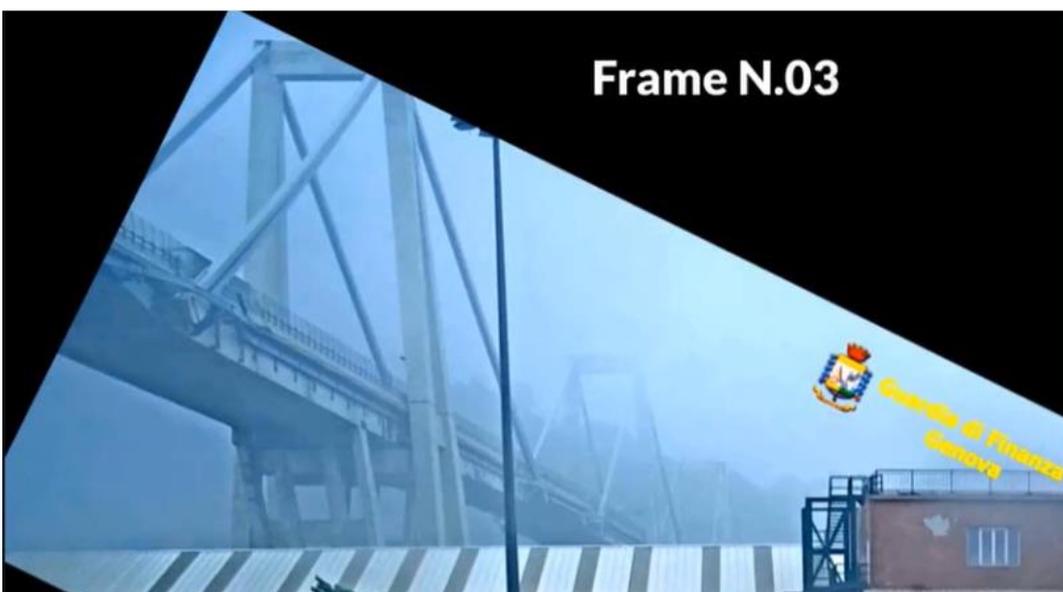


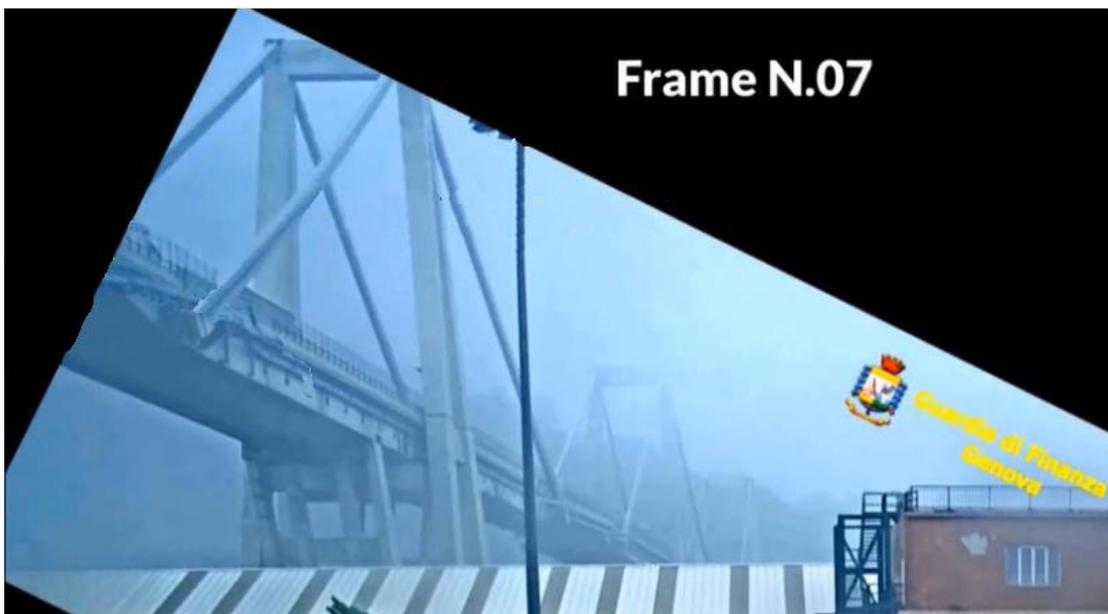
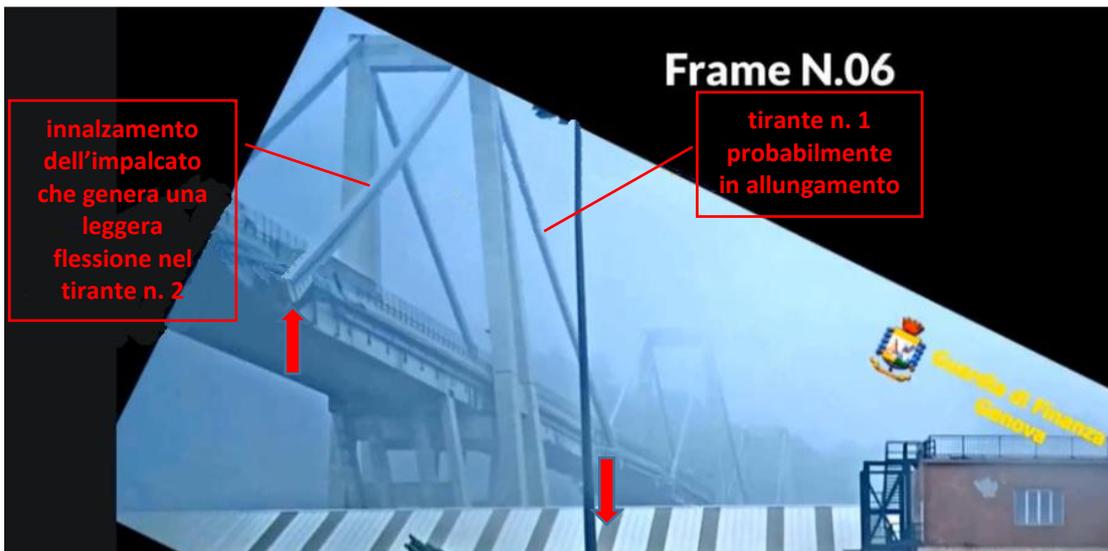
Per l'analisi ingegneristica che segue, al di là dei molteplici pareri degli esperti del campo, tutti informati alla massima cautela, ho trovato utile il videoclip comparso in linea, inizialmente sequestrato dalla Guardia di finanza, e successivamente reso pubblico su autorizzazione dell'Autorità giudiziaria, visibile al link <https://youtu.be/a-LfXohbn0U>, rielaborato e frammentato in un video reperibile all'indirizzo <https://youtu.be/8B0zc2TUgmc> dal titolo "Anomalie video crollo Ponte Morandi a 3fps (Ferrometal)".



Per procedere con attenzione nell'osservazione degli istanti a cavallo del tragico evento, ho estrapolato dal video citato i frames (fotogrammi), analizzandoli ed indicandovi le notazioni significative. I frames saltati sono stati ritenuti poco significativi per la comprensione del meccanismo di rottura.

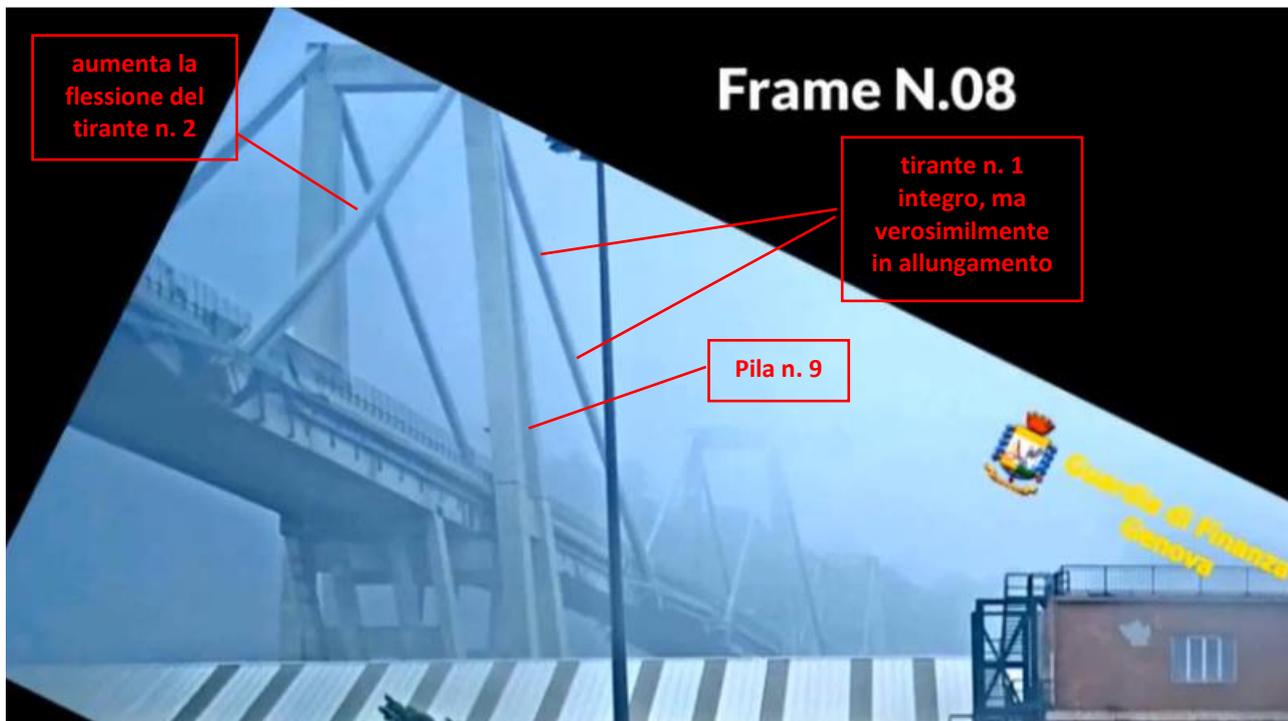
Frames n. 1 ~ 8: il crollo sta per avvenire



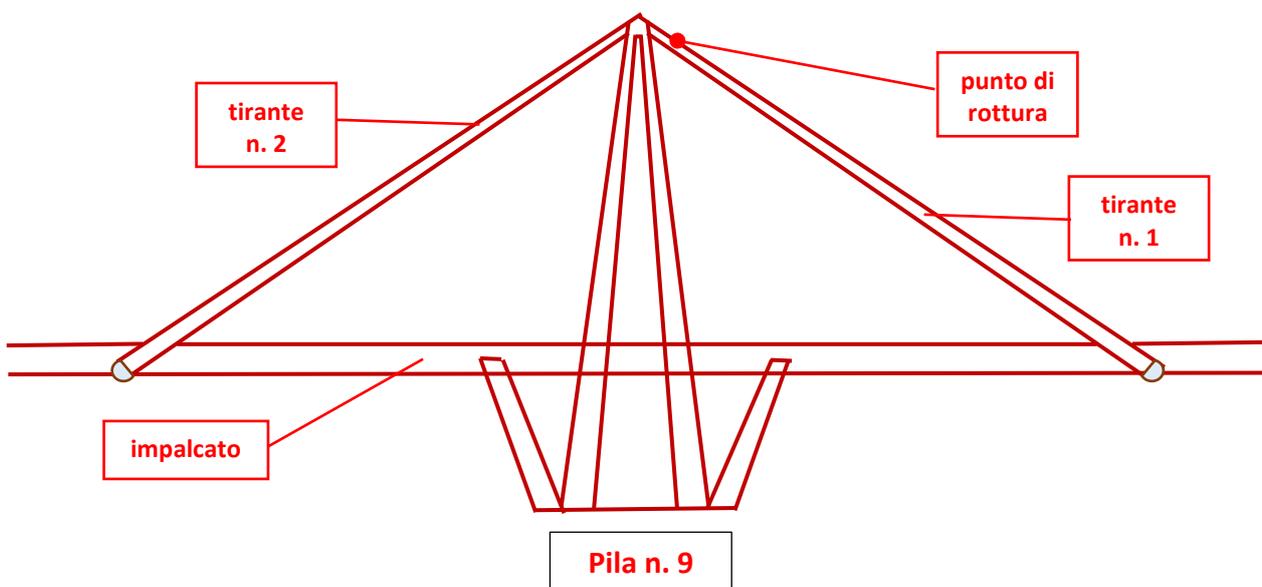


INIZIA IL CEDIMENTO DEL PONTE

Nel seguente Frame n. 08 i tiranti sono ancora integri, pur se imminente il cedimento del tirante n. 1 (notare la differenza del suo livello di attaccatura alta tra il Frame n. 08 ed il successivo Frame n. 09).

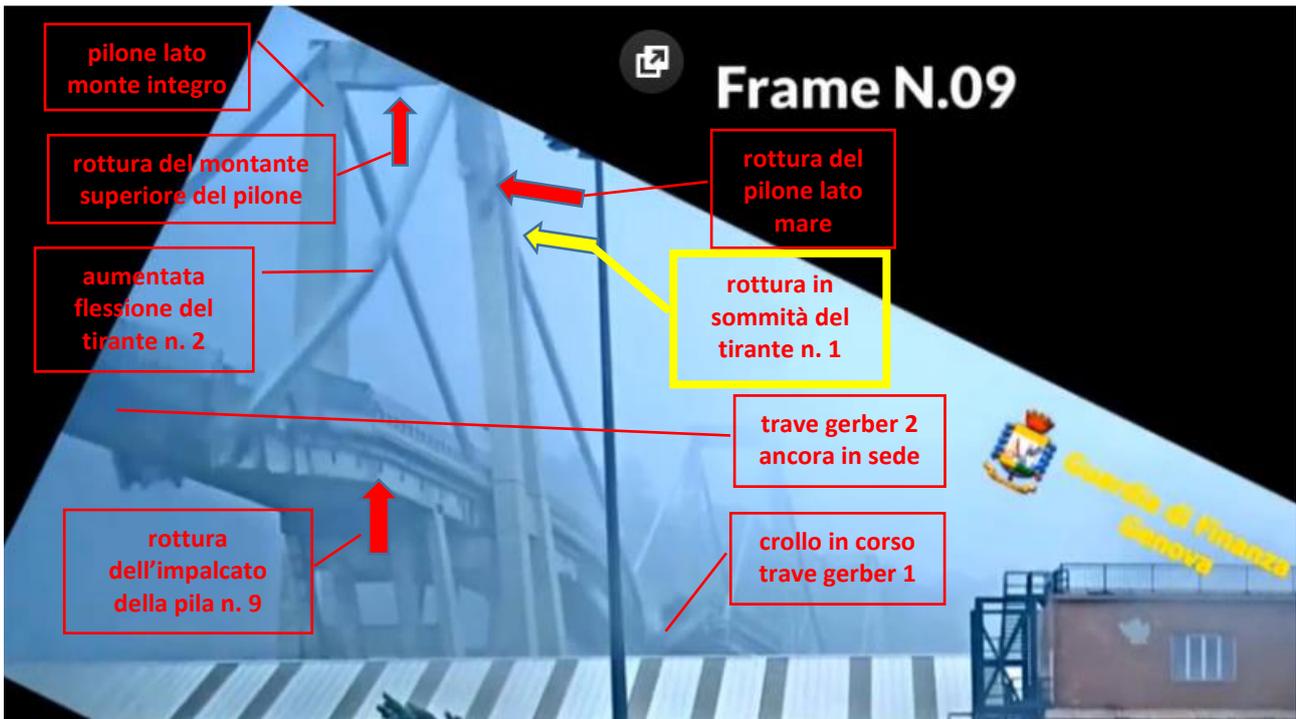


Il cedimento strutturale sembrerebbe avviato dalla rottura dei cavi in acciaio interni al tirante n. 1 lato mare, credibilmente corrosi nel tempo dalle infiltrazioni d'acqua insinuatesi nelle fessurazioni del calcestruzzo posto tutt'intorno a protezione.

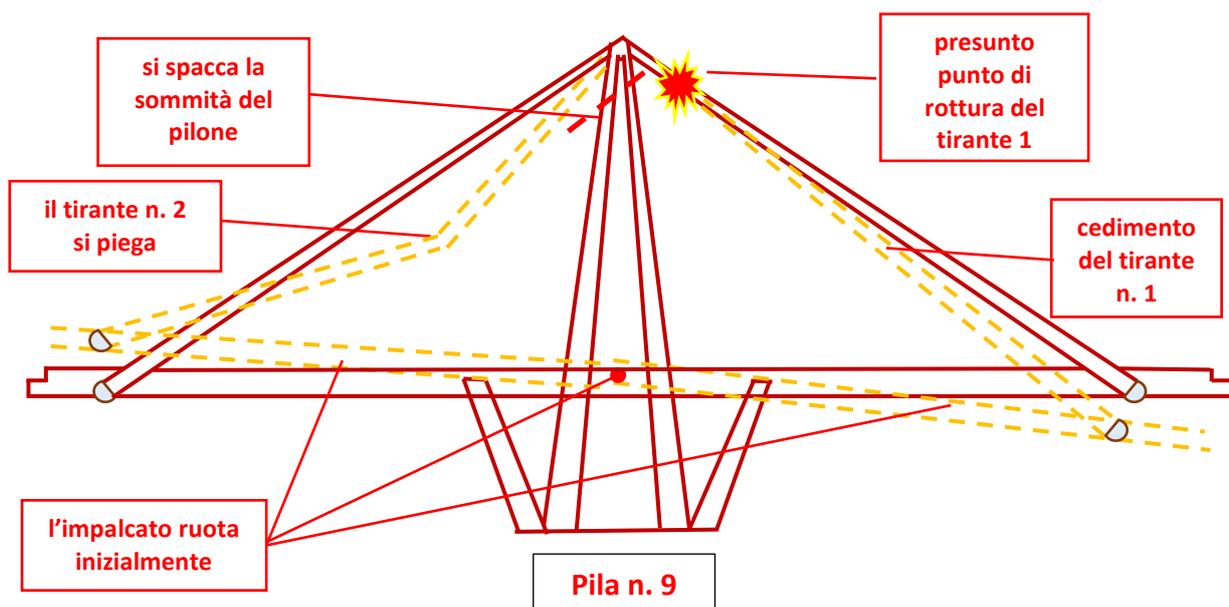


Schema strutturale della Pila n. 9

Inizio del crollo del ponte



Verosimilmente, cede in sommità il tirante lato mare indicato col n. 1 della Pila n. 9: viene così meno l'equilibrio tra i lati a "bilancia" del ponte. Cede la sommità del pilone, trascinato dal tirante n. 2 ancora collegato, non essendo in grado di contrastare l'imprevisto momento flettente. Per il venir meno di un supporto, l'impalcato stradale, che stava già basculando intorno alla pila n. 9 per il presumibile allungamento del tirante n. 1 prima della rottura, torce ed inizia a rompersi. Il crollo avviato della trave gerber n. 1, quando la corrispondente trave gerber n. 2 è ancora in sede, avvalorava l'ipotesi del cedimento del tirante n. 1 quale evento iniziale del crollo.



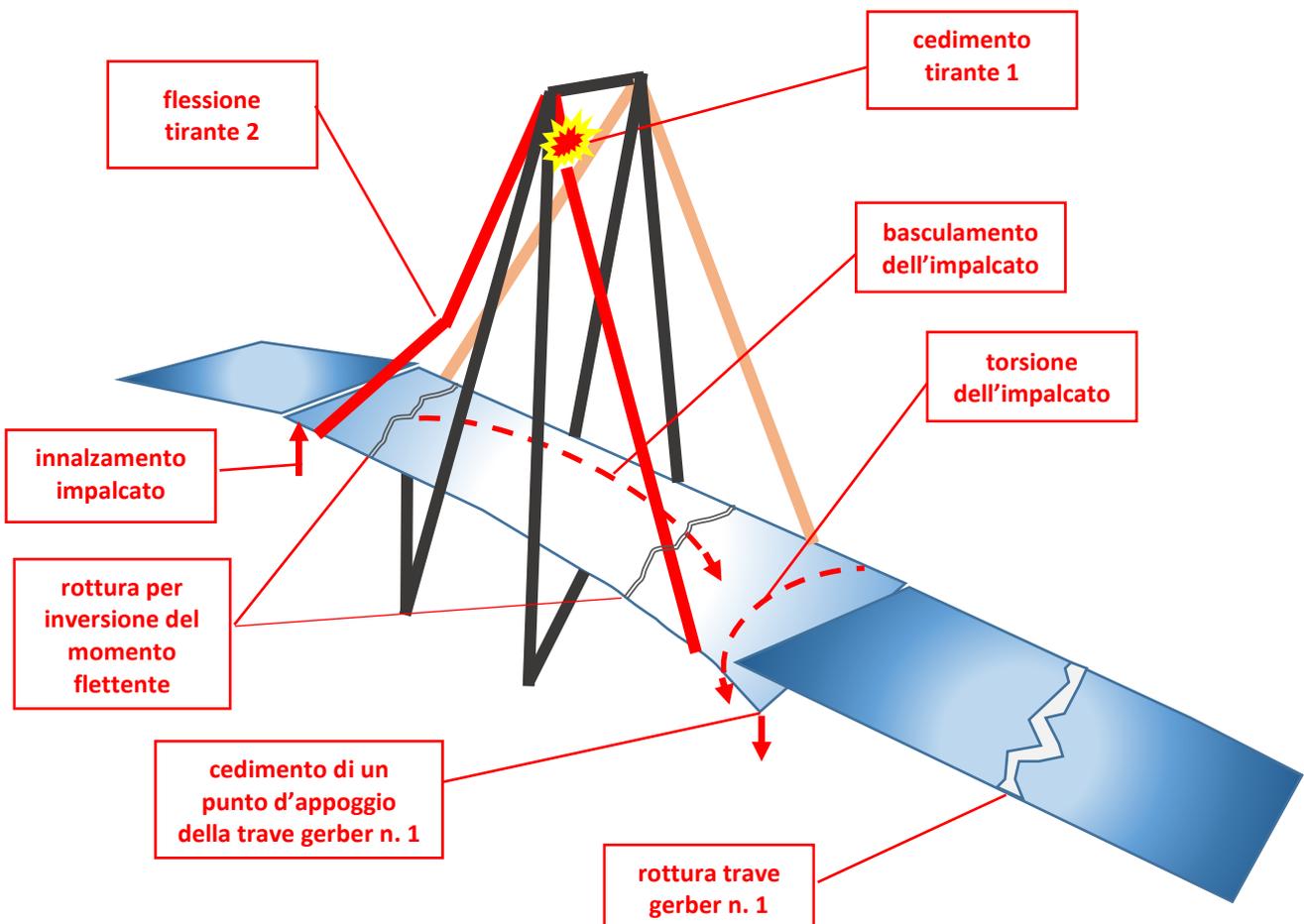
ipotesi di rottura della Pila n. 9

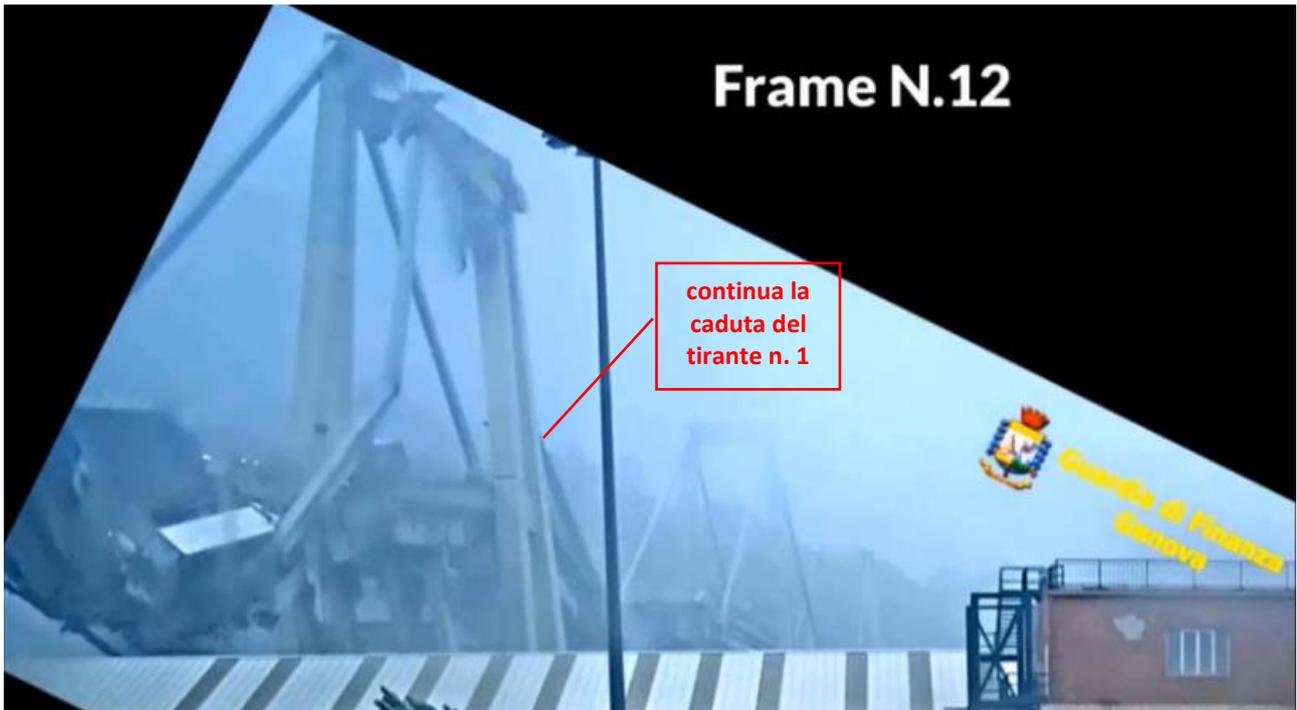
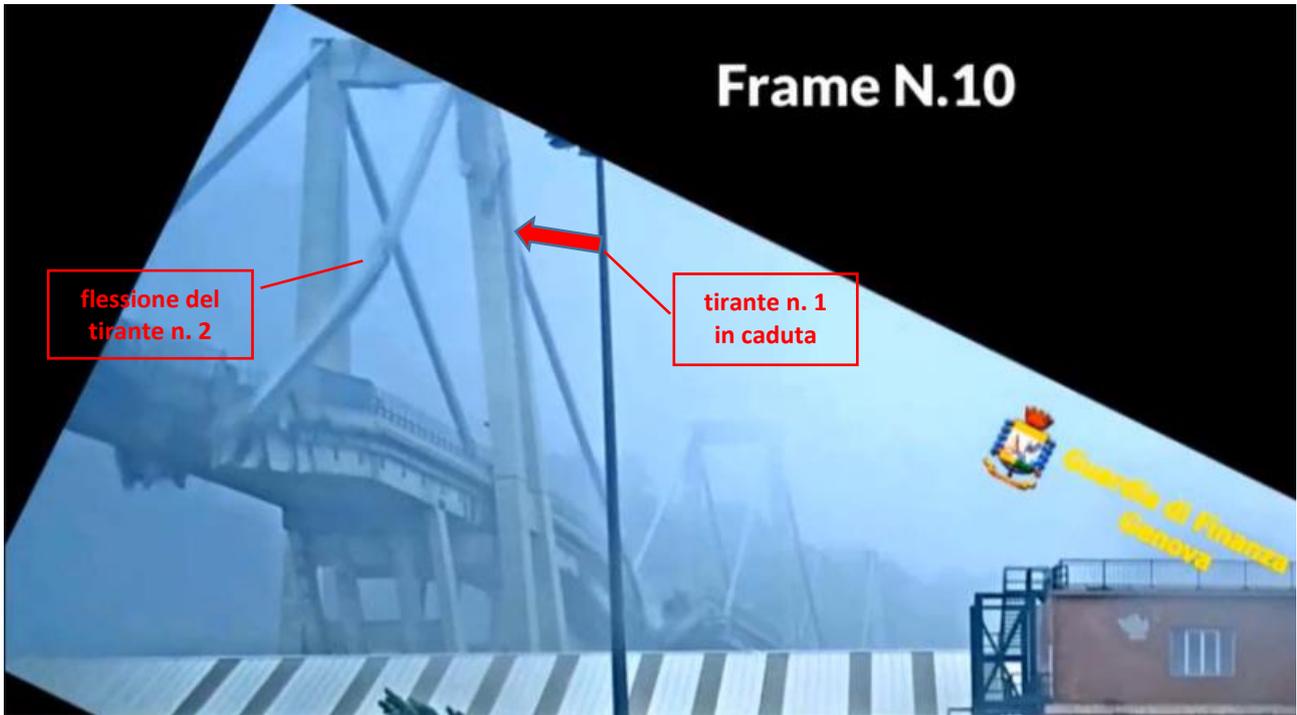
In effetti, dai fotogrammi disponibili, potrebbero apparire due le cause possibili del crollo:

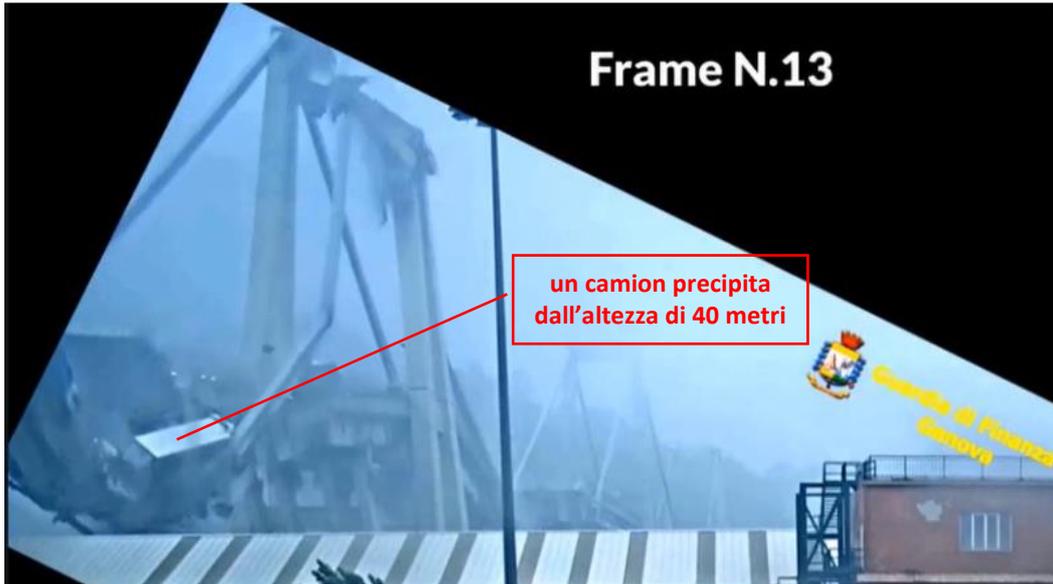
- 1) *La rottura lato mare della sommità della pila n. 9, da ritenere poco probabile;*
- 2) *La rottura iniziale del tirante n. 1, che sembra essere il motivo reale.*

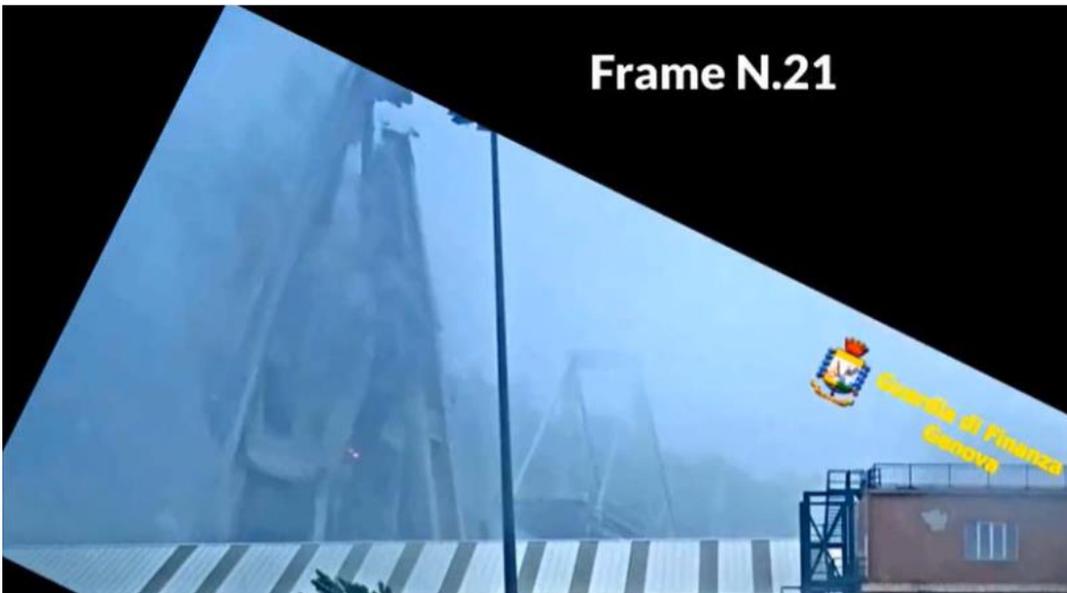
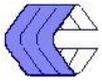
Infatti gli elementi a sostegno della seconda ipotesi quale causa primaria sono:

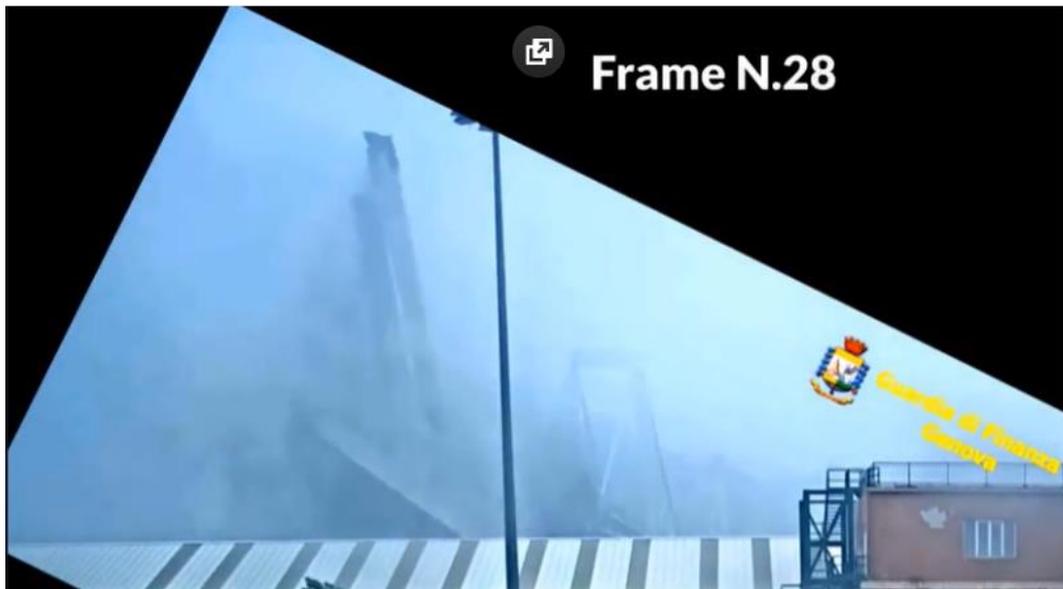
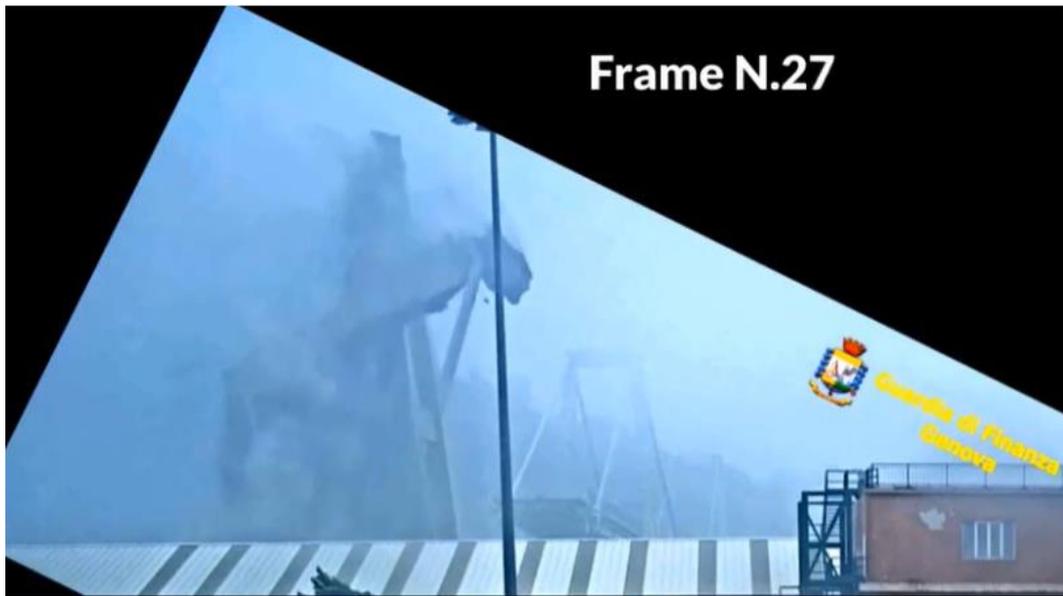
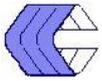
- a) La flessione del tirante n. 2 evidente già prima del crollo (dovuta all'innalzamento dell'impalcato del ponte lato trave gerber n. 2, causato dall'allungamento in corso del tirante n. 1 prima della definitiva rottura);
- b) L'evidente distacco già avvenuto del tirante n. 1 dalla sommità della Pila 9 (Frames n. 09 e segg.): mentre gli altri tre stralli sono ancora agganciati alla cima.
- c) La posizione in sede della trave gerber n. 2, ancora integra, mentre è già avvenuta la rottura della trave gerber n. 1 (vedi Frame n. 09). Simultaneamente allo strappo del tirante n. 1 quest'ultima trave cede per prima perché, a causa della torsione dell'impalcato privato di uno strallo, resta sostenuta solo da tre appoggi, invece dei quattro previsti in progetto.
- d) L'eventuale spaccatura iniziale della sommità della Pila n. 9 avrebbe determinato il simultaneo crollo delle due travi gerber.

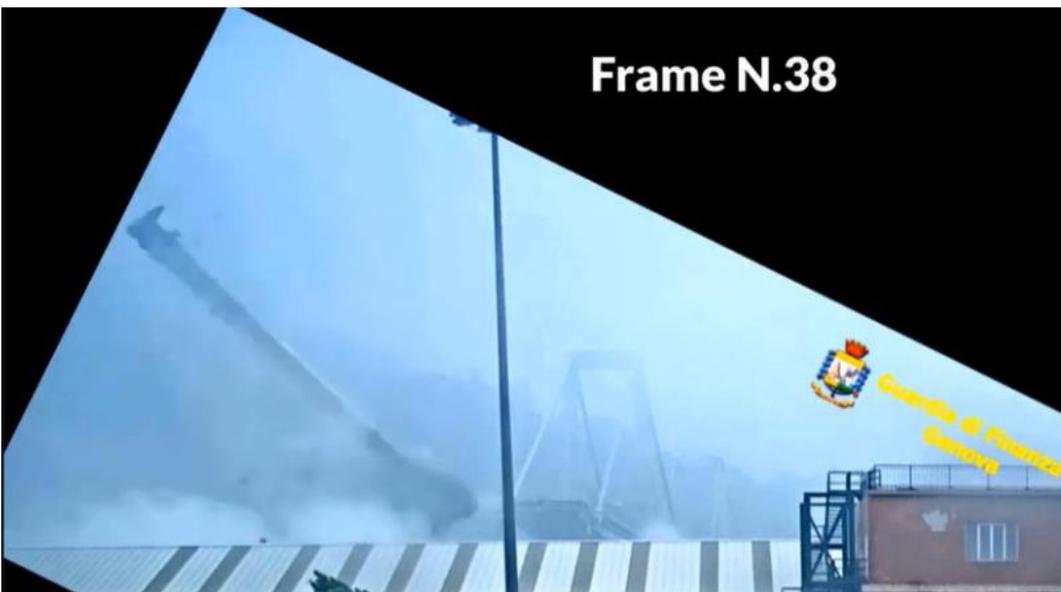
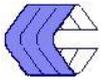






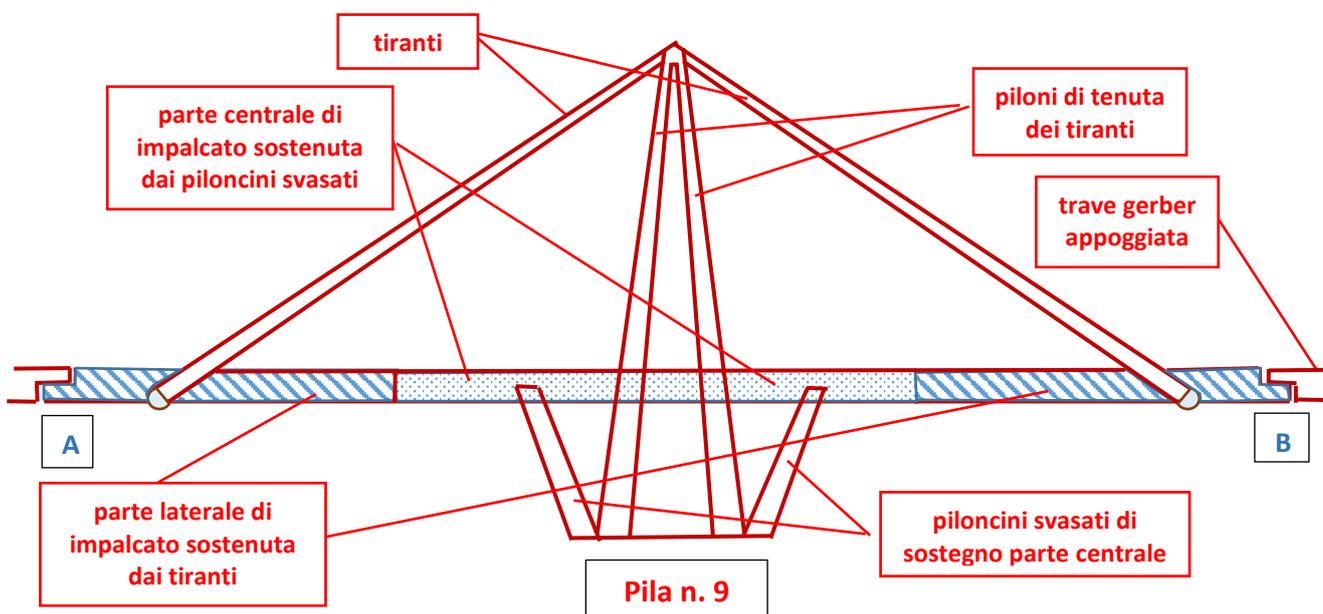






Il cedimento strutturale del tirante n. 1 della Pila 9 ha verosimilmente determinato il cedimento a catena dell'insieme Pila-impalcato, e il crollo non contemporaneo delle due travi gerber appoggiate alle estremità dell'impalcato solidale alla Pila n. 9; impalcato che, privo del tirante di sostegno n. 1, si piega su se stesso, flette, torce, e crolla insieme al resto del ponte.

In una intervista reperibile sul web il progettista ing. Morandi, spiega molto bene il funzionamento strutturale della sua creatura. I piloni alti centrali servono a mantenere l'equilibrio ed a sostenere i due tiranti laterali, ai quali compete il sostegno delle parti estreme dell'impalcato stradale , mentre il sostegno della parte centrale della sede stradale indicata con  spetta ai due piloncini centrali svasati.



Da alcune immagini risalenti alla costruzione del ponte si nota che la parte di impalcato, individuabile dal punto **A** al punto **B** è stato progettato per essere autosostentante anche in mancanza degli stralli laterali (tiranti), ma in assenza di carichi. Ciò porta alla considerazione che il sovraccarico fisso delle barriere di protezione in calcestruzzo (New Jersey), sommato al carico accidentale dei veicoli circolanti in quel momento, oltre al peso delle due travi gerber posizionate alle estremità, abbiano potuto generare la trazione sufficiente a determinare la rottura del tirante 1.

Ing. Giovanni Corrao

14 agosto 2019

in memoria dei 43 deceduti

(revisione del 27 febbraio 2020)



La relazione progettuale dell'ing. Riccardo Morandi

MORANDI Riccardo L. F. S.

PROG. N. FOGLIO N. 1

ORIG. FEBBR,

IL VIADOTTO DEL POLCEVERA
DELL'AUTOSTRADA GENOVA - SAVONA

ROMA, 25 AGOSTO 1967

DOGLIA - V.le Rinaldo 20 - Telef. 05 22 50 - Roma

PROG. N.

FOGLIO N. 2

tratto 8/9 11

Il tratto terminale, verso Genova, dell'Autostrada Savona-Genova, prima di innestarsi all'Autostrada Genova-Valle del Po e dopo aver sottopassato con una galleria la collina della Coronata, sovrappassa la Valle del Polcevera ed indi si ~~sfocia~~ *di riva* nel sistema di innesto tra le due autostrade.

L'attraversamento della Valle del Polcevera ed il dispositivo di innesto hanno obbligato alla realizzazione di una grande opera d'arte di concezione unitaria e di notevoli dimensioni ed interesse tecnico, per il fatto che si inserisce entro una zona intensamente fabbricata con edifici civili ed industriali e soprattutto interessata, oltre che dal fiume Polcevera, anche da una serie di impianti ferroviari di grande importanza.

Ovviamente tutte queste esigenze hanno condizionato la impostazione del progetto, sia per quanto si riferisce al partito statico ed alla scansione delle luci, sia per il metodo di esecuzione.-

L'opera quindi nel suo complesso può considerarsi un interessante esempio di inserimento di una grande infrastruttura entro un fitto tessuto urbano ed industriale; ~~con~~ ^{con} ~~in~~ ⁱⁿ tendimento di creare una corretta composizione anche dal punto di vista formale e paesaggistico.

Inoltre la dimensione notevole delle luci maggiori, scavalcate con strutture di notevole economicità, contribuisce a dimostrare, insieme ad altri casi consimili, la possibilità di costruzioni di opere sempre più importanti pur continuando ad adottare la tecnica e la tecnologia del calcestruzzo di cemento armato e precompresso, ovviamente trattate con sempre maggiore elaborazione.



Il viadotto, della lunghezza totale (senza i dispositivi di raccordo) di ml. 1100, è della larghezza di ml. 18,00 e corre ad una altezza di circa 45 metri al disopra della quota media del sistema viario cittadino, presentando la seguente sequenza di luci teoriche :

- 1 luce da ml. 43,00
- ~~5 luci da ml. 73,20~~
- 1 luce da ml. 75,31
- 5 luci da ml. 73,20
- 1 luce da ml. 142,65
- 1 luce da ml. 207,88
- 1 luce da ml. 202,50
- 1 luce da ml. 65,10

Il sistema delle grandi luci ricalca, nelle sue grandi linee, il tema già precedentemente risolto dal progettista nella realizzazione del ponte sul Lago di Maracaibo (Venezuela), già inaugurato nel 1962.

Gli attraversamenti sono risolti a mezzo di speciali sistemi bilanciati, in cui la travata consta di un continuo a tre luci, su quattro appoggi elastici, con sbalzi terminali all'estremità dei quali poggia la trave centrale di serraglia.

I due appoggi estremi di ciascuna travata sono costituiti dai terminali di due tiranti in acciaio pretesi, che passano al disopra di un'antenna a quattro elementi obliqui, alta ml. 42,25 al disopra del piano viabile.

Ciascuna grande pila insiste su una zattera di calcestruzzo armato, poggiata su palificate fondali costituite da pali trivellati di grande diametro, lunghi in molti casi fino a circa 40 metri.

Al disopra delle zattere si dipartono due sistemi statici distinti, simmetrici rispetto ad un comune piano assiale, e cioè :

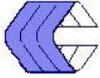
- uno speciale cavalletto di calcestruzzo armato a V composto di quattro elementi paralleli, a due braccia, collegati fra loro, sia a metà altezza che al piano dell'impalcato, per mezzo di traversi normali all'asse del viadotto ;
- un sistema di antenne a quattro gambe, a forma tronco-piramidale, con travi di collegamento longitudinale al piano di impalcato e con un trasverso in sommità.

L'impalcato è costituito da una travata continua di tipo cellulare, con una soletta estradossale e n° 6 pareti verticali dello spessore medio di cm. 22.

Le estremità delle travate presentano un robusto trasverso, sporgente dalle pareti esterne con sbalzi, ai quali risultano assicurati i già citati tiranti, che poggiano sulla sommità dell'antenna e sono costituiti da fasci di acciaio armonico coinvolti da una guaina di calcestruzzo.-

Fra le estremità delle pareti a sbalzo di due travate bilanciate consecutive, come già detto, è stata varata infine una travata della luce di ml. 36,00, semplicemente appoggiata, mediante l'interposizione di apparecchi oscillanti.-

I tre graditi sistemi bilanciati così risultanti sono indipendenti l'uno dall'altro e quindi non vengono indotte sollecitazioni nella struttura per eventuali assestamenti disuniformi delle fondazioni.-



PROG. N.

FOGLIO N. 5

La seconda parte del viadotto è costituita da una serie di speciali pile a V composte ciascuna da quattro doppi pilastri a sezione variabile, collegati a metà altezza ed in sommità da trasversi e poggianti su zattere di fondazione, fondate ugualmente su palificate a pali di grosso diametro.-

L'estremità superiore dei pilastri a V sopporta una trave della lunghezza di ml. 20,00 che si protende a sbalzo al di fuori dei pilastri stessi per ml. 7,50 da ciascun lato.-

Appoggiate agli sbalzi in questione ~~vengono~~ ^{sono} varate travi prefabbricate, di dimensioni e luci identiche a quelle che collegano i grandi sistemi bilanciati delle grandi campate.-

Tutte le strutture sopra descritte sono in calcestruzzo normale o precompresso ; in particolare, la precompressione ~~viene~~ ^è adottata per una parte delle travi di impalcato delle grandi pile e per i relativi grandi cavi di sostegno, nonché per tutte le travate indipendenti in terposte fra le pile.-

Le speciali condizioni ambientali hanno obbligato ad eseguire le travate di ciascun sistema bilanciato con un metodo che, se non si può definire completamente originale, può considerarsi interessante e delicato.-

Costruito con normali puntellature il tratto di impalcato compreso tra i due ritti obliqui di ciascun cavalletto, su detto tratto sono stati montati due speciali carrelloni su ruote e rotaie, ciascuno in grado di sopportare il peso corrispondente al getto dell'intera sezione di impalcato del ponte per una lunghezza di ml. 5,50.



PROG. N.

FOGLIO N. 6

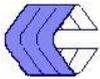
I
Detti carrelloni sono stati quindi mossi all'infuori simultaneamente e simmetricamente rispetto al piano verticale trasversale del ponte passante per l'asse della pila ed hanno gettato, da ambo le parti, il primo concio da ml. 5,50.-

Indurito il getto, reso solidale alla struttura precedente a mezzo di armature in acciaio normale, esso è stato reso atto a resistere alle sollecitazioni di flessione e taglio derivanti dal metodo di costruzione a sbalzo mediante fili provvisori in acciaio armonico, ammarrati alle sezioni simmetriche di estremità dei conci e posti opportunamente in tensione da ambo i lati.-

Questi fili, non protetti da guaine di calcestruzzo, erano disposti al disopra del piano estradossale dell'impalcato e rinviati da due setti verticali in calcestruzzo armato dell'altezza di ml. 2,10, posti in corrispondenza delle sezioni di attacco ai ritti del cavalletto.-

Svincolato quindi il carrellone dal concio eseguito, esso è stato avanzato per il getto del secondo tratto da ml. 5,50, al termine del quale sono state ripetute le operazioni di aggancio ad una serie di cavi provvisori e di loro tesatura.-

Sono state così effettuate n° 9 operazioni successive fino ad arrivare alla sezione di attacco ai tiranti di esercizio.- L'ultimo concio è stato gettato senza includere il volume totale del trasversone di ancoraggio dei tiranti stessi all'impalcato, ma solo quello di uno strato inferiore dell'altezza di ml. 1,00.- Ciò allo scopo di evitare di gravare l'estremità della mensola di oltre ml. 50,00 di luce del considerevole peso del trasversone stesso.-



PROG. N.

FOGLIO N. 7

A questo punto sono stati posti in opera dei tiranti provvisori costituiti da fasci di ~~4~~ fili di acciaio armonico, in posizione simile a quella dei tiranti di esercizio (e quindi scavalcati l'antenna) ma ancorati, a quota dell'impalcato, non all'estremità del trasversone ma in corrispondenza delle sei singole nervature.-

Indurito lo strato di fondo di ml. 1,00 del trasversone, si sono messi in tensione i tiranti provvisori e si è completato il getto del trasversone stesso.-

Sono stati quindi messi in opera i cavi dei tiranti definitivi e, previa parziale tesatura dei cavi di precompressione del trasversone, posti in leggera tensione.

Eliminati i cavi dei tiranti provvisori, la tensione nei cavi definitivi si è incrementata automaticamente anche per effetto del getto in due conci, sempre tramite carrellone, degli sbalzi oltre i nodi di tirante.-

Dopo aver parzialmente posto in tensione i cavi di precompressione di esercizio della travata, sono stati eliminati i cavi provvisori di sostentamento della travata, concio per concio lungo tutta la sua lunghezza.- Si è quindi completata la tesatura dei cavi della travata e, smontato il carrellone, asportandolo.

Completata la tesatura dei cavi di precompressione del trasversone e quella dei cavi dei tiranti, si sono posti in opera, intorno ai cavi già in tensione, quelli ausiliari per la precompressione delle guaine dei tiranti.

Si sono quindi gettate le guaine, anch'esse come già detto a conci, avendo avuto cura di lasciare libero un certo intervallo in corrispondenza dell'attacco all'impalcato.- Induriti i getti e le sigillature che successi



PROG. N.

FOGLIO N. 8

vamente sono state gettate tra concio e concio, si è proceduto alla messa in coazione delle guaine operando la tesatura dei cavi ausiliari dalla testata provvisoria in corrispondenza dell'estremità libera al disopra del piano di impalcato.-

Si è quindi proceduto al getto della restante parte di guaina e, previo allungamento dei cavi ausiliari mediante speciale manicotto di giunzione fino alla testata definitiva in corrispondenza del trasversone, alla sua precompressione.-

Iniettati tutti i cavi, la struttura è risultata pronta ad accogliere prima il varo delle nervature prefabbricate delle travi da ml. 36,00, quindi i successivi getti in opera di completamento delle medesime, la stesa della pavimentazione e delle altre sovrastrutture stradali e finalmente i carichi mobili.-

Durante tutto il processo di costruzione della travata sono state costantemente controllate le deformazioni della struttura ed in particolare gli abbassamenti delle sue estremità e, agendo sui tiranti, operate le opportune correzioni in modo da far sì che, alla fine delle varie operazioni ed avendo tenuto debito conto dell'effetto di ognuna di esse, la posizione raggiunta da tali sezioni sulla verticale fosse rigorosamente quella competente alla condizione di esercizio del ponte.-

Allo scopo infine di lumeggiare l'aspetto economico della soluzione adottata per le grandi luci, si precisa quanto segue :

Si consideri una luce di ml. 208,00 : la superficie dell'impalcato è di mq. 3742,00.



PROG. N.

FOGLIO N. 9

Per il sistema costituito dall'impalcato, dalle antenne e dai tiranti (escludendo i cavalletti che si assomigliano alle pile di qualsiasi altra soluzione), si riscontrano le seguenti quantità :

- Calcestruzzo :	mc.	5530,00
- Acciaio ad aderenza migliorata :	Tn.	348,50
- Acciaio R/170 Kg/mmq. :	Tn.	191,60

Tali quantità, rapportate a metro quadrato di impalcato, determinano i seguenti numeri indici :

- Calcestruzzo :	mc/mq.	1,48
- Acciaio ad aderenza migliorata :	Kg/mq.	93,00
- Acciaio R/170 Kg/mmq. :	Kg/mq.	51,00

L'opera, progettata dal Prof. Ing. Riccardo Morandi con la collaborazione del Dott. Ing. Claudio Cherubini, è stata eseguita dalla Società Italiana per Condotte d'Acqua di Roma sotto la direzione ed il controllo dell'Ufficio Speciale Autostrade dell'Azienda Autonoma delle Strade Statali.-

Il Dott. Ing. Luigi De Sanctis, per conto dell'Impresa, ha diretto la costruzione.-