

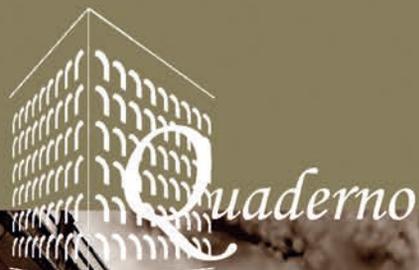


Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

N 1S/2024

# Quaderno

Apparecchi di appoggio e Giunti:  
Tipologie, Modellazione, Sostenibilità ed Interventi Evolutivi



In copertina:  
Immagine di repertorio



# Il saluto del Presidente

Ing. Massimo Cerri



## *GLI APPARECCHI D'APPOGGIO E LA FORMAZIONE*

Questo quaderno è dedicato a un tema molto specifico, quale quello degli Apparecchi d'appoggio. Gli appoggi strutturali per opere di ingegneria civile sono dispositivi che permettono il collegamento di parti della stessa struttura (ponti o infrastrutture civili), consentendo la trasmissione controllata dei carichi agenti sulla struttura sia per naturali azioni del vento, variazioni di temperatura, deformazione dei materiali che per l'intervento di fenomeni sismici.

La combinazione di queste forze impone la scelta dei dispositivi di appoggio più idonei alla struttura, progettati e prodotti per essere in grado di assecondare i movimenti e le rotazioni previste secondo opportuni schemi di vincolo.

L'argomento è di grande interesse per tutte le opere civili e pertanto l'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma desidera dare un approfondimento ai suoi iscritti anche attraverso i quaderni tematici. Sono convinto che la formazione, in ogni sua espressione, debba assumere un carattere sempre più importante in un contesto come quello attuale, in cui sono richieste dal mondo del lavoro competenze, capacità e attitudini sempre più specifiche.

L'affinamento delle professionalità è un' esigenza particolarmente sentita dagli operatori economici che aspirano al mantenimento ed al miglioramento della propria competitività sul mercato locale, nazionale o internazionale.

Indispensabile quindi, rispondere a tali bisogni tramite la promozione e la realizzazione di corsi, seminari, convegni, riviste e quaderni finalizzati alla all'aggiornamento ed al perfezionamento.

L'acquisizione di nuove competenze diventa oggi una leva strategica, un vantaggio indispensabile per essere competitivi, aumentare il livello di soddisfazione dell'utente/cliente e affrontare le nuove sfide che ci proporrà il futuro.

La formazione aumenta il nostro valore e aumenta la motivazione.

In un periodo dove l'originalità e l'innovazione dei prodotti ha durata breve, dove la tecnologia è superata dalla nuova, la professionalità è il valore che ci permette di differenziarci.

La formazione rappresenta lo strumento strategico per espandersi in nuovi settori o fortificarsi in quelli già esistenti.

Ing. Massimo Cerri  
Presidente

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma



# L'Editoriale

Ing. Maria Elena D'Effremo



La Commissione Tematica “Analisi e valutazione del degrado su opere esistenti” è stata istituita presso l’Ordine degli Ingegneri di Roma nel 2022 al fine di affrontare tematiche estremamente attuali, quali la cura delle infrastrutture esistenti.

Nel 2020 il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici approvava la prima versione delle “Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti” aggiornata poi nel 2022.

L’obiettivo delle Linee guida è quello di avviare il percorso della messa in sicurezza del patrimonio infrastrutturale italiano, attraverso una valutazione e classificazione del rischio basato su un approccio necessariamente omogeneo, utilizzando una procedura multilivello. Inutile sottolineare come tale documento sia fondamentale per gli Ingegneri che nella professione si occupano di infrastrutture esistenti e abbia completamente cambiato il modo di far approcciare noi professionisti alle opere esistenti.

La valutazione dello stato di conservazione delle nostre infrastrutture e la verifica delle condizioni di sicurezza allo stato attuale è un impegno che noi Ingegneri abbiamo nei confronti della società.

La commissione “Analisi e valutazione del degrado su opere esistenti”, nasce in questo periodo storico in cui prenderci cura del costruito, della storia, del passato, diventerà uno dei focus principali della nostra professione, perché se da una parte la tecnologia avanza a passi da gigante, le nostre infrastrutture lentamente invecchiano, ma da ingegneri dovremo puntare a incrociare questi due percorsi divergenti, perché la tecnologia, così come le normative, dovranno essere la nostra guida per permetterci di avere cura del costruito, del territorio e di tutte le infrastrutture esistenti che rappresentano la nostra storia.

Non mi resta che augurarvi buona lettura, ricordandovi che nell’ottica di un approccio più agile e mirato alla condivisione, anche IO Roma si è dotata di una pagina LinkedIn, “IO Roma Rivista dell’Ordine Ingegneri della provincia di Roma”, che vi invito a seguire, così come vi invito a consultare la pagina <https://ioroma.info/>.

Ing. Maria Elena D'Effremo  
Direttrice Editoriale





**Direttrice responsabile**

Marialisa Nigro

**Direttrice editoriale**

Maria Elena D'Effremo

**Comitato di redazione**

**Sezione A**

Massimo Cerri

Silvia Torrani

Micaela Nozzi

Stefania Arangio

Fabrizio Averardi Ripari

Michele Colletta

Alessandro Fuschiotto

Marco Ghimenti

Giorgio Martino

Giovanni Nicolai

Paolo Reale

Mauro Villarini

**Sezione B**

Alfredo Simonetti

**Amministrazione e redazione**

Piazza della Repubblica, 59 - 00185 Roma

Tel. 06 4879311 - Fax 06 487931223

**Direttore creativo e progettazione grafica**

Tiziana Primavera

**Assistenza Editoriale**

Leonardo Lavallo

Antonio Di Sabatino

Emanuela Cariani

**Referente FOIR**

Francesco Marinuzzi

**Stampa**

Press Up

**Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma**

Piazza della Repubblica, 59 - 00185 Roma

[www.ording.roma.it](http://www.ording.roma.it)

[segreteria@ording.roma.it](mailto:segreteria@ording.roma.it)

[editoriale@ording.roma.it](mailto:editoriale@ording.roma.it)

**Finito di stampare:** luglio 2024

Il Quaderno IOROMA è una estensione alla rivista IOROMA

La Direzione rende noto che i contenuti, i pareri e le opinioni espresse negli articoli pubblicati rappresentano l'esclusivo pensiero degli autori, senza per questo aderire ad esse.

La Direzione declina ogni qualsiasi responsabilità derivante dalle affermazioni o dai contenuti forniti dagli autori, presenti nei suddetti articoli.



**GLI EDITORIALI**

Il saluto del Presidente <i>di Massimo Cerri</i>	<b>02</b>
L'Editoriale <i>di Maria Elena D'Effremo</i>	<b>04</b>

**INDICE**

1 Introduzione al Quaderno e alla Commissione "Analisi e valutazione del degrado su opere esistenti" <i>G. De Benedetti</i>	<b>10</b>
2 Apparecchi di Appoggio e Giunti: Introduzione al tema del degrado <i>G. Palermo</i>	<b>14</b>
3 Sostenibilità, durabilità e vita utile dei dispositivi d'appoggio, giunti e isolatori <i>L. Paroli, M. Bisti</i>	<b>18</b>
4 Isolamento sismico e dissipazione supplementare di energia: principi base e modellazione numerica in SAP2000 <i>L. Bandini</i>	<b>30</b>
5 Ispezione speciale e manutenzione straordinaria del viadotto strallato Carpineto I <i>L. Della Sala, R. Cerone, A. Gennari Santori</i>	<b>46</b>

<b>L'AREA WEB DEL QUADERNO E DELLA RIVISTA</b>	<b>72</b>
--	-----------







*a cura di:  
Ing. Georgia  
De Benedetti  
Presidente  
Commissione  
Analisi e valutazione  
del degrado su opere  
esistenti*



# INTRODUZIONE AL QUADERNO E ALLA COMMISSIONE “ANALISI E VALUTAZIONE DEL DEGRADO SU OPERE ESISTENTI”



I contributi presentati in questo Quaderno sono estratti dal seminario “Apparecchi di appoggio e Giunti: Tipologie, Modellazione, Sostenibilità ed Interventi Evolutivi” tenuto il 24/3/2023 presso la sede dell’Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma.

Il tema principale è quello di inquadrare e di analizzare il tema della vetustà di dispositivi di appoggio e giunti, installati su opere d’arte esistenti, volendone valutare la magnitudo nel panorama nazionale ed evidenziandone le azioni messe in atto per mitigarne il rischio.

Il seminario è stato tenuto dalla Commissione tematica “Analisi e valutazione del degrado su opere esistenti” nel corso del suo primo anno di vita.

La Commissione sviluppa e analizza temi inerenti alle opere esistenti, siano esse infrastrutture stradali, gallerie, dighe, edifici o pavimentazioni, con particolare riferimento alle condizioni di degrado, da cui possono essere interessate. La Commissione rappresenta un punto di incontro per ragionamenti, scambi di idee e di esperienze su tematiche ad oggi di particolare interesse e fortemente attuali: principali tecniche di indagine e diagnostica presenti sul mercato nazionale ed internazionale; tipologie e modalità di ispezioni visive o strumentali; approfondimenti e disamine delle principali tecniche di intervento di manutenzione conservativa ed evolutiva, presentate mediante casi studio effettivamente realizzati. Ampio spazio è dedicato alla conoscenza delle attività in essere dei principali gestori nazionali, relativamente al loro impegno sul tema e alla conseguente presentazione delle nuove piattaforme e sistemi applicativi utilizzati per il catalogo ed il censimento delle opere esistenti.

Per traguardare l’articolo presentato nel seguito, come tante altre attività è stata necessaria la partecipazione e la collaborazione di ogni membro del gruppo, con le proprie esperienze e le proprie inclinazioni, nelle tempistiche e nelle modalità che ognuno ha potuto fornire alla commissione stessa.

Nel prosieguo, vengono presentati i seguenti argomenti che sono suddivisi sostanzialmente in quattro parti:

- la prima, evidenzia la necessità sancita dalle recenti “Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti” (LLG Ponti), emanate inizialmente col Decreto del MIT (17 dicembre 2020, n. 578) di indagare lo stato di conservazione degli apparecchi di appoggio a partire dalle ispezioni ordinarie; inoltre, sono messe in risalto le esperienze significative delle commissioni nominate dall’Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie e delle Infrastrutture Stradali e Autostradali (ANSFISA) nell’ambito della loro attività;
- la seconda parte individua le tipologie di apparecchi di appoggio e giunti esistenti, con le problematiche ad essi annesse, e le nuove tecnologie presenti sul mercato, con particolare riferimento alla sostenibilità e alla vita utile;
- la terza parte è un approfondimento sull’isolamento sismico e la dissipazione supplementare di energia, valutandone i principi base e la modellazione numerica. Viene quindi presentata la modellazione lineare e non lineare delle principali tipologie di dispositivi su programmi di calcolo agli elementi finiti;
- inquadrare le tipologie di degrado e le cause d’origine, nell’ultima parte si porrà il focus su un caso di studio, il Viadotto Carpineto sul raccordo autostradale Sicignano-Potenza, che rappresenta l’esempio più all’avanguardia delle tecnologie ad oggi usate per il sollevamento degli impalcati.



**Ing. Georgia de Benedetti**  
*Presidente Commissione  
 Analisi e valutazione del degrado  
 su opere esistenti*



**Ing. Marco Bisti**  
*Referente settore editoriale  
 Commissione Analisi e valutazione  
 del degrado su opere esistenti*



# APPARECCHI DI APPOGGIO E GIUNTI: INTRODUZIONE AL TEMA DEL DEGRADO

Gli apparecchi di appoggio ed i giunti rappresentano dei dispositivi di fondamentale importanza per il corretto funzionamento e la conservazione dei ponti, nonché per la sicurezza del traffico stradale.

I dispositivi di appoggio/isolamento hanno la funzione sostanziale di: assicurare le giuste condizioni di vincolo, nonché eventualmente esser in grado di dissipare energia (isolatori); garantire la portanza per carichi gravitazionali e sismici, rispetto a cui l'opera è progettata.

I giunti hanno la funzione principale di: garantire la continuità del piano stradale, fornendo portanza ed attrito ai veicoli che percorrono la piattaforma stradale; impedire alle acque di piattaforma di affluire agli elementi sottostanti, proteggendo gli elementi sottostanti dal degrado.

Le "Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti" (LLG Ponti), emanate inizialmente col Decreto del MIT (17 dicembre 2020, n. 578), sono nate per razionalizzare la gestione dei ponti esistenti, evidenziando difetti e carenze manutentive. Esse prevedono che: i difetti relativi agli apparecchi d'appoggio hanno valenza strutturale (con gravità dei difetti G che arriva a 4), per cui durante l'ispezione si possono evidenziare delle «pregiudica statica» (PS); i difetti dei giunti non hanno grande valenza strutturale (con gravità dei difetti G che si ferma a 2), tuttavia essi possono accelerare il degrado degli elementi sottostanti.

Nell'ambito dell'attività ispettiva sui ponti stradali nazionali da parte di commissioni nominate dall'Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie e delle Infrastrutture Stradali e Autostradali (ANSFISA), agenzia nazionale indipendente vigilata dal MIT, si è potuto constatare (nell'arco di più di due anni di attività) che:

- lo stato di conservazione degli elementi d'opera principali (tra cui gli apparecchi d'appoggio) è direttamente legato allo stato di efficienza dei giunti nel tempo;
- i giunti, insieme al sistema di smaltimento delle acque, spesso non risultano efficaci per l'allontanamento delle acque di piattaforma dagli elementi d'opera sottostanti;
- in molti casi i giunti originari sono stati sostituiti con giunti tampone sotto-pavimentazione (che risultano spesso afflitti da problemi di tenuta all'acqua) e gli appoggi, quando critici, più che sostituiti sono affiancati da altri dispositivi (per problematiche legate al sollevamento).

Ciò detto, per un cambio di passo significativo, dispositivi di appoggio e giunti devono essere:

- attentamente ispezionati ed il loro contributo alla sicurezza deve esser tenuto debitamente in conto, anche oltre quello che prevedono le recenti «LLG Ponti»;
- mantenuti con approcci prestazionali e proattivi, programmando le attività manutentive e tenendo ben presenti i dettami dei manuali di manutenzione forniti dai costruttori e quanto previsto dalle norme, nonché dall'esperienza e dalle buone pratiche di settore.

In aggiunta, le opere dovrebbero essere pensate per meglio consentire l'ispezione, la manutenzione e la sostituzione di dispositivi di appoggio e giunti, mentre i Gestori ed i progettisti dovrebbero considerare attentamente quanto noto (dalle norme, dai produttori e dalla ricerca), circa la dipendenza delle caratteristiche meccaniche dei dispositivi rispetto al degrado ed alle condizioni ambientali.









a cura di:  
Ing. Luca Paroli  
Direttore commerciale  
Europa e Asia di  
MAURER SPS GmbH  
Ing. Marco Bisti  
Membro della Commissione "Analisi e valutazione del degrado su opere esistenti"

# **SOSTENIBILITÀ, DURABILITÀ E VITA UTILE DEI DISPOSITIVI D'APPOGGIO, GIUNTI E ISOLATORI**



## **Introduzione**

Il tema della sostenibilità, così importante al giorno d'oggi, si applica in diversi campi, compresa la produzione di dispositivi in ambito infrastrutturale. Un approccio ingegneristico a questa tematica si traduce in un'analisi dei parametri di sostenibilità e durabilità dei dispositivi per la riduzione della life-cycle costing (LCC). L'obiettivo di questa analisi è comprendere se un maggiore investimento iniziale nei dispositivi, permette di risparmiare in termini di costi ed emissioni nel lungo periodo. Questo dal punto di vista dell'azienda produttrice si traduce nell'allungare la vita dei prodotti, ridurre l'impatto ambientale e aumentare il comfort degli utenti.

### Apparecchi d'appoggio

La prima categoria di dispositivi analizzati è quella degli apparecchi d'appoggio. Quelli maggiormente usati in Italia sono:

- a vaso;
- elastomerici;
- sferici.

Gli **appoggi a vaso**, economici e di diffuso utilizzo, nel corso degli anni hanno rivelato una serie di limiti legati ai materiali impiegati e al loro funzionamento.

La loro vita utile mediamente è di 25 anni e tra le principali cause di deterioramento vi sono gli sposta-

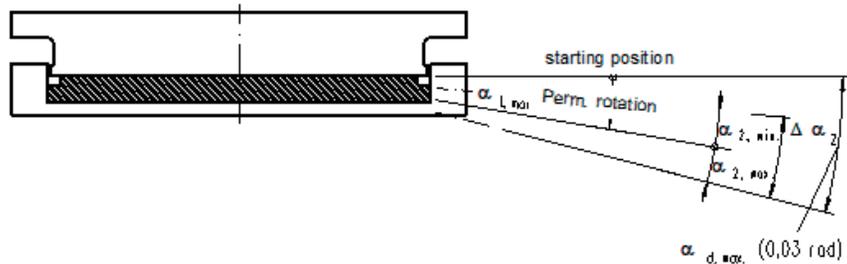


Figura 1 - Appoggio a vaso

menti viscosi innescati tra i materiali che compongono i dispositivi. In particolare, rotazioni maggiori di 3-5 mrad, combinate con carichi verticali bassi e forze orizzontali alte, portano alla separazione tra inox e materiale di scorrimento.

Un altro limite è rappresentato dalle guarnizioni che, usurandosi, possono permettere la fuoriuscita della gomma del cuscinetto interno, ostacolando le rotazioni.

Per gli **appoggi elastomerici**, uno dei principali problemi è legato all'invecchiamento della gomma, che può ridurre notevolmente le prestazioni del dispositivo nel tempo, considerata anche la loro non ispezionabilità all'interno. Un'altra difficoltà è rappresentata dal loro smaltimento al termine della vita utile, il che inficia sul giudizio complessivo di sostenibilità di tali dispositivi.

Gli **appoggi sferici**, infine, a fronte di una maggiore spesa iniziale, garantiscono una vita utile che è almeno il doppio delle altre due tipologie indagate, con alte performance riguardanti le forze e le rotazioni ammissibili.

In particolare, per questi dispositivi, l'evoluzione tecnologica che ha coinvolto i materiali utilizzati ha permesso un miglioramento di diversi parametri, su tutti il percorso accumulato. Nei materiali di prima generazione (come il PTFE) l'usura si manifestava dopo circa 10 km. In quella di seconda generazione il limite si è spostato oltre i 50 km.

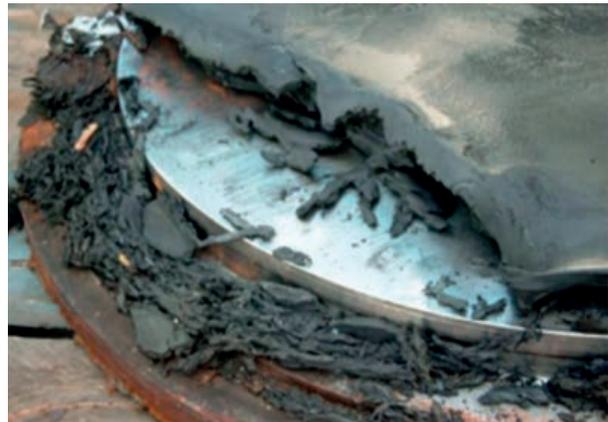


Figura 2 - Guarnizioni degradate



Figura 3 - Appoggi elastomerici

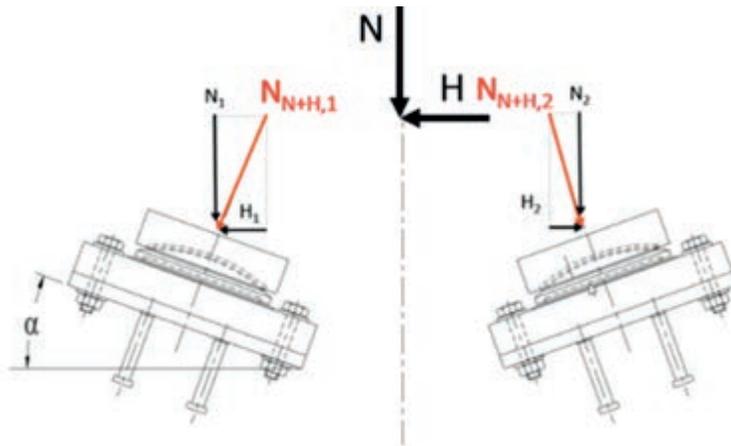


Figura 4 - Appoggi sferici montati a catamarano

Con gli ultimi ritrovati tecnologici e l'introduzione di materiali di terza generazione, si arriva ad un percorso accumulato fino a 100 km, avvicinando la vita utile del dispositivo e dell'opera stessa. Anche altri parametri che concorrono alla performance del dispositivo possono sensibilmente migliorare con l'utilizzo di nuovi materiali di terza generazione, infatti aumentano anche le temperature sostenibili e si abbassano i coefficienti di attrito coinvolti, con conseguente diminuzione delle forze trasmesse alle sottostrutture.

Un altro aspetto da considerare è rappresentato dalle ridotte dimensioni degli appoggi sferici rispetto a quelli a vaso (-30%) e quelli elastomerici (-50%), ciò può costituire un grande vantaggio specialmente in configurazioni dove lo spazio di installazione è limitato.

Rimanendo nel campo delle nuove idee, in via di sviluppo ci sono gli appoggi sferici montati a "catamarano". Grazie alla loro installazione inclinata, appoggi multidirezionali (e non guidati come nel caso di un'installazione orizzontale) possono compensare le forze orizzontali, inoltre hanno ridotti ancoraggi a trazione e non presentano giochi laterali, aspetto molto importante nel campo ferroviario.

Quindi la tecnologia che avanza viene in aiuto del progettista e del gestore; per questo, scegliendo dei dispositivi con caratteristiche migliori, si rendono meno frequenti le operazioni di manutenzione e di sostituzione, concorrendo ad un ulteriore avvicinamento della vita utile di progetto dell'appoggio a quella dell'infrastruttura sulla quale viene installato.

### Giunti di dilatazione

I giunti di dilatazione ricoprono un ruolo cruciale nella durabilità e nella salvaguardia dell'opera in quanto, oltre a consentire la continuità tra le strutture in corrispondenza dei varchi, non permettono l'infiltrazione di acqua nelle sottostrutture e permettono i movimenti relativi tra gli elementi strutturali.

Per quanto riguarda il quadro normativo, in termini di prestazioni, si fa riferimento ai documenti di verifica europei EAD, che specificano due diversi modelli di carico e due diversi approcci con cui dimensionare i dispositivi a riguardo dei veicoli da cui sono attraversati: FLM1 e FLM2.

- FLM1 è usato per verificare che la vita a fatica sia illimitata. Quindi il numero di veicoli che transitano è irrilevante perché si lavora sotto al limite di fatica;

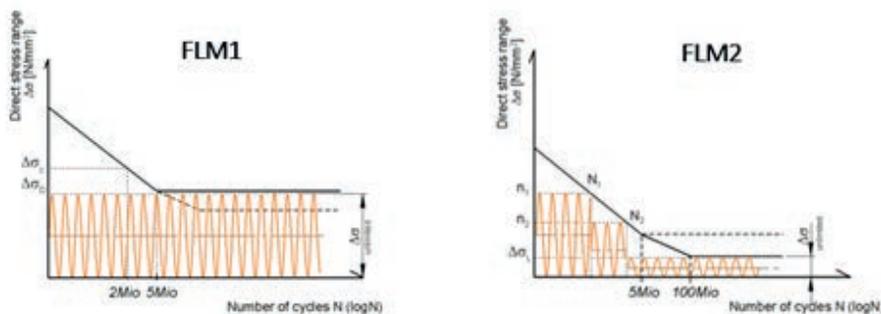


Figura 5  
FLM1 e FLM2

- FLM2 è usato per verificare una certa vita nominale. Il numero di veicoli che passeranno il giunto deve essere noto perché si lavora per danno cumulativo.

I giunti di dilatazione più usati in Italia sono:

- in gomma armata;
- a pettine;
- modulari.

I **giunti in gomma armata** rispondono ai criteri FLM2, sono economici e di rapida installazione, ma hanno una vita utile limitata tra i 10 e i 15 anni. In termini di degrado sono sensibili al passaggio degli spazzaneve e i bulloni spesso si allentano a causa delle azioni dinamiche, necessitando perciò di costante manutenzione. Inoltre, non garantiscono l'impermeabilità tra modulo e modulo ed essendo di gomma, presentano anch'essi problemi di invecchiamento.

I **giunti a pettine** hanno una vita utile maggiore, tra i 20 e i 25 anni ma rispondono tipicamente solo a FLM2 (essendo quindi soggetti a fenomeni di fatica). Soffrono sotto movimenti laterali e presentano

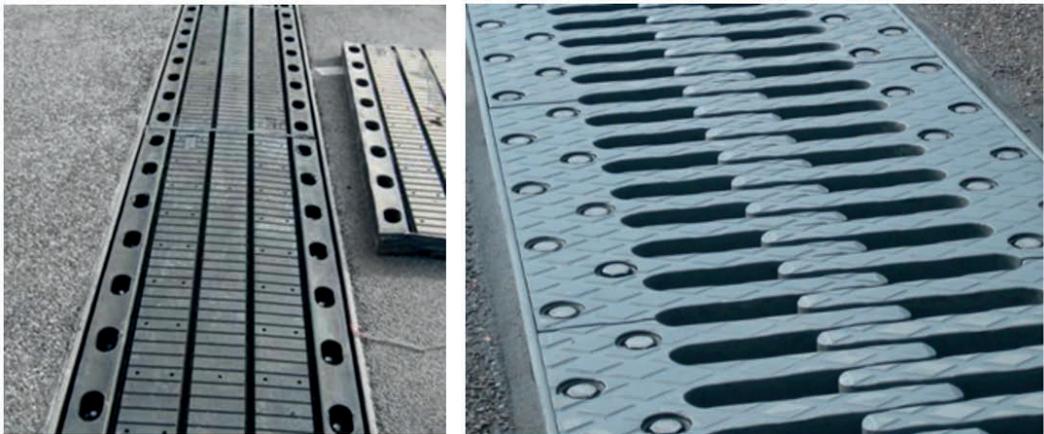


Figura 6 - Giunti in gomma armata (sx) e a pettine (dx)

mancanza di impermeabilità durevole e bisogno di manutenzione costante a causa dei bulloni che si allentano per azioni dinamiche, come i giunti in gomma armata.

La soluzione più durevole è rappresentata dai **giunti modulari** che, a fronte di un investimento iniziale maggiore, hanno una vita utile di 50 anni e rispondono a FLM1, avendo quindi vita a fatica idealmente illimitata. Presentano 6 gradi di libertà, quindi ideali per ponti isolati, e hanno un sistema di controllo puramente cinematico. Tutti i collegamenti soggetti a sollecitazioni dinamiche sono saldati, evitando così il problema dei bulloni. Garantiscono anche un miglior comfort all'utente, grazie alla possibilità di prevedere soluzioni di insonorizzazione sia all'estradosso, quindi sulla piattaforma stradale, sia all'intradosso.



Figura 7 - Giunto modulare



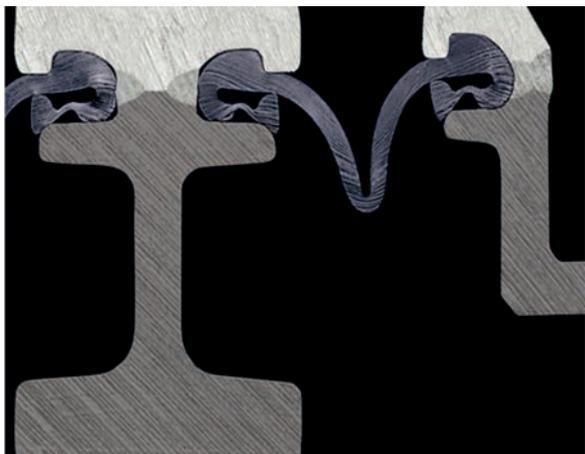
Uno svantaggio dei giunti modulari è rappresentato dalla loro considerevole altezza, che va tenuta in conto qualora si volessero installare in opere esistenti, dove non sempre è possibile avere lo spazio sufficiente.

Le ultime innovazioni hanno portato ad avere un sistema di controllo a catamarano (o a doppia guida prismatica) per i giunti modulari, dove le guide in materiali di scorrimento di terza generazione causano attrito minimo tra le componenti, certificate fino a 50 km di percorso accumulato e 50 anni di vita utile.

Figura 8 - Sistema di controllo a catamarano per i giunti modulari



Figura 9 - Sistemi di scavalco modulari



Un aspetto innovativo che è di grande interesse per i gestori è la possibilità di evitare il traffico durante le sostituzioni dei giunti. Questo è possibile attraverso sistemi di scavalco modulare, attraversabili a velocità che arrivano fino a 70 km/h.

Al fine di evitare la corrosione ed aumentare contestualmente la vita utile dei giunti, è possibile applicare **profili ibridi** per evitare la corrosione nelle zone esposte alle intemperie, grazie all'utilizzo di una testa in acciaio inox saldata a un corpo in acciaio strutturale.

Figura 10  
Particolare di profili ibridi

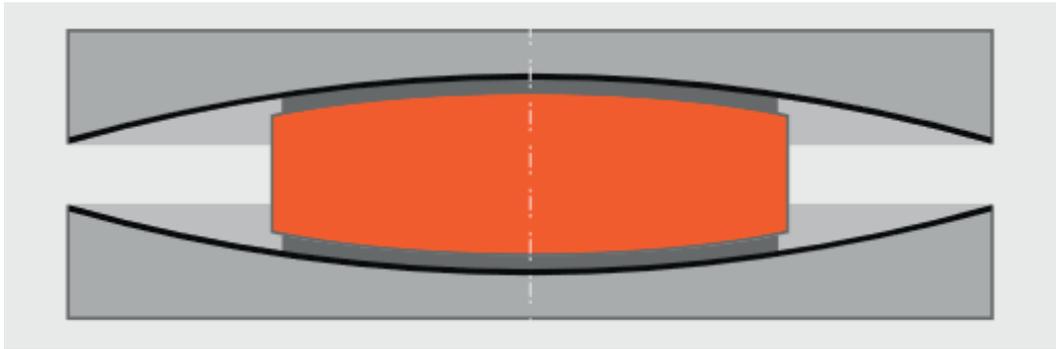


Figura 11 - Isolatori a doppio pendolo

### Isolatori e dissipatori

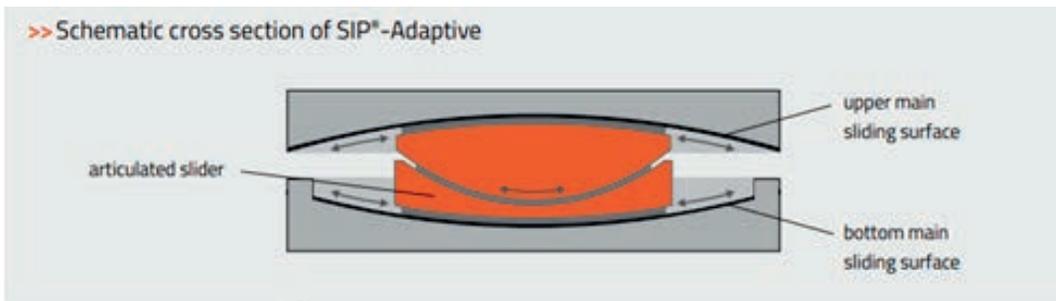
Partendo dagli isolatori, quelli più usati in Italia sono:

- in gomma-piombo;
- a pendolo;
- semplice;
- doppio;
- adattivi.

Per quanto riguarda gli isolatori in **gomma piombo**, i principali vantaggi risiedono nella riduzione delle forze in servizio e in una media/alta dissipazione. Gli svantaggi di questa tipologia risiedono nel processo di invecchiamento, che ne riduce le

prestazioni nel tempo in maniera considerevole, portando ad una limitata vita utile (intorno ai 20-25 anni). Inoltre, non sono ispezionabili all'interno. Per quanto riguarda gli isolatori a **pendolo**, sono molto diffusi quelli a doppio pendolo, che tuttavia fino al superamento dell'attrito statico non isolano la struttura, esponendola a rischio di low-cycle-fatigue per le fasi a basse accelerazioni dell'evento sismico. Inoltre, permettono le rotazioni solo grazie allo schiacciamento del materiale di scorrimento, riducendo inevitabilmente la loro vita utile.

Rimanendo nel campo degli isolatori a pendolo, una soluzione durevole è rappresentata dai pendoli adattivi.



Bottom main sliding surface with articulated slider



Assembly of SIP®-Adaptive

Figura 12 - Pendoli adattivi

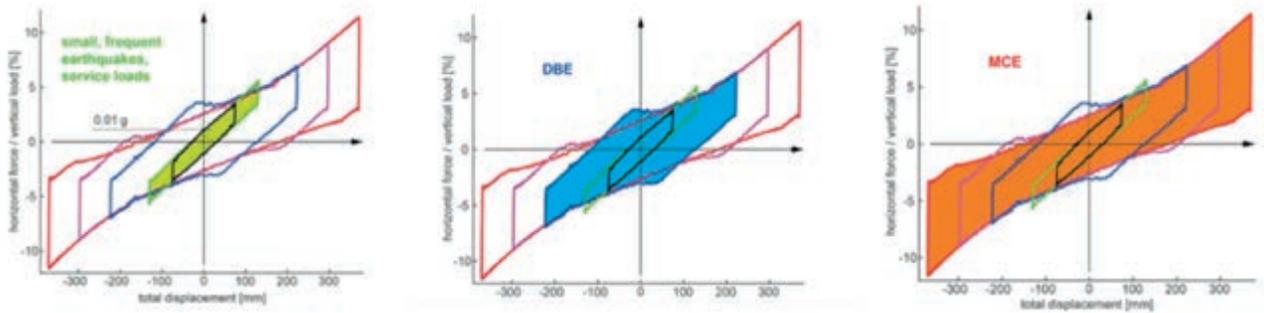


Figura 13 - Relazione tra carichi e spostamenti

Questi presentano due superfici, con raggi e coefficienti d'attrito diversi, permettendo un comportamento variabile a seconda del tipo di sollecitazione.

La cerniera centrale abbina una riduzione delle dimensioni, con alte capacità di rotazione.

La possibilità di questi isolatori di adattarsi a sollecitazioni di diverse intensità permette di garantire le migliori prestazioni sia in caso di sisma sia per i carichi di servizio. Proprio in quest'ultimo scenario di carico, l'attivazione ad attrito ridotto si traduce in tagli minori sulla struttura.

Una nuova frontiera per gli isolatori è costituita dai dispositivi **SIP-V** per la mitigazione combinata, grazie ai quali si ottiene sia un isolamento sismico in direzione orizzontale, sia un isolamento acustico e dalle vibrazioni in direzione verticale. Quest'ultimo aspetto si dimostra di spiccato interesse specialmente in applicazioni urbane (in caso di prossimità con una metropolitana) o per proteggere macchinari particolarmente sensibili dalle vibrazioni.

L'ultima categoria di dispositivi analizzati sono i dissipatori.

I dissipatori più usati in Italia sono:

- idraulici;
- isteretici.

Quelli **idraulici** lavorano secondo la formula di Maxwell, in cui la forza di risposta dipende dalla geometria, dalla velocità e dal parametro alfa.

$$F = Cxv^\alpha$$

Il valore del parametro alfa risulta decisivo, infatti per alfa bassi (0,02 - 0,05) si hanno principalmente due vantaggi: proteggere la struttura da sovraccarichi e aumentare la dissipazione a basse velocità, con conseguente riduzione delle corse fino al 30%.

I limiti di questa tecnologia sono sicuramente da individuare nell'invecchiamento, dovuto alla presenza di olio e alla necessaria ispezionabilità.

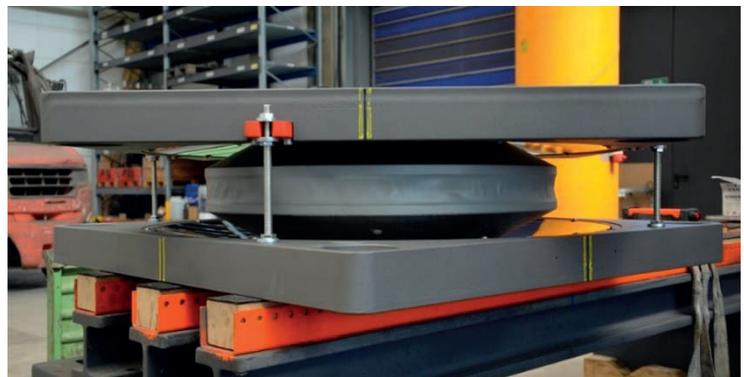


Figura 14 - Isolatori SIP-V

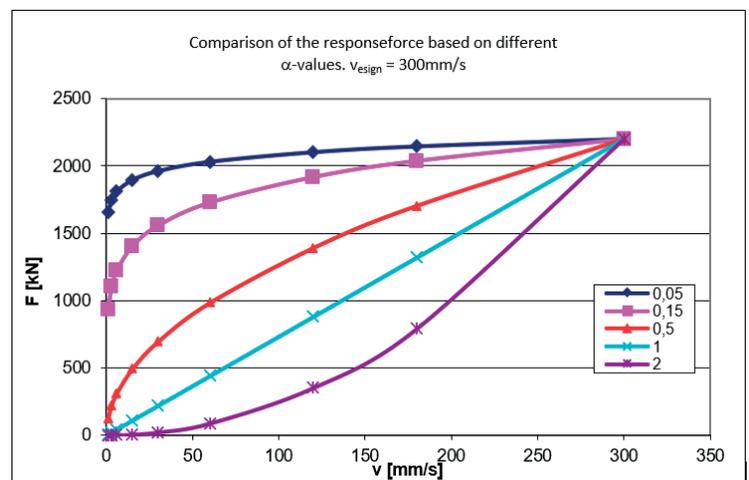


Figura 15 - Legge di lavoro per i dispositivi idraulici

Nel caso degli **shock transmitter**, al crescere della velocità si registra una risposta che cresce indefinitamente. Una soluzione durevole può essere rappresentata dagli shock transmitter con

limitatore di carico, in quanto consentono di proteggere la struttura in caso di sovraccarico e di distribuire il carico in modo uniforme tra i vari dispositivi.

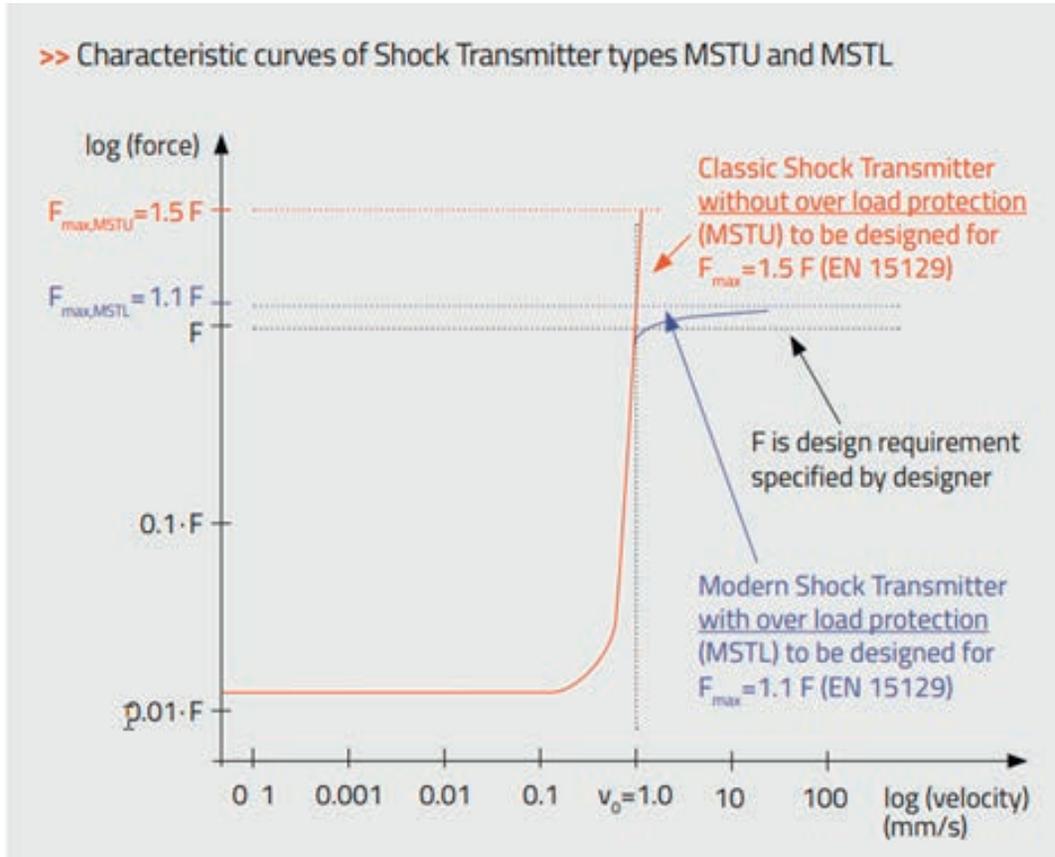


Figura 16 - Curva caratteristica degli shock transmitter

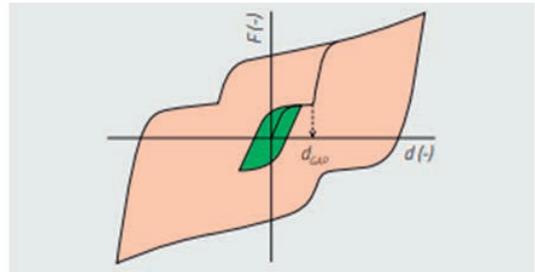
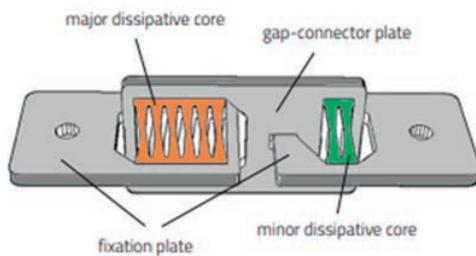


Figura 17 - Dissipatori isteretici

Per quanto riguarda i dissipatori **isteretici** invece, questi possono garantire massima dissipazione, resistenza all'invecchiamento in quanto costituiti solamente d'acciaio e un funzionamento indipendente dalla temperatura.

I dispositivi più performanti, definiti adattivi, possono adattarsi all'intensità del sisma che devono mitigare, attivando a seconda del caso dei cicli isteretici per basse o alte intensità, modulando rigidità, smorzamento e tagliante in base alla sollecitazione. Dopo ogni evento sismico è necessario verificare l'integrità del dissipatore.

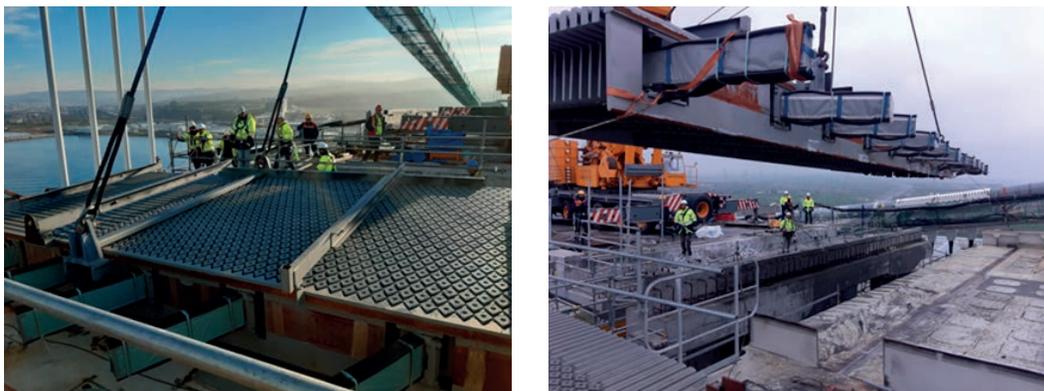


Figura 18 - Giunti per il ponte di Canakkale in Turchia



Figura 19 - Moschea Djamaa Al Djazair in Algeria

Proprio su quest'ultima considerazione, si può concludere che durevolezza vuol dire monitorare; partendo dall'identificazione di possibili danni allo stato iniziale, e continuando con il monitoraggio in tempo reale dello stato di ogni struttura (carichi, numeri di veicoli, corse, temperature, etc.), ricordando che esistono diverse interfacce possibili a seconda del caso studiato.

Infine, si riportano referenze di progetti di grande scala, come i giunti di Canakkale in Turchia - il ponte sospeso più lungo del mondo - dove i 4 giunti presenti hanno corse per un totale di 2,8 metri, compreso servizio e sisma e ancora la moschea Djamaa Al Djazair in Algeria, dove sono stati installati 80 dissipatori idraulici e 256 isolatori a pendolo con carichi fino a 40 MN, avendo come target una vita utile di 1000 anni.







a cura di:  
Ing. Leonardo Bandini  
socio di CSI Italia srl

Per eventuali  
domande:  
leonardo@csi-italia.eu  
0434.28465



# ISOLAMENTO SISMICO E DISSIPAZIONE SUPPLEMENTARE DI ENERGIA: PRINCIPI BASE E MODELLAZIONE NUMERICA IN SAP2000

## Sommario

L'isolamento sismico e la dissipazione supplementare di energia sono utilizzati da molti decenni come metodi di controllo della risposta dinamica delle strutture e la mitigazione degli effetti indotti dalle azioni sismiche. Il contenuto qui presentato è tratto dall'intervento tenuto dallo scrivente presso l'Ordine degli Ingegneri di Roma il giorno 24 marzo 2023, all'interno di seminari tematici su "*Apparecchi di appoggio e giunti*". Si farà riferimento ad alcune slide utilizzate in quell'occasione. Si consiglia di affiancare al presente documento l'intera documentazione disponibile "Modellazione lineare e non lineare dei principali dispositivi di isolamento sismico e dissipazione supplementare di energia" [1]. Tutti i modelli di calcolo qui citati sono stati realizzati con l'ausilio del codice di calcolo **SAP2000** [2] e sono liberamente scaricabili dallo stesso indirizzo.

## Introduzione

Nei riguardi della protezione sismica delle strutture, il processo normativo e culturale internazionale ha subito profondi cambiamenti negli ultimi decenni. In tutto il mondo, dal concetto di resistenza strutturale espressa in termini esclusivi di forza, si è passati ad un concetto di progettazione espressa in termini di duttilità e prestazione [3][4]. Come è noto, un progetto basato su criteri di resistenza, quindi su forze, per tenere in conto degli effetti dissipativi introdotti dal danneggiamento, necessita di un fattore riduttivo delle azioni che intervenga a monte del dimensionamento stesso. Questo fattore riduttivo prende il nome di fattore di struttura. In altre parole, dato uno spettro di risposta elastico per il sito in esame, si passa ad uno spettro di progetto utilizzando l'abbattimento offerto dal fattore di struttura. La scelta di un alto fattore di struttura produce di conseguenza un alto "sconto" sulle forze di progetto, ma sarà responsabile di un maggiore danno atteso sugli elementi sismo-resistenti. Danno che avverrà all'interno di zone sacrificali, le c.d. zone a danneggiabilità controllata: controventi concentrici ed eccentrici, zone di estremità di travi e colonne di un sistema telaio, la base di un setto, ecc. Secondo questo *modus operandi*, il progettista fissa tale fattore di struttura sulla base del sistema sismo-resistente e di una prestazione attesa. Questo è il cuore del processo di progettazione noto anche come approccio prestazionale (*Performance Based Design*) ormai diffuso da oltre 15 anni, tanto da parlare già di nuove generazioni di approcci prestazionali [5]. Come teoria contrapposta al danno, da alcuni progettisti viene svolta una progettazione scegliendo strutture a carattere non dissipativo, adottando per questo motivo fattori di comportamento modesti e tendenti all'unità. Tuttavia, quest'ultima tecnica produce la necessità di sovrarigidità e sovrarigidità associate così a strutture che hanno una massima risposta in termini di accelerazione, con conseguente incremento degli effetti sismici sul contenuto delle strutture (occupanti, impianti, elementi non strutturali).

Il danno è alla base della dissipazione e quindi, della riduzione della risposta sismica in termini di accelerazione e forza di una struttura. Tuttavia, per effetto del danneggiamento degli elementi sismo-resistenti, la struttura perde parte della propria rigidità, con il risultato, valido nella maggior parte dei casi, che l'azione sismica si riduce, ma gli spostamenti rimangono almeno uguali a quelli che avrebbe avuto la stessa struttura progettata con azioni non scontate (deformazioni ottenute con azioni calcolate in accordo allo spettro di risposta elastico). Di conseguenza, le forze diminuiscono ma le deformazioni no, anzi nella maggior parte dei casi esse aumentano.

Quando la dissipazione di energia è veicolata all'interno di particolari elementi realizzati *ad hoc* ed introdotti nella compagine strutturale, si parla di **dissipazione supplementare di energia**, essa può essere inserita all'interno di una struttura esistente, allo scopo di proteggerla, ma può anche essere pensata come elemento sismo-resistente di una struttura nuova, in aggiunta ad altri elementi tradizionali (per esempio sistemi a telaio) allo scopo di conferire un'alta capacità dissipativa, senza ricorrere al danno degli elementi strutturali. La maggior parte dei casi la dissipazione supplementare avviene mediante l'introduzione di controventi dissipativi: controventi ospitanti dispositivi atti a creare questa dissipazione: isteretici, viscosi, attritivi, ecc.

Una dissipazione supplementare riduce le forze a cui la struttura è sottoposta (abbattendo le accelerazioni di risposta) e interviene nel contempo anche nella riduzione delle deformazioni elastiche del sistema, proteggendo anche gli elementi non strutturali ed in generale il contenuto della struttura.

Quando i dispositivi, in questo caso d'appoggio, sono introdotti per creare una disconnessione all'interno della struttura, ad uno o più livelli della stessa, atta al disaccoppiamento dinamico con il terreno o comunque con la parte direttamente a contatto con esso, si parla di **isolamento sismico**. L'isolamento sismico è una tecnica di protezione sismica che basa le sue radici in tempi antichi. Com'è noto, mediante l'introduzione di dispositivi *ad hoc* sul c.d. **piano di scivolamento** (piano di sconnesione tra sotto-struttura e sovrastruttura) si crea un vero e proprio disaccoppiamento dinamico, una specie di filtro che separa la parte di struttura mobile (porzione protetta) dalla parte (o più parti) considerata a base fissa.

Nell'isolamento sismico si ricorre spesso a dispositivi che uniscono l'isolamento e la dissipazione supplementare di energia. In questo caso, la capacità dissipativa dei dispositivi concorre a ridurre gli spostamenti della struttura isolata, riducendo così la dimensione dei giunti e degli snodi di impianti che oltrepassano il piano di scivolamento, mantenendo il vantaggio del disaccoppiamento strutturale.



### Principi di base della dissipazione supplementare di energia e/o isolamento sismico

Per meglio comprendere il vantaggio di una protezione sismica indotta da un sistema di isolamento e/o di dissipazione supplementare di energia, si utilizza qui una parte del contenuto descritto del documento internazionale: *“Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage”* [6].

Nella pratica di progettazione capita spesso di fare confronti tra le diverse metodologie di protezione sismica e di progettazione delle strutture: metodi convenzionali (basati sulla resistenza), metodi fondati sul danneggiamento controllato degli elementi strutturali (*Capacity Design*) e metodi più evoluti come l'isolamento e/o la dissipazione supplementare di energia. All'interno del documento citato, si confrontano gli effetti sugli elementi strutturali e non strutturali indotti dal sisma nei tre casi suddetti. Fare la scelta di progettare il sistema sismo-resistente basandosi interamente sulla resistenza degli elementi strutturali, pensando che essi rimangano in campo elastico o sostanzialmente elastico (fattori di struttura bassi, come per le strutture non dissipative), oltre ad essere spesso non economicamente vantaggioso, può voler dire proteggere il valore insito nel costo degli elementi strutturali, ma esporre la

restante e principale parte del valore a rischi più alti. Difatti, una struttura pensata e dimensionata per rimanere in risposta sostanzialmente elastica avrà necessariamente una rigidezza maggiore di una struttura progettata sfruttando le capacità duttili, pertanto avrà anche una risposta in termini di accelerazione maggiore. Si guardi con attenzione le Figure 1 e 2. Si riferiscono alla stessa tipologia di edifici, nella fattispecie un ospedale, fotografati a seguito di un evento sismico. Come si può vedere dalla foto esterna, gli elementi strutturali sembrano non aver subito danno. Gli elementi non strutturali interni risultano, invece, fortemente danneggiati.

Una progettazione basata sul danneggiamento controllato avrebbe invece ridotto le accelerazioni di risposta ma non le deformazioni di interpiano. Mentre una protezione ottenuta mediante dissipazione supplementare di energia o isolamento sismico registrerebbe una riduzione delle accelerazioni e deformazioni di risposta, senza avere il danneggiamento degli elementi strutturali. In altre parole, con tecniche basate sulla dissipazione supplementare di energia o isolamento sismico si consegue la protezione dell'intero valore del fabbricato e del suo contenuto. Per non parlare dell'effetto benefico che ha la riduzione delle accelerazioni sulla percettibilità dell'azione sismica e sull'effetto panico.

### Dissipazione strutturale o supplementare

Una struttura, sottoposta all'azione sismica, ha diverse fonti di dissipazione energetica: dissipazione isteretica, dissipazione viscosa non lineare, dissipazione derivante da altre fonti non isteretiche. Il primo contributo, la dissipazione isteretica, è prodotto dal danneggiamento degli elementi strutturali sismo-resistenti, di cui abbiamo parlato precedentemente, dal comportamento attritivo degli elementi strutturali, da dispositivi eventualmente inseriti nella compagine strutturale. La dissipazione viscosa non lineare è eventualmente presente se sono stati inclusi dispositivi con tale legge reologica (che vedremo successivamente). Il terzo contributo dissipativo racchiude tutto quello che non può essere definito dai punti precedenti, per esempio, comportamento attritivo tra gli elementi strutturali e non strutturali, nel comportamento dissipativo degli elementi non strutturali (non modellati esplicitamente nel modello *FEM*), nella fessurazione di elementi in c.a. se presenti e nella deformazione dell'impianto fondazionale. In generale quest'ultimo contributo è modesto e prende il nome di “dissipazione viscosa lineare equivalente”. Tale nomenclatura nasce dal fatto che essa rappresenta un *escamotage* numerico per rappresentare le dissipazioni non espressamente computate nel modello analitico. Nella progettazione classica (quella basata su analisi per lo più lineari) si tiene in conto di queste eventuali fonti



Figura 1 - vista esterna di un ospedale soggetto ad evento sismico



Figura 2 - vista interna con danni agli elementi non strutturali

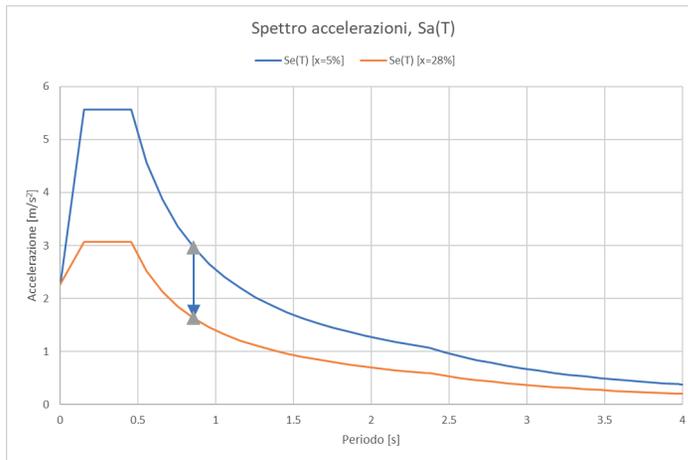


Figura 3 - spettri di risposta elastici in termini di accelerazione

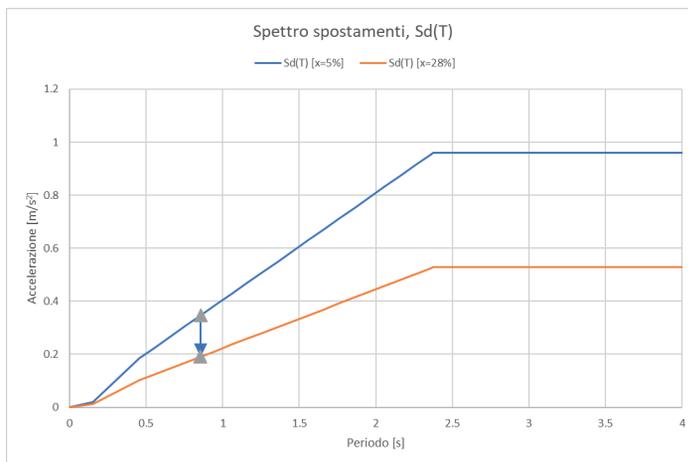


Figura 4  
spettri di risposta elastici in termini di spostamento

di dissipazione nel calcolo delle forze di progetto. Il termine isteretico, legato al danno, è computato mediante l'adozione di un fattore di struttura, mentre il termine generico di viscosità lineare è computato direttamente nello spettro di risposta elastico, tracciato per es. con un rapporto di smorzamento, il cui valore tipico è  $x = 5\%$ . Per meglio comprendere gli effetti di protezione sismica indotti da una dissipazione supplementare di energia è utile partire da un approccio lineare. Si immagini l'aggiunta di mera dissipazione, in altre parole si immagini che i dispositivi inseriti, nella compagine strutturale, producano un incremento trascurabile di rigidità orizzontale della struttura, essi interverranno solo aumentando notevolmente la capacità dissipativa (intervento di pura dissipazione). Con queste ipotesi il periodo fondamentale

della struttura rimarrà pressoché invariato. Si faccia riferimento allo spettro di risposta elastica, riportato in Figura 3, si immagini di poter "stimare" l'accresciuta capacità dissipativa e di poterla includere direttamente nel rapporto di smorzamento viscoso lineare equivalente, per esempio  $x = 28\%$ .

Sotto queste ipotesi, la domanda in termini di forza dell'azione sismica è direttamente calcolabile adottando uno spettro abbattuto, su tutte le ordinate spettrali, secondo le indicazioni di normativa. L'abbattimento è calcolabile mediante il fattore correttivo descritto nell'equazione (1).

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0,55 \quad (1)$$

Anche la riduzione della domanda di spo-

stamento indotta dall'azione sismica è stimabile con lo stesso criterio, si veda la Figura 4. Sotto queste ipotesi deformazioni e forze, nella struttura protetta, scenderanno della stessa quantità rispetto alla struttura nuda.

Come da premessa, questo approccio lineare è utile per descrivere i benefici indotti dalla dissipazione, ma difficilmente potrà essere adottato per una progettazione esecutiva dell'intervento di adeguamento. La difficoltà maggiore risiede proprio nella stima dello smorzamento aggiunto. Tale stima è possibile per un sistema assimilabile ad un grado di libertà (per esempio strutture mono-piano), ma per sistemi complessi, come strutture multipiano protette ai diversi livelli, risulta estremamente complesso: lo smorzamento incide in modo diverso ed indipendente sui diversi modi, rendendo la linearizzazione non più percorribile. Nei casi di strutture multipiano, quando la dissipazione è disposta su più livelli l'unico approccio numericamente possibile è l'analisi dinamica non lineare.

Nel caso di isolamento sismico, com'è noto il principale beneficio si ha nei confronti del periodo. Difatti, in questo caso, il progettista sceglie il periodo fondamentale della struttura isolata (normalmente compreso tra 2.5" e 3.5", ma può variare di caso in caso). Si faccia riferimento alla Figura 5. Si immagini una struttura tradizionale a base fissa, con periodo di 0.6". Con l'azione caratteristica rappresentata nello spettro, essa

sarebbe caratterizzata di una risposta di circa  $6 \text{ m/s}^2$ , se progettata per rimanere elastica ( $q=1$ ). Facendo l'ipotesi che abbia un sistema sismoresistente tale da garantire un  $q=3$ , la si progetterebbe per sopportare un'accelerazione di circa  $2 \text{ m/s}^2$ . Naturalmente, all'arrivo di un sisma di tale entità, per avere un  $q=3$  la struttura si danneggerebbe in modo significativo, consentendo tale sconto della risposta dinamica. Immaginiamo adesso di proteggere la stessa struttura isolandola. Si procederebbe alla scelta di dispositivi tali da garantire per esempio un periodo di 2.5" (il periodo è la principale scelta in fase di progettazione di una struttura isolata). Se immaginiamo i dispositivi a comportamento elastico, la struttura sarebbe soggetta ad una accelerazione di circa  $1.8 \text{ m/s}^2$ , ma si potrebbe fare la scelta di utilizzare dispositivi di isolamento che abbiano anche una buona capacità dissipativa. Per esempio, gomma-piombo, oppure gomma armata, con mescole di gomma altamente dissipative, oppure ancora, isolando mediante slitte piane ed introducendo dispositivi di dissipazione supplementare, per esempio fluido-viscosi [7].

Il ragionamento sino qui seguito è di tipo lineare. In sostanza, si sono confrontati benefici e procedure per o per proteggere la struttura mediante dissipazione supplementare seguendo una logica semplice e linearizzabile (semplice analisi spettrale con spettri modificati).

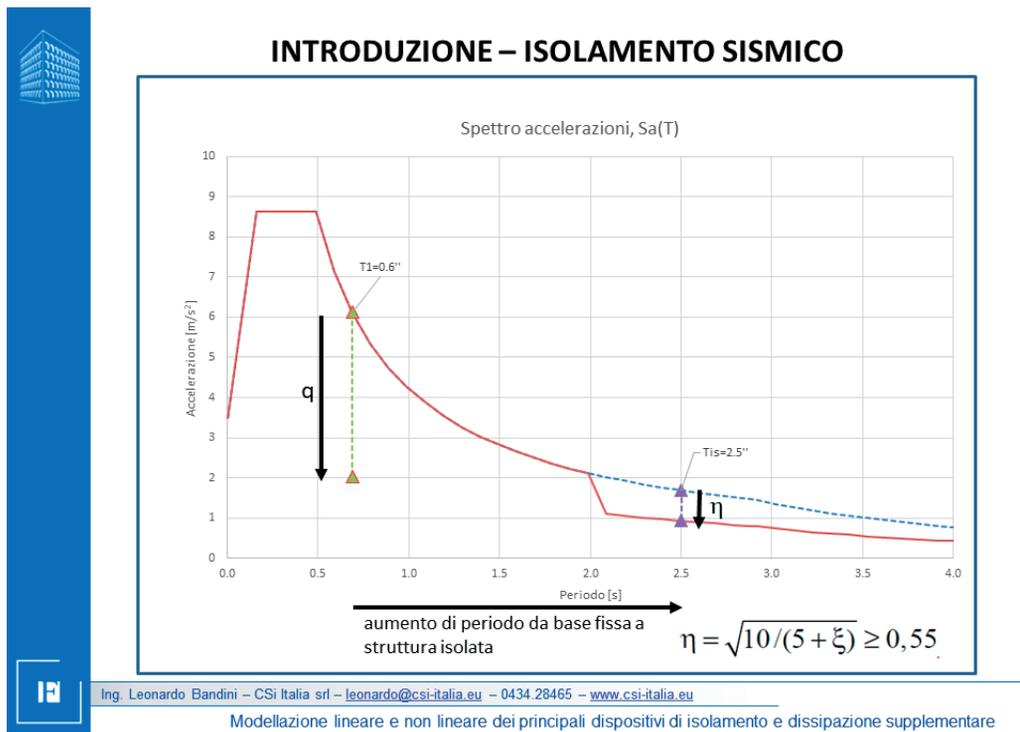


Figura 5 - slide isolamento sismico

### Procedura numerica: analisi dinamica non lineare

Da un punto di vista numerico la risposta dinamica di una struttura soggetta ad un'azione esterna può essere scritta secondo la nota espressione dell'equazione di moto (valida al generico istante  $t$ ) riportata nell'equazione (2).

$$M\ddot{u}_t + C\dot{u}_t + Ku_t \quad (2)$$

Dove:

- $M$ : matrice di massa;
- $C$ : matrice di smorzamento;
- $K$ : matrice di rigidità;
- $u_t$ : il vettore delle deformazioni al passo  $t$ ;
- $\dot{u}_t$ : il vettore delle velocità al passo  $t$ ;
- $\ddot{u}_t$ : il vettore delle accelerazioni al passo  $t$ ;
- $F_t$ : il vettore delle forze esterne applicate (o le forze inerziali) al passo  $t$ .

Per risolvere l'equazione di moto presente in (2) sono nati negli anni diversi approcci numerici. Di norma questi metodi si basano sull'integrazione diretta delle equazioni di moto: Newmark (Newmark et al., 1959), Hilbert-Huges-Taylor (HHT, Hilbert et al.), Wilson, ..., Tutti metodi c.d. a "forza bruta". Nel 2002, Wilson propone un metodo alternativo che prende il nome di "Fast Nonlinear Analysis" (FNA) (Wilson, 2002 [8], Bandini, 2006 [9]). Le strutture presentano generalmente un limi-

tato numero di membrature impegnate in campo non lineare durante un'azione sismica; tale numero scende sensibilmente per quelle dotate di elementi di dissipazione supplementare di energia o di dispositivi di isolamento sismico, mantenendo essenzialmente in campo elastico la risposta della restante parte dell'organismo strutturale. Nel modello computazionale, soprattutto nell'ambito di problemi dinamici, risulta quindi opportuno evitare un approccio di analisi non lineare a forza bruta, ossia, mediante integrazione diretta delle equazioni di moto, il cui processo risolutivo preveda l'aggiornamento della matrice di rigidità ad ogni passo di integrazione. Nasce così il metodo FNA. Con tale metodo si procede al disaccoppiamento delle equazioni di moto su base modale. Ogni modo viene integrato al passo ed il risultato finale viene ottenuto da una semplice somma delle risposte ai singoli modi, per ogni istante temporale. Il vantaggio in termini computazionali è evidente ed è quantificabile in una riduzione dei tempi di analisi di circa un fattore 100 [9].

### Semplice classificazione dei dispositivi

In letteratura ed in commercio si trovano numerosi dispositivi di dissipazione supplementare di energia e d'isolamento. Una prima classificazione di questi può essere fatta sulla base della legge reologica che li governa, per comodità riportata nella Tabella 1.

Comune classificazione di dispositivi di isolamento o dissipazione supplementare di energia			
Classificazione	Principi sfruttati	Materiali e tecnologie	Risultato
Dispositivi isteretici	Snervamento del materiale	Acciaio, metalli dolci ciclicamente stabili	Dissipazione di energia, accrescimento della rigidità, miglioramento della resistenza
	Attrito	Contatto metallo - metallo o non metallo	Dissipazione di energia, sconnessione/isolamento
Dispositivi viscoelastici	Deformazione di solidi viscoelastici	Polimeri viscoelastici	Dissipazione di energia, assorbimento di urti, mancanza di contrasto a deformazioni lente o quasi statiche
	Deformazione di fluidi viscoelastici o a matrice siliconica	Fluidi altamente viscosi (olio, silicone)	
Dispositivi ricentranti	Fluido in pressione passante in orifici	Fluidi comprimibili, sigillatura ad alte pressioni	Dissipazione di energia, limitato accrescimento della rigidità, capacità ricentranti.
	Azione di molle ad attrito	Isteresi attritiva per contatto	
	Trasformazione di fase nei metalli	Leghe a memorie di forma, comportamento superelastico	

Tabella 1 - tabella di classificazione dei dispositivi per la dissipazione supplementare di energia

### Tecniche di modellazione

In linea generale, sia che la dissipazione supplementare di energia venga utilizzata come tecnica di adeguamento di una struttura esistente, sia che venga utilizzata come metodo di protezione di una struttura di nuova realizzazione, essa è volta alla protezione pressoché completa degli altri elementi strutturali, i quali avranno quindi un danneggiamento nullo o limitato. La stessa asserzione vale nel caso di isolamento sismico. Questa condizione semplifica molto la modellazione strutturale. Difatti, facendo la scelta di adottare metodi di analisi non lineari, tale non linearità deve essere presente nei modelli *FEM* utilizzati, ed essendo essa adducibile ai dispositivi utilizzati permette la realizzazione di modelli numerici interamente lineari ad eccezione dei dispositivi stessi. La non linearità dei dispositivi è di norma più facilmente quantificabile e definibile rispetto a quella indotta dal danneggiamento degli elementi strutturali. Sui dispositivi i produttori rilasciano dettagliate schede tecniche nelle quali sono presenti, a seconda di caso, le leggi costitutive (Forza-Spostamento, Forza-Velocità) necessarie alla modellazione dei medesimi. Per la modellazione dei dispositivi si utilizzano elementi finiti *ad hoc*, in **SAP2000** per esempio, questi elementi si chiamano *NLLINK* (Non-Linear Link, qui di seguito indicati semplicemente con il termine *Link*). In molti casi i dispositivi richiedono solo la presenza di un unico Link per la loro modellazione, in alcuni di essi occorre l'utilizzo di più *Link* messi in parallelo (elementi finiti che uniscono la stessa coppia di nodi) o in serie. In tutti i casi risulterà comunque semplice verificare il comportamento di questi elementi. Il vantaggio di una modellazione esplicita delle non linearità è innegabilmente quello che i risultati ottenuti ricalcheranno in modo fedele il comportamento atteso, in altre parole, in fase di definizione del modello di analisi si passa in modo esplicito la legge di comportamento degli unici elementi non lineari, che a seguito delle analisi potrà essere stampata istante per istante, potendola così verificare. Di seguito verranno presentati alcuni dei più comuni dispositivi di dissipazione ed isolamento sismico insieme alla loro modellazione. La lista non vuole essere esaustiva; in commercio ne esistono un numero considerevole, ma ha il compito di mostrare le diverse tipologie di modellazione.

### Modellazione FEM in campo non lineare dei dispositivi

I dispositivi qui presenti e riportati in Figura 6 e 7 sono stati descritti durante il già citato evento di formazione presso l'Ordine degli Ingegneri di Roma, la loro modellazione in ambito FEM, viene eseguita ricorrendo ad elementi *ad hoc* basati sulla riproduzione della legge isteretica che li governa. Nei codici di calcolo destinati ad analisi non lineare, si ritrovano elencati proprio sulla base della loro legge di comportamento. In **SAP2000**, la loro modellazione avviene utilizzando uno o più dei seguenti elementi *Link* presenti:

- Linear Link, elemento lineare definibile separatamente sui 6 gradi di libertà;
- MultiLinear Elastic, legge elastica definibile a tratti lineari;
- MultiLinear Plastic, legge elastoplastica, con backbone definita a tratti e legge isteretica di tipo: cinematico, Pivot, Takeda, Concrete, BRB o Degrading;
- Damper exponential, legge di Maxwell per fluidoviscosi e viscoelastici;
- Friction Spring Damper;
- GAP/Hook, elementi resistenti a sola compressione o trazione con apertura, utili per fondo corsa e stop di arresto;
- Rubber isolator, Link per dispositivi in gomma e gomma-piombo;
- Friction isolator e *triple pendulum isolator*, per dispositivi di isolamento pendolari.

Seguono una lista di possibili dispositivi e loro modellazione. Per maggiori informazioni al riguardo si rimanda a [1][7][10], oppure, si prega di contattare direttamente lo scrivente.

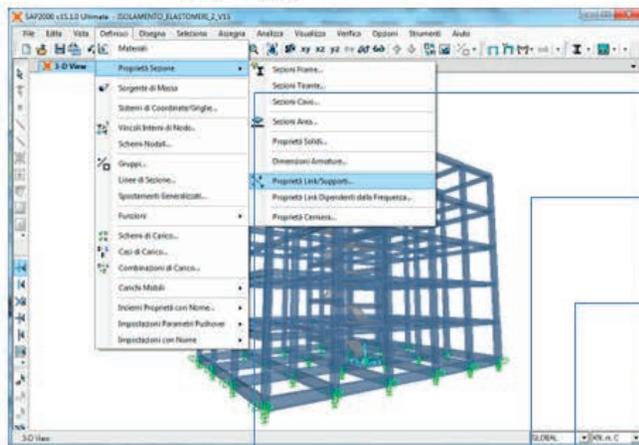


Figura 6



Figura 7

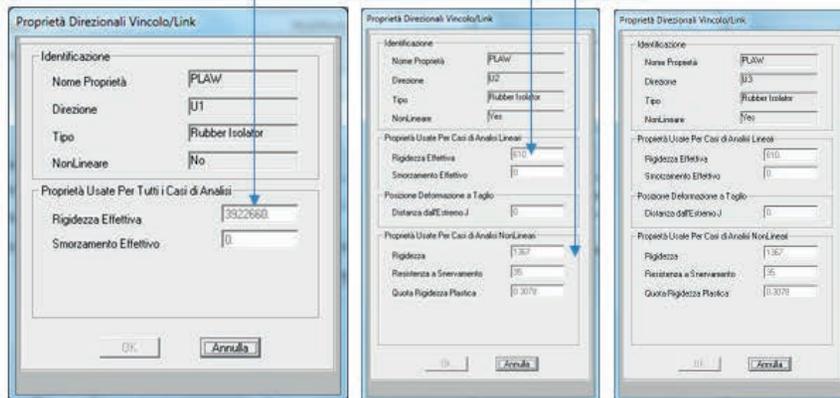
## Appoggi elastomerici – modellazione non lineare



Inserire la rigidezza lineare per la componente verticale del dispositivo (il comportamento verticale è lineare)

Rigidezza equivalente che verrà utilizzata esclusivamente in analisi lineari (per esempio modale)

Rigidezza di primo ramo, forza di snervamento ed incrudimento per le due direzioni a taglio del dispositivo



Ing. Leonardo Bandini – CSI Italia srl – [leonardo@csi-italia.eu](mailto:leonardo@csi-italia.eu) – 0434.28465 – [www.csi-italia.eu](http://www.csi-italia.eu)

Modellazione lineare e non lineare dei principali dispositivi di isolamento e dissipazione supplementare

24/03/2023 pag. 24

Figura 8 - appoggio in elastomero armato

### Dispositivi di isolamento sismico e loro modellazione FEM

- Dispositivi di appoggio in neoprene armato** (Slide 19-24 [1]):  
 sono i dispositivi di appoggio più semplici da comprendere e da riprodurre numericamente. Da un punto di vista fisico sono strati di gomma vulcanizzati insieme a piatti metallici interposti, aventi lo scopo di confinamento per la gomma. Sono spesso caratterizzati da una modesta capacità dissipativa ed una rigidezza che rimane pressoché costante per tutto il range di deformazione. Per questo motivo sono facilmente linearizzabili, il loro comportamento numerico è assimilabile ad una semplice molla. Si può tenere in conto della loro capacità dissipativa, abbattendo lo spettro di progetto ed adottando così procedure numeriche lineari (analisi dinamica lineare), in modo descritto nella Figura 5. Da un punto di vista della modellazione è possibile utilizzare *Link* a due nodi o, ad un nodo definiti come *linear Link*. In alternativa è possibile definire il comportamento bilatero, utilizzando dei *Link* di tipo *Rubber Isolator*, eseguendo analisi dinamiche non lineari. In questo caso una possibile definizione è riportata nella Figura 8;
- Gomma piombo** (Slide 25-32 [1]):  
 in sintesi, sono dispositivi di appoggio simili ai precedenti, ma dotati di una maggiore capacità dissipativa derivante dal nucleo in piombo. Da un punto di vista di modellazione numerica, ven-



Figura 9 - elastomero armato con nucleo in piombo

gono utilizzati dei *Link* non lineari denominati *Rubber Isolator*, realizzati *ad hoc*. Una possibile definizione è riportata nella Figura 9;

- **Appoggi attritivi pendolari** (Slide 33-42 [1]): sono dispositivi di appoggio caratterizzati da un comportamento attritivo. Possono essere a singola o doppia (meno diffusamente a tripla) superficie di scorrimento. Nel caso di singola o doppia superficie di scorrimento, per la loro modellazione numerica, si utilizza un *Link* denominato *T/C Friction Isolator*. La definizione numerica di questi dispositivi è essenzialmente basata sul loro attrito e sul raggio della superficie di scorrimento. Nel caso di doppia superficie di scorrimento, viene utilizzato il raggio equivalente. Questi parametri di modellazione sono ben descritti nei cataloghi dei produttori, nel caso specifico delle slide indicate sono riportati i parametri di dispositivi prodotti da due di essi: FIP MEC srl e Maurer SE, Figura 10. Un tipico esempio di modellazione è riportato in Figura 11;
- **Dispositivi di dissipazione supplementare di energia Buckling Restrained Braces** (Slide 59 [1]): controventi ad instabilità impedita, sono controventi dimensionati per plasticizzarsi a compressione e trazione, sono realizzati mediante sezioni metalliche, di norma rivestite in modo da impedirne l'instabilità a compressione. La dissipazione avviene mediante isteresi metallica, la modellazione è molto semplice si utilizza un *Link* di tipo *Plastic WEN*. I parametri che governano il ciclo isteretico, sono: la rigidezza di primo ramo, la soglia di snervamento, l'incrudimento (rapporto tra la pendenza di secondo ramo e quella di primo ramo) ed un esponente che regola la curva di passaggio tra il primo ed il secondo ramo, di norma questo esponente è di ordine 2 o 3. Imponendo, invece, un esponente alto (valore consigliato 20) si ha un passaggio a cuspidi tra le due pendenze (di primo e secondo ramo);
- **Fluidi viscosi, doppio effetto** (Slide 56-58 [1]): rispetto a quelli a singolo effetto, quelli a doppio effetto non hanno un'apprezzabile rigidezza elastica, il loro ciclo isteretico si presenta come pseudo-rettangolare, con gli spigoli smussati,

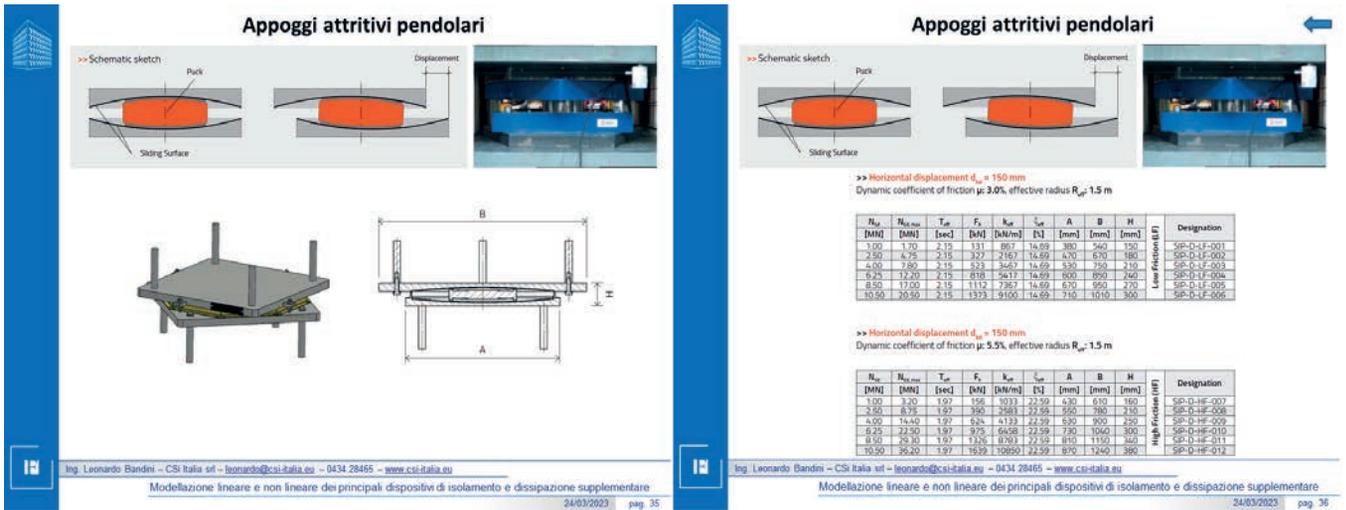


Figura 10 - dispositivo pendolare a doppia superficie di scorrimento

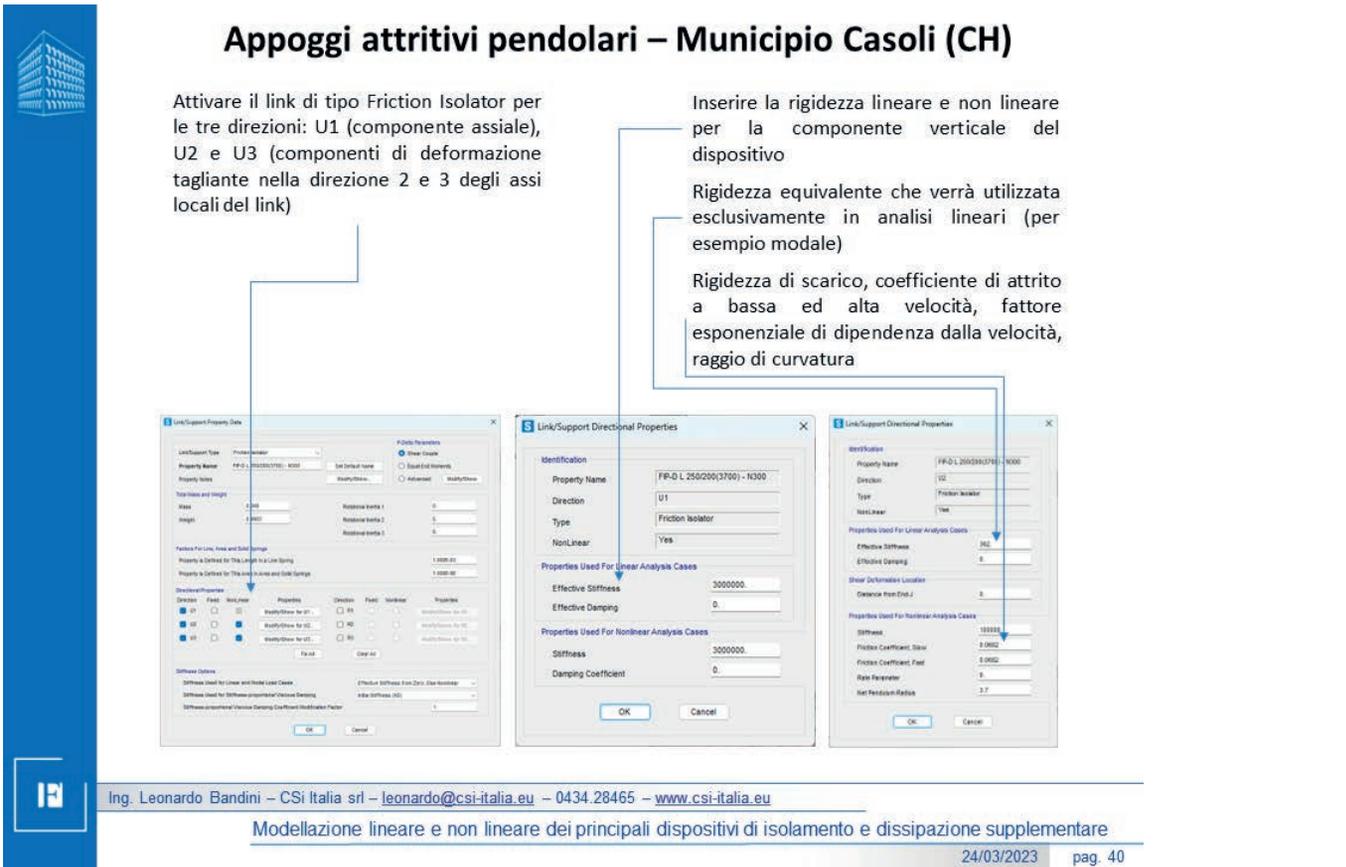


Figura 11 - esempio di parametrizzazione numerica di un dispositivo di appoggio pendolare

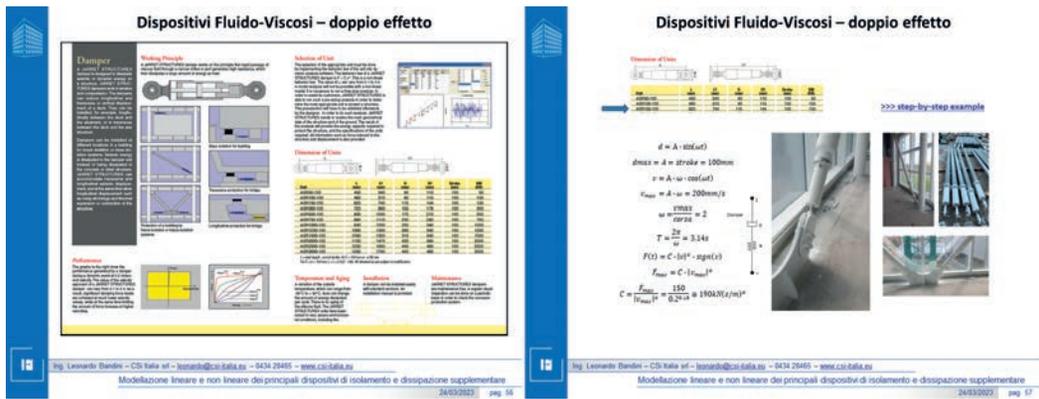


Figura 12 - dispositivi fluido-viscosi a doppio effetto

una sorta di ellisse che degenera in un rettangolo. La componente viscosa segue la legge di Maxwell quindi è identica a quanto descritto precedentemente. Si modellano ricorrendo ad un unico Link di tipo Damper. Nelle slide [1] viene anche riportato un collegamento ad un video di libera fruizione dove lo scrivente mostra un esempio passo-passo descrivendo la formulazione, la caratterizzazione e la scelta di un dispositivo di tipo Fluido-Viscoso;

- Shark, Adaptive-Shark – Maurer SE** (Slide 60-63 [1]):  
 si tratta di un dispositivo la cui dissipazione è affidata all'isteresi metallica delle sue componenti. Esiste un particolare dispositivo denominato Adaptive-Shark, rappresentato nella Figura 13 Figura 14. Il termine adattivo indica che per basse deformazioni (azioni sismiche modeste), si attiva solo una parte del dispositivo, plasticizzando solo una porzione di elementi, per azioni maggiori, la plasticizzazione interessa un numero maggiore di elementi, questo comporta un ciclo isteretico più complesso, rappresentato nelle figure soprastanti. La modellazione in **SAP2000** risulta possibile eseguendo una combinazione di più Link, in particolare si utilizzano 3 Link: un primo Link di tipo WEN, un Link di tipo *multi-linear elastic* ed un secondo Link di tipo WEN. Il primo WEN, denominato nello schema di Figura 14 come WEN1 è in serie al parallelo del secondo Link WEN



Figura 13 - dispositivo Shark prodotto da Maurer SE

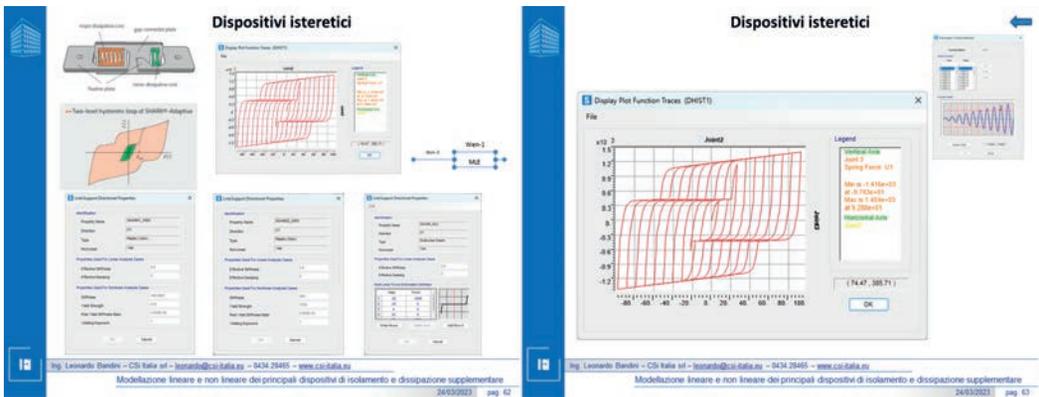


Figura 14 - dispositivo Shark prodotto da Maurer SE

(denominato come WEN2) ed il Link multi lineare elastico.

### Caso studio dissipazione supplementare di energia: la torre CPC di Modena

Come esempio applicativo di struttura sismicamente protetta mediante dissipazione supplementare di energia si riporta la **torre CPC** di Modena, la cui realizzazione è stata completata nel 2022. L'edificio, realizzato a struttura mista acciaio-clt, si trova nella zona industriale della periferia nord della città di Modena. Si tratta di un edificio di 11 piani fuori terra, più un interrato, interamente destinato ad uffici di proprietà della società CPC srl.

Particolarità della struttura metallica è senza dubbio rappresentata dall'utilizzo di controventi tradizionali accoppiati a controventi ospitanti dispositivi di dissipazione supplementare di energia. Le sollecitazioni orizzontali di natura quasi statica, per esempio dovute al vento o in generale quelle associate alla funzione di stabilizzazione, sono affidate ai controventi di tipo tradizionale, che rimangono in campo elastico, mentre le sollecitazioni di natura dinamica, per esempio di tipo sismico (o la componente dinamica del vento) sono ripartite sul sistema doppio: tradizionale e dissipativo. I dispositivi, utilizzati per la dissipazione supplementare di energia, sono di tipo Fluido-Viscosi a matrice silconica, i c.d. dispositivi a doppio effetto. Questi dispositivi hanno lo scopo di accrescere notevolmente la capacità dissipativa della struttura e quindi, quello di ridurre le azioni sismiche previste. Il doppio sistema di controventamento conferisce la proprietà auto-ricentrante: assenza deformazioni permanenti in seguito all'evento sismico. Si riportano in modo sintetico i soggetti interessati nella realizzazione della suddetta opera:

- CPC srl – lavorazione meccanica su composito e metallo;
- progettista architettonico: arch. Marcello Dettori;
- progettista strutturale: ing. Bruno Dettori;
- d.l.: ing. Dario Nozza;
- collaudatore: ing. Leonardo Bandini.

Alcune foto dell'opera sono riportate in Figura 15.

In particolare, si osservi il doppio sistema controventate, costituito da diagonale tesa/compressa tradizionale e diagonale ospitante dispositivi di dissipazione supplementare di tipo Fluido-Viscoso a matrice silconica (Figura 16). Lo scopo di tale scelta è quello di abbattere la domanda dell'azione sismica accrescendo la dissipazione della struttura senza ricorrere nel danneggiamento degli elementi strutturali. Nel caso specifico l'obiettivo era quello di ridurre a circa il 50% le azioni di natura sismica, ma un beneficio maggiore potrebbe essere ottenuto scegliendo dispositivi della stessa categoria, ma con capacità dissipativa maggiore, oppure, disponendo un maggior numero degli stessi. Come ulteriore obiettivo era stato scelto di voler aumentare il comfort per tutte le azioni di natura dinamica: come vento o azioni ambientali (per esempio traffico).

Il modello di analisi è stato realizzato con l'ausilio del codice di calcolo **SAP2000**, le uniche non linearità presenti nel modello sono rappresentate dagli elementi NLLINK rappresentanti il comportamento delle diagonali di controvento che ospitano i dispositivi fluido-viscosi, gli altri elementi finiti utilizzati per colonne,



Figura 15 - vista dei dispositivi di dissipazione supplementare integrati nei controventi

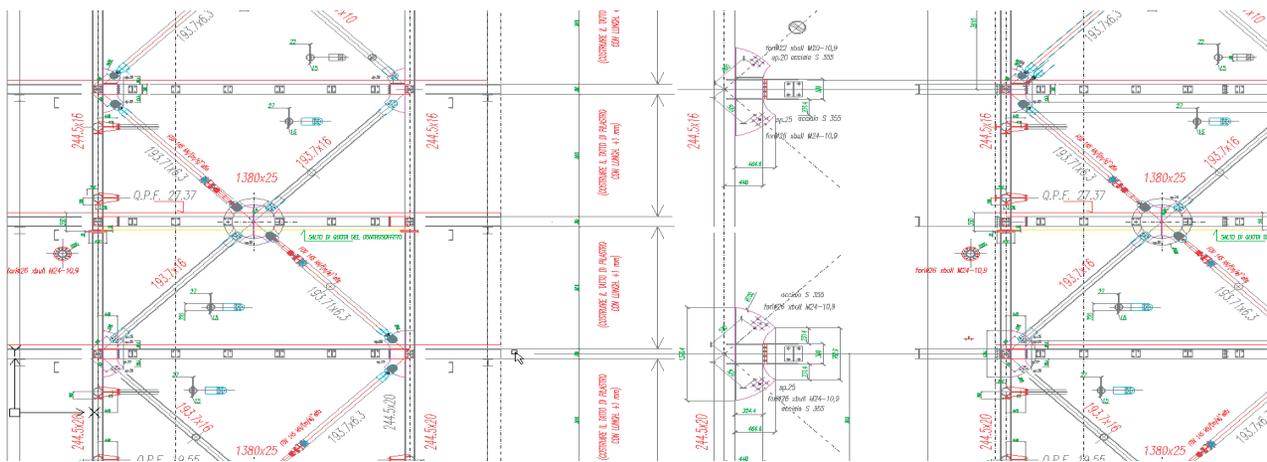


Figura 16 - schema generale di controventamento

travi, porzioni di solaio seguono una trattazione tradizionale ed un comportamento lineare ed elastico.

### Caso studio isolamento sismico: Il Municipio di Casoli

L'isolamento sismico è un'ottima tecnica di protezione sismica per strutture di nuova realizzazione, ma nel contempo si presta alla protezione anche di strutture esistenti. L'esempio qui riportato riguarda proprio questo secondo caso. Il **Municipio di Casoli** è ospitato in un fabbricato realizzato alla fine degli anni Cinquanta costituito da un unico corpo di fabbrica. L'intervento di adeguamento è consistito nell'introduzione di dispositivi di isolamento sismico di tipo ad attrito con superficie curva, montati in sommità delle colonne del piano seminterrato. Tali dispositivi, a comportamento non lineare, hanno il compito di isolare sismicamente la sovrastruttura e al contempo di dissipare l'energia sismica prodotta dall'evento di progetto. Nella Figura 18, 19, 20 e 21 sono riportati il modello numerico, alcuni risultati ed alcune foto dell'intervento di taglio della sottostruttura atto all'inserimento dei dispositivi. Il risultato di tale intervento è quello di aver consentito una riduzione delle azioni sismiche previste dell'ordine del 90%.

Da un punto di vista della modellazione *FEM*, il modello è interamente lineare (quindi tradizionale) ad eccezione degli isolatori che sono stati modellati con elementi *Link* di tipo *Friction Isolator*.

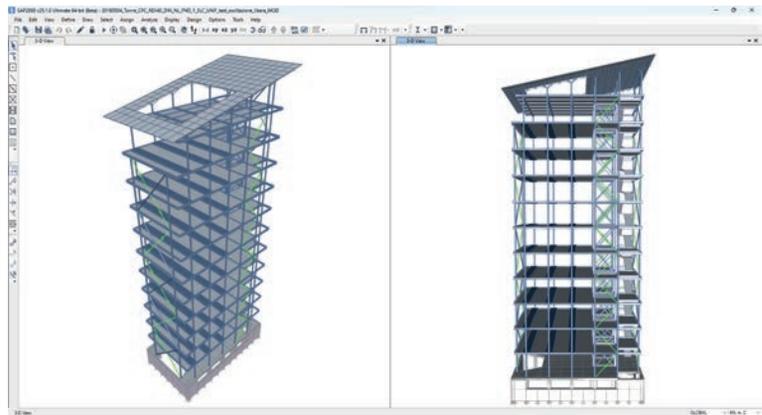


Figura 17 - modello di analisi in SAP2000, in verde sono evidenziati i Link a comportamento non lineare



Figura 18 - isolamento sismico struttura esistente



Figura 19 - isolamento sismico struttura esistente



Figura 20 - isolamento sismico struttura esistente



Figura 21 - isolamento sismico struttura esistente

## Bibliografia

- [1] Bandini, Leonardo. Modellazione lineare e non lineare dei principali dispositivi di isolamento sismico e dissipazione supplementare di energia. [Online] <https://www.leonardobandini.it/lezioni/isolamentodissipazione.zip>.
- [2] Computers And Structures, inc. SAP2000. Walnut Creek, CA 94596: s.n., V25.
- [3] MIT. Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni. DM 17 gennaio 2018, NTC18. 2018.
- [4] CEN. EN1998 Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance. EC8. 2004.
- [5] FEMA. Next-Generation Performance-Based Seismic Design Guidelines. 2006, Vol. FEMA-445.
- [6] FEMA. Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage – A Practical Guide. 2012, Vol. FEMA E-74.
- [7] S.Sorace, G. Russo et Al. Protezione sismica delle strutture - Tecnologie innovative - Ricerca - Applicazioni. s.l.: CISM - Flaccovio Editore - DF8835, 2006.
- [8] Edward L. Wilson, Professor Emeritus of Structural Engineering. Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures - A Physical Approach With Emphasis on Earthquake Engineering. Berkeley, California, USA: CSI, 2002.
- [9] Sorace, S., Terenzi, G. e Bandini, L. Le potenzialità della "FNA" nell'analisi dinamica non lineare di strutture dotate di sistemi avanzati di protezione sismica. GIMC 2006, Bologna: s.n., 2006.
- [10] Computers and Structures, inc. SAP2000 V25 - CSI Analysis Reference Manual. Walnut Creek, California 94596: CSI, 2017 - Rev 18.



*a cura di:*  
Prof. Ing.  
Lucio Della Sala  
*Professore emerito di*  
*Costruzione di Ponti,*  
*Università della Basilicata*

Ing. Rosario Cerone,  
*Libero Professionista*

Ing. Alberto Gennari  
Santori  
*Libero Professionista*



**ISPEZIONE SPECIALE E MANUTENZIONE  
STRAORDINARIA DEL VIADOTTO  
STRALLATO CARPINETO I**

### Premessa

In applicazione alle LLGG ponti esistenti, a 45 anni dalla sua entrata in servizio il viadotto strallato Carpineto I, una delle opere iconiche di Riccardo Morandi, è stata oggetto di un'esaustiva campagna di rilievi ed indagini strutturali, modellazioni e verifiche numeriche che hanno portato alla progettazione ed esecuzione di una serie di interventi di manutenzione straordinaria. Nel presente articolo si descrivono sinteticamente le attività di diagnostica e verifica strutturale e si espone nel dettaglio la prima fase di interventi manutentivi, consistenti nella sostituzione degli apparecchi di appoggio e di giunto delle travate tampone del viadotto.

### DESCRIZIONE DELL'OPERA

Il viadotto Carpineto I, ultimato nel 1976, rappresenta, in ordine di tempo, l'ultimo dei ponti strallati omogeneizzati in calcestruzzo armato precompresso realizzati su progetto del prof. ing. Riccardo Morandi (Figura 1).

L'opera presenta due vie di corsa parallele separate ed indipendenti, ognuna della larghezza di 9.5 m e lunghezza complessiva di 241.8 m. Ogni carreggiata è costituita da una coppia di strutture strallate ad ancoraggio esterno collegate mutuamente da una travata isostatica di luce 42.0 m, in maniera tale da realizzare una luce centrale di 181.0 m e consentire il superamento di una zona vallecola in frana (Figura 2). Ogni sistema strallato si compone di una travata principale a cassone biconnessa monocellulare in c.a.p. di lunghezza 65.5 m (C-D-E), incernierata ad una estremità al blocco di fondazione in corrispondenza della pila e sospesa ad una coppia di stralli in campata; le due travi a cassone sono collegate tra loro da un impalcato tampone a graticcio, in c.a.p., semplicemente appoggiato mediante selle Gerber (EE'). Gli stralli sono realizzati mediante tiranti costituiti da elementi in cls da un fascio di 15 cavi paralleli<sup>1</sup> composti da 16 trefoli da 0.5" protetti da un "guscio" in calcestruzzo armato a sezione rettangolare a creare una guaina in c.a.p.. Il "guscio" è costituito da conci prefabbricati di lunghezza 2.0 m, precompressi longitudinalmente mediante ulteriori 10 cavi<sup>2</sup> composti da 8 trefoli da 0.5" in modo da imprimere una presollecitazione che impedisce l'insorgenza di tensioni di trazione nel calcestruzzo nelle massime condizioni di esercizio (Figura 3).

Le antenne sono formate da 2 ritti a sezione rettangolare inclinati di 22° sulla verticale, di altezza pari a 32.0 m e collegati in testa da un traversone cavo in c.a.p. Tutti i cavi sono passanti su ciascuna antenna tramite apposite selle di rinvio realizzate con profilati in acciaio successivamente annegate nel calcestruzzo.



Figura 1 - Vista dell'opera

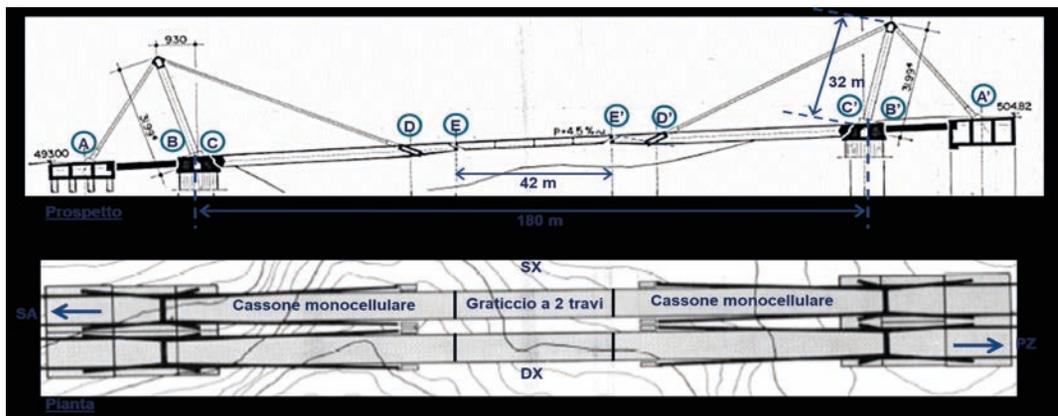


Figura 2 - Schema dell'opera

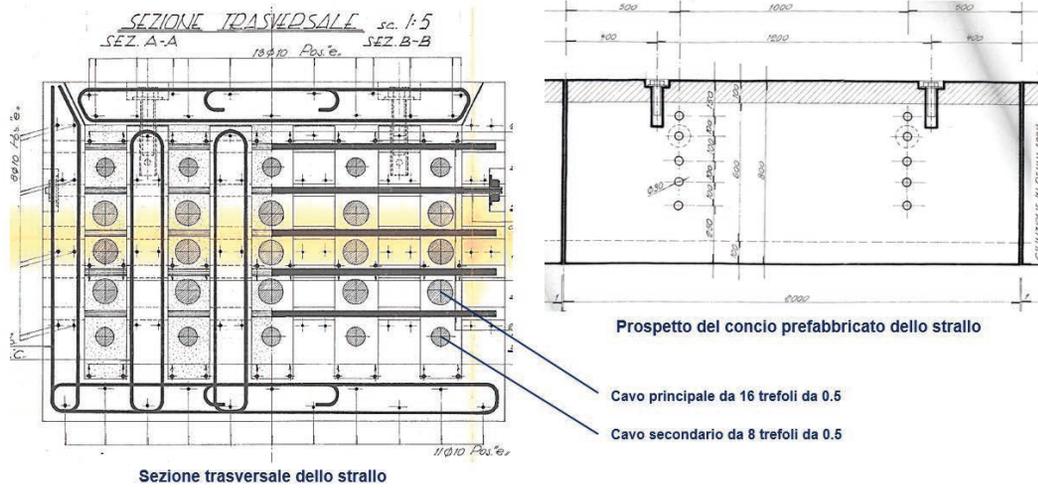


Figura 3 - Caratteristiche dello strallo



Figura 4 – Degradamento superficiale della sella Gerber



Figura 5 – Degradamento superficiale degli stralli



Figura 6 – Degradamento degli apparecchi di appoggio



Figura 7 – Degradamento degli apparecchi di giunto

## CAMPAGNA DIAGNOSTICA E MODELLAZIONE NUMERICA

La campagna diagnostica, eseguita nel corso del biennio 2022-2023 a cura del Laboratorio di Diagnostica Strutturale del Centro Sperimentale Stradale ANAS di Cesano, e le attività di modellazione numerica, sono state articolate nelle seguenti fasi:

50

- **ispezione visiva** ravvicinata di tutti gli elementi strutturali in elevazione (impalcati a cassone e travate di accoppiamento, stralli, antenne), eseguita sia direttamente a distanza di braccio che con l'ausilio di droni, con mappatura e schedatura fotografica delle formazioni di degrado. Le ispezioni hanno consentito di evidenziare la presenza di diffusi fenomeni di degrado superficiale sui vari elementi strutturali esposti agli agenti atmosferici dove il calcestruzzo risulta interessato da dilavamento e locali distacchi del copriferro con esposizione ed ossidazione delle armature lente, in particolar modo sulle selle Gerber delle travate tampono (Figura 4) e sugli stralli (Figura 5); in corrispondenza delle citate selle si è riscontrato tra l'altro un pessimo stato di conservazione sia delle apparecchiature di appoggio (Figura 6), che di giunto longitudinale (Figura 7);
- **Rilievo geometrico e dei dettagli costruttivi:**
  - rilievo topografico della configurazione a catenaria degli stralli;
  - rilievo del tracciato dei cavi di precompressione degli impalcati a cassone, della travata tampono, del traversone di sommità delle antenne, mediante prospezioni georadar e saggi conoscitivi (Figura 8);
  - rilievo del sistema di rinvio dei cavi degli stralli sulla sommità delle antenne, mediante saggi conoscitivi.

I rilievi effettuati hanno confermato la piena corrispondenza tra quanto riportato nei documenti di contabilità finale e la struttura reale;

- **Rilievo dello stato di conservazione dei cavi di precompressione e della tensione di precompressione residua:**
  - valutazione dell'integrità dei cavi di precompressione mediante ispezioni endoscopiche eseguite sugli stralli (n. 105), sugli impalcati a cassone e sulla travata di accoppiamento (n. 24) e sui traversoni di sommità delle antenne (n. 3) (Figura 9);
  - valutazione della tensione residua "locale" dei cavi di precompressione, mediante prove di rilascio eseguite sui fili dei trefoli dei cavi degli stralli (15 prove), degli impalcati a cassone e della travata tampono (9 prove);
  - valutazione della tensione residua media "globale" del calcestruzzo degli stralli mediante 24 prove di rilascio sul cls, effettuate con la tecnica dei 4 tagli.

Le prospezioni endoscopiche hanno evidenziato che i cavi degli stralli risultano iniettati ed interessati nella maggior parte dei casi da una lieve ossidazione superficiale oltre che dalla presenza di leggera umidità, ad eccezione di un unico cavo sul quale i trefoli sono risultati corrosi; i trefoli dei cavi investigati sugli impalcati e sui traversoni di sommità delle antenne sono generalmente risultati in buone condizioni di conservazione.



Figura 8 - Rilievo armature e cavi selle Gerber



Figura 9 - Ispezione endoscopica dei cavi di precompressione

Le prove di rilascio sui trefoli hanno evidenziato tensioni medie di 723 MPa per i cavi degli stralli e di 841 MPa per i cavi degli impalcati. Analogamente, le prove di rilascio sul calcestruzzo degli stralli hanno fornito tensioni medie di -2.7 Mpa;

- **rilievo delle proprietà meccaniche del calcestruzzo:**  
esecuzione di prove di compressione a rottura su 10 carote di calcestruzzo prelevate dalle antenne e dagli impalcati. La resistenza cubica media in sito del calcestruzzo è risultata pari a 68.6 Mpa;
- **identificazione modale:**  
esecuzione di prove di identificazione modale sull'intera struttura con la tecnica OMA (Operational Modal Analysis), sotto l'azione del traffico stradale, strumentando con accelerometri in configurazione mono, bi o triassiale 30 punti di misura ubicati su impalcati, antenne e stralli.

I rilievi dinamici hanno consentito di individuare 13 modi naturali di vibrazione (Figura 10), i cui parametri (frequenze, spostamenti e smorzamenti modali) sono stati successivamente impiegati per calibrare un modello fisico-matematico della struttura;

- **Modellazione numerica:**  
i dati ottenuti dalle prove e dai rilievi effettuati in sito sono stati utilizzati per mettere a punto un modello strutturale agli elementi finiti predisposto in maniera tale da considerare sia la sequenza di tutte le fasi costruttive che i fenomeni di viscosità e ritiro prevedibili con le attuali normative, al duplice scopo di:
  - o valutare attendibilmente le sollecitazioni delle membrature nelle massime condizioni di esercizio;
  - o progettare una prova di carico statico di validazione del comportamento strutturale dell'opera d'arte mirata, tra l'altro, a definire il grado di sicurezza di quest'ultima.

La struttura è stata schematizzata come un sistema di elementi *Cable* ed elementi *beam* a comportamento elastico lineare riportando le reali sezioni dei diversi elementi strutturali (Figura 11). Successivamente, mediante tecniche di *modal-updating* si è proceduto alla calibrazione del modello, operando sui vari parametri che influenzano la rigidità delle varie membrature e dei vincoli esterni fino a minimizzare lo scarto tra i parametri modali individuati sperimentalmente mediante le prove dinamiche ed i corrispondenti parametri teorici calcolati sul modello. L'analisi della sollecitazione del modello calibrato ha confermato, anche se solo per i carichi permanenti, il comportamento a sezione interamente reagente degli stralli imposto da Morandi.

Per verificare il reale comportamento dell'opera sotto i carichi di esercizio, il modello calibrato è stato impiegato per progettare una serie di prove di carico tese al rilievo dell'effettivo comportamento del Viadotto sotto l'azione dei carichi di esercizio, valutando sia le sollecitazioni che le deformazioni indotte nei diversi elementi strutturali dai carichi di prova;

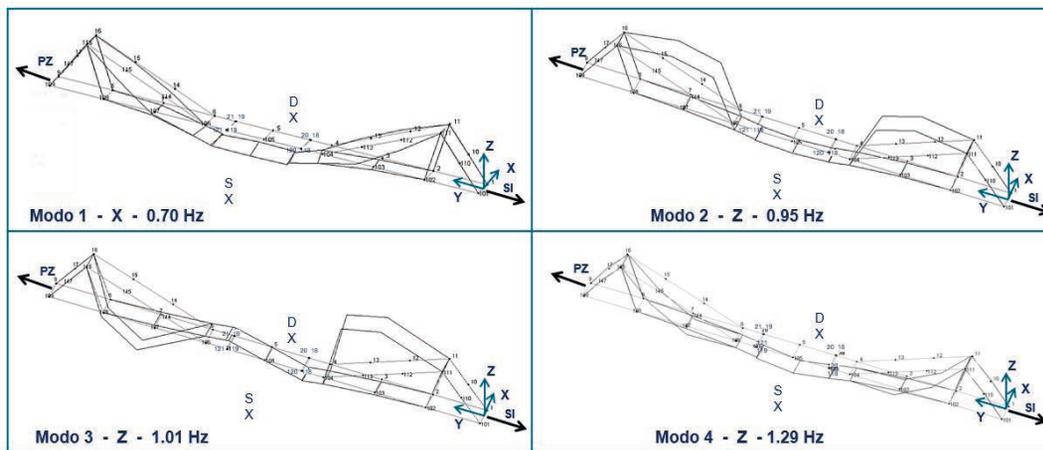


Figura 10 - Deformate modali dei primi 4 modi individuati mediante prove dinamiche

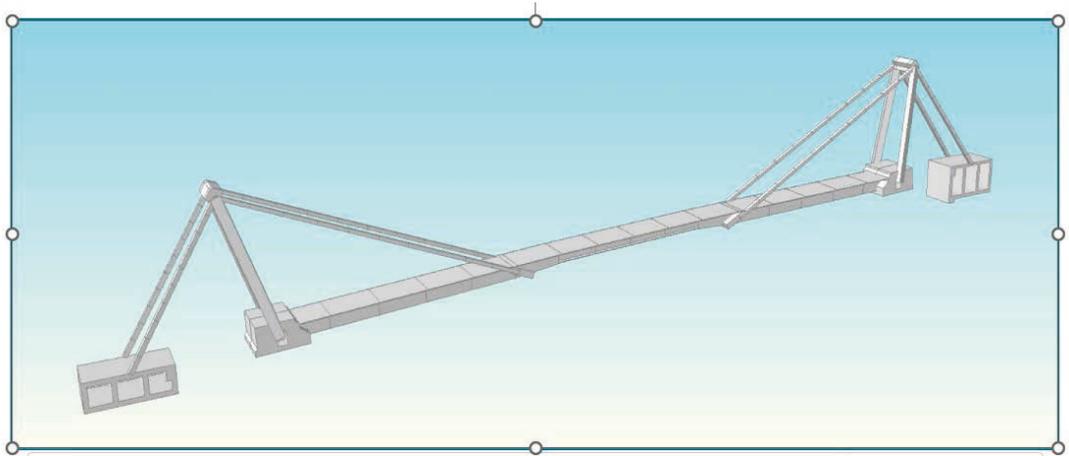
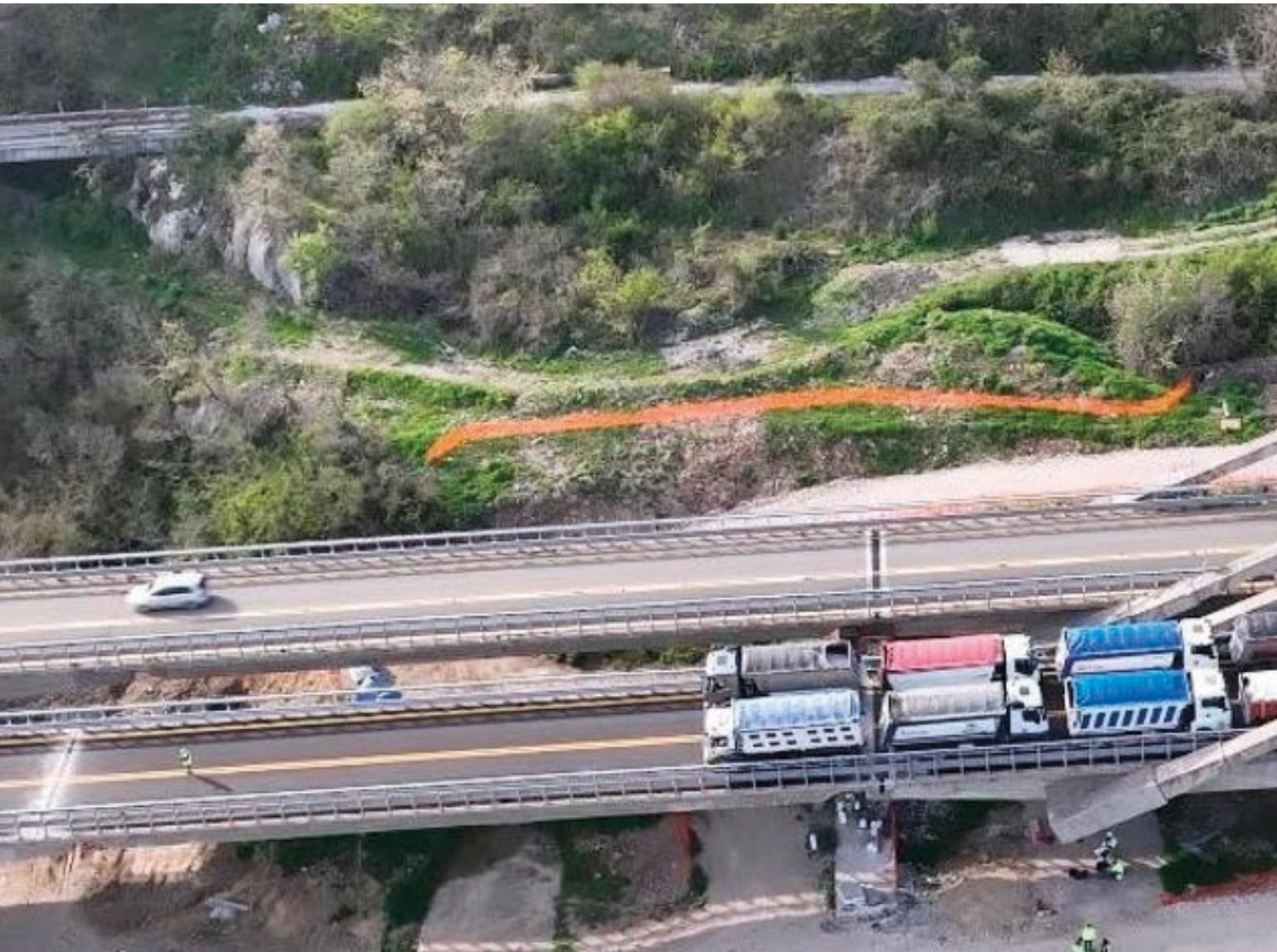


Figura 11 - Modello numerico FEM della struttura

Figura 12  
Prova di carico statico, Condizione di carico che massimizza il tiro negli stralli del cavalletto lato PZ



- **Prove di carico statico:**

la progettazione delle prove di carico statico sul modello FEM ha condotto alla definizione di 8 condizioni di carico, di cui 6 per massimizzare le sollecitazioni di trazione degli stralli dei 2 cavalletti e 2 per massimizzare flessione e taglio sulla travata tampone; in particolare, le condizioni di carico più significative sono state quelle che hanno indotto simmetricamente il massimo tiro negli stralli di ciascun cavalletto, e per le quali sono stati impiegati 8 autocarri di peso totale 385 kN ciascuno (Figura 12).

Nel corso delle prove si è proceduto all'esecuzione delle seguenti misurazioni:

- spostamenti XYZ di 38 punti di misura strumentati con miniprismi e distribuiti tra impalcati, antenne e stralli, mediante 3 stazioni totali motorizzate automatiche (Figura 13);
- deformazioni del calcestruzzo degli stralli di campata del cavalletto lato SA, mediante 8 estensimetri a corda vibrante;
- deformazioni dei trefoli dei cavi di precompressione degli stralli di campata del cavalletto lato SA e PZ, mediante 16 estensimetri resitivi;
- temperatura degli stralli e delle superfici di intradosso ed estradosso dell'impalcato.

Le prove di carico hanno sostanzialmente confermato le previsioni del modello FEM nell'ipotesi di strallo interamente compresso sotto l'azione dei carichi applicati.



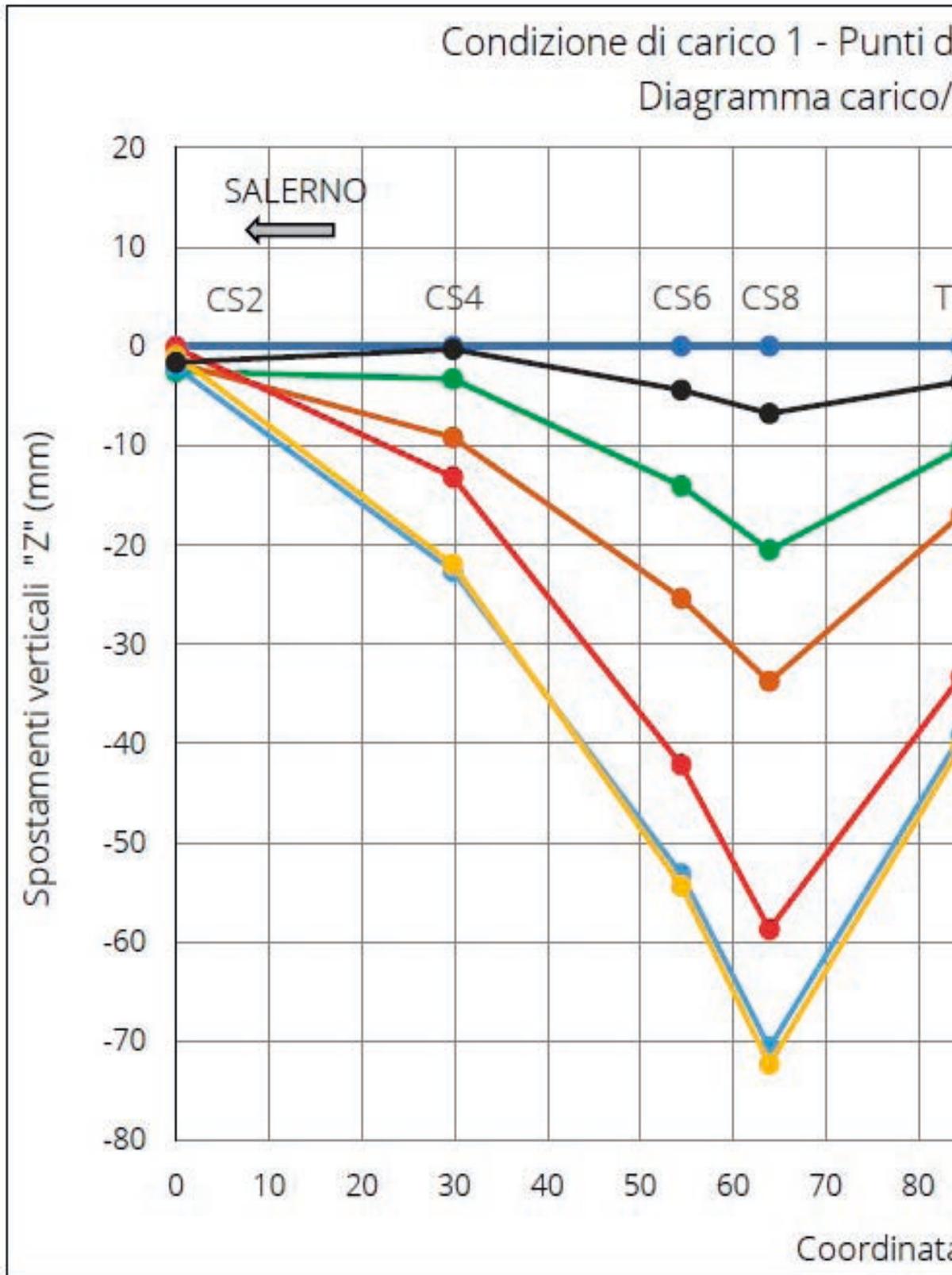
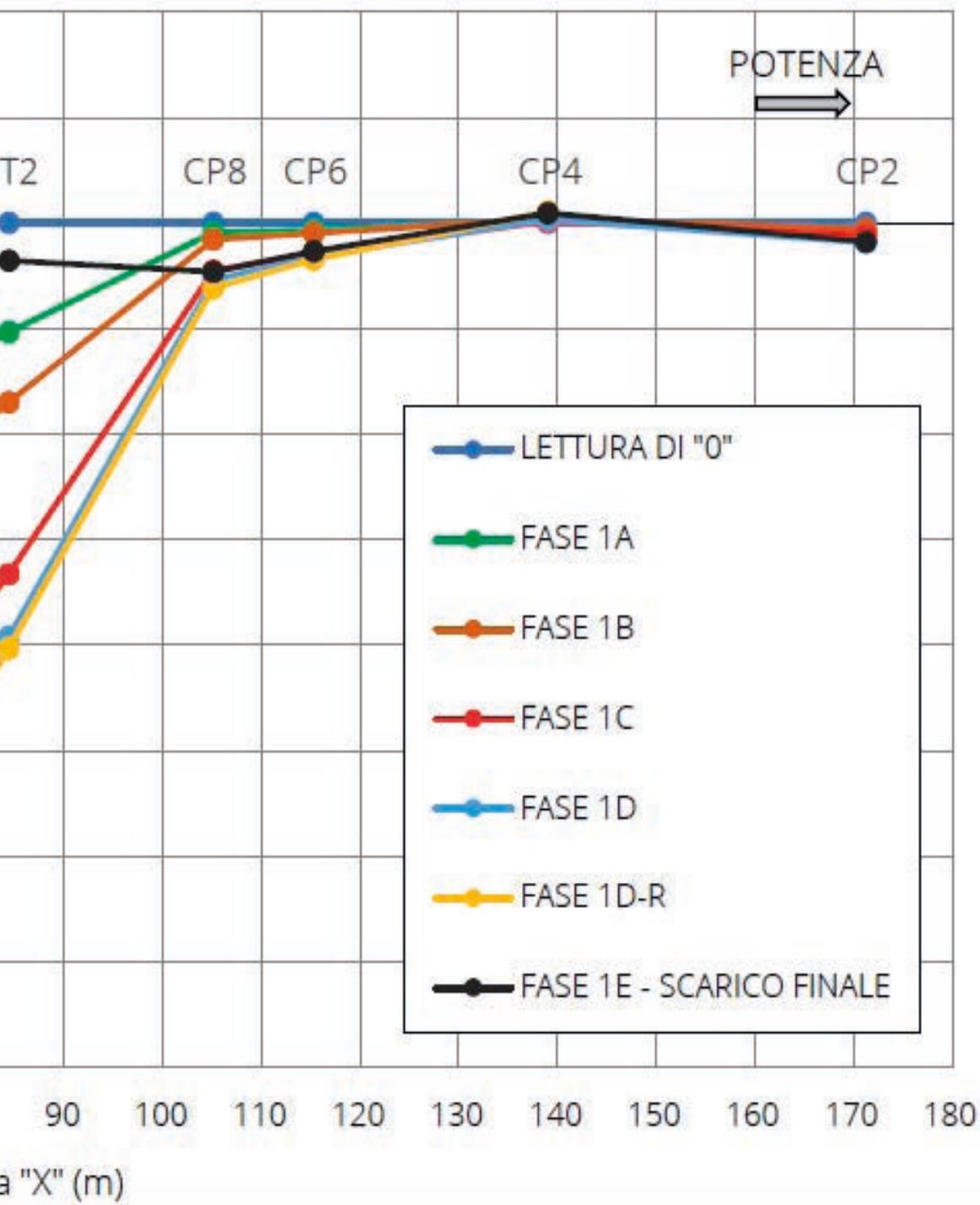


Figura 13  
 Prova di carico statico, Condizione di carico che massimizza il tiro negli stralli del cavalletto lato PZ –  
 Spostamenti verticali dell'impalcato

li misura impalcato lato dx  
deformazione

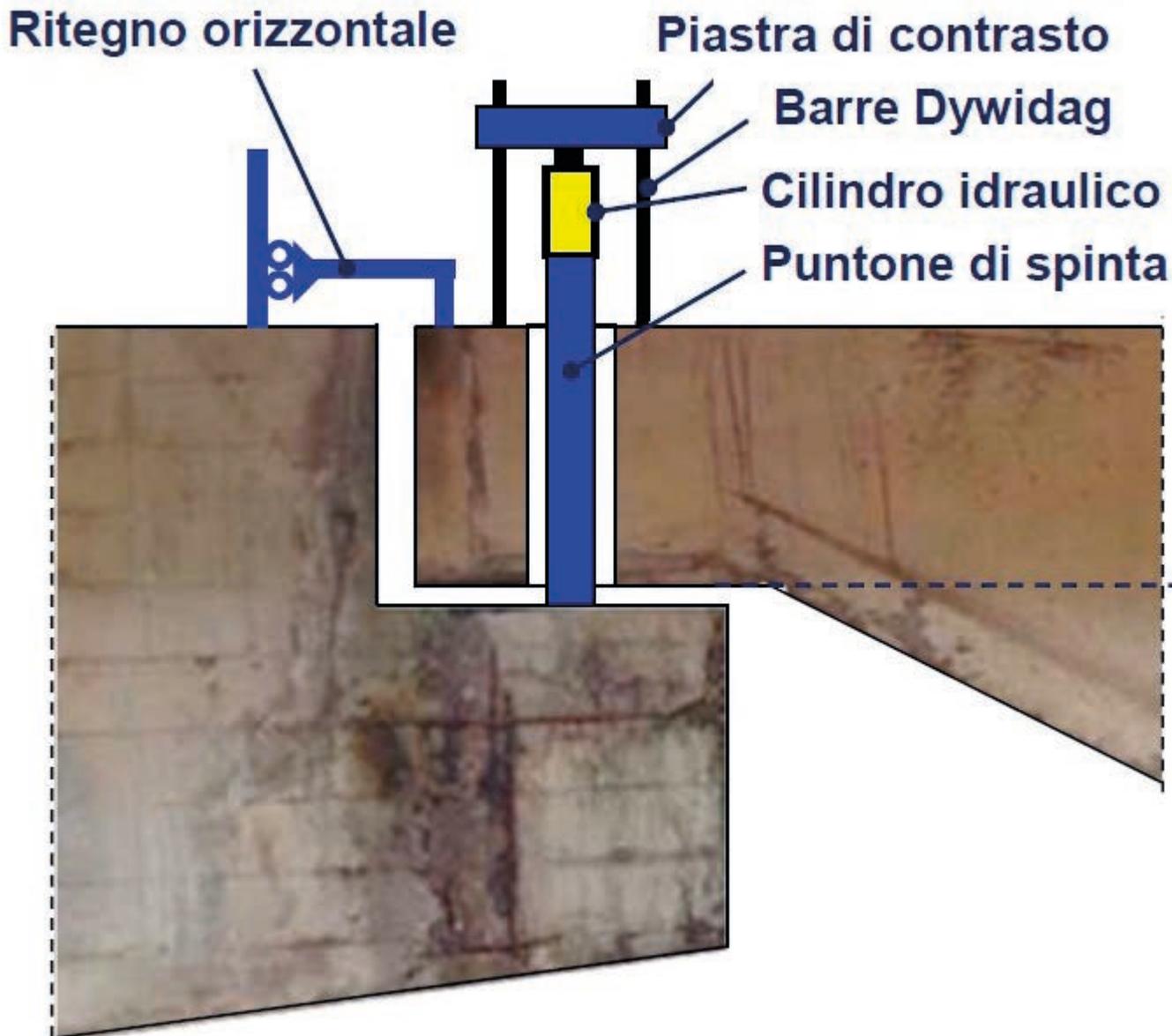


**SOSTITUZIONE APPOGGI DELLE CAMPATE TAMPONE CENTRALI**

Il presente paragrafo si riferisce alle operazioni di sollevamento e successivo abbassamento degli impalcati centrali del viadotto in oggetto, finalizzate alla sostituzione degli apparecchi di appoggio esistenti. I lavori sono stati eseguiti dall'Impresa appaltatrice Bulfaro S.p.A. di Senise, su progetto dell'Ing. Rosario Cerone di Melfi, con il supporto strumentale del Laboratorio Controlli Materiali e Strutture CMS S.r.l. di Melfi.

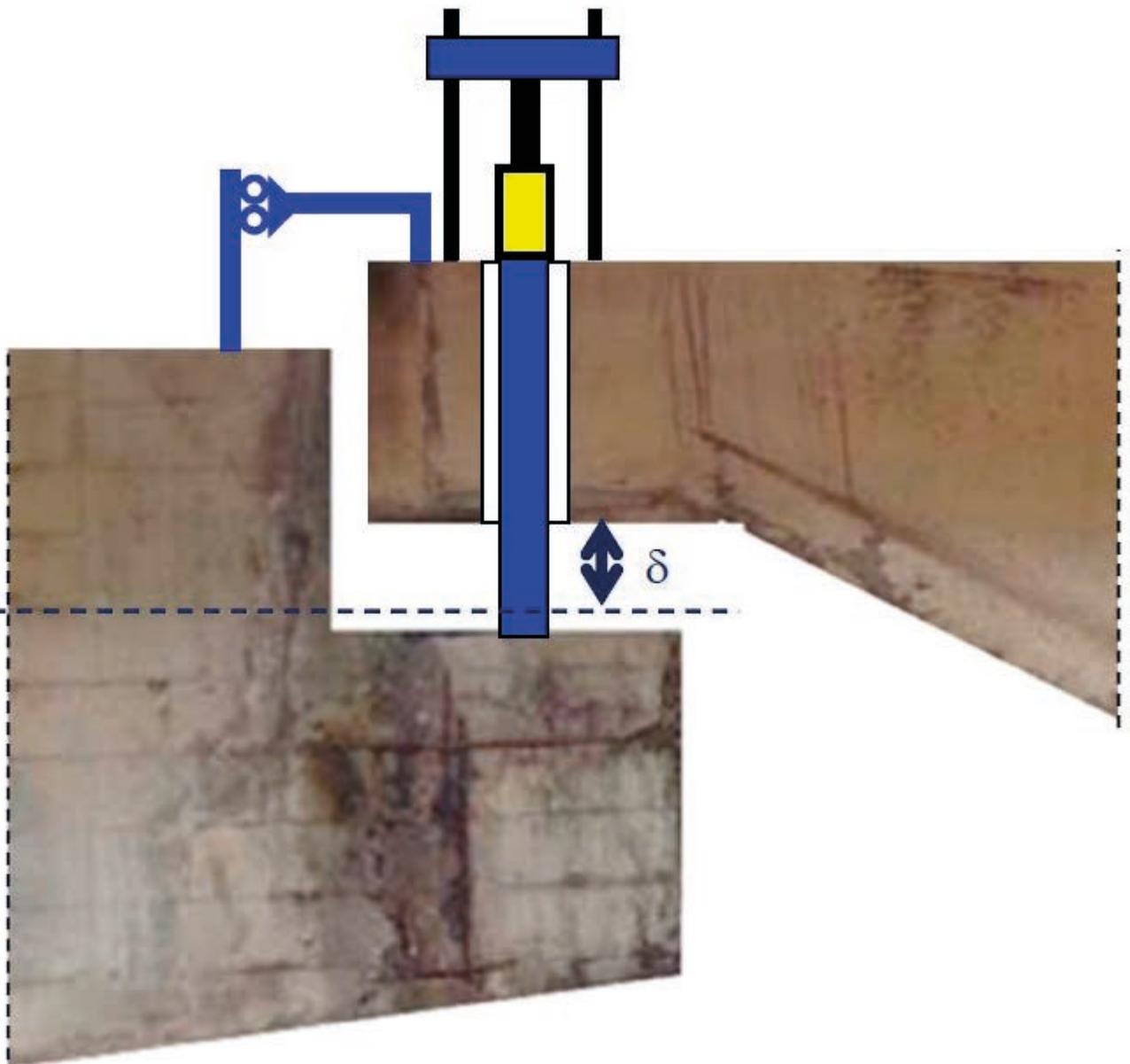
Il sistema e la procedura descritti, sono stati studiati in considerazione delle particolari condizioni operative e limitazioni presenti in opera. Trattandosi di uno schema statico molto particolare di campata appoggiata su due sistemi strallati indipendenti, è stato necessario utilizzare come piano di appoggio temporaneo le stesse selle in punta alle travate sospese e come elemento di sollevamento i traversi di testata delle travate. In tal modo si mobilitano e ridistribuiscono solo forze interne che non modificano le sollecitazioni globali sui vari elementi strutturali, in particolare sugli stralli.

*Figura 14 - Schema sistema di sollevamento*



Le ridotte altezze libere tra pulvini e traversi non consentono di operare agevolmente dal basso per effettuare la regolarizzazione delle superfici e per l'inserimento dei cilindri ad alto tonnellaggio, con incluse tesine oscillanti e piatti di ripartizione. È stato pertanto studiato il sistema in oggetto che opera dall'estradosso dell'impalcato attraverso una coppia di puntoni che spingono sul traverso della travata sospesa e, per reazione, determinano il sollevamento della campata tamponone (Figura 14).

Dovendo sostenere i carichi dell'impalcato in una posizione non prevista dal progetto originario dell'opera, i traversi vengono rinforzati applicando una precompressione secondo il proprio asse impiegando un sistema di traverse e barre ad alta resistenza. Per l'installazione del sistema di spinta vengono eseguiti a mezzo di un carotiere due fori verticali passanti, del diametro di 140 mm, all'interno dei quali vengono successivamente introdotti i puntoni di spinta in testa ai quali sono alloggiati i cilindri di carico. I cilindri, di capacità pari a 3000 kN ciascuno, idonei per il carico di sollevamento di 1300 kN per puntone, vengono reazionati attraverso piatti di contrasto, vincolati all'impalcato a mezzo di due corone di sei ancoranti Dywidag 26 WR (Figure 15 e 16).



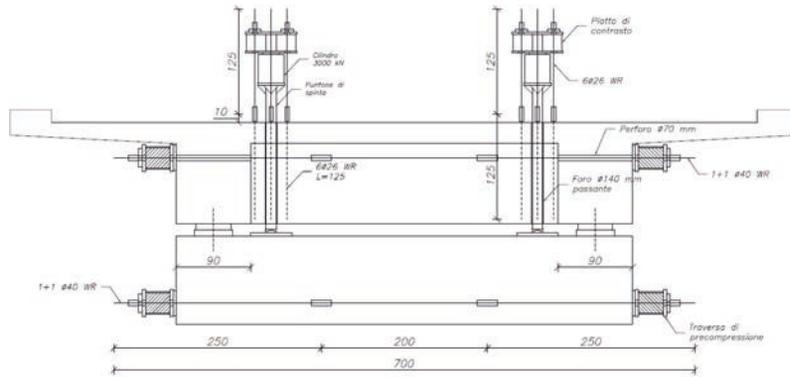


Figura 15 - Dettagli sistema di sollevamento: sezione

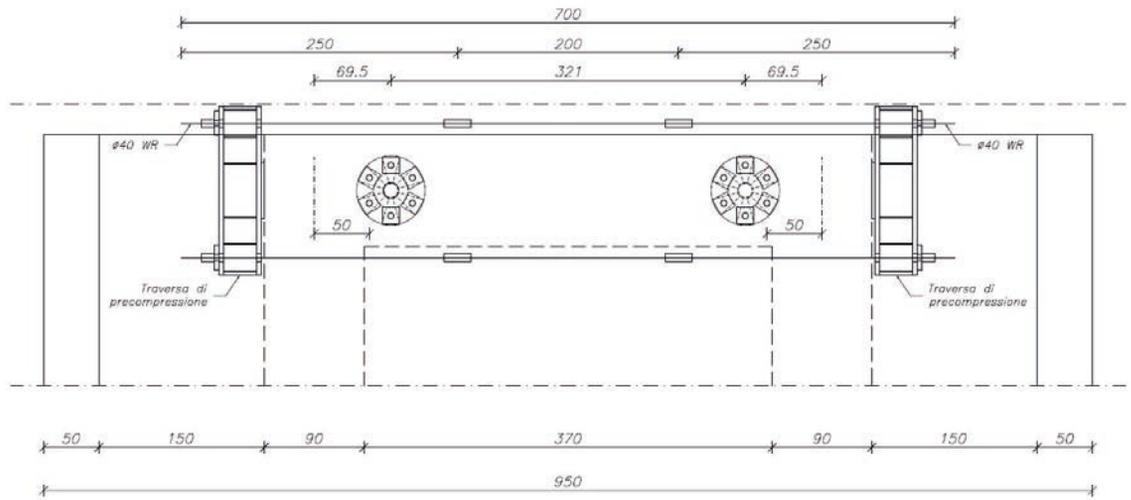


Figura 16 - Dettagli sistema di sollevamento: pianta

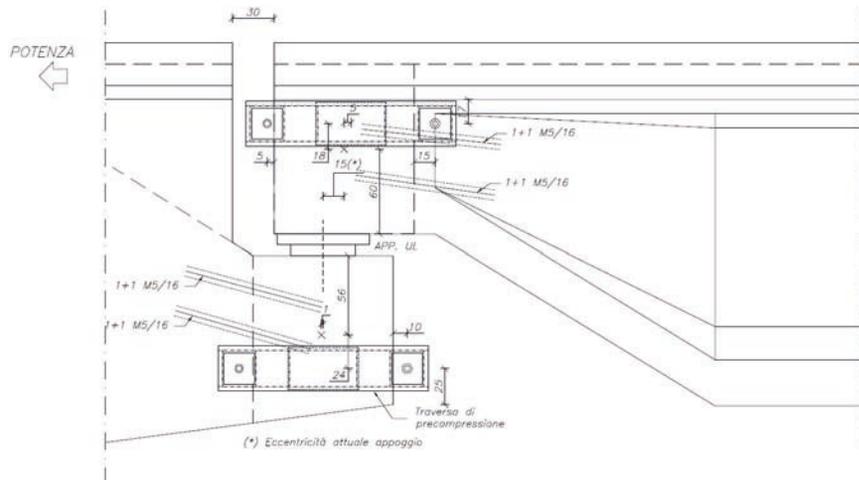


Figura 17 - Schema del sistema di precompressione temporanea traversi

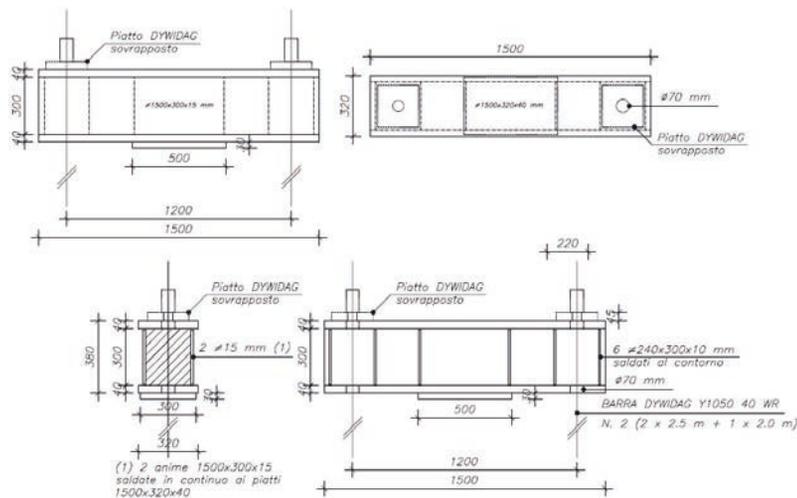


Figura 18 - Traversa di precompressione

I fori passanti f140 ed i fori di ancoraggio f60 L=115 cm vengono eseguiti nelle posizioni indicate in modo da installare i puntoni di spinta in asse ai traversi, previa scarifica locale per l'integrazione delle armature superiori eventualmente intercettate. Eseguiti i fori, effettuate le operazioni di soffiatura con aria compressa per l'eliminazione di detriti e polveri, si effettuano le operazioni di inghisaggio delle barre in acciaio Dywidag Y1050 f26 WR curando la fuoriuscita delle stesse dalla soletta di 10 cm circa per consentire il successivo avvitamento dei manicotti di giunzione. Per il corretto posizionamento sono state impiegate dime metalliche, rimosse dopo il fissaggio.

Per l'inghisaggio si è adoperata malta cementizia specifica ad alte prestazioni, con resistenza a compressione a 7 giorni maggiore di 50 MPa, adesione al cls maggiore di 2 MPa.

Prima di procedere con le lavorazioni all'estradosso dell'impalcato, è stato installato il sistema di precompressione temporanea dei traversi inferiore e superiore, necessario al rinforzo degli stessi per sostenere i carichi di sollevamento (Figura 17).

Le traverse di contrasto sono sostanzialmente travi composte da piattini di acciaio S355 in spessori da



Figura 19 - Prova di collaudo delle traverse di precompressione (CMS S.r.l.)



*Figura 20 - Fase di precompressione dei traversi in opera*



*Figura 21 - Precompressione dei traversi in opera*

40 mm per i piatti d'ala, da 15 mm per le anime e 10 mm per gli irrigidimenti. Per il montaggio delle traverse (Figure 18 e 19), su ciascuna testata, è stato necessario eseguire due coppie di fori passanti  $\varnothing 70$  mm per il passaggio delle barre da precompressione Y1050 f40 WR Dywidag. La posizione dei fori è stata studiata in modo da non intercettare i cavi M5/16 presenti. Il tracciamento è stato effettuato previa scansione georadar da parte di Tecnici specializzati del Centro Sperimentale ANAS di Cesano (Figura 8), partendo dalla documentazione di progetto disponibile. Le perforazioni sono state precedute da fori guida da 25 mm di diametro per controllare l'assenza di interferenze con i cavi, l'ortogonalità alle superfici nonché l'allineamento dei fori per il corretto passaggio delle barre f40 WR da una trave all'altra. Eseguiti i fori, ed inserite le barre che vengono composte in opera impiegando i manicotti in dotazione (2.5+2.0+2.5 m), si è provveduto alla regolarizzazione delle superfici di contatto delle traverse con il cls per l'alloggiamento di cuscinetti di ripartizione in elastomero prima dell'applicazione delle coazioni. Installate le traverse, è stata eseguita la tesatura delle barre operando da un solo lato per ciascuna copia di traverse (Figure 20 e 21).

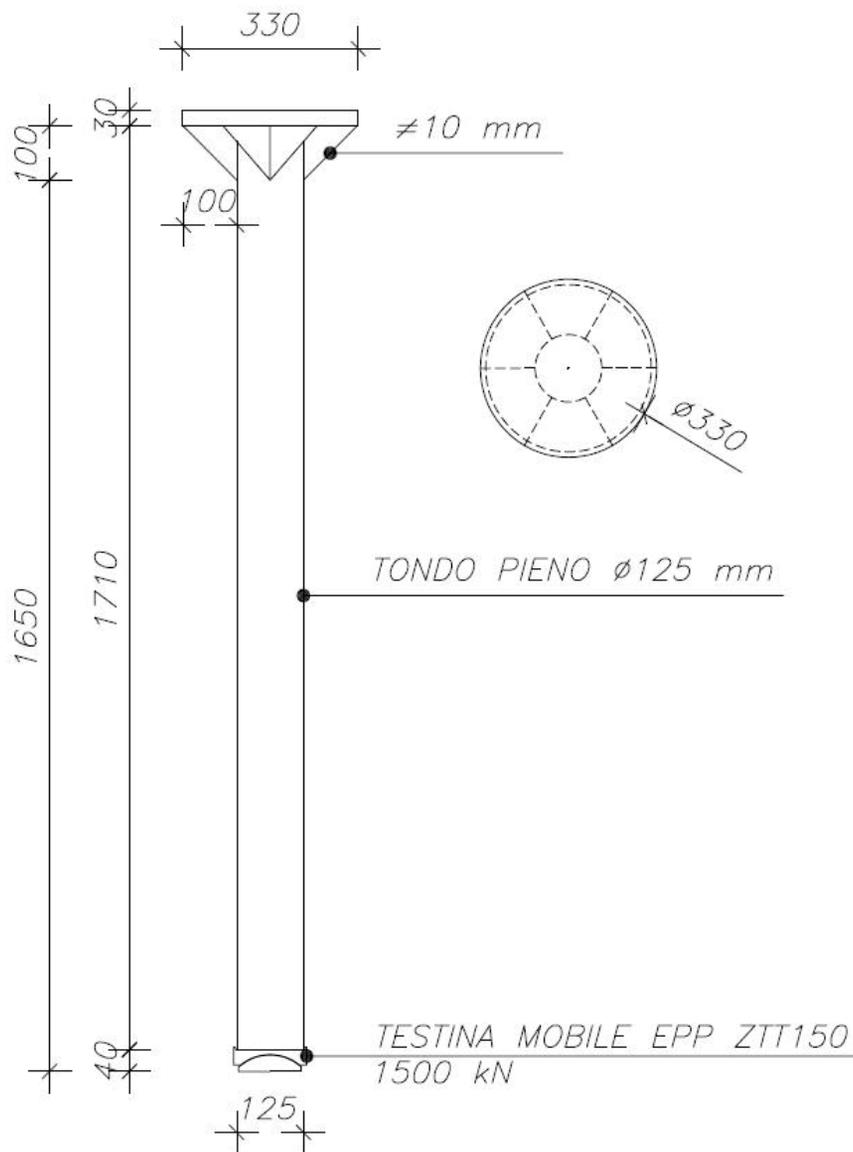


Figura 22 - Puntone di spinta

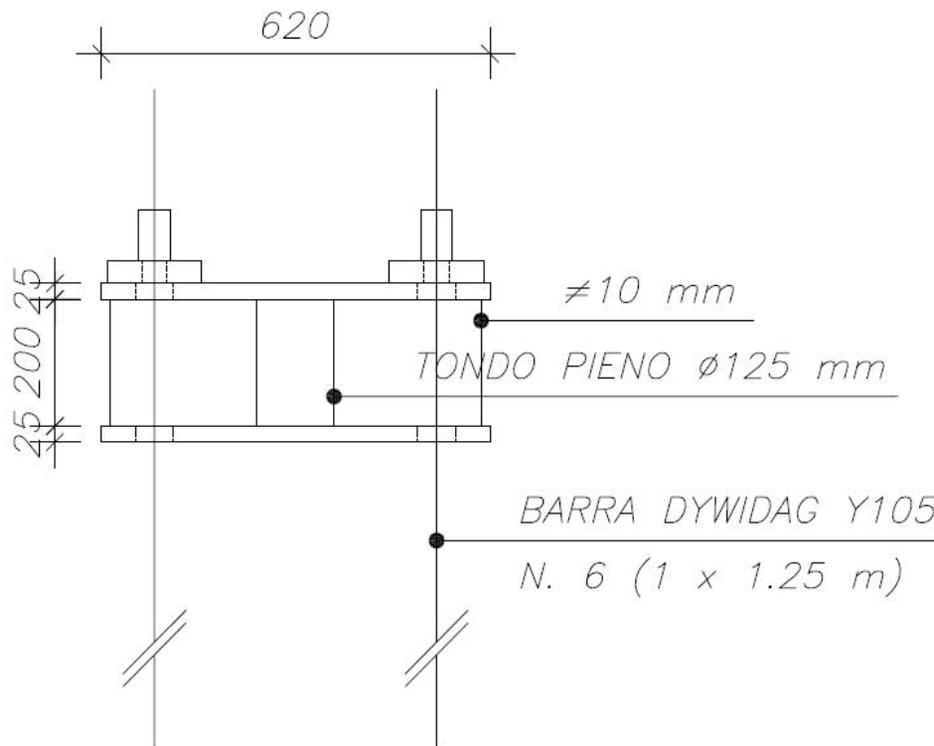


Figura 23 - Piastra di contrasto



Figura 24 - Ritegni orizzontali

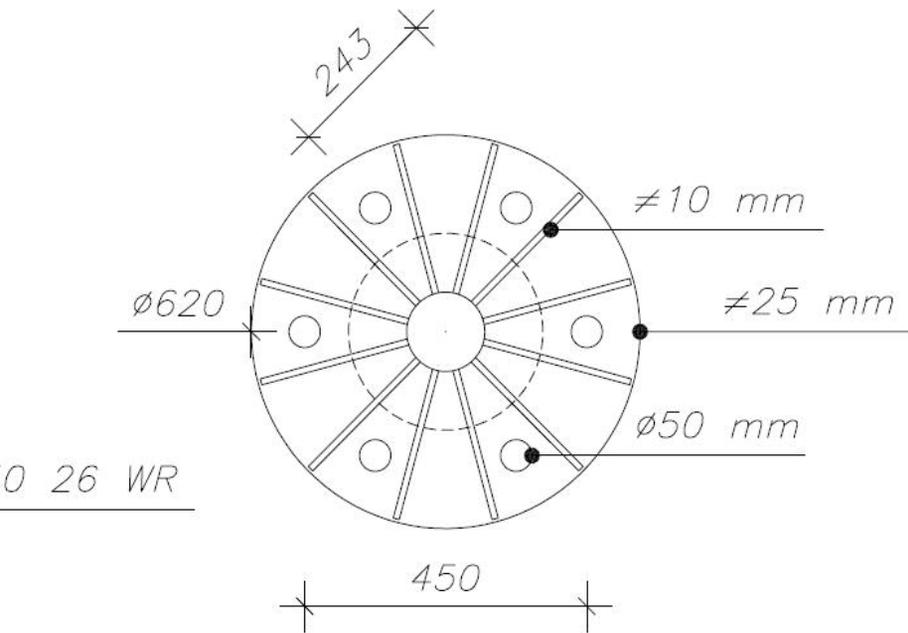


Figura 24 - Ritegni orizzontali



Figura 25 - Dettaglio sistema di sollevamento



**Ritegno  
orizzontale**

**Sistema di  
sollevamento**

Figura 26 - Vista di assieme del sistema di sollevamento



**Sistema di sollevamento**

**Ritegno orizzontale**

Sulla superficie di appoggio sulla sella, preventivamente regolarizzata, sono state installate due piastre di ripartizione 500x500 mm<sup>2</sup> da 40 mm di spessore, ed i pattini antifrizione.

Atteso il tempo del necessario indurimento della malta degli ancoranti installati in estradosso, sono state le barre di prolungamento, e successivamente sono stati inseriti i puntoni di spinta (Figura 22).

I puntoni di spinta sono costituiti da tondo pieno in acciaio S355 del diametro di 125 mm, muniti in testa di un piatto f330 mm x 30 mm per l'alloggiamento dei cilindri, ed alla base di una testina oscillante EPP ZTT150 da 1500 kN di carico utile, per l'adattamento alla superficie della piastra di appoggio. Il piatto è saldato al tondo ed irrigidito con sei costole triangolari da 10 mm di spessore.

Si è proceduto poi all'installazione dei cilindri di carico, delle piastre di contrasto (Figura 23) e dell'attrezzatura di comando e di controllo.

Le piastre di contrasto sono costituite ciascuna a due piatti circolari in acciaio S355 da 620 mm di diametro e spessore di 25 mm, distanziate da un tondo pieno da 125 mm di diametro e lunghezza di 200 mm saldato sul contorno, ed irrigidite con 12 piatti 243x200x10 mm disposti a raggiera e saldati sul perimetro a contatto con le piastre e con il tondo centrale.

Le piastre sono munite di fori passanti f50 mm per il passaggio delle 6 barre di ancoraggio 26 WR.



**Controllo degli spostamenti verticali con encoder wireless (CMS S.r.l.)**



**Controllo degli spostamenti longitudinali con trasduttori di spostamento wireless (CMS S.r.l.)**

*Figura 27 - Strumentazione di controllo*



**Apparecchio di appoggio esistente    Appoggio provvisorio    Puntone di spinta    Piatto di ripartizione**

*Figura 28 - Fase di sollevamento: appoggi provvisori*



**Sollevamento apparecchio di appoggio**



**Apparecchio di appoggio disinstallato**

*Figura 29 - Rimozione appoggio esistente*



**Nuovo apparecchio di appoggio fisso installato**



**Nuovo apparecchio di appoggio mobile installato**

*Figura 30 - Nuovi appoggi*

Per impedire il contrasto dei movimenti orizzontali della travata nelle fasi di sollevamento della testata, sono state installate le carpenterie metalliche di ritegno longitudinale e trasversale (Figura 24).

I ritegni impiegati consistono in guide verticali in profili HEA all'interno delle quali scorrono le traverse orizzontali, i due elementi di ciascuna coppia sono fissati alle due parti di impalcato a ridosso del giunto interessato. Sulle superfici di contatto tra le parti metalliche a contatto vengono inseriti piatti di teflon per ridurre al minimo gli attriti interni.

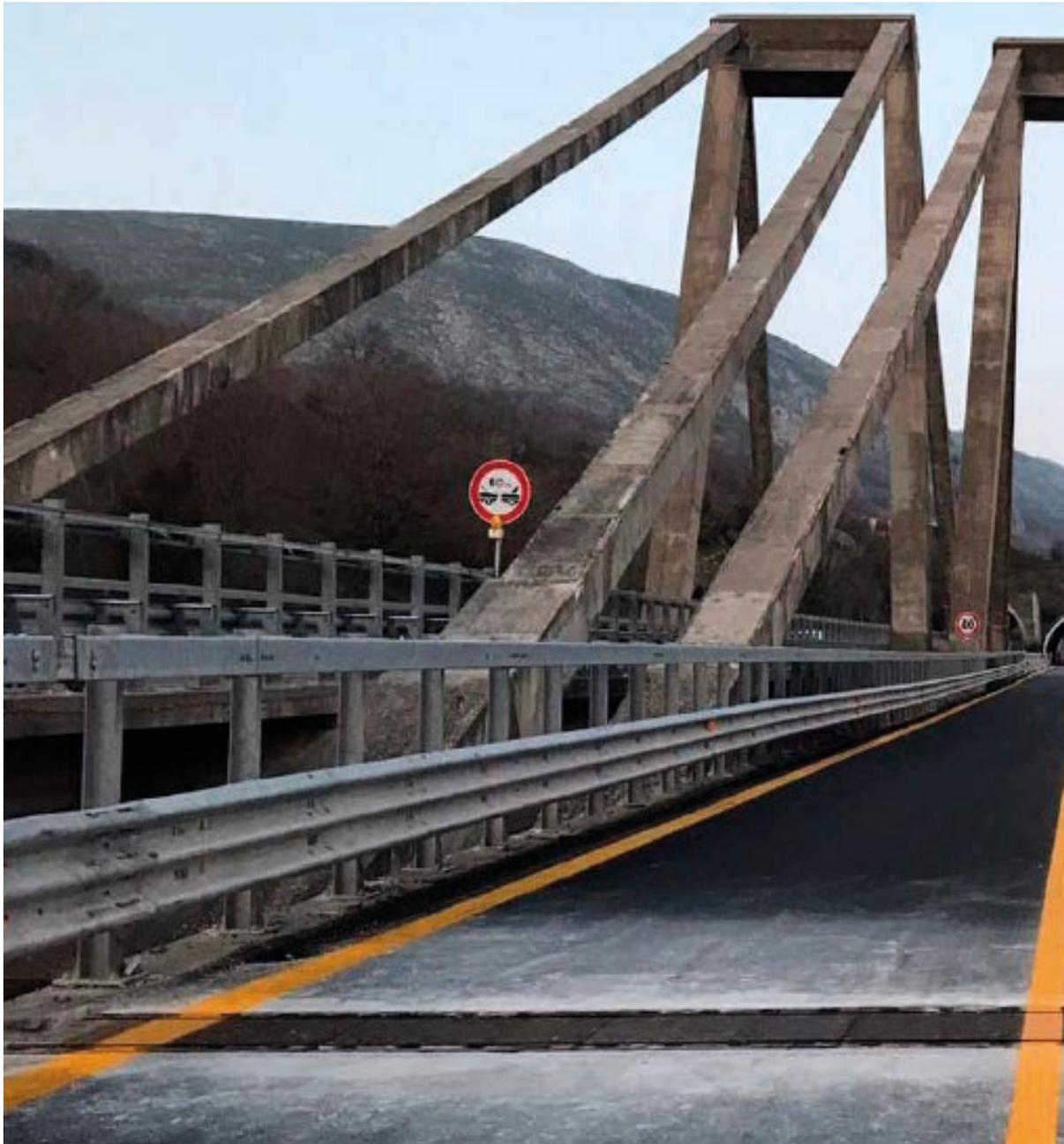
Installati tutti i componenti in carpenteria metallica (Figure 25 e 26), quelli del sistema oleodinamico e le attrezzature elettroniche di controllo (Figura 27), è stata eseguita la verifica del funzionamento sincrono del sistema sia nelle fasi di carico che di scarico ed il controllo del sistema di acquisizione.

Si è proceduto, quindi, con il sollevamento della testata ad avanzamenti graduali, provvedendo ad inserire progressivamente appoggi temporanei (Figura 28) lateralmente agli appoggi esistenti (Figura 29) da rimuovere, nello spazio libero verso i puntoni di spinta.

Gli appoggi temporanei consistono in piatti di acciaio di idonea dimensione; le parti a contatto con le superfici di cls sono in elastomero per assicurare una uniforme distribuzione delle pressioni.

Agli appoggi temporanei viene affidato il carico dell'impalcato per il tempo necessario a consentire le operazioni previste, articolate nelle fasi richieste fino al completo abbassamento della testata ad al rilascio dei carichi sui nuovi appoggi (Figura 30).

Posizionato definitivamente l'impalcato alla quota di progetto, si è provveduto a smontare le attrezzature installate, compreso il sistema di precompressione temporanea dei traversi. Al termine delle operazioni strutturali, sono state eseguite le opere di finitura (Figura 31) e le prove di collaudo statico per la successiva riapertura al traffico.



*Figura 31 - Ultimazione cantiere sollevamento*



**Note**

1. Cavi Principali "A" - M5/16 Sistema Morandi.
2. Cavi Secondari "B" - M5/8 Sistema Morandi.







## **ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI ROMA**

Piazza della Repubblica, 59 - 00185 - Roma

Tel. 06.487.93.11 - Fax: 06.487.931.223

Cod. Fisc. 80201950583

Orari di apertura al pubblico degli uffici

Lunedì 09:30-12:30 14:30-17:30

Martedì 09:30-12:30 14:30-17:30

Mercoledì 09:30-12:30 14:30-17:30

Giovedì 09:30-12:30 14:30-17:30

Venerdì 09:30-12:30

Sabato 09:30-12:30

La Segreteria dell'ordine chiude alle 16.00

### AREE DEL SITO WEB DEL QUADERNO



AREA CIVILE AMBIENTALE

<https://rivista.ording.roma.it/civile/>



AREA INDUSTRIALE

<https://rivista.ording.roma.it/industriale/>



AREA DELL'INFORMAZIONE

<https://rivista.ording.roma.it/informazione/>



AREA INTERSETTORIALE

<https://rivista.ording.roma.it/intersectoriale/>



È possibile consultare tutti i numeri  
all'indirizzo Internet  
***ioroma.info***



# *Quaderno Speciale*



*Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma  
Piazza della Repubblica, 59 - 00185 Roma  
[www.ording.roma.it](http://www.ording.roma.it)*