

Politecnico di Milano

SCUOLA DI ARCHITETTURA URBANISTICA
INGEGNERIA DELLE COSTRUZIONI
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Sistemi Edilizi



POLITECNICO
MILANO 1863

**INFLUENZA DELLA CORROSIONE
SULLA VULNERABILITÀ SISMICA
DEI VIADOTTI**

Relatore

Prof. Ing. Pietro Crespi

Correlatore

Ing. Carlo Pettorruso

Candidato
Simone Papazzoni
251376

Anno Accademico 2024 - 2025

Abstract

Il lavoro studia l'influenza della corrosione sulla vulnerabilità sismica dei viadotti in cemento armato allo scopo di individuare l'evoluzione del loro indice di rischio in funzione del tempo, considerando tre differenti intensità del fenomeno corrosivo: bassa, media e alta. L'obiettivo è l'ottenimento di diagrammi evolutivi che possano rappresentare uno strumento di controllo e programmazione degli interventi di manutenzione dei ponti soggetti a carbonatazione.

In questo lavoro sono stati analizzati in dettaglio tre viadotti caratterizzati da schemi strutturali differenti (pile rette a sezione piena, pile rette a sezione cava, pile a telaio) mediante due differenti tipologie di analisi: Analisi statica non lineare attraverso la procedura Modal Pushover Analysis (MPA), nei confronti delle crisi a pressoflessione e taglio separatamente, e Analisi dinamica non lineare attraverso la procedura Time History Analysis, in cui le due modalità di crisi vengono considerate simultaneamente.

Partendo dai risultati dell'analisi MPA, si sono determinate le curve di andamento dell'indice di rischio in funzione della riduzione d'area d'armatura della sezione per ogni schema strutturale. I risultati sono stati poi confrontati e validati con analoghi risultati riferiti ad altri viadotti analizzati con la stessa metodologia in precedenti ricerche. In particolare, nella finestra temporale che arriva a 75 anni dalla costruzione del viadotto, le curve di decadimento dell'indice di rischio evidenziano delle riduzioni della capacità portante variabile tra il 50% e il 70%, in funzione della modalità di crisi e della tipologia strutturale dell'opera.

In conclusione, viene analizzato anche lo stato di attivazione delle cerniere plastiche al momento della crisi dei viadotti attraverso i risultati ottenuti dall'analisi Time History: il meccanismo di rottura ricorrente è quello associato alla crisi fragile per taglio alla base delle pile, per ogni viadotto. In aggiunta, si evidenzia anche come le cerniere flessionali non vengano contemporaneamente attivate salvo che nel caso del viadotto con pile a sezione cava e grado di corrosione elevato in cui, già a 50 anni dalla costruzione, una cerniera flessionale risulta lievemente plasticizzata al momento della crisi per taglio. Si può concludere quindi che, quantomeno nel set di viadotti considerati, la modalità di crisi per flessione influenza in modo non significativo il valore dell'indice di rischio.

Abstract in inglese

This research investigates the effects of corrosion on the seismic vulnerability of reinforced concrete viaducts, with the objective of characterizing the temporal evolution of their risk index under three different corrosion severity levels: low, medium, and high. The study aims to develop time-dependent degradation diagrams that can serve as effective tools for monitoring strategies and maintenance planning of bridges affected by carbonation-induced deterioration.

Three viaducts with distinct structural configurations were examined in detail: solid-section piers, hollow-section piers, and frame-type piers. The seismic performance assessment was carried out using two complementary analytical approaches. Nonlinear static analyses were performed through the Modal Pushover Analysis (MPA) procedure, evaluating flexural and shear failure mechanisms separately. In addition, nonlinear dynamic analyses were conducted using Time History Analysis, in which both failure modes were considered simultaneously within a fully coupled framework.

Based on the results obtained from the MPA, degradation curves of the risk index were derived as a function of reinforcement cross-sectional area reduction for each structural typology. These findings were subsequently compared and validated against analogous results from previous studies conducted on similar viaducts using the same methodological framework. Within a service-life horizon extending up to 75 years after construction, the risk index decay curves indicate a reduction in load-bearing capacity ranging from 50% to 70%, depending on both the governing failure mode and the structural configuration.

Finally, the activation state of plastic hinges at the onset of structural failure was examined through the outcomes of the nonlinear Time History analyses. For all viaducts, collapse was consistently governed by brittle shear failure at the base of the piers. Furthermore, flexural hinges were not simultaneously activated at the time of failure, except in the case of the viaduct with hollow-section piers subjected to a high corrosion level, where slight flexural plasticization was observed at 50 years, concurrent with shear collapse. It can therefore be concluded that, at least for the set of viaducts considered, flexural failure mechanisms exert a negligible influence on the evaluated risk index.

Sommario

ABSTRACT	I
ABSTRACT IN INGLESE	II
INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1 IL CALCESTRUZZO	3
1.1. COMPOSIZIONE E PROPRIETÀ DEL MATERIALE	3
1.2. MECCANISMI DI TRASPORTO DEL CALCESTRUZZO	4
CAPITOLO 2 IL DEGRADO DEL CALCESTRUZZO	7
2.1. DEGRADO CHIMICO	8
2.2. DEGRADO FISICO	9
2.3. DEGRADO MECCANICO	9
CAPITOLO 3 LA CORROSIONE DELLE BARRE DI ARMATURA	10
3.1. TIPOLOGIE E VELOCITÀ DI CORROSIONE	10
3.2. CORROSIONE DA CARBONATAZIONE	12
3.3. CORROSIONE DA CLORURI	15
CAPITOLO 4 MODELLAZIONE E ANALISI DEL DEGRADO DI UNA STRUTTURA IN C.A.	19
4.1. DETERMINAZIONE DEL TEMPO DI INNESCO	19
4.2. EFFETTI DELLA CORROSIONE SUL CALCESTRUZZO	25
4.3. EFFETTI DELLA CORROSIONE SUL DIAMETRO DELLE ARMATURE	29
4.4. EFFETTI DELLA CORROSIONE SULLE PROPRIETÀ MECCANICHE DELLE ARMATURE	33
4.5. CENNI SULLA PREVENZIONE	37
CAPITOLO 5 ANALISI DEI VIADOTTI	39
5.1. DEFINIZIONE DEI MATERIALI	40
5.2. REALIZZAZIONE DEL MODELLO FEM E ANALISI MODALE	44
5.3. ANALISI PUSHOVER	45
5.4. ANALISI TIME HISTORY	54
5.5. INTRODUZIONE AI CASI STUDIO	74

CAPITOLO 6 IL VIADOTTO B83	75
6.1. DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA	76
6.2. ANALISI PER SCENARIO TEMPORALE	77
6.3. ANALISI PER CONFIGURAZIONI DI SEZIONE	99
6.4. CONFRONTO TRA I DUE APPROCCI	110
6.5. ANALISI TIME HISTORY	113
CAPITOLO 7 IL VIADOTTO B88	122
7.1. DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA	123
7.2. DEFINIZIONE DELLE CONFIGURAZIONI	124
7.3. ANALISI MODALE	126
7.4. MECCANISMO DUTTILE	130
7.5. MECCANISMO FRAGILE	132
7.6. ANALISI DEI RISULTATI	135
7.7. ANALISI TIME HISTORY	138
CAPITOLO 8 IL VIADOTTO R13	144
8.1. DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA	145
8.2. DEFINIZIONE DELLE CONFIGURAZIONI	147
8.3. ANALISI MODALE	151
8.4. MECCANISMO DUTTILE	159
8.5. MECCANISMO FRAGILE	163
8.6. ANALISI DEI RISULTATI	167
8.7. ANALISI TIME HISTORY	170
CAPITOLO 9 RIEPILOGO DEI RISULTATI	179
9.1. VIADOTTI CON PILE RETTE A SEZIONE PIENA	180
9.2. VIADOTTI CON PILE A TELAIO	190
9.3. VIADOTTI CON PILE RETTE A SEZIONE CAVA	204
CONCLUSIONI	220
BIBLIOGRAFIA	222
INDICE DELLE FIGURE	227
INDICE DELLE TABELLE	232

Introduzione

Negli ultimi anni, diversi studi si sono focalizzati sul problema della durabilità delle strutture in calcestruzzo armato. La loro crescente diffusione sul territorio, nonché i numerosi danni cui esse sono soggette, hanno determinato un'attenzione sempre crescente nei confronti di questa tematica, anche a causa del conseguente aumento dei costi di mantenimento e riparazione.

Il calcestruzzo armato è tra i materiali da costruzione più versatili, economici e durevoli, ma anche quello più prestante può andare incontro a problemi di deterioramento. Tra i diversi tipi di degrado che coinvolgono le strutture in c.a., è stato osservato che uno dei più rilevanti riguarda la corrosione delle barre dovuta per esempio alla carbonatazione del calcestruzzo [1].

Alcuni studi hanno sviluppato dei modelli numerici in grado di predire l'evoluzione del fenomeno della carbonatazione nelle suddette strutture [2-4]. I modelli sono stati applicati a diversi casi studio, in modo da coglierne la natura probabilistica circa la valutazione della vulnerabilità. Lo scopo principale è stato quello di valutare l'influenza di alcuni parametri nella definizione delle equazioni differenziali che governano il problema, e di determinare il tempo di innesco e propagazione della corrosione nelle strutture in calcestruzzo armato.

Il problema relativo agli effetti della corrosione sulle prestazioni della struttura deve essere risolto considerando le caratteristiche dei materiali utilizzati e le condizioni ambientali in cui essa opera. Il degrado delle strutture risulta molto più critico per i viadotti che per gli edifici, a causa dell'esposizione diretta degli elementi strutturali all'ambiente circostante. Per affrontare questo problema, sono stati sviluppati diversi approcci probabilistici volti alla valutazione della vita nominale delle strutture da ponte in c.a., per i quali è fondamentale l'interazione tra rischio sismico ed ambientale [5-11].

La valutazione della risposta sismica dei viadotti in c.a., svolta tramite gli approcci non lineari standard, può presentare alcune problematiche. Una valida alternativa a tali metodi può essere data dall'Analisi Pushover modale (MPA).

In questo lavoro si presentano due procedure di valutazione del rischio: la prima si basa proprio su analisi di tipo modale che tiene conto del comportamento non lineare della struttura e della sua complessa risposta dinamica con limitati costi computazionali; la seconda si basa sulla ricerca e applicazione al suolo di

accelerogrammi spettrocompatibili con la struttura in esame, avendo così una maggior precisione dei risultati a scapito di un aggravio degli oneri computazionali. In particolare, sono stati analizzati diversi casi studio, sottolineando gli aspetti critici più significativi in base alla tipologia strutturale dei ponti.

Lo scopo del presente elaborato consiste nella valutazione della capacità sismica di alcuni viadotti, sulla base di diversi scenari temporali e di degrado. In riferimento al panorama italiano, la maggior parte dei viadotti autostradali risale alla fine degli anni '60. Tali viadotti rivestono oggi un notevole interesse e richiedono importanti operazioni di mantenimento volte al raggiungimento di opportuni standard di sicurezza.

Ulteriori approfondimenti in tal senso si ritengono fondamentali per via dell'interazione tra il fenomeno corrosivo ed il susseguirsi dei numerosi eventi sismici del paese. A questo si aggiunge anche un aumento dell'aggressività delle condizioni ambientali, che accelera il deterioramento delle strutture influenzandone le prestazioni in termini di durabilità [12], [13].

È stato già osservato che, tra le cause che determinano il degrado delle strutture in c.a., la corrosione delle barre d'armatura riveste un ruolo significativo. Essa può essere attivata da fattori esterni quali la carbonatazione o l'ingresso di cloruri nel calcestruzzo. I principali aspetti teorici riguardanti il comportamento dei materiali ed il fenomeno della corrosione verranno richiamati nei primi capitoli della trattazione. Successivamente seguirà l'analisi dei casi studio considerati e la discussione dei risultati ottenuti dai casi studiati, esplicitando la relazione tra il fenomeno della corrosione e la vulnerabilità sismica dei viadotti attraverso la variazione dei fattori di sicurezza e degli indicatori della capacità resistente.

Capitolo 1

Il calcestruzzo

Da diversi anni, il calcestruzzo armato viene ampiamente utilizzato come materiale da costruzione in molte opere di ingegneria civile. Le ragioni di tale successo sono diverse, a partire dalla versatilità di utilizzo, dal costo non eccessivo e dalla sua durabilità. Nonostante questo, si ritiene importante approfondire il tema della durabilità del materiale in esame, a causa del crescente rischio rappresentato dall'interazione tra fenomeno corrosivo e azioni sismiche. Per farlo, si richiamano inizialmente le principali caratteristiche del materiale oggetto di studio.

1.1. Composizione e proprietà del materiale

Il calcestruzzo è un materiale lapideo artificiale, composto da aggregati di dimensione variabile (detti inerti), legante idraulico (cemento) e acqua, che vanno a formare un materiale composito mediante reazioni di idratazione, presa e indurimento del cemento [14].

Le caratteristiche del calcestruzzo dipendono dalle proprietà delle sue componenti. Tra i fattori che influiscono maggiormente in tal senso, vi è il quantitativo di cemento presente. All'aumentare del cemento, aumentano le proprietà del calcestruzzo in termini di resistenza, ma valori eccessivi, superiori a 500 kg/m^3 , possono far sì che il quantitativo di acqua non sia sufficiente a garantire una presa adeguata. Di contro, un eccesso di acqua provoca una diminuzione della resistenza e della durabilità del calcestruzzo. Per questo motivo è fondamentale determinare il corretto valore del rapporto acqua/cemento (a/c) in fase di mix design, che influisce anche sulla lavorabilità. Per la presa sono necessari circa 30 litri di acqua per quintale di cemento. Tuttavia, tale quantitativo viene raddoppiato per rendere il calcestruzzo lavorabile. Anche le caratteristiche degli aggregati influenzano le proprietà del calcestruzzo. Essi devono presentare una corretta granulometria, ottenuta tramite quantità e diametri di dimensioni variabili, per avere una porosità corretta in funzione dell'ambiente circostante. Vengono

adoperati opportuni abachi, tra cui quelli di Fuller e Bolomey [15], in modo da ottenere una distribuzione granulometrica ottimale. Inoltre, gli inerti di forma tondeggiante migliorano la lavorabilità del calcestruzzo.

Per quanto riguarda il cemento, esso può essere classificato in diverse categorie. Tra gli altri, il cemento Portland è il tipo di cemento più diffuso. Le ragioni che favoriscono l'ampio utilizzo del Portland sono diverse, tra cui l'ampia diffusione delle materie prime che lo costituiscono (calcare e argilla), di facile estrazione. La resistenza meccanica e chimica ed il tempo di presa del Portland possono essere variati alterando le proporzioni delle materie prime che costituiscono il clinker e controllandone la macinazione. In particolare, macinando il clinker con una certa percentuale di gesso idrato (4-5%), la presa del cemento può essere posticipata in modo da permettere produzione, trasporto, getto e finitura di volumi notevoli di impasto fresco. Inoltre, il gesso consente un aumento della resistenza meccanica nelle prime cinquantadue settimane.

È importante inoltre far attenzione alle condizioni ambientali in fase di maturazione. Temperature elevate sono responsabili dell'aumento della velocità di presa del cemento, con conseguenze negative sulla qualità del calcestruzzo. In condizioni di caldo secco, ventilato e insolazione diretta, viene favorita l'evaporazione dell'acqua superficiale, con possibile formazione di fessure dovute al ritiro rapido. In tal caso, si consiglia di mantenere il getto coperto e bagnato. A basse temperature la presa rallenta e se l'acqua gela viene interrotto il processo, provocando un aumento di volume che rompe i legami già formati.

1.2. Meccanismi di trasporto del calcestruzzo

Il calcestruzzo presenta dei pori di diverse dimensioni dovuti al legame chimico che li caratterizza. In base alla loro larghezza, i pori facilitano o impediscono il meccanismo di trasporto e propagazione di sostanze nocive all'interno del calcestruzzo. Di seguito si elencano le principali categorie di pori in funzione della loro dimensione:

- I pori del gel *C-S-H*, di dimensioni pari ad alcuni nm, non permettono il passaggio degli agenti aggressivi; quindi, non compromettono resistenza e durabilità del calcestruzzo.

- I *pori capillari* presentano un diametro compreso tra i 10 e i 50 nm, che possono arrivare a 3-5 μm in presenza di rapporto a/c elevato o basso grado di idratazione.
- I vuoti di aria possono raggiungere dimensioni di alcuni millimetri, e sono dell'ordine di 0.05-0.2 mm se ottenuti con additivi aeranti per contrastare l'azione del gelo-disgelo.
- I *macropori*, di dimensione superiore ai 50 nm, influenzano la durabilità del materiale permettendo la penetrazione degli agenti aggressivi nel calcestruzzo.

In generale la dimensione e volume dei pori diminuiscono all'aumentare del grado di idratazione (stagionatura) e al diminuire del rapporto a/c . Questo diminuisce la penetrazione di ioni e gas presenti nell'atmosfera che portano alla degradazione della struttura e aumenta di conseguenza la sua durabilità.

I principali meccanismi di trasporto vengono elencati di seguito, con rimandi alla letteratura scientifica per una trattazione maggiormente approfondita:

- Meccanismo di diffusione: Il movimento di una sostanza avviene da una regione in cui vi è una concentrazione più elevata ad una a concentrazione minore attraverso i pori. Per i gas, la diffusione è favorita nei pori contenenti aria, mentre per gli ioni avviene solo attraverso l'acqua. La diffusione è descritta dalla prima e dalla seconda legge di Fick [16].
- Meccanismo di permeazione: è il meccanismo di trasporto dovuto a un gradiente di pressione ed è definito dalla legge di Darcy [17]. La permeabilità della pasta cementizia dipende dalla porosità capillare e diminuisce al diminuire del rapporto a/c e all'avanzare della maturazione.
- Meccanismo di assorbimento capillare: L'assorbimento capillare del calcestruzzo è dovuto alle forze capillari che si formano all'interno dei pori. Tali forze aumentano al diminuire della viscosità del liquido e delle dimensioni dei pori. La superficie del calcestruzzo non è idrorepellente, quindi è possibile che si abbia risalita capillare per via del ridotto angolo di contatto tra liquido e pareti del poro.
- Meccanismo di trasporto elettroforetico: All'interno del calcestruzzo possono generarsi dei campi elettrici ad opera di fenomeni corrosivi per pitting, macrocoppie o correnti disperse provenienti dall'esterno. Una differenza di potenziale tra due punti del materiale provoca il movimento degli ioni presenti nella soluzione contenuta nei pori. Gli ioni positivi migrano nel senso della corrente, mentre quelli negativi si muovono nel senso opposto. Il trasporto di materia che ne consegue lavora insieme al processo diffusivo, che tende a ripristinare una

distribuzione uniforme. Si vedrà nel seguito che all'aumentare della resistività del calcestruzzo diminuisce la velocità di corrosione delle armature

Capitolo 2

Il degrado del calcestruzzo

La durabilità di una generica struttura richiede uno studio approfondito dei fenomeni di degrado e delle cause che lo determinano. Il degrado del calcestruzzo consiste nella perdita delle sue caratteristiche iniziali a causa delle condizioni ambientali in cui si trova.

Le normative stabiliscono opportune prescrizioni in funzione delle classi di esposizione ambientale, che sono necessarie per garantire la vita minima di servizio della struttura in esame. Nel caso delle strutture in calcestruzzo armato, tali provvedimenti si rendono necessari per la limitazione degli effetti del degrado indotto dall'attacco chimico, fisico e quelli derivanti dalla corrosione delle armature e dai cicli di gelo e disgelo (NTC 2018 [18]). I fattori che determinano il degrado del calcestruzzo possono essere di diversi tipi:

- fisici, dovuti a variazioni termiche che possono essere naturali (gelo-disgelo) o artificiali (incendi);
- chimici (attacco acido, solfatico, da solfuri, reazioni alcali-aggregati, da acque pure, da acque di mare);
- meccanici (erosione, abrasione, urto, esplosione);
- biologici (incrostazione da sostanza organica, detta fouling);
- strutturali (assestamenti, sovraccarichi, sollecitazioni ripetute ciclicamente).

Il calcestruzzo non armato, confezionato e messo correttamente in opera è tuttavia caratterizzato da un'elevata durabilità. L'obiettivo principale di questa prima parte di trattazione sarà quello di evidenziare il legame che intercorre tra il degrado del calcestruzzo e quello delle armature, ed in particolare le sue conseguenze. Come noto, infatti, i fattori sopra riportati possono alterare le proprietà del calcestruzzo e creare le condizioni per il deterioramento delle barre in presenza di elementi armati. Di contro, è possibile che il degrado delle armature, dovuto a fattori esterni, sia responsabile del danneggiamento del calcestruzzo.

2.1. Degrado chimico

Tra le principali tipologie di degrado del calcestruzzo vi è quello di tipo chimico che può essere legato a diversi fattori:

- Carbonatazione: L'anidride carbonica rappresenta la causa principale del fenomeno corrosivo. Essa è naturalmente presente nell'atmosfera e penetra nei pori del calcestruzzo, legandosi con l'idrossido di calcio e dando origine al carbonato di calcio. Data l'importanza del fenomeno nel caso delle barre d'armatura, lo studio verrà ulteriormente approfondito nel Capitolo 3 (Paragrafo 3.2).
- Attacco da cloruri: I cloruri attaccano le armature e distruggono in modo localizzato la pellicola di ossido che le protegge. Ciò avviene se il quantitativo di cloruri supera il valore critico. L'attacco da cloruri interessa particolarmente le strutture in ambienti marini e quelle soggette allo spargimento di sale anti-gelo. Per via del notevole interesse nei riguardi dell'attacco da cloruri per le armature delle strutture in c.a., ulteriori approfondimenti in merito verranno esposti nel Capitolo 3 (Paragrafo 3.3).
- Attacco da solfati: È possibile che il calcestruzzo si trovi in acque o terreni contaminati da solfati (SO_4^{2-}). Si ha attacco solfatico interno se lo ione è presente all'interno degli aggregati del calcestruzzo, mentre se è presente nell'acqua o nei terreni circostanti la costruzione si parla di attacco solfatico esterno. I solfati possono reagire con i costituenti della matrice cementizia e dare luogo a reazioni chimiche che generano prodotti espansivi in grado di fessurare e degradare il calcestruzzo.
- Attacco da solfuri: La presenza dei solfuri è comune in terreni argillosi ricchi di pirite e nelle acque di falda, palude o fogna. I solfuri S^{2-} e H_2S possono formare sostanze acide in grado di attaccare il materiale. Questo tipo di attacco è più raro rispetto a quello dei solfati e generalmente non rappresenta direttamente la causa del deterioramento del materiale, ma la sua trasformazione in altri composti può essere determinante.
- Attacco da alcali aggregati: la presenza di alcali provoca un attacco di tipo chimico, specialmente nel caso di calcestruzzi con aggregati silicei contenenti elevate percentuali di silice amorfa. I prodotti della reazione tra alcali e aggregati sono silicati di sodio idrati e silicati di potassio idrati, che degradano il calcestruzzo espandendosi.

2.2. Degrado fisico

Tra le principali tipologie di degrado del calcestruzzo vi è il degrado di tipo fisico. È dovuto prevalentemente alla variazione di temperatura, che può avere origini sia naturali che artificiali, che può causare diversi fenomeni di degrado:

- **Calore di idratazione:** Alcuni studi hanno dimostrato che l'esotermicità del processo di idratazione può generare grandi quantità di calore [19]. Tale riscaldamento fa sì che la parte esposta all'aria si raffreddi più rapidamente di quella interna e notevoli differenze termiche tra le due facce possono generare autotensioni e quindi fessurazioni superficiali.
- **Ritiro:** Il fenomeno del ritiro è legato alla formazione di crepe e microfessure nella fase di presa. Ciò rende il calcestruzzo, e quindi la struttura, più vulnerabile agli attacchi chimici.
- **Cicli gelo – disgelo:** L'acqua contenuta nei pori congela a temperature inferiori a 0 °C. L'aumento di volume che ne segue provoca sforzi di trazione nel calcestruzzo e possibili fessurazioni. Tuttavia, il fenomeno risulta maggiormente dannoso quando ha carattere ciclico, infatti diversi studi hanno dimostrato inoltre che il danno del materiale è maggiore se il calcestruzzo è soggetto a brusche variazioni di temperatura [19], [20].
- **Incendio:** Il calcestruzzo presenta una bassa conducibilità termica. La parte più interna delle armature risulta protetta dal fuoco, mentre gli effetti dell'incendio sono più rilevanti in superficie. Essi dipendono dalla massima temperatura raggiunta e dal tempo di esposizione. Tuttavia, la caratteristica più rilevante è il copriferro in quanto l'oggetto maggiormente danneggiato dalle alte temperature risultano le armature di acciaio.

2.3. Degrado meccanico

Erosioni, abrasioni, urti ed esplosioni sono alcuni esempi di fenomeni che determinano degrado di tipo meccanico. Tra gli altri, possono causare fessure con probabile distacco del copriferro, rendendo le armature maggiormente esposte a fenomeni di corrosione.

Capitolo 3

La corrosione delle barre di armatura

La durabilità delle strutture in calcestruzzo armato dipende dalle caratteristiche dei materiali che lo compongono e dalla loro interazione. Dopo aver richiamato i principali fenomeni di degrado del calcestruzzo nel Capitolo 2, si procede ora alla trattazione dei fenomeni di degrado che coinvolgono le barre di armatura [21].

Le barre sono spesso soggette a corrosione, che è un processo di natura elettrochimica. Nel calcestruzzo armato, l'elettrolita è costituito dalla soluzione contenuta nei pori (idrossido di calcio, potassio, sodio) con pH superiore a 11.5. L'ambiente basico l'assenza di cloruri determina le condizioni di passività: le barre vengono ricoperte da un film di ossido di spessore di pochi nanometri che le protegge dall'ambiente esterno. In presenza di ambienti aggressivi, tale condizione viene meno.

Se il calcestruzzo è correttamente confezionato e messo in opera, si passiva perfettamente poiché il pH nei pori si aggira tra 13 e 14. Un normale calcestruzzo tende a perdere però le sue caratteristiche protettive, e ciò avviene in funzione del livello di aggressività dell'ambiente in cui opera.

Il fenomeno della corrosione è di tipo elettrochimico: una volta distrutto il film protettivo delle barre, la corrosione può aver luogo in presenza di ossigeno e acqua seguendo le trasformazioni illustrate dalla teoria di Evans [22], a cui si rimanda per la trattazione approfondita delle trasformazioni chimiche.

3.1. Tipologie e velocità di corrosione

La rottura del film di passività può portare alla corrosione in presenza di acqua o ossigeno oppure, nel caso di correnti disperse, se l'interferenza si perpetua nel tempo. L'innescò della corrosione rappresenta la fase nella quale si producono i fenomeni che determinano la perdita delle condizioni di passività. Esso rappresenta il tempo necessario affinché abbia inizio il fenomeno corrosivo. All'innescò

segue una fase di propagazione, successiva alla rottura del film protettivo. Una descrizione grafica delle due fasi può essere osservata in Figura 3.1.

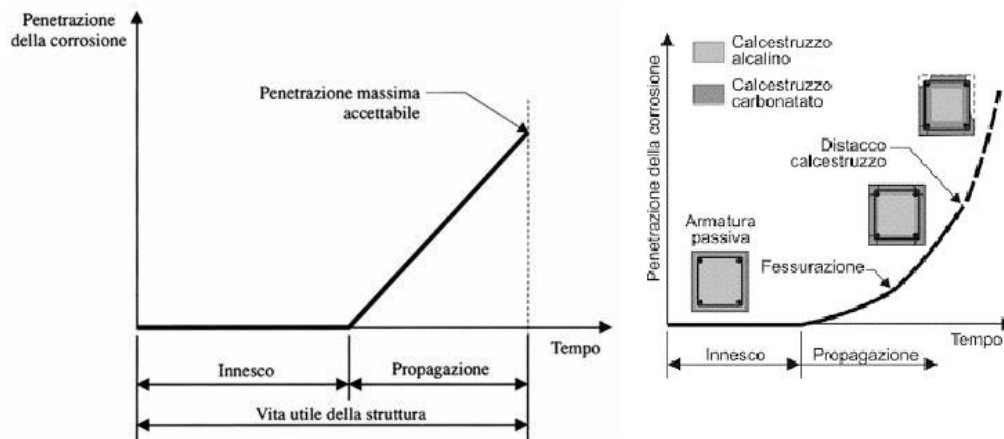


Figura 3.1 – Innesco e propagazione della corrosione

La velocità di corrosione può essere espressa in $\mu\text{m}/\text{anno}$ o in mA/m^2 , più raramente in termini di perdita di massa per unità di tempo e superficie ($\text{g}/(\text{m}^2 \text{ anno})$). L'esposizione del calcestruzzo ad ambienti aggressivi determina la perdita delle sue caratteristiche protettive e ciò può avvenire nelle seguenti situazioni:

- per *carbonatazione*, l'alcalinità del calcestruzzo viene neutralizzata dall'anidride carbonica, che penetra nei pori e porta il pH della soluzione a valori inferiori a 9;
- per attacco da *cloruri*, la cui penetrazione nei pori può raggiungere la superficie delle armature e, per tenori superiori alla soglia critica (0.4-1% del contenuto in peso di cemento), provoca localmente la rottura del film protettivo;
- nelle strutture interessate da campi elettrici, percorse da correnti disperse che interferiscono con le armature, nelle zone in cui la corrente esce dalle armature stesse.

Sulla base della vita di servizio richiesta alle strutture in calcestruzzo armato, l'effetto della corrosione sulle armature può essere trascurato per velocità di penetrazione inferiori a $1.5\text{-}2 \mu\text{m}/\text{anno}$. Al di sopra di tale soglia, i prodotti della corrosione si accumulano sull'interfaccia tra armatura e calcestruzzo, causando inizialmente una riduzione di aderenza, per poi provocare fessurazioni ed espulsioni di copriferro. Si presentano in Figura 3.2 alcune velocità di corrosione per diversi scenari di calcestruzzo.

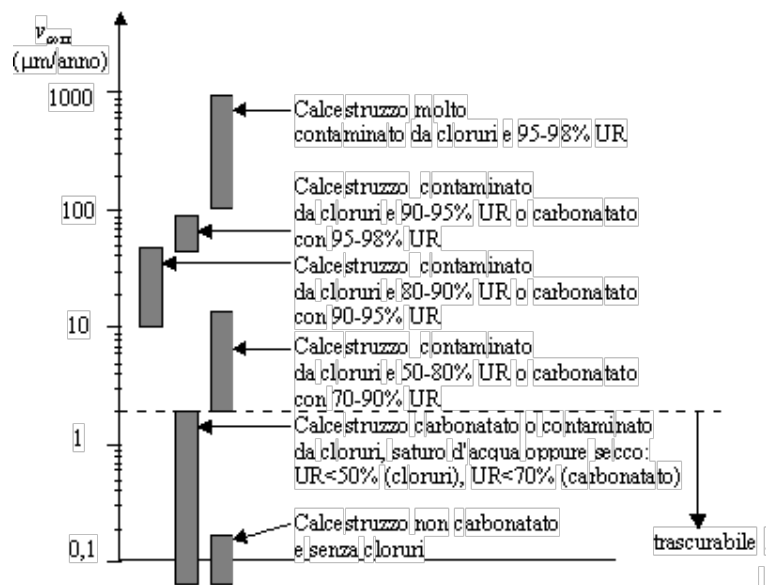
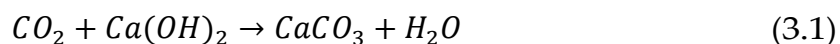


Figura 3.2 – velocità di corrosione

3.2. Corrosione da carbonatazione

La corrosione da carbonatazione [23], [24] si manifesta per effetto dell'anidride carbonica che reagisce con l'idrossido di calcio contenuto nei pori. La reazione di carbonatazione può essere scritta come:



L'anidride carbonica tende quindi a neutralizzare i componenti alcalini quando entra in contatto con il calcestruzzo. Anche altre sostanze sono in grado di neutralizzare l'alcalinità del calcestruzzo, come l'anidride solforosa e gli ossidi di azoto, ma in maniera minore. L'acciaio delle barre d'armatura non si trova più in condizioni di passività e può ossidarsi.

3.2.1. Tempo di innesco

La reazione di carbonatazione ha luogo a partire dalla superficie esterna e successivamente va ad interessare le regioni più interne. Si è visto come la fase di innesco rappresenti il tempo necessario affinché abbia inizio il fenomeno della corrosione, quindi il tempo a disposizione della carbonatazione per raggiungere la superficie esterna dell'armatura [23], [25]. Pertanto, è possibile far riferimento alla seguente relazione:

$$s = K \cdot t^{\frac{1}{n}} \quad (3.2)$$

dove s rappresenta lo spessore dello strato carbonatato, K il coefficiente che esprime la velocità di carbonatazione, n un coefficiente che dipende dal calcestruzzo (circa 2 per calcestruzzi porosi, superiore a 2 per calcestruzzi compatti) e t il tempo. La velocità di penetrazione si ricava poi derivando l'Equazione 3.2 rispetto al tempo:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{K}{n} \cdot t^{\frac{1-n}{n}} \quad (3.3)$$

Il coefficiente di carbonatazione K viene espresso in $mm \cdot anno^{-\frac{1}{n}}$ e dipende dalla porosità e dall'alcalinità dell'ambiente circostante. Si richiamano di seguito i principali fattori che lo influenzano.

Rapporto acqua/cemento e stagionatura

La porosità del calcestruzzo influenza molto la velocità di penetrazione della carbonatazione. Quest'ultima diminuisce con il rapporto a/c , per questo il calcestruzzo deve presentare una stagionatura adeguata in modo tale da evitare fessurazioni al livello del copriferro, ovvero lo strato più suscettibile all'evaporazione dell'acqua.

Umidità relativa e temperatura

Il trasporto di anidride carbonica viene favorito nei pori riempiti di aria ed è invece limitato nel caso di pori riempiti di acqua. Per questo motivo, la penetrazione dell'anidride carbonica diminuisce al crescere dell'umidità relativa, fino ad annullarsi in calcestruzzi saturi. Inoltre, la reazione di carbonatazione avviene in presenza di acqua e con velocità apprezzabile per valori di umidità relativa maggiori del 40%. Di conseguenza, l'intervallo per il quale si hanno le condizioni peggiori è quello per cui l'umidità relativa assume valori compresi tra il 50% e l'80% (Figura 3.3).

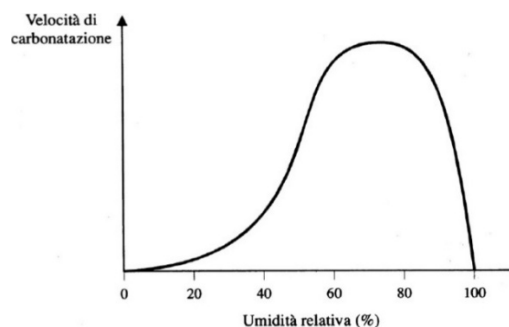


Figura 3.3 - Confronto tra umidità relativa e velocità di carbonatazione

Alcuni studi hanno permesso di ricavare sperimentalmente un range di valori del coefficiente di carbonatazione K , per strutture in calcestruzzo aventi diversi livelli di porosità e contenuti di cemento (Tabella 3.1). Il coefficiente K varia quindi a seconda del tempo e della zona della costruzione, dagli strati più esterni a quelli più interni. Viene influenzato dalle condizioni di umidità e temperatura nelle diverse parti della struttura, anche in base alla sua geometria. Come è possibile osservare in Figura 3.4, a parità di altre condizioni, anche un aumento di temperatura provoca un aumento della velocità di penetrazione [26].

Tabella 3.1 – Valori sperimentali di K per porosità diverse

Porosità	K [mm/anno ^{1/2}]
Bassa ($c > 350\text{kg/m}^3$)	2 - 6
Media ($250\text{kg/m}^3 < c < 350\text{kg/m}^3$)	6 - 9
Alta ($c < 250\text{kg/m}^3$)	> 9

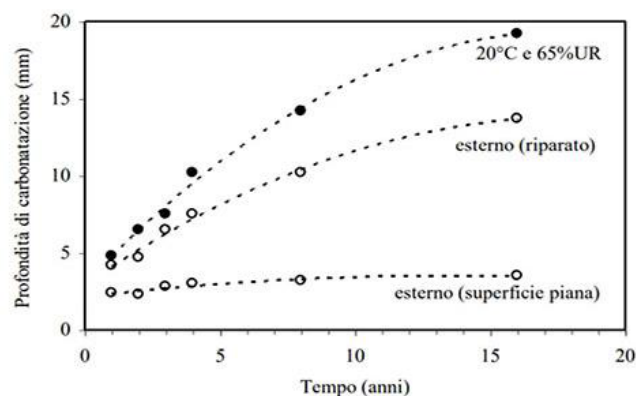


Figura 3.4 - Profondità di carbonatazione a diverse temperature

Concentrazione di anidride carbonica

Maggiore è il contenuto di anidride carbonica nell'atmosfera, maggiore è la velocità di penetrazione della carbonatazione. Alcuni studi hanno osservato sperimentalmente che una settimana di esposizione con il 4% di CO_2 presenta la stessa penetrazione di carbonatazione di un anno di esposizione alla normale atmosfera (avente circa lo 0.035% di CO_2). [27]

3.2.2. Velocità di propagazione

Successivamente, la carbonatazione raggiunge le armature e, in presenza di acqua e ossigeno, si forma una situazione favorevole al processo corrosivo. Fatta eccezione per le strutture sottomarine, l'ossigeno può sempre raggiungere la superficie delle armature in quantità sufficienti alla corrosione. Il fattore principale

che determina la velocità di corrosione è la resistività del calcestruzzo. Essa dipende soprattutto dal suo contenuto di acqua, dal tipo di cemento, dal rapporto a/c e dalla maturazione. La resistività di un calcestruzzo di buona qualità è trascurabile per umidità relative di valore inferiore all'80%, per il quale si introduce il fattore *tempo di bagnato*. Una volta superato questo valore, si suppone che la corrosione si propaghi e lo faccia solo durante il tempo di bagnato. [28]

Come visto in Figura 3.3, è possibile raggiungere in prossimità delle condizioni di saturazione la massima velocità di corrosione, che è dell'ordine di 100 - 200 $\mu\text{m}/\text{anno}$. In condizioni standard di esposizione ambientale si hanno generalmente velocità di 5 - 50 $\mu\text{m}/\text{anno}$ (Figura 3.5).

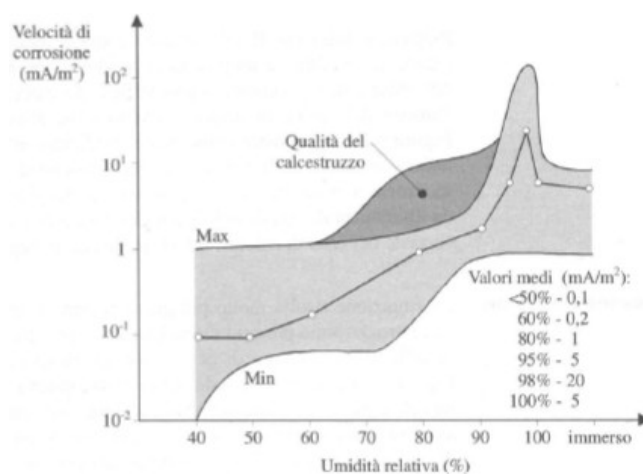


Figura 3.5 - Confronto tra umidità relativa e velocità di corrosione

Dal confronto tra gli andamenti osservati in funzione dell'umidità relativa, in particolare della velocità di penetrazione della carbonatazione e della velocità di propagazione della corrosione (Figura 3.3, Figura 3.5), si evince come lo scenario peggiore sia dato dall'alternanza tra condizioni di umidità media e alta: tale situazione è tipica dei calcestruzzi esposti alle intemperie. Con umidità comprese tra il 50% e l'80% si massimizza la velocità di penetrazione, ma una volta che la carbonatazione ha raggiunto l'armatura, la corrosione viene accelerata per umidità relative superiori all'80%.

3.3. Corrosione da cloruri

A causa dei cloruri, le armature sono spesso soggette a corrosione. Le normative attuali non permettono l'utilizzo di materie prime che presentino un contenuto significativo di questi sali. Tuttavia, i sali a base di cloruri possono provenire dall'ambiente esterno e causare la corrosione delle armature, specialmente nel

caso di strutture in ambienti marini o in presenza di sali antigelo (NaCl , CaCl_2). La corrosione può aver luogo nel caso in cui il tenore di cloruri sulla superficie delle armature superi il valore critico. Il meccanismo è legato alla rottura localizzata del film di passività delle armature per via dell'ingresso dei cloruri nel calcestruzzo, che possono essere stati aggiunti nell'acqua di impasto, sottoforma di sabbia di mare non lavata, o additivi. La rottura localizzata prende il nome di *pitting* o *vaiolatura* (Figura 3.6).

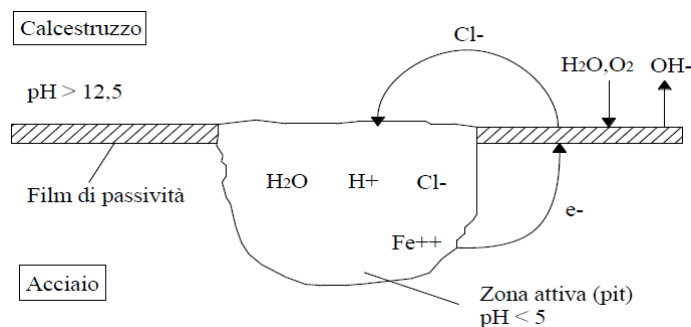


Figura 3.6 - Schema di corrosione per pitting

La rottura del film di passività crea un ambiente aggressivo che fa sì che la corrosione possa raggiungere velocità di penetrazione molto elevate, fino a 1 mm/anno. Le zone non più protette fungono da anodo e nelle zone circostanti si ha riduzione dell'ossigeno. Il passaggio di corrente dalla zona anodica a quelle catodiche favorisce il trasporto di cloruri verso la zona anodica, abbassandone l'alcalinità. Nella zona catodica il film viene rafforzato, l'alcalinità aumenta e i cloruri vengono allontanati.

Il contenuto critico dei cloruri dipende da diversi fattori. Innanzitutto, può dipendere dal potenziale delle armature, che a sua volta è legato alla quantità di ossigeno che raggiunge la loro superficie. Una diminuzione del potenziale può portare ad un incremento del tenore critico, anche di un ordine di grandezza. Se il calcestruzzo è esposto all'atmosfera, l'ossigeno può raggiungere facilmente le armature e l'attacco può aver luogo per un quantitativo di cloruri relativamente modesto. Nel caso di strutture immerse, il potenziale delle armature risulta molto negativo ed il tenore critico di cloruri è più elevato.

Anche la composizione del calcestruzzo influenza il contenuto critico di cloruri. In calcestruzzi non carbonatati, ottenuti con cemento Portland, il rischio di corrosione è basso per tenori inferiori allo 0.4% ed elevato al di sopra dell'1%. Nel caso di calcestruzzi poco permeabili, il tenore critico è più elevato. In generale, l'attacco viene favorito dalla presenza di bolle d'aria. Infine, anche un aumento della temperatura riduce il tenore critico dei cloruri.

3.3.1. Tempo di innesco

Il tempo di innesco è influenzato dalla velocità di penetrazione dei cloruri nel calcestruzzo, dal tenore critico di cloruri e dallo spessore del copriferro. In particolare, si vengono a creare dei profili di distribuzione dei cloruri caratterizzati da concentrazioni elevate in prossimità della superficie esterna, via via decrescenti con la profondità. In via semplificativa, per la descrizione del processo si considera la seconda legge di Fick [16] estesa anche al caso di meccanismi di trasporto diversi dalla diffusione.

La stima dei parametri di concentrazione superficiale C_s e di diffusione D non è così semplice. Nella realtà, infatti, i due coefficienti non sono costanti nel tempo e possono dipendere da diversi fattori. In particolare, il primo è influenzato dalla posizione della struttura, dalla giacitura e dall'orientamento della superficie, dal microclima, dall'esposizione al vento e alle intemperie. Il coefficiente di diffusione, invece, dipende dalle caratteristiche intrinseche della matrice cementizia come il rapporto a/c , la permeabilità, il grado di compattazione, la presenza di fessure ed il tipo di cemento.

3.3.2. Velocità di propagazione

La velocità di propagazione della corrosione delle barre può variare da qualche decimo di millimetro fino a 1 *mm/anno*, in funzione dell'umidità relativa (70-95%) e della concentrazione di cloruri (1-3% in peso rispetto al cemento). Nel caso di concentrazione di cloruri superiore al 3%, la velocità di penetrazione può divenire significativa per valori di umidità relativa del 50%. Nel caso di strutture immerse, o comunque con umidità relativa superiore al 95%, il ridotto apporto di ossigeno non permette la propagazione e dunque la velocità è bassa. La zona soggetta a spruzzi delle strutture marine è quella maggiormente interessata dal fenomeno della corrosione da cloruri, per via della ciclicità tra condizione di bagnato e ossigenazione della superficie.

Anche i viadotti stradali possono essere a forte rischio di corrosione, in quanto il cospargimento dei sali antigelo nella stagione invernale provoca ristagni di acqua che presentano elevate concentrazioni di cloruri. Nelle zone più critiche, si raggiungono addirittura valori prossimi a quelli delle zone soggette a spruzzi per le strutture marine. Il problema della corrosione interessa le solette, ma anche elementi come pulvini e pile quando le scossaline dei giunti sono assenti o non

sigillate, o quando le opere di allontanamento delle acque di scolo sono assenti o non posizionate in modo corretto.

Capitolo 4

Modellazione e analisi del degrado di una struttura in c.a.

Sulla base dei richiami teorici riportati nei capitoli precedenti, si procede ora alla definizione dei più significativi fenomeni di degrado delle strutture in calcestruzzo armato. A seconda dell'effetto che la corrosione provoca a livello strutturale, vengono introdotti alcuni dei principali modelli presenti in letteratura riguardo la corrosione delle strutture in c.a.

4.1. Determinazione del tempo di innesco

Nel Capitolo 3 sono già state introdotte alcune considerazioni in merito al tempo di innesco, ovvero il tempo necessario affinché abbia inizio il fenomeno corrosivo. In questa sezione si riportano i modelli maggiormente utilizzati per la determinazione di questo parametro.

4.1.1. Saetta, Vitalliani (2004)

Nell'articolo "Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures" [29] viene definito un modello numerico di degrado che, fornendo i parametri caratterizzanti il calcestruzzo e assumendo note le condizioni ambientali, consente di ottenere previsioni affidabili del tempo di innesco della corrosione di una costruzione. Questo modello, basato sugli studi di Saetta [27][30] e successivamente migliorato introducendo alcune nuove caratteristiche, come il flusso di umidità, calore e agenti aggressivi (ad esempio CO_2) attraverso il calcestruzzo e includendo eventuali reazioni chimiche tra i componenti cementizi e le specie aggressive.

Assumendo che dai risultati sperimentali siano noti i coefficienti di diffusione dell'acqua C e della sostanza aggressiva D_c all'interno della matrice porosa del

calcestruzzo, la conducibilità termica del calcestruzzo e gli altri parametri dei materiali, il seguente sistema di equazioni può essere risolto numericamente:

Flusso di umidità

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \text{div}(C \nabla h) + \frac{\partial h_s}{\partial t} + k \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial h_c}{\partial t} \quad (4.1)$$

Flusso termico

$$\rho C_q \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(b \nabla T) + \frac{\partial Q_h}{\partial t} + \frac{\partial Q_c}{\partial t} \quad (4.2)$$

Flusso dell'agente aggressivo

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \text{div}(D_c \nabla c) + \frac{c}{\alpha} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial c_c}{\partial t} \quad (4.3)$$

Velocità di reazione chimica

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \alpha_4 f_1(h) f_2(c) f_3(\eta) f_4(T) \quad (4.4)$$

dove h , T e c rappresentano rispettivamente l'umidità relativa (RH), la temperatura e la concentrazione della specie diffusiva (ad esempio anidride carbonica). w è il contenuto d'acqua, Q_h è il flusso di calore per unità di volume del solido e η è un parametro che rappresenta il grado di reazione chimica. Inoltre, le funzioni $f_1(h)$, $f_2(c)$, $f_3(\eta)$, $f_4(T)$ descrivono rispettivamente l'influenza della presenza d'acqua, della concentrazione della specie aggressiva, del grado di reazione chimica e della temperatura sulla velocità del processo chimico. La derivata parziale rispetto al tempo, ad esempio $\partial(\cdot)/\partial t$, indica la variazione nel tempo della grandezza considerata.

I termini:

$$\frac{\partial h_c}{\partial t} = \alpha_1 \frac{\partial \eta}{\partial t}, \quad \frac{\partial Q_c}{\partial t} = \alpha_2 \frac{\partial \eta}{\partial t}, \quad \frac{\partial c_c}{\partial t} = \alpha_3 \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (4.5)$$

dove α_1 , α_2 e α_3 , come α_4 nell'equazione 4.4, sono parametri che variano in funzione delle caratteristiche del calcestruzzo e degli agenti aggressivi [1-4].

L'influenza di vari parametri sulle diffusività può essere tenuta in conto mediante un fattore moltiplicativo per la diffusione dell'umidità:

$$C = C_{\text{rif}} F_1(h) F_2(T) F_3(t_e) F_4(\eta) \quad (4.6)$$

$$D_c = D_{c,rif} F_1(h) F_2(T) F_3(t_e) F_4(\eta) \quad (4.7)$$

dove C_{rif} e $D_{c,rif}$ sono le diffusività in condizioni standard. Le funzioni F_i , assumono le seguenti espressioni:

$$F_1^*(h) = \alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \left(\frac{1-h}{1-h_c}\right)^m} \quad (4.8)$$

$$F_1(h) = (1 - h)^{2.5} \text{ per fenomeni di diffusione dei gas (ad es. CO}_2\text{)} \quad (4.9)$$

$$F_1(h) = \left[1 + \left(\frac{1-h}{1-h_c}\right)^4\right]^{-1} \text{ per fenomeni di diffusione ionica (ad es. Cl}^-) \quad (4.10)$$

$$F_2(T) = \exp\left[\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (4.11)$$

$$F_3(t_e) = \chi + (1 - \chi) \left(\frac{t_e}{28}\right)^{0.5} \quad (4.12)$$

Per questo ultimo termine deve essere utilizzato un valore diverso per il parametro $\chi = D_\infty/D_{28}$, che rappresenta il rapporto tra la diffusività a lungo termine e quella a 28 giorni. La diffusività al tempo infinito D_∞ rispetto alla diffusività a 28 giorni D_{28} dipende dallo specifico processo diffusivo considerato.

Infine, se la reazione chimica produce un precipitato, come il carbonato di calcio nel processo di carbonatazione, per il quale

$$\eta = \frac{[\text{CaCO}_3]}{[\text{CaCO}_3]_{\max}}, \quad (4.13)$$

il fenomeno diffusivo non è rallentato dalla riduzione della porosità e la funzione $F_4(\eta)$ può essere scritta, ad esempio, come [3-5]:

$$F_4(\eta) = 1 - \zeta\eta \quad (4.14)$$

dove il parametro ζ varia tra 0 e 1.

Tutte le variabili dovrebbero essere considerate nell'ambito di un approccio probabilistico alla durabilità, poiché possono variare significativamente a livello locale e presentare una notevole dispersione. Di conseguenza, non solo i valori

medi, ma anche le distribuzioni statistiche delle variabili coinvolte dovrebbero essere prese in considerazione. Alcuni risultati preliminari possono essere trovati in [32].

Dopo aver determinato il fronte di carbonatazione, definito come la profondità d_c alla quale la profondità numerica corrisponde a un grado di reazione chimica $\eta = 0,1$, risolvendo il sistema di equazioni si ottengono gli andamenti temporali dell'umidità e della propagazione della sostanza corrosiva all'interno del materiale, nonché del grado della reazione stessa.

4.1.2. El Hassan, Bressollette, Chateauneuf, El Tawil (2010)

In "Reliability-based assessment of the effect of climatic conditions on the corrosion of RC structures subject to chloride ingress" [33] viene spiegato che il tempo di innesco può essere calcolato utilizzando la seconda legge di Fick, assumendo che il calcestruzzo sia un materiale omogeneo e isotropo.

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D_c(t, T, RH) \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} \quad (4.15)$$

dove C è la concentrazione di ioni cloruro, D_c è il coefficiente di diffusione dei cloruri nel calcestruzzo, t è il tempo, x è la profondità nella direzione di diffusione, T è la temperatura e RH è l'umidità relativa. Si assumono le seguenti ipotesi:

- il coefficiente di diffusione è costante;
- la concentrazione di cloruri è nulla al tempo iniziale ($t = 0$);
- la concentrazione di cloruri sulla superficie è costante.

La soluzione conduce alla concentrazione di cloruri $C(x, t)$ alla profondità x dalla superficie al tempo t [21]:

$$C(x, t) = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right) \quad (4.16)$$

dove C_s è la concentrazione di cloruri alla superficie (kg/m^3) ed $\operatorname{erf}(\cdot)$ indica la funzione errore standard. Quando la concentrazione di cloruri raggiunge il valore di soglia alla profondità dell'armatura, lo strato passivante dell'acciaio viene distrutto. L'innesco della corrosione dipende dalla disponibilità di ossigeno e umidità, dal criterio adottato e dalla qualità dell'interfaccia calcestruzzo-acciaio.

Assumendo un innesco immediato della corrosione nel momento in cui l'acciaio si depassiva, ipotesi più cautelativa rispetto all'assunzione di un intervallo di tempo la cui durata è difficilmente caratterizzabile, il tempo di innesco della corrosione può essere determinato risolvendo l'equazione 4.15 come segue:

$$t_{\text{ini}} = \frac{e^2}{4D_c \left[\text{erfc}^{-1} \left(\frac{C_{th}}{C_s} \right) \right]^2} \quad (4.17)$$

dove t_{ini} è il tempo di innesco della corrosione (anni), e è la profondità del copri-ferro (mm), D_c è il coefficiente di diffusione dei cloruri nel calcestruzzo (mm^2/anno), $\text{erf}^{-1}(\cdot)$ è la funzione errore complementare inversa, e C_{th} e C_s sono rispettivamente la concentrazione soglia e la concentrazione superficiale di cloruri (kg/m^3).

Se le condizioni ambientali non sono costanti nel tempo l'integrazione numerica dell'equazione 4.17 diventa necessaria, quindi nel caso in cui le condizioni al contorno nel tempo e nello spazio sono $C(x, 0) = 0$ e $C(0, t) = C_s$. Utilizzando un piccolo incremento temporale, l'applicazione dello schema di Runge-Kutta consente di calcolare la concentrazione di cloruri in qualsiasi istante e coordinata spaziale e, infine, il tempo di innesco della corrosione viene determinato verificando la condizione $C(e, T_{\text{ini}}) = C_{th}$.

Viene anche analizzata l'influenza dei parametri citati precedentemente e delle condizioni ambientali sul tempo di innesco tramite dati sperimentali ottenuti da prove in sito su un ponte le cui caratteristiche possono essere visionate in [33].

In Figura 4.1 si può osservare che la concentrazione soglia di cloruri C_{th} esercita la maggiore influenza sul tempo di innesco della corrosione. Tale osservazione rimane valida anche quando i valori medi degli altri parametri sono modificati fino al 40%. Questo risultato sottolinea il fatto che la determinazione del potenziale dell'acciaio gioca principalmente un ruolo dipendente dalla concentrazione di cloruri. Sebbene ciò implichi che la concentrazione superficiale di cloruri C_s svolga un ruolo significativo nell'innesco della corrosione, l'influenza del coefficiente di diffusione di riferimento $D_{c,\text{ref}}$ risulta molto meno rilevante rispetto agli altri due parametri. Questo può essere spiegato dal fatto che la sensibilità alle condizioni al contorno, ossia dalla concentrazione superficiale di cloruri (da C_s a C_{th}), è più elevata rispetto alla cinetica del processo diffusivo.

In Figura 4.2 e Figura 4.3 si può notare come l'aumento dell'Umidità Relativa e della temperatura comportino un decadimento significativo del tempo di innesco.

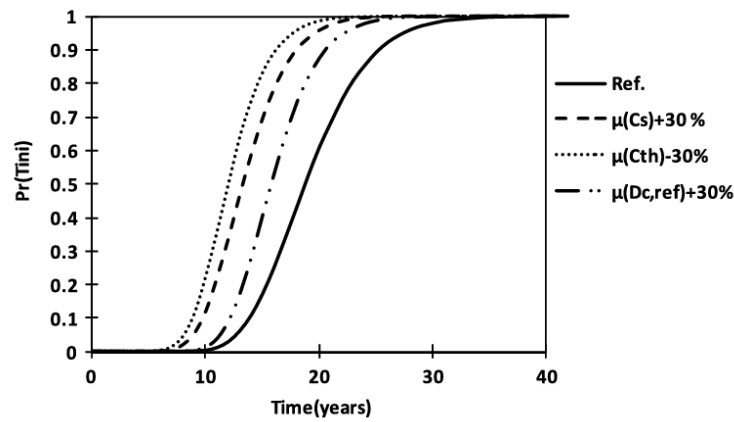


Figura 4.1 – influenza dei parametri C_s , C_{th} , D_c sul tempo di innesco

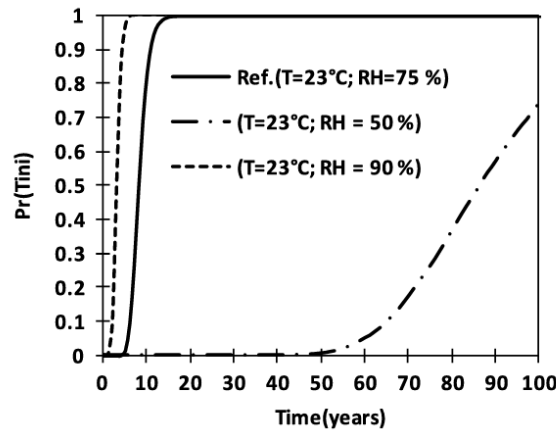


Figura 4.2 – influenza dell'umidità relativa sul tempo d'innesco

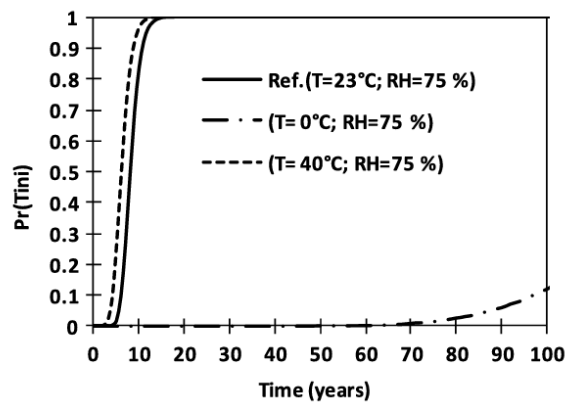


Figura 4.3 – influenza della temperatura sul tempo d'innesco

4.2. Effetti della corrosione sul calcestruzzo

La corrosione delle barre di armatura può portare alla formazione di prodotti di ossidazione che hanno degli effetti non trascurabili sul calcestruzzo. Innanzitutto, la riduzione dell'aderenza all'interfaccia tra calcestruzzo e barre di armatura fa sì che vi possa essere perdita di ancoraggio e sfilamento delle barre, il che renderebbe indipendenti i due materiali. Inoltre, la formazione di prodotti di corrosione, aventi volume maggiore rispetto a quello occupato dall'acciaio, è in grado di provocare il cosiddetto *spalling* del calcestruzzo. Ciò è dovuto alla presenza di sforzi di trazione che portano alla fessurazione e al possibile distacco del copriferro. [20], [34]

Le fessure permettono alle specie aggressive di penetrare nel calcestruzzo con maggiore facilità, favorendo l'attivazione dei fenomeni di degrado. Come è noto, la disposizione delle barre influenza la modalità di propagazione delle fessure. In particolare, è possibile considerare due modalità di fessurazione [28], [35]:

- fessurazione con piano di frattura a 45°;
- delaminazione (piano di frattura parallelo alla barra).

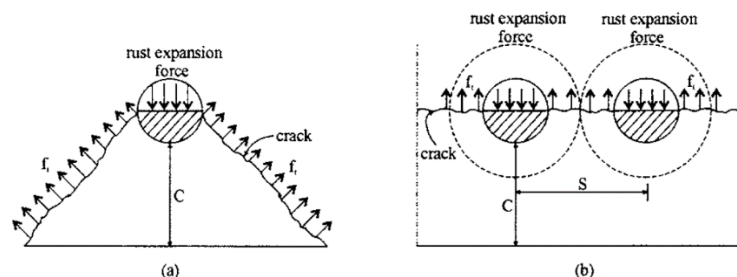


Figura 4.4 -Diverse modalità di fessurazione

Una rappresentazione grafica del fenomeno è data in Figura 4.4. Si consideri ora l'interasse tra le barre di armature S , il loro diametro D e lo spessore del copriferro C . La modalità di fessurazione a 45° si ha per $S > 6D$ e la sua configurazione viene rappresentata in Figura 4.5.

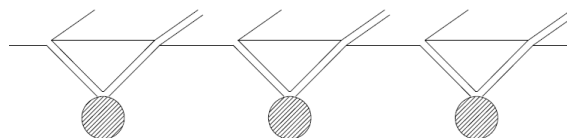


Figura 4.5 – Propagazione delle fessure a 45°

Il fenomeno della delaminazione è una conseguenza della propagazione delle fessure lungo un piano parallelo alle barre. Tale effetto della corrosione si ha per $C > \frac{S-D}{2}$ e viene mostrato schematicamente in Figura 4.6.

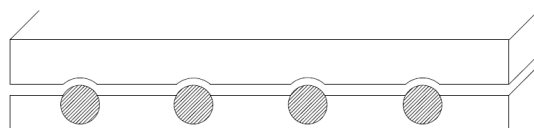


Figura 4.6 – Delaminazione del calcestruzzo

Infine, in presenza di barre poste all'estremità dell'elemento in c.a., è possibile avere effetti d'angolo legati alla fessurazione indotta dalla corrosione, come riportato in Figura 4.7.

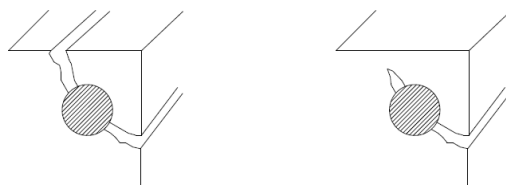


Figura 4.7 – Effetti d'angolo legati alla fessurazione

La qualità del calcestruzzo influenza notevolmente la fessurazione del copriferro. Tuttavia, anche il rapporto tra copriferro e diametro dell'armatura (C/D) ha una certa rilevanza. In particolare, un rapporto ridotto provoca una fessurazione immediata del copriferro ad opera dei prodotti di corrosione, mentre per valori elevati viene ritardata la fessurazione.

All'aumentare del rapporto aumenta quindi il tempo di innesco della corrosione, come mostrato in Figura 4.8. Si noti inoltre l'influenza del tempo di innesco in relazione al rapporto acqua/cemento. La porosità del calcestruzzo riveste infatti un ruolo importante nella corrosione. Un calcestruzzo con rapporto a/c elevato è infatti più poroso e permette ai prodotti della corrosione di penetrare nei vuoti, riducendo la fessurazione.

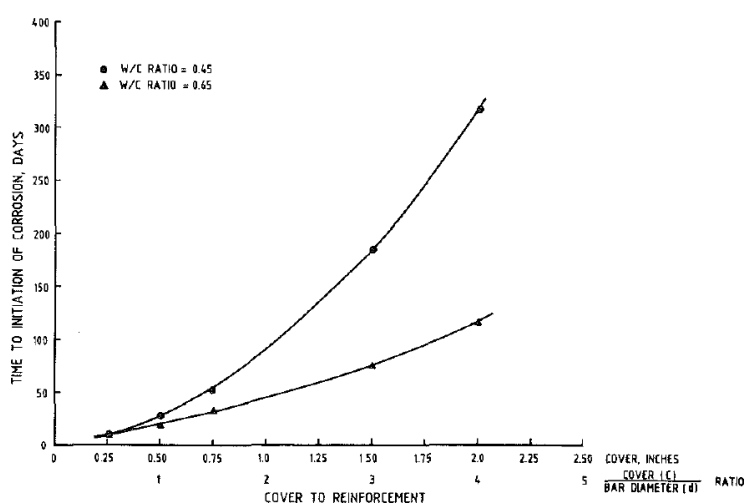


Figura 4.8 – Tempo di innesco in funzione del rapporto C/D

I prodotti di corrosione generano una pressione radiale sul calcestruzzo circostante le barre che, essendo sottoposto a uno stato di tensione biassiale, riduce la

propria resistenza. La riduzione del diametro efficace delle barre d'acciaio e la perdita di aderenza tra acciaio e calcestruzzo influenzano in modo significativo la resistenza a trazione delle barre, mentre gli effetti dovuti alla microfessurazione del calcestruzzo possono essere considerati come una perdita di resistenza del calcestruzzo nella zona compressa delle sezioni in c.a. [37-39].

In "Influence of reinforcement corrosion-in the compressive zone-on the behaviour of RC beams" [37] viene sviluppato un metodo di analisi basato su una legge costitutiva modificata σ - ϵ per il calcestruzzo in compressione, che tiene conto di un coefficiente di riduzione della resistenza λ , assumendo che il processo di corrosione non abbia raggiunto il distacco del copriferro e che l'integrità geometrica della sezione sia mantenuta.

Il coefficiente di riduzione della resistenza viene messo in relazione al coefficiente di danno definito come segue:

$$DC = 1 - \frac{EI^U}{EI^D} \quad (4.18)$$

Dove EI^U è la rigidezza della sezione non danneggiata ed EI^D nella configurazione danneggiata. Tale coefficiente può essere valutato mediante prove statiche prima e dopo il danneggiamento.

Di seguito viene riportata la formulazione principale dell'analisi ed i risultati ottenuti [39-42] :

Coefficiente di riduzione

$$\lambda = \frac{f_{c,max}^D}{f_{c,max}^U} \quad (4.19)$$

dove $f_{c,max}^U$ e $f_{c,max}^D$ sono rispettivamente la resistenza di picco del calcestruzzo non danneggiato e di quello danneggiato (Figura 4.9).

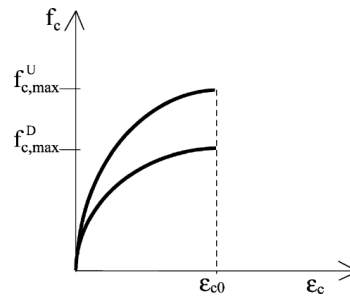


Figura 4.9 – Legge costitutiva del calcestruzzo danneggiato e non danneggiato

La curva tensione-deformazione del calcestruzzo non danneggiato soggetto a compressione nel campo elastico è espressa mediante la seguente curva parabolica:

$$f_c^U = \frac{f_{c,\max}^U}{\varepsilon_{c0}^2} \varepsilon_c (2\varepsilon_{c0} - \varepsilon_c) \quad (4.20)$$

con $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{c0} = \varepsilon_{c0}^U$, dove ε_{c0}^U è la deformazione corrispondente alla tensione di picco del calcestruzzo non danneggiato $f_{c,\max}^U$, solitamente assunta pari a 0,2% [39].

Considerando il danneggiamento del calcestruzzo compresso dovuto alla corrosione delle armature, la curva tensione-deformazione ridotta nel campo elastico è espressa come:

$$f_c^D = \frac{f_{c,\max}^D}{\varepsilon_{c0}^2} \varepsilon_c (2\varepsilon_{c0} - \varepsilon_c) \quad (4.21)$$

con $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{c0} = \varepsilon_{c0}^U$

Di seguito vengono riportati i risultati delle prove effettuate su una trave danneggiata in termini di coefficiente di danno e coefficiente di riduzione.

Tabella 4.1 – Coefficienti di riduzione in funzione del coefficiente di danno

DC	λ
0.10	1.56
0.15	1.95
0.20	2.47

In “Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: Modeling guidelines” [42] il legame costitutivo del calcestruzzo fessurato viene espresso in funzione dell’espansione dovuta alla formazione dei prodotti di corrosione. La resistenza a compressione ridotta viene definita in base alla seguente relazione:

$$f_c^* = \frac{f_c}{1 + K \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{c0}}} \quad (4.22)$$

essendo:

$$\varepsilon_{c0} = 0.0017 + 0.0010 \left(\frac{f_{cm}}{70} \right) \quad (4.23)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{b_f - b_i}{b_i} = \frac{n \cdot w}{b_i} \quad (4.24)$$

ed in particolare:

- K è un coefficiente legato alla scabrezza delle barre e può essere assunto pari a 0.1;
- ε_{c0} è la deformazione corrispondente al picco della resistenza a compressione f_c ;
- ε_1 rappresenta la deformazione trasversale, dovuta alla formazione dei prodotti di corrosione;
- b_f e b_i sono le larghezze della sezione considerata successivamente e precedentemente all'apertura delle fessure. La loro differenza può essere espressa come il prodotto tra il numero di barre n nella sezione e l'apertura media della fessura w per ogni barra.

L'ampiezza della fessura w può essere espressa in accordo a quanto suggerito da [43]:

$$w = 2\pi(v_{rs} - 1)x \quad (4.25)$$

dove:

- x rappresenta la profondità dell'attacco corrosivo;
- v_{rs} è il rapporto di espansione volumetrica degli ossidi rispetto al materiale vergine, assunto pari a 2.

Si ottiene quindi $w = 2\pi x$.

4.3. Effetti della corrosione sul diametro delle armature

Prima di procedere, sono necessarie alcune precisazioni in merito ai parametri che verranno utilizzati per la valutazione degli effetti della corrosione sulle barre di armatura. Verrà fatto riferimento dapprima alla corrosione da carbonatazione, per poi spostare l'attenzione sulla corrosione dovuta all'attacco dei cloruri. Tra i fattori che influenzano gli effetti della corrosione delle strutture, è importante tener conto della velocità di corrosione. Essa è fondamentale per determinare i danni della struttura nel tempo e può essere valutata tramite la legge di Faraday. Tale relazione permette di ricavare la profondità di armatura corrosa $\Delta\Phi$ mediante l'espressione [3]:

$$\Delta\phi = \int_{t_0}^t 0.0116 i_{\text{corr}}(\xi) d\xi \quad (4.26)$$

che può essere semplificata assumendo costante la velocità di corrosione. In tal caso, l'equazione 4.26 diventa:

$$\Delta\phi = 0.0116 i_{\text{corr}} t \quad (4.27)$$

dove la velocità del processo di corrosione i_{corr} è espressa in $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ e lo spessore di acciaio corrosato $\Delta\phi$ in cm. I valori di i_{corr} dipendono dalla classe di esposizione della struttura e sono riportati in Tabella 4.2 [44].

Tabella 4.2 – Intensità di corrosione in base alla classe di esposizione

Classe di esposizione	Livello corrosione	i_{corr} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]
XC1	Trascurabile	< 0.1
XC2	Bassa	0.1 - 0.5
XC3	Trascurabile	< 0.1
XC4	Bassa / Moderata	0.1 - 0.5 / 0.5 - 1

Nella Equazione 4.27 il fenomeno della corrosione comporta una diminuzione del diametro con andamento lineare nel tempo. Queste formulazioni, infatti, sono una semplificazione del fenomeno reale che può essere descritto attraverso la formulazione proposta in “Corrosion in PT Tendons: Review of Estimation & Forecasting Models”[45].

L'intensità di corrosione dell'acciaio nel calcestruzzo carbonatato è governata da fenomeni di microcelle di corrosione, con il contributo dell'attività di macrocella. La velocità di corrosione è influenzata da numerosi parametri, quali principalmente il contenuto di umidità del calcestruzzo, la porosità del calcestruzzo e la sua composizione. La velocità di corrosione varia tipicamente da 1 a 10 $\mu\text{m}/\text{anno}$; tuttavia, in ambienti ad elevata umidità sono stati osservati valori fino a 40 $\mu\text{m}/\text{anno}$.

La velocità di corrosione varia da 10 a 70 $\mu\text{m}/\text{anno}$ in funzione delle classi di esposizione [46] quando la corrosione è promossa dai cloruri. Poiché la velocità di corrosione può aumentare o diminuire durante la vita utile della struttura, la penetrazione della corrosione può essere calcolata mediante un modello multilinare:

$$P_{\text{corr}} = P_{\text{corr},1} + P_{\text{corr},2} + \dots + P_{\text{corr},n} = V_{\text{corr},1} t_{p,1} + V_{\text{corr},2} t_{p,2} + \dots + V_{\text{corr},n} t_{p,n} \quad (4.28)$$

Come alternativa all'equazione 4.27 è stata proposta una legge di potenza:

$$P_{\text{corr}} = V_{\text{corr}} \cdot t^n \quad (4.29)$$

dove, se il fattore $n < 1$, la velocità di corrosione si attenua, mentre se $n > 1$ la velocità di corrosione accelera. Ad esempio, dopo 10 anni si passa da circa $16 \mu\text{m}$ per $n = 0,5$ e $V_{\text{corr}} = 5 \mu\text{m}/\text{anno}$ fino a circa $158 \mu\text{m}$ per $n = 1,5$ e $V_{\text{corr}} = 50 \mu\text{m}/\text{anno}$.

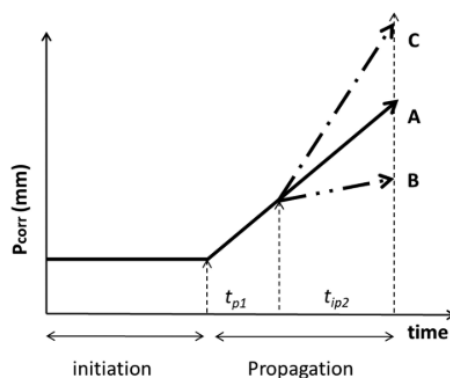


Figura 4.10 – Sviluppo nel tempo della penetrazione dovuta alla corrosione

Tuttavia, nell'articolo "Propagation period modeling and limit state of degradation" [25] si evidenzia come l'equazione 4.29 sia meno pratica rispetto all'equazione 4.27 in quanto la variazione della pendenza della curva di penetrazione della corrosione (Figura 4.10) può avere origine da diversi fenomeni, in particolare dalla formazione di fessure dovute al carattere espansivo dei prodotti di corrosione. In generale, in condizioni di immersione, la comparsa di fessure favorisce l'ingresso dei cloruri, determinando un incremento significativo della velocità di corrosione. In condizioni atmosferiche, invece, la formazione di fessure può comportare un tempo di bagnamento più breve, poiché la zona fessurata può asciugarsi più rapidamente rispetto al calcestruzzo integro. Di conseguenza, le zone di acciaio in prossimità delle fessure presentano un periodo di bagnamento più breve e la velocità di corrosione può diminuire. Tuttavia, tale diminuzione dipende dal tempo annuo di esposizione della zona fessurata alla pioggia: se il tempo di bagnamento per anno è elevato, la velocità di corrosione nelle zone fessurate esposte all'atmosfera può non diminuire, ma al contrario aumentare.

In conclusione, la diminuzione con andamento lineare risulta una semplificazione accettabile poiché le analisi effettuate sono volte alla ricerca della crisi del viadotto, quindi su un arco temporale elevato (Figura 4.11).

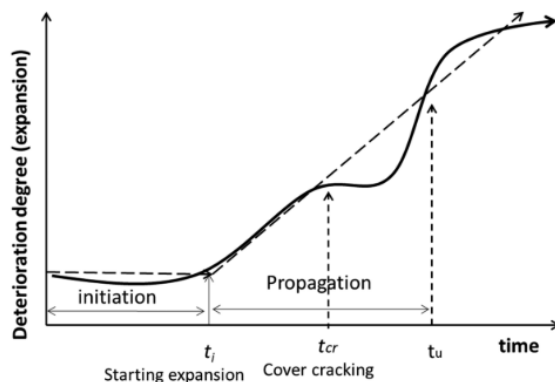


Figura 4.11 – Sviluppo reale nel tempo del grado di deterioramento

Per calcolare la perdita di diametro della barra, è importante distinguere tra corrosione omogenea e corrosione localizzata. Se l'attacco corrosivo è localizzato, è stata stabilita una relazione empirica tra la profondità massima del pit P_{pit} e la profondità dell'attacco corrosivo basata sulla corrosione uniforme P_{corr} [47], [48]:

$$P_{\text{pit}} = P_{\text{corr}} \cdot \alpha \quad (4.30)$$

dove α è il fattore di pitting, che tiene conto della profondità massima del pit (Figura 4.12). In altri termini, la profondità massima del pit è α volte maggiore di quella che si avrebbe se l'attacco corrosivo fosse omogeneo. Per le armature in acciaio nel calcestruzzo, il valore medio è $\alpha = 10$, mentre in presenza di attacco da cloruri α può variare tra 3 e 15. Per la corrosione indotta da carbonatazione si assume $\alpha = 1$.

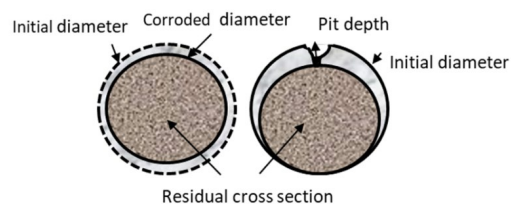


Figura 4.12 – Schematizzazione dell'effetto della corrosione omogenea e localizzata

In questo lavoro le analisi vengono effettuate su elementi soggetti a carbonatazione; dunque, la corrosione localizzata può essere trascurata.

A seconda dell'intensità di corrosione, è possibile trovare in letteratura diversi valori di i_{corr} per i diversi studi di ricerca [2], [48], [49]. Si possono individuare quattro differenti livelli di corrosione delimitati come da Figura 4.13.

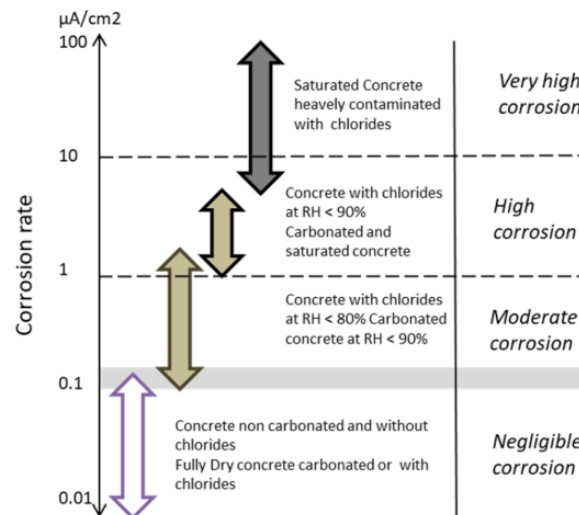


Figura 4.13 – Divisione dei livelli di corrosione in base all'intensità

In questo lavoro si è scelto dunque di utilizzare i valori indicati in Tabella 4.3, in accordo con altri studi simili [5-8], [51], [52].

Tabella 4.3 – valori di intensità di corrosione in base al livello di degrado

Livello di corrosione	i_{corr} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]
Trascurabile	< 0.1
Bassa	0.1
Moderata	1
Alta	5

4.4. Effetti della corrosione sulle proprietà meccaniche delle armature

Diversi studi hanno evidenziato il forte legame che sussiste tra corrosione e variazione delle proprietà meccaniche delle barre di armatura. Ad esempio, nello studio "Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars" [4] si osserva, a causa del fenomeno corrosivo, una riduzione in termini di tensione di snervamento, tensione di rottura, deformazione ultima e duttilità (Figura 4.14) La rottura delle barre è locale nel caso in cui vi siano fessure nel calcestruzzo, per via della localizzazione del processo corrosivo e della riduzione di sezione in alcuni punti, con conseguente concentrazione degli sforzi.

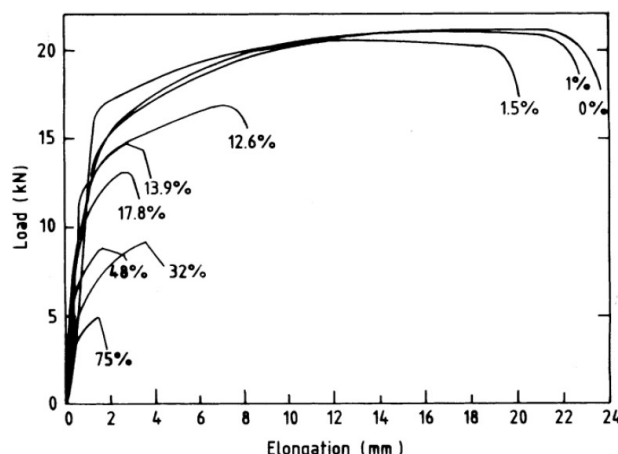


Figura 4.14 – Diagrammi sforzo – deformazione a confronto in base al grado corrosivo

Il passaggio dal dato sperimentale ad una formulazione matematica in grado di poter prevedere il decadimento delle proprietà meccaniche è stato proposto da studi successivi.

In “Effect of corrosion on ductility of reinforcing bars” [52] viene dimostrato come il fenomeno corrosivo comporti un effetto trascurabile sul rapporto di resistenza, sulla deformazione di incrudimento e sul modulo elastico delle barre di armatura.

La spiegazione di questa osservazione risiede nel fatto che la deformazione di incrudimento e il modulo elastico delle barre d’armatura dipendono dalla loro composizione chimica e dal processo produttivo. La corrosione rimuove ioni di ferro solo dalla superficie della barra e non modifica la natura e la composizione dell’acciaio rimanente. Di conseguenza, la corrosione delle armature non altera in modo significativo la deformazione di incrudimento e il modulo elastico.

La Figura 4.15 mostra che la deformazione ultima delle barre d’armatura si riduce significativamente a causa della corrosione. Le analisi di regressione indicano che la deformazione ultima delle barre corrose può essere generalmente descritta dall’equazione 4.31:

$$\varepsilon_u = (1.0 - \alpha_\varepsilon Q_{\text{cor}}) \varepsilon_{u0} \quad (4.31)$$

Dove α_ε è il coefficiente di regressione per la deformazione ultima ε_u e Q_{cor} è la percentuale di armatura corrosa.

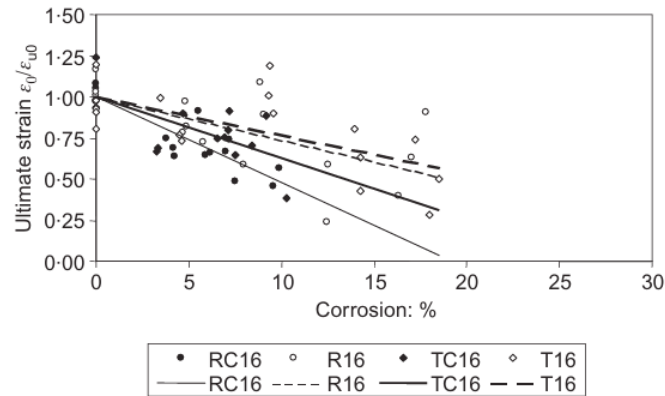


Figura 4.15 – Variazione della deformazione ultima delle barre di armatura in base allo stato di degrado

Sebbene il diametro della barra e il tipo di barra influenzino effettivamente la riduzione della deformazione ultima, dell'area duttile e dell'allungamento delle barre corrose, tali influenze non risultano significative al livello di significatività del 5%. Di conseguenza, la riduzione della deformazione ultima di barre di diverso tipo e diametro è determinata principalmente dalla percentuale di corrosione piuttosto che dal tipo o dal diametro della barra. L'effetto della condizione di corrosione, ossia barra nuda o barra inglobata nel calcestruzzo, risulta invece significativo.

Gli autori dello studio concludono che, considerando congiuntamente i risultati di tutte le barre come un'unica popolazione e arrotondando i coefficienti per eccesso per rimanere a favore di sicurezza, si ottengono le equazioni 4.32 e 4.33 rispettivamente per barre nude e barre inglobate nel calcestruzzo:

$$\varepsilon_u = (1.0 - 0.03 Q_{\text{cor}}) \varepsilon_{u0} \quad (4.32)$$

$$\varepsilon_u = (1.0 - 0.05 Q_{\text{cor}}) \varepsilon_{u0} \quad (4.33)$$

L'articolo "Evaluation of the mechanical properties of steel reinforcement embedded in concrete specimen as a function of the degree of reinforcement corrosion"[53] ha indagato quantitativamente la relazione tra il grado di corrosione delle armature e le proprietà meccaniche dell'armatura stessa. Nell'esperimento, le prove di trazione su armature corrose sono state eseguite in diverse fasi del processo di corrosione delle armature. Dai risultati è emerso che all'aumentare del grado di corrosione delle armature, il carico di snervamento nominale e il modulo elastico nominale diminuiscono. Inoltre, è stata riscontrata una correlazione molto elevata tra il grado di corrosione delle armature e le loro proprietà meccaniche.

È stato quindi possibile definire leggi costitutive del materiale per descrivere le proprietà meccaniche delle armature in funzione del grado di corrosione (Tabella 4.4). Inoltre, è possibile analizzare la resistenza di elementi strutturali in calcestruzzo armato danneggiati dalla corrosione delle armature utilizzando tali leggi costitutive nell'ambito del Metodo degli Elementi Finiti (FEM).

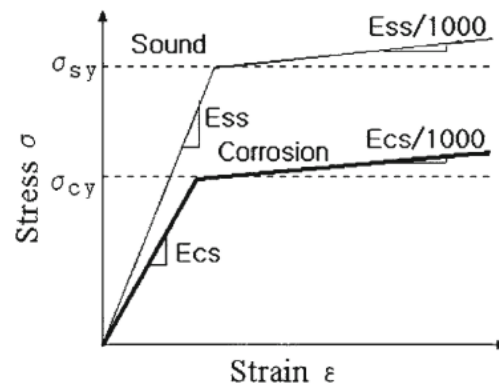


Figura 4.16 – Schematizzazione della legge costitutiva di una barra d'armatura corrosa

Il modello bilineare mostrato in Figura 4.16 è un modello disponibile per le armature nelle analisi agli elementi finiti (FEM). Tale modello è costituito dal punto di snervamento e dal modulo elastico. Pertanto, le leggi costitutive per le armature possono essere ottenute definendo il punto di snervamento e il modulo elastico delle armature in funzione della massa corrosa ψ , espressa in %. Nell'indagine è stato adottato il modello di corrosione uniforme per le armature, nel quale l'area della sezione trasversale dell'armatura corrosa è assunta uguale a quella di un'armatura integra, mentre le prestazioni meccaniche apparenti dell'armatura corrosa risultano ridotte, come mostrato in Figura 4.17.

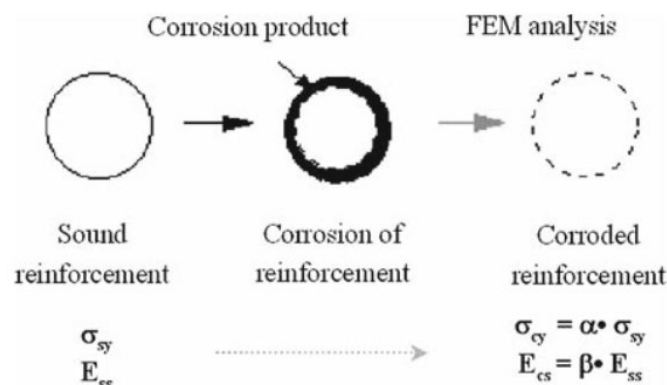


Figura 4.17 – Schematizzazione del modello di corrosione uniforme

Tabella 4.4 – Formulazioni della legge costitutiva dell'armatura corrosa in caso di corrosione uniforme o localizzata

Proprietà meccanica	Tipo corrosione	Regressione
Tensione di snervamento	Uniforme	$f_{y,corr} = (1 - 0.0124 \psi) f_y$
	Localizzata	$f_{y,corr} = (1 - 0.0198 \psi) f_y$
Tensione di rottura	Uniforme	$f_{u,corr} = (1 - 0.0107 \psi) f_u$
	Localizzata	$f_{u,corr} = (1 - 0.0157 \psi) f_u$
Deformazione ultima	Uniforme	$\varepsilon_{u,corr} = (1 - 0.0195 \psi) \varepsilon_u$
	Localizzata	$\varepsilon_{u,corr} = (1 - 0.0259 \psi) \varepsilon_u$
Modulo elastico	Uniforme	$E_{s,corr} = (1 - 0.0075 \psi) E_s$
	Localizzata	$E_{s,corr} = (1 - 0.0115 \psi) E_s$

4.5. Cenni sulla prevenzione

La prevenzione del degrado delle strutture in calcestruzzo armato è di fondamentale importanza e deve essere effettuata a partire dalle prime fasi di progettazione. In particolare, devono essere tenuti in considerazione la destinazione d'uso dell'opera, l'ambiente in cui si trova, le sollecitazioni cui è soggetta e la tipologia di struttura e dei dettagli costruttivi che la caratterizzano. Il comportamento delle strutture in c.a. dipende da numerose variabili che rendono complessa la valutazione del loro sviluppo nel tempo. Per questi motivi, ciascuna opera deve essere periodicamente monitorata in accordo a quanto previsto dalle normative vigenti. Facendo riferimento alla prevenzione nel caso di progettazione, messa in opera e manutenzione delle strutture, si riportano qui solamente alcune specifiche generali [23].

Innanzitutto, è importante far attenzione a non provocare fessurazioni eccessive, intervenendo sia a livello progettuale che di esecuzione dell'opera. Bisogna poter garantire una corretta accessibilità globale per l'ispezione e la manutenzione della struttura, che deve essere studiata in modo tale da non presentare geometrie troppo complesse, addensamenti di armature o spigoli vivi. Durante il trasporto e la messa in opera è importante evitare la segregazione dell'impasto ed in generale è necessario garantire adeguati spessori di copriferro e mantenere condizioni di temperatura e umidità ottimali.

Per far sì che la struttura presenti una durabilità adeguata, le normative riportano opportune prescrizioni in termini di massimo rapporto acqua/cemento e minimi valori di copriferro e classe di resistenza, in funzione della classe di esposizione dell'opera. Nel caso dei viadotti, è opportuno tener conto anche dei dettagli legati all'impermeabilizzazione degli impalcati, ai giunti di dilatazione e alla corretta

progettazione dei sistemi di raccolta e deflusso delle acque. A causa del notevole costo dovuto ad operazioni di intervento e ripristino successivo al deterioramento, le normative vigenti prevedono un attento piano di prevenzione.

Un altro metodo di prevenzione e riparazione può essere rappresentato dai trattamenti superficiali per ridurre la carbonatazione. Tra i trattamenti più comunemente applicati rientrano i rivestimenti barriera a base acrilica, poliuretanica o epossidica [54], [55]. Tali rivestimenti sono tuttavia soggetti a degrado, richiedono spesso una manutenzione significativa e presentano il limite di modificare l'aspetto estetico della superficie del calcestruzzo.

Un'altra tipologia di trattamento superficiale che non influisce sull'aspetto estetico del calcestruzzo è rappresentata dall'impregnazione idrofobica. Per quanto riguarda la carbonatazione, diversi studi in letteratura indicano che un trattamento superficiale idrofobico risulta inefficace nel ridurre in modo significativo le velocità di carbonatazione [56] o può addirittura accelerare la carbonatazione; tale effetto è stato attribuito al fatto che il trattamento idrofobico riduce il contenuto di umidità del calcestruzzo, facilitando così la carbonatazione [57].

Al contrario, altri studi hanno riportato un effetto positivo dei trattamenti superficiali idrofobici sull'avanzamento della carbonatazione [58], [59], mentre Xu et al. [60] hanno correlato il potenziale effetto di un trattamento a base di silani alla porosità iniziale del calcestruzzo, suggerendo che il trattamento idrofobico possa risultare più efficace in calcestruzzi caratterizzati da una struttura porosa più densa.

Capitolo 5

Analisi dei viadotti

A questo punto è possibile procedere con la fase di analisi delle strutture. Come anticipato, si intendono studiare tre viadotti autostradali e valutare l'effetto della corrosione per diversi scenari di degrado e differenti scenari temporali. La variazione della capacità sismica dei viadotti viene valutata mediante i seguenti parametri:

indice di rischio in termini di accelerazione, definito dalla relazione:

$$IR_a = \frac{PGA_{\text{resistente}}}{PGA_{\text{normativa}}} \quad (5.1)$$

indice di rischio in termini di tempo di ritorno, definito dalla relazione:

$$IR_T = \left(\frac{TR_{\text{resistente}}}{TR_{\text{normativa}}} \right)^{0.41} \quad (5.2)$$

Il modello a elementi finiti (*FEM*) e gran parte delle analisi sono stati realizzati utilizzando il software commerciale *Midas Civil*. La documentazione dei viadotti è stata preventivamente esaminata e utilizzata per la creazione del modello di calcolo e per la caratterizzazione dell'evento sismico sollecitante. La caratterizzazione geometrica e meccanica della struttura riveste un'importanza fondamentale e deve risultare sufficientemente accurata (Livello di conoscenza LC3 secondo NTC 2018).

La normativa italiana *NTC 2018* [18] richiede l'utilizzo di un fattore di confidenza, dipendente dal livello di conoscenza acquisito durante le indagini. In questo modo, la resistenza dei materiali viene ridotta nelle verifiche strutturali. In assenza di specifici approfondimenti sperimentali in laboratorio, le proprietà meccaniche dei materiali vengono assunte sulla base di opportuni studi di ricerca correlati.

I viadotti sono opere strategiche per le quali si considera un periodo di riferimento di 100 anni, ottenuto moltiplicando la vita nominale dell'opera per un

coefficiente che tiene conto della classe d'uso di appartenenza. Note anche le caratteristiche del sito, si ricavano i parametri che definiscono lo spettro di risposta in condizioni ideali (sottosuolo rigido e piano topografico orizzontale). Nelle *NTC 2018* tali parametri sono tabellati per diversi periodi di ritorno e per differenti condizioni del sito.

La prima grandezza rappresenta la massima accelerazione orizzontale del terreno ed è indicata con il simbolo a_g . Segue il valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale (F_0) e il periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale (T_c^*). Lo spettro elastico in accelerazione della componente orizzontale del moto sismico è definito dalle seguenti espressioni:

$$0 \leq T \leq T_B \rightarrow S_e(T) = a_g S \eta F_0 \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta F_0} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right] \quad (5.3)$$

$$T_B < T \leq T_c \rightarrow S_e(T) = a_g S \eta F_0 \quad (5.4)$$

$$T_c < T \leq T_D \rightarrow S_e(T) = a_g S \eta F_0 \left(\frac{T_c}{T} \right) \quad (5.5)$$

$$T_D < T \rightarrow S_e(T) = a_g S \eta F_0 \left(\frac{T_c \cdot T_D}{T^2} \right) \quad (5.6)$$

dove T rappresenta il periodo proprio di vibrazione, η è il fattore che modifica lo spettro elastico in funzione dello smorzamento e S è un parametro dipendente dalla categoria di sottosuolo e dalle condizioni topografiche del sito.

Lo scopo di questo capitolo consiste nell'illustrare le metodologie di analisi comuni ai tre viadotti analizzati, al fine di presentare una sola volta le considerazioni e le procedure che li accomunano.

5.1. Definizione dei materiali

La legge costitutiva dei materiali deve tenere conto dei fenomeni meccanici che si manifestano sia a livello di elemento sia a livello di sezione trasversale. La scelta del legame costitutivo è di fondamentale importanza ai fini della buona riuscita delle analisi, soprattutto perché tali analisi includono il campo non lineare.

5.1.1. Legame costitutivo del calcestruzzo

Per il calcestruzzo è stato utilizzato il modello proposto da *Kent e Park (1971)*[61], la cui legge costitutiva tiene conto dell'effetto di confinamento offerto dall'armatura trasversale tramite un parametro K . L'aumento della tensione assiale, fino alla rottura, provoca un significativo incremento della deformazione trasversale del calcestruzzo, che viene ostacolata dalla presenza delle staffe. Queste determinano l'insorgere di tensioni triassiali che aumentano la resistenza a compressione e la duttilità del calcestruzzo.

Il modello di Kent e Park tiene conto di tale fenomeno ed è caratterizzato dai seguenti tratti:

- un ramo parabolico, fino al raggiungimento della deformazione del calcestruzzo ε_{c0} in corrispondenza dello sforzo massimo;
- un tratto lineare decrescente, fino al raggiungimento della resistenza residua;
- un tratto orizzontale, fino alla deformazione ultima del calcestruzzo ε_{cu} .

Il legame costitutivo è rappresentato in Figura 5.1 ed è descritto dalle seguenti espressioni:

$$\sigma_c = \begin{cases} K f'_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right], & \text{per } \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c0} \\ K f'_c [1 - Z(\varepsilon_c - \varepsilon_0)], & \text{per } \varepsilon_y < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c1} \\ 0.2 K f'_c, & \text{per } \varepsilon_{c1} < \varepsilon_c \end{cases} \quad (5.7)$$

dove:

- K è il fattore che tiene conto dell'aumento di resistenza dovuto al confinamento, solitamente con valori compresi tra 1,1 e 1,5. Il parametro si può ottenere attraverso la formula seguente:

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{yk}}{f'_c} \quad (5.8)$$

- Z rappresenta la pendenza del tratto di softening, pari a:

$$Z = \frac{1}{2} \left(\frac{3 + 0.29 f'_c}{145 f'_c - 1000} + 0.75 \rho_s \sqrt{\frac{h'}{s_h}} - 0.002 K \right)^{-1} \quad (5.9)$$

- f'_c è la resistenza cilindrica a compressione del calcestruzzo [kN/m²];

- ε_c e ε_0 rappresentano rispettivamente la deformazione della fibra di calcestruzzo e la deformazione in corrispondenza dello sforzo massimo;
- σ_c è lo sforzo della fibra di calcestruzzo [kN/m²];
- ρ_s è la percentuale volumetrica di armatura trasversale, caratterizzata da una tensione di snervamento f_{yk} [kN/m²];
- s_h rappresenta il passo delle staffe [m];
- h' è la dimensione del nucleo di calcestruzzo [m].

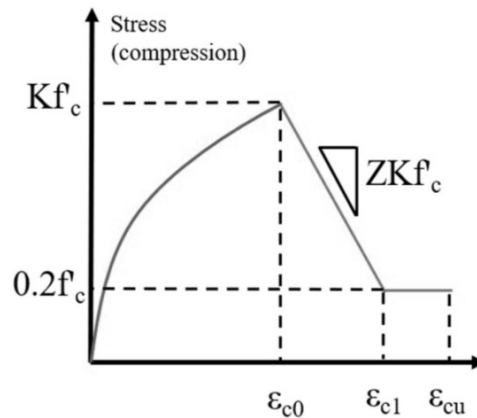


Figura 5.1 – Legge costitutiva del calcestruzzo, modello Kent Park

5.1.2. Legame costitutivo dell'acciaio

Per quanto riguarda l'acciaio, viene utilizzata la legge costitutiva proposta da Park (1973) [61], nota come *Park Strain Hardening*. Il comportamento elastoplastico con incrudimento dell'acciaio è rappresentato mediante tre rami distinti:

- un tratto elastico lineare, dall'origine fino alla deformazione di snervamento ε_y , con pendenza E_s ;
- un tratto perfettamente plastico, con aumento di deformazione a sforzo costante fino all'inizio del tratto incrudente;
- un tratto incrudente curvilineo, fino al raggiungimento della deformazione di rottura ε_{su} .

Il modello è mostrato in Figura 5.2 ed è descritto dalle seguenti relazioni:

$$\sigma_y = \begin{cases} E_s \varepsilon_y, & \text{per } \varepsilon < \varepsilon_y \\ f_y, & \text{per } \varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_{sh} \\ f_y \left[\frac{m(\varepsilon - \varepsilon_{sh}) + 2}{60(\varepsilon - \varepsilon_{sh}) + 2} + \frac{(\varepsilon - \varepsilon_{sh})(60 - m)}{2(30r + 1)^2} \right], & \text{per } \varepsilon_{sh} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{su} \end{cases} \quad (5.10)$$

dove:

- i parametri m e r sono definiti come:

$$m = \frac{(f_u/f_y)(30r + 1)^2 - 30r - 1}{15r^2} \quad r = \varepsilon_u - \varepsilon_{sh} \quad (5.11)$$

- σ_y rappresenta lo sforzo nelle barre;
- E_s è il modulo di Young;
- ε_y , ε_{sh} ed ε_{su} rappresentano rispettivamente la deformazione di snervamento, la deformazione di inizio dell'incrudimento (assunta pari all'1%) e la deformazione ultima;
- f_y e f_u sono rispettivamente la tensione di snervamento e la tensione di rottura.

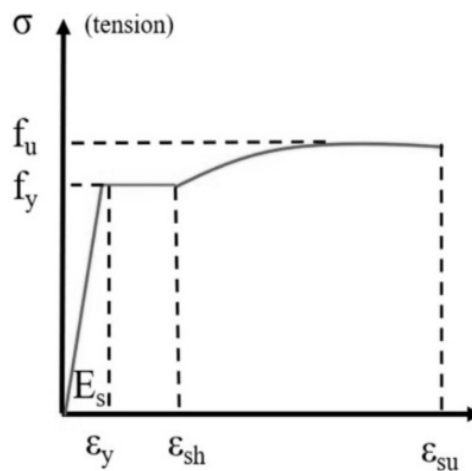


Figura 5.2 – Legge costitutiva dell'acciaio, modello Park strain Hardening

Di seguito si vogliono riportare i valori delle proprietà meccaniche utilizzate per la definizione dei legami costitutivi delle tipologie di materiale che caratterizzano i viadotti studiati:

Tabella 5.1 – Caratteristiche meccaniche calcestruzzo

Caratteristiche Calcestruzzo							
Classe	f_{ck}	R_{ck}	f_{cd}	f_{cm}	E_{cm}	ε_{c1}	ε_{cu1}
-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[‰]	[‰]
C20/25	21	25	11.76	28.75	30200	1.98	3.50
C25/30	25	30	14.11	32.90	31447	2.07	3.50
C28/35	29	35	16.46	37.05	32588	2.14	3.50

Tabella 5.2 – Caratteristiche meccaniche acciaio

Caratteristiche Acciaio					
Tipo	f_{yk}	f_{tk}	f_{ym}	f_{tm}	ϵ_{su}
-	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
Aq50	270	500	371.20	549.38	13.05
ALE	440	550	513.80	780.98	8.90

5.2. Realizzazione del modello FEM e analisi modale

Le pile sono state modellate come elementi di tipo *beam*, così come gli impalcati per via del loro prevalente sviluppo longitudinale. Gli appoggi elastomerici in neoprene armato sono stati considerati come *elastic links*, connessi agli elementi *beam* tramite collegamenti rigidi (*rigid links*). Mediante il comando *Loads to Masses*, i carichi sono stati automaticamente convertiti in masse. Le spalle sono state modellate mediante vincoli rigidi, come pure le fondazioni. I valori delle azioni e le loro combinazioni sono quelle definite dalla normativa vigente per le nuove costruzioni. Il peso proprio della struttura viene calcolato tramite il comando *Self Weight* di MidasCivil, che tiene conto del peso specifico dei materiali e della dimensione degli elementi. Il carico degli elementi non strutturali è stato considerato come carico distribuito sugli impalcati, mentre il carico dovuto ai traversi è stato applicato come carico puntuale.

La riduzione della rigidezza dovuta alla fessurazione deve essere tenuta in considerazione per descrivere correttamente il comportamento dinamico della struttura. Tale riduzione interessa specialmente le pile e può essere effettuata tramite l'applicazione di opportuni fattori di scala, in grado di ridurre la rigidezza elastica della sezione lorda di calcestruzzo. I coefficienti di riduzione possono essere ricavati dai diagrammi Momento-Curvatura ($M-\chi$) delle sezioni, come indicato nel Paragrafo 2.3.6.1 dell'Eurocodice 8-2 [62]. In particolare, per il calcolo dell'inerzia fessurata per pile da ponte viene suggerita la seguente relazione:

$$J_{eff} = 0.08 J_{un} + \frac{M_y}{E_c \cdot \chi_y} \quad (5.12)$$

dove J_{eff} rappresenta il momento d'inerzia ridotto, J_{un} il momento d'inerzia della sezione non fessurata, M_y il momento di snervamento, E_c il modulo elastico del calcestruzzo e χ_y la curvatura di snervamento.

Il momento e la curvatura di snervamento sono stati ottenuti facendo uso dell'applicativo *General Section Design (GSD)* di *MidasCivil*. In particolare, sono state importate la geometria delle sezioni e la disposizione delle barre, per poi procedere alla definizione del legame costitutivo dei materiali, secondo quanto illustrato nel Paragrafo 5.1. L'analisi ha permesso così di ricavare alcune proprietà delle sezioni, in particolare il diagramma $M-\chi$ in funzione dell'azione assiale e della direzione. I momenti di inerzia così calcolati sono stati inseriti nel modello mediante il comando *Stiffness in Properties - Section Manager* di *MidasCivil*. A questo punto, è stato possibile eseguire l'analisi modale.

In accordo alle normative vigenti già citate, è necessario considerare un numero di modi propri di vibrazione in grado di descrivere il comportamento della struttura in maniera conforme alla realtà. Di conseguenza si fa sì che la sommatoria delle masse partecipanti dei modi sia superiore all'85% e che vengano considerati i soli modi significativi aventi massa partecipante superiore all'1%.

5.3. Analisi Pushover

La risposta non lineare della struttura viene considerata effettuando un'analisi dinamica lineare, detta *Pushover*. La struttura viene sottoposta a un profilo di spinta laterale monotono, di valore crescente fino alla rottura o al raggiungimento di una certa deformazione. Ciò che si ricava è una curva che lega la forza laterale allo spostamento associato, detta curva di capacità o *Pushover*.

5.3.1. Sistemi SDOF e MDOF

Viene proposto inizialmente un sistema ad un grado di libertà (*SDOF, Single Degree of Freedom*), idealizzato come una massa concentrata m sorretta da un elemento privo di massa con rigidezza laterale k e collegato ad un elemento (privo di massa e rigidezza) responsabile dello smorzamento. La configurazione deformata (o campo di spostamento) del sistema è definita quindi da un unico parametro che può identificarsi con lo spostamento relativo della massa rispetto al suolo (spostamento orizzontale D_t in Figura 5.3).

Un caso evidente di struttura riconducibile ad un sistema *SDOF* è quello delle pile da ponte che possono considerarsi, con buona approssimazione, pendoli rovesci ossia oscillatori semplici in cui la totalità della massa (impalcato, pulvino e fusto della pila) è concentrata in testa mentre la rigidità del sistema può attribuirsi ad un elemento di massa nulla (il fusto della pila stessa). In questi semplici casi, l'analisi di spinta consiste nell'applicare alla massa del sistema uno spostamento D o una forza F la cui intensità viene gradualmente incrementata nella direzione dell'unico grado di libertà disponibile. Il valore iniziale della forza o dello spostamento non ha ovviamente importanza. Le espressioni che definiscono la forzante (intesa in senso generalizzato come forza o spostamento) possono esprimersi come:

$$F(\alpha) = \alpha F_{max}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

$$D(\beta) = \beta D_{max}, \quad 0 \leq \beta \leq 1$$

Dunque, fissato arbitrariamente il valore di D_{max} o F_{max} , il fattore moltiplicativo α o β viene gradualmente incrementato da zero fino ad un valore finale che permetta di investigare il campo di risposta di interesse per il sistema in esame. Ad ogni valore di α o β corrisponde quindi un valore di D o F che rappresenta lo spostamento o la forza applicati alla massa del sistema.

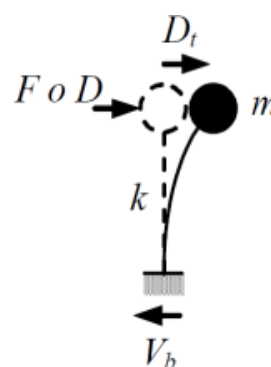


Figura 5.3 - Schema del sistema ad un grado di libertà

Il comportamento del sistema è definito da un legame forza-spostamento in cui la forza coincide con il taglio alla base V_b e lo spostamento con quello della massa D_t :

- nel caso di analisi a forze imposte (F è la forza applicata ad m): $V_b = F$ e $D_t = D$, essendo D lo spostamento di m prodotto da F ;
- nel caso di analisi a spostamenti imposti (D è lo spostamento applicato ad m): $D_t = D$ e $V_b = F$ essendo F la reazione vincolare risultante;

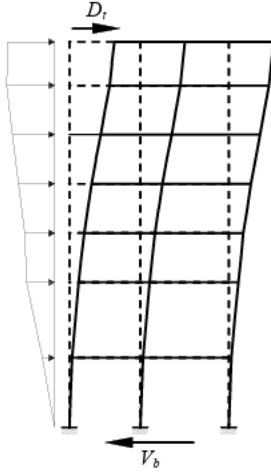


Figura 5.4 - Schematizzazione di un modello generico MDOF

Nel caso di sistemi *MDOF*, l'approccio è simile con la differenza che la struttura viene "spinta" applicando un profilo di forze o di spostamenti orizzontali in corrispondenza di ciascun piano (Figura 5.4) e che, per descrivere il comportamento dell'intero sistema in termini di legame forza-spostamento, è necessario scegliere un solo parametro di forza ed un solo parametro di spostamento.

La scelta di tali parametri non è univoca e può dar luogo a differenti legami forza-spostamento ossia a differenti legami costitutivi del sistema *SDOF* equivalente detti curva di capacità.

5.3.2. Curva di capacità

Il risultato più immediato di un'analisi di *Pushover* è la definizione della curva di capacità (o *curva di Pushover*) della struttura, ossia della curva forza-spostamento espressa, solitamente, in termini di taglio alla base V_b e spostamento in sommità D_t (Figura 5.4), che rappresenta appunto la capacità esibita dal sistema a fronteggiare una certa azione esterna.

Considerando un sistema *SDOF*, l'andamento della curva di capacità dipende dalla rigidezza k e dalla flessibilità k^{-1} del sistema, che a loro volta dipendono essenzialmente dalle caratteristiche geometriche e meccaniche del sistema e sono funzioni non lineari rispettivamente dello spostamento e della forza applicata al sistema:

$$F = k(D) \quad \text{oppure} \quad V_b = k(D_t) \quad (5.13)$$

$$D = k^{-1}(F) \quad \text{oppure} \quad D_t = k^{-1}(V_b) \quad (5.14)$$

In Figura 5.5 sono diagrammati i legami forza-spostamento, ossia le curve di capacità rappresentative di tre comportamenti emblematici caratterizzati da un iniziale comportamento elastico lineare fino alla soglia di snervamento (rappresentata da un ramo sostanzialmente lineare), seguito da un comportamento post-elastico non lineare incrudente (*i*), perfetto (*p*) o degradante (*d*).

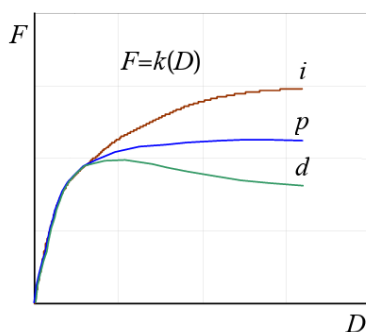


Figura 5.5 – Andamento della curva di capacità

L'andamento delle curve di capacità dipende dalle proprietà meccaniche e geometriche dei sistemi. In accordo allo studio "Analisi Dinamica Lineare (Pushover)"[63] le curve possono essere poi semplificate mediante approssimazione bilineare o trilineare (Figura 5.6). Per quanto riguarda la linearizzazione, è possibile far riferimento a diversi criteri, alcuni dei quali in funzione del punto di funzionamento. Tale aspetto verrà nuovamente ripreso ed approfondito nel corso della trattazione.

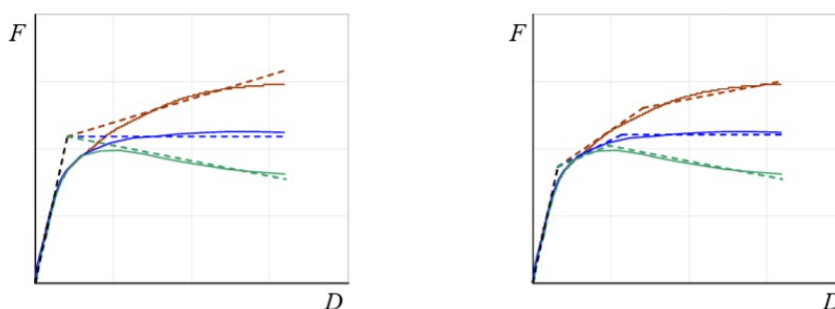


Figura 5.6 – semplificazione bilineare e trilineare della curva di capacità

Nel caso più complesso, ma di maggiore interesse, di sistemi *MDOF* la curva di capacità mostra andamenti analoghi caratterizzati ancora da un tratto inizialmente rettilineo, corrispondente al comportamento lineare della struttura, che si incurva quando inizia la plasticizzazione e la risposta progredisce in campo non lineare.

La capacità di una struttura dipende dalle capacità di resistenza e di deformazione dei suoi singoli componenti. La curva di capacità definisce la capacità della struttura indipendentemente da qualsiasi specifica richiesta sismica (infatti non si fa riferimento alcuno all'azione sismica) e quindi descrive le caratteristiche intrinseche del sistema resistente; in altre parole, è una sorta di legame costitutivo semplificato della struttura. Trattandosi di un legame scalare forza-spostamento, il comportamento del sistema *MDOF* viene così ricondotto sostanzialmente a quello di un sistema *SDOF* che può ragionevolmente definirsi equivalente dato

che la curva di capacità è stata costruita tenendo conto del comportamento dell'intero sistema *MDOF*.

5.3.3. Il metodo CSM

Il metodo dello spettro di capacità (*CSM, Capacity Spectrum Method*) della normativa americana ATC-40 [64] viene utilizzato per la valutazione dello spostamento massimo atteso di una struttura in seguito ad un evento sismico assegnato. Tale spostamento viene generalmente indicato come *Performance Point* ed è individuato considerando innanzitutto un sistema *SDOF* equivalente al sistema *MDOF* che rappresenta la struttura.

Il comportamento della struttura viene descritto dalla curva di *Pushover*, mentre l'azione sismica viene definita mediante lo spettro di risposta elastico, che rappresenta la curva di domanda. Entrambe le curve devono essere rappresentate nel piano *ADRS (Acceleration Displacement Response Spectrum)*, avente in ascissa lo spostamento spettrale S_d ed in ordinata l'accelerazione spettrale S_a . Lo spostamento atteso si determina individuando sulla curva di capacità uno spostamento compatibile con quello della richiesta sismica. La curva di domanda può essere convertita nel piano *ADRS* dallo spettro di risposta in accelerazione ($S_a - T$) tramite la relazione:

$$S_d = \frac{1}{4\pi^2} S_a T^2 \quad (5.15)$$

La conversione della curva di capacità nel piano $S_d - S_a$ può essere effettuata invece attraverso le seguenti espressioni:

$$S_a = \frac{V_{bn}}{M_n^*} \quad (5.16)$$

$$S_d = \frac{u_{rn}}{\Gamma_n \Phi_{rn}} \quad (5.17)$$

Dove i termini hanno il seguente significato:

- V_{bn} rappresenta il taglio di base del modo n ;
- M_n^* è la massa modale del modo n ;
- u_{rn} è lo spostamento del punto di controllo del modo n ;
- Γ_n è il fattore di partecipazione modale;

- Φ_{rn} è la componente dell'autovettore n associata al punto di controllo.

Il punto di funzionamento si ottiene dall'intersezione tra la curva di capacità e quella di domanda e rappresenta il modo in cui la struttura si comporta se soggetta all'azione sismica considerata. La sua determinazione è un processo iterativo che ruota attorno allo smorzamento efficace del sistema *SDOF* equivalente. Tale operazione è necessaria poiché la capacità resistente di una struttura e la relativa domanda sismica non sono tra loro indipendenti. Quando una struttura plasticizza a causa di uno spostamento indotto dal sisma, diminuisce la sua rigidità ed il periodo si allunga; le accelerazioni spettrali dipendono dal periodo e di conseguenza anche la domanda cambia allo snervarsi della struttura. Inoltre, quando la struttura plasticizza dissipa energia per smorzamento, principalmente di tipo isteretico, e lo smorzamento provoca una riduzione dello spostamento poiché l'energia dissipata non viene immagazzinata dalla struttura.

Tramite una bilinearizzazione della curva di capacità è possibile calcolare un coefficiente riduttore della domanda (in termini di fattore di struttura o di smorzamento equivalente) necessario per considerare le dissipazioni di energia che si verificano in campo non lineare. Al variare dello smorzamento equivalente v_{eq} , è necessario ridurre lo spettro di domanda tramite un fattore di riduzione spettrale da applicare allo spettro elastico:

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + v_{eq}}} \geq 0.55 \quad (5.18)$$

In Figura 5.7 è riportata una rappresentazione grafica del metodo *CSM*, i cui passaggi principali sono riassunti di seguito:

1. definizione della domanda sismica in termini di spettro *ADRS*;
2. scelta di un punto di primo tentativo (a_{pi}, d_{pi}) sulla curva di capacità;
3. bilinearizzazione della curva di capacità con ramo iniziale di pendenza K_i e ramo incrudente di pendenza definita tramite il principio di equivalenza energetica tra le aree A_1 e A_2 e dal passaggio per il punto (a_{pi}, d_{pi}) ; calcolo dei punti (a_y, d_y) e della pendenza del tratto incrudente (Figura 5.8a);
4. riduzione dello spettro di domanda calcolando lo smorzamento effettivo, che tiene conto del contributo isteretico e del contributo viscoso;
5. individuazione del punto di funzionamento mediante procedura iterativa, tramite intersezione delle due curve (Figura 5.8b).

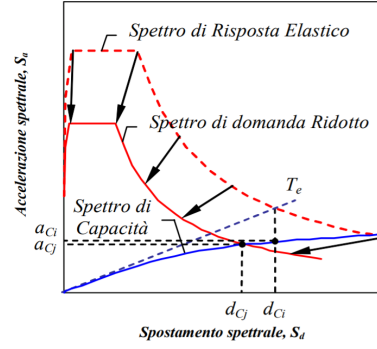


Figura 5.7 – Schematizzazione dei passaggi del metodo CSM

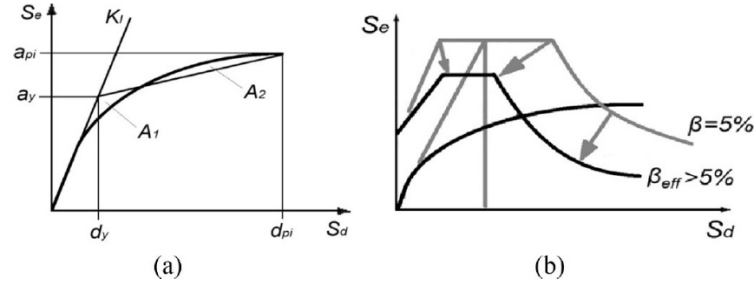


Figura 5.8 - semplificazione bilineare (a), riduzione dello spettro di domanda e identificazione del PP (b)

5.3.4. Analisi Pushover modale – MPA

I viadotti sono sistemi strutturali complessi per i quali la scelta del profilo di carico non è univoca ed è in grado di influenzare i risultati in modo significativo. Anche per questo motivo, nel corso degli anni sono state presentate diverse metodologie di analisi *Pushover*, che permettono di tener conto del comportamento dinamico della struttura, valutando la risposta sismica non lineare della struttura tramite la combinazione di più modi. Data la complessità di tali strutture, il solo primo modo di vibrare non è sufficiente a descrivere la risposta dinamica del sistema ed è fondamentale considerare anche gli effetti dei modi superiori per valutarne il comportamento in modo accurato.

Di seguito verrà descritta la metodologia di analisi *MPA* come da letteratura scientifica [65], [66]. Per ogni modo significativo di vibrare, con massa partecipante superiore ad un certo limite, qui assunto pari all'1%, si effettua un'analisi *Pushover* avente il seguente profilo di carico:

$$s_n^* = M \Phi_n \quad (5.19)$$

in cui s_n^* è il vettore di carico applicato alla struttura durante l'analisi, M rappresenta la matrice di massa del sistema e Φ_n è l'autovettore del modo n .

Per ogni curva, si determina il punto di funzionamento associato alla domanda sismica mediante il metodo *CSM* e si ottengono così i valori degli spostamenti e delle azioni interne degli elementi strutturali per ciascun modo. Essi vengono poi combinati seguendo le comuni regole di combinazione modale *SRSS* (*Square Root of Sum of Squares*) o *CQC* (*Complete Quadratic Combination*) in funzione della massa partecipante di ogni modo. L'analisi *MPA* è stata effettuata tramite un programma applicativo sviluppato dal Consorzio *CISE* del Politecnico di Milano, in collaborazione con l'azienda *SINECO S.p.A.*, che richiede i seguenti file di ingresso:

- curve di capacità associate ad ogni profilo di spinta analizzato;
- andamento degli spostamenti di ciascun elemento per ogni passo di analisi;
- andamento delle azioni interne per ogni passo di analisi;
- proprietà dei legami costitutivi *FEMA* delle cerniere plastiche.

5.3.4.1. Modellazione delle cerniere plastiche

Per tener conto della risposta non lineare degli elementi, sono stati considerati due tipi di meccanismi resistenti: duttili e fragili. Da un punto di vista fisico, tali meccanismi possono coesistere nello stesso elemento in diversi punti della struttura ed interagiscono tra loro influenzando il comportamento globale del sistema. Ciononostante, le due modalità di crisi sono state considerate separatamente al fine di definire la variazione delle prestazioni strutturali per ciascuna di esse.

Cerniere plastiche - Meccanismo duttile

Nel caso di pile da ponte in c.a., tale meccanismo è legato alla capacità rotazionale delle cerniere plastiche che si formano in concomitanza di azioni trasversali di notevole intensità. Le cerniere sono concentrate in corrispondenza delle sezioni in cui si ipotizza la formazione di un meccanismo duttile, in grado di sopportare ampie deformazioni senza subire significative perdite di resistenza. Le proprietà delle cerniere plastiche associate a un meccanismo duttile si ricavano a partire dai diagrammi Momento-Curvatura, caratterizzati generalmente da una prima fase elastica, cui segue un esteso tratto incrudente. A partire dal grafico $M-\chi$ è necessario ricondursi al diagramma Momento-Rotazione ($M-\theta$); tale operazione richiede la definizione della lunghezza della cerniera plastica L_{pl} , su cui integrare le curvature sezionali. Per il calcolo di L_{pl} è possibile far riferimento alla seguente relazione proposta dall'Eurocodice 8 [62]:

$$L_{pl} = 0.1 L_v + 0.17 h + 0.24 \frac{d_{bl} f_y}{\sqrt{f_c}} \quad (5.20)$$

La formula tiene conto di tre contributi:

- la luce di taglio L_v , ovvero la distanza tra il punto a momento massimo e il punto a momento nullo;
- la dimensione caratteristica della sezione attraverso la sua altezza h ;
- i parametri meccanici dei materiali, in particolare d_{bl} , che rappresenta il diametro delle barre longitudinali, f_y , che è la tensione di snervamento dell'acciaio, e f_c , che è la resistenza a compressione del calcestruzzo.

La rotazione a snervamento e la rotazione ultima possono essere espresse attraverso le seguenti relazioni:

$$\Theta_y = L_{pl} \chi_y \quad (5.21)$$

$$\Theta_u = L_{pl} \chi_u \quad (5.22)$$

Il legame è riportato in Figura 5.9a (tratto da *FEMA 356* [67]) ed è caratterizzato da un ramo iniziale AB lineare, un ramo incrudente fino al punto C che rappresenta il momento ultimo del generico componente strutturale, un tratto che rappresenta un rapido decremento della resistenza (CD), per concludere con una resistenza residua descritta da un tratto a forza costante assunta convenzionalmente pari al 20% della forza massima. Il punto E corrisponde quindi alla completa rottura dell'elemento. In termini di deformazione, il criterio di accettabilità determina il raggiungimento della condizione di stato limite considerato, in questo caso SLV , assunto pari a 3/4 della rotazione Θ_u .

Cerniere plastiche - Meccanismo fragile

Anche per quanto riguarda il meccanismo fragile, le proprietà delle cerniere plastiche ad esso associate sono ottenute in accordo a quanto previsto dalla normativa *FEMA 356* [67]. In particolare, si considera un comportamento elastico lineare AB fino al raggiungimento del massimo valore di taglio resistente, cui segue una rapida perdita di resistenza fino ad un valore pari al 20% del valore massimo (Figura 5.9b). Il meccanismo di rottura fragile dipende dalla capacità a taglio delle pile. Le comuni strutture in c.a. sono state progettate per sopportare carichi laterali modesti, quindi non sono in grado di resistere alle azioni sismiche in maniera adeguata, anche di modesta intensità.

Si è scelto di adottare l'approccio contenuto nella circolare applicativa delle NTC 2008 (pubblicata il 2 febbraio 2009) al paragrafo C8A.8.6.5, secondo cui la resistenza a taglio ciclica V_R della cerniera plastica può essere espressa come somma

di tre fattori, che dipendono rispettivamente dall'azione assiale agente, dalla resistenza del calcestruzzo e dal contributo fornito dall'armatura trasversale:

$$V_R = \frac{1}{\gamma_e} \frac{h-x}{2L_v} \min(N; 0.55A_c f_c) + \frac{1}{\gamma_e} [1 - 0.05 \min(5; \mu_\Delta^{pl})] \cdot 0.16 \max(0.5; 100\rho_{tot}) \left(1 - 0.16 \min\left(5; \frac{L_v}{h}\right)\right) \sqrt{f_c A_c} + V_w \quad (5.23)$$

Dove i termini hanno il significato seguente:

- γ_e è un coefficiente di sicurezza,
- x è l'altezza della zona di calcestruzzo compressa,
- N è la forza assiale di compressione,
- A_c è l'area della sezione di calcestruzzo,
- μ_Δ^{pl} è la duttilità di rotazione,
- ρ_{tot} è il rapporto totale di armatura longitudinale;
- V_w è il contributo dell'armatura trasversale.

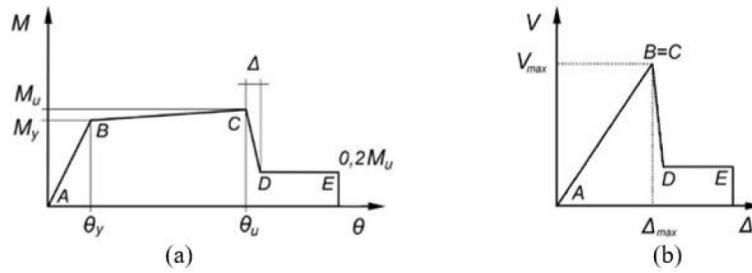


Figura 5.9 – diagramma momento-curvatura per meccanismo duttile (a) e diagramma taglio-spostamento per meccanismo di rottura fragile (b)

5.4. Analisi Time History

In parallelo all'analisi dinamica lineare è stata effettuata l'analisi dinamica non lineare (*Time History Analysis*) con l'obiettivo di determinare per ogni scenario di degrado il relativo indice di rischio così da confrontare i risultati delle due metodologie.

L'analisi dinamica non lineare basata sull'impiego di accelerogrammi consiste nel calcolo della risposta sismica della struttura mediante integrazione diretta (al passo) delle equazioni del moto, utilizzando un modello non lineare della struttura e gli accelerogrammi definiti al § 3.2.3.6. delle NTC2018 [18]. Per questo motivo è stato necessario applicare alla modellazione dei viadotti anche un set di accelerogrammi spettro compatibili, in riferimento alle coordinate geografiche

del sito ove sorgono le strutture; tali accelerogrammi sono stati definiti tramite il software REXEL v 3.5 [68].

Tale analisi valuta il comportamento dinamico della struttura in campo non lineare, consentendo il confronto diretto tra duttilità richiesta e duttilità disponibile ad ogni passo di carico, nonché di verificare l'integrità degli elementi strutturali nei confronti di possibili comportamenti fragili.

A differenza dell'analisi dinamica lineare, la modalità di analisi non lineare non richiede la determinazione preventiva della domanda sismica globale (come, per esempio, il *target displacement* nelle analisi *Pushover*), la domanda di spostamento globale viene infatti stimata nel corso della stessa analisi della risposta strutturale.

L'analisi Time History rispetto all'analisi dinamica lineare tramite analisi modale, la quale fornisce solo una stima della risposta di picco (mediante metodi di combinazione statistica SRSS e CQC), consente di calcolare la massima risposta sismica in modo più accurato.

In tale analisi vi è comunque la necessità di definire il modello di comportamento non lineare della struttura in maniera più completa includendo anche la descrizione del comportamento ciclico, inoltre si deve rilevare la forte sensibilità della risposta ai parametri di input, la necessità di definire opportunamente gli accelerogrammi di ingresso e l'elevato onere computazionale

L'analisi dinamica non lineare è sicuramente il metodo di calcolo più affidabile e preciso, poiché consente di interpretare l'evoluzione nel tempo dei diversi parametri di risposta della struttura (spostamenti, deformazioni, tensioni e sollecitazioni).

Definito correttamente l'input sismico, sulla base della forma spettrale o dello scenario sismogenetico, si definiscono il numero di registrazioni necessarie per condurre le analisi. La maggior parte dei codici di progettazione sismica, come l'Eurocodice 8 (al punto 4.3.3.4.3) [62], definiscono un utilizzo di almeno tre registrazioni. Nel dettaglio se vengono utilizzate meno di sette registrazioni, la massima risposta strutturale deve essere utilizzata come base per la progettazione, mentre se si considerano sette o più registrazioni, allora è possibile valutare gli effetti medi e non massimi sulla risposta strutturale.

5.4.1. Accelerogrammi

Nelle analisi pseudo statiche lo spettro di risposta di progetto caratterizza le azioni del terremoto, nel caso di analisi dinamiche non-lineari, invece, occorre selezionare opportunamente uno o più storie accelerometriche.

Gli accelerogrammi sono le rappresentazioni più dettagliate del movimento del suolo sismico, poiché contengono informazioni inerenti alla natura dello scuotimento al sito in esame. Essi possono essere scelti da banche dati di registrazioni reali (accelerogrammi naturali) o possono essere generati sinteticamente come serie di Fourier (accelerogrammi artificiali) o come risultanti di meccanismi sismogenetici, mediante modelli di frattura del sottosuolo e conseguente propagazione delle onde (accelerogrammi simulati). In tutti i casi, gli accelerogrammi usati nel progetto dovranno essere compatibili con il livello di pericolosità sismica e riflettere la natura del movimento del suolo atteso nel sito [18].

5.4.1.1. Accelerogrammi naturali

Gli accelerogrammi naturali sono ottenuti da registrazioni autentiche di scuotimento prodotto dai terremoti. Essi descrivono tutte le caratteristiche del movimento del suolo (ampiezza, frequenza, contenuto energetico, durata, caratterizzazione di fase) e riflettono tutti i fattori che influenzano gli accelerogrammi (caratteristiche della sorgente epicentrale, percorso e sito).

Lo svantaggio connesso all'impiego di accelerogrammi naturali è che non tutte le combinazioni di magnitudo dell'evento sismico e distanza della sorgente (epicentro) dal sito in cui è effettuata la registrazione sono coperte, e inoltre gli spettri sono generalmente non compatibili con quelli di normativa.

Le NTC affermano che l'uso di accelerogrammi registrati è ammesso, a condizione che la loro scelta sia rappresentativa della sismicità del sito e sia adeguatamente giustificata in base alle caratteristiche sismogenetiche della sorgente, alle condizioni del sito di registrazione, alla magnitudo, alla distanza dalla sorgente e alla massima accelerazione orizzontale attesa al sito.

Gli accelerogrammi registrati devono essere quindi selezionati ed eventualmente corretti con procedure di adattamento spettrale (*adjustment*) che le rendano compatibili con la sismicità attesa e prevista dalle analisi di pericolosità.

Le indicazioni fornite dalle NTC indicano pertanto una procedura di scalatura degli accelerogrammi, scelti a seguito della disaggregazione della pericolosità sismica, al valore dello spettro di riferimento. Per scalatura si intende il prodotto

degli accelerogrammi per un fattore di scala che si applica per rendere il valore del picco (PGA, *peak ground acceleration*) oppure delle ordinate spettrali (valutate al periodo fondamentale della struttura o su un intervallo di periodi di interesse), il più possibile vicini ai corrispondenti valori dello spettro di progetto.

Non sempre sono disponibili informazioni dettagliate sui meccanismi di sorgente, nonché sulla combinazione di magnitudo e distanza più rilevanti ai fini della determinazione della pericolosità sismica al sito in esame. Queste informazioni derivano da una procedura chiamata *disaggregazione* della pericolosità sismica, che permette di individuare le caratteristiche del terremoto (in termini di coppia magnitudo-distanza) che influenzano maggiormente la sismicità del sito in esame, posto che essa è il risultato di un'analisi probabilistica di pericolosità (PSHA, *probabilistic seismic hazard analysis*) ovvero di un'aggregazione di scenari derivanti dalla considerazione di molteplici coppie magnitudo-distanza e diverse posizioni di sorgenti.

In alternativa è possibile utilizzare le condizioni di compatibilità spettrale media avendo cura in ogni caso di rispettare le condizioni geologiche di sito e di scegliere accelerogrammi il cui spettro è simile a quello di riferimento. La procedura di scalatura applicata non dovrebbe inoltre indurre cambiamenti nelle registrazioni, per non dar luogo a caratteristiche che potrebbero non essere attese in un reale movimento del suolo.

5.4.1.2. Accelerogrammi artificiali spettro-compatibili

In alcuni casi è difficile trovare accelerogrammi che soddisfino certi requisiti di magnitudo e distanza (specialmente per grandi magnitudo e distanze ravvicinate, i cosiddetti terremoti *near-fault*, cioè registrati vicino alla faglia).

Esistono svariate regioni che mancano di una storia sismica significativa, tipicamente regioni a medio-bassa sismicità e quindi anche di un database accelerometrico cui riferirsi nella progettazione. L'uso di serie artificiali è quindi necessario al fine di superare questa carenza di registrazioni reali.

Gli accelerogrammi artificiali sono serie accelerometriche prodotte da modelli iterativi di generazione e aggiustamento di segnali nel dominio della frequenza o del tempo, a partire da alcune caratteristiche attese per le loro componenti e compatibili con lo spettro di normativa.

Possono anche ottenersi da registrazioni reali modificate attraverso manipolazioni nel dominio delle frequenze. In pratica, assunto lo spettro di risposta di norma come spettro target, la serie accelerometrica viene generata in modo tale che lo spettro ad essa associato sia coincidente, entro una certa tolleranza, a quello

target. Questa operazione implica delle procedure iterative volte a modificare il segnale nel dominio delle frequenze per ottenere la spettro-compatibilità.

La normativa come descritto al § 3.2.3.6. delle NTC2018 non fornisce ragguagli sulla modalità di simulazione e sulle caratteristiche dei modelli da adottare; tuttavia, viene specificato che la serie accelerometrica generata deve essere compatibile con il livello di pericolosità atteso nel sito.

Le norme impongono quindi una verifica di coerenza in termini di compatibilità media con lo spettro elastico di riferimento al 5% del rapporto di smorzamento critico non maggiore del 10%.

5.4.1.3. Accelerogrammi simulati

La generazione di accelerogrammi simulati è principalmente fatta mediante la modellazione del processo di rottura causato dall'evento e del processo di propagazione delle onde attraverso il sottosuolo ed in superficie, mediante approcci deterministici o stocastici. Generalmente si fa riferimento ad uno scenario caratteristico del sito in termini di magnitudo-distanza e caratteristiche sismologiche della sorgente.

Nelle procedure di simulazione, si usa un modello di sorgente cinematico per descrivere il processo di slittamento della faglia, la quale può essere modellata come un punto o come una sorgente di dimensioni finite.

Secondo le NTC, l'uso di accelerogrammi generati mediante simulazione del meccanismo di sorgente e della propagazione è ammesso a condizione che siano adeguatamente giustificate le ipotesi relative alle caratteristiche sismo-genetiche della sorgente e del mezzo di propagazione. La loro applicazione risulta chiaramente troppo complessa, poiché è legata alla definizione di un elevato numero di parametri di input per la caratterizzazione del terremoto di riferimento.

5.4.2. Integrazione delle equazioni di moto

L'analisi è stata effettuata tramite metodi di integrazione diretta delle equazioni del moto, nello specifico viene utilizzato il metodo di Newmark, tale metodo è applicato in condizioni di non linearità del materiale, quando sia stata definita la dipendenza dal tempo delle caratteristiche dei materiali e siano trascurabili gli effetti del secondo ordine.

La convergenza della soluzione passo per passo è trovata mediante un opportuno criterio, come quello di Newton-Raphson, usando come grandezza fisica la

norma in termini di forza, spostamenti o energia, per controllare la convergenza di ogni step.

Il metodo di Newmark [69] appartiene alla famiglia dei *metodi alle differenze finite*. Tale metodo prevede la discretizzazione dell'intervallo temporale di analisi in passi temporali Δt uguali fra loro. Conoscendo la configurazione del sistema all'istante iniziale, questo metodo permette di ricavare la soluzione all'istante temporale successivo. Tale soluzione diviene la condizione iniziale per il successivo *step* di calcolo. Il problema dell'equilibrio è governato da una generica equazione del tipo:

$$Ma(t) + Ku(t) = f(t) \quad (5.24)$$

cui sono associate le condizioni iniziali. Considerando il generico istante t_j , sono note le componenti di spostamento, di velocità e di accelerazione in questo istante. Il metodo di Newmark considera accelerazioni nodali lineari nel tempo:

$$\ddot{u}(t) = a(t) = a_j + \frac{t - t_j}{\Delta t} (a_{j+1} - a_j) \quad (5.25)$$

Integrando, si ottengono le relazioni per la determinazione della velocità e dello spostamento:

$$\dot{u}(t) = v(t) = v_j + (t - t_j)a_j + \frac{(t - t_j)^2}{2\Delta t} (a_{j+1} - a_j) \quad (5.26)$$

$$u(t) = u_j + (t - t_j)v_j + \frac{(t - t_j)^2}{2} a_j + \frac{(t - t_j)^3}{6\Delta t} (a_{j+1} - a_j) \quad (5.27)$$

Essendo noti u_j , v_j , a_j , l'unica incognita risulta essere a_{j+1} . La velocità e lo spostamento all'istante t_{j+1} sono rispettivamente:

$$v_{j+1} = v_j + \Delta t \left(\frac{1}{2} a_j + \frac{1}{2} a_{j+1} \right) \quad (5.28)$$

$$u_{j+1} = u_j + \Delta t v_j + \frac{\Delta t^2}{2} \left(\frac{2}{3} a_j + \frac{1}{3} a_{j+1} \right) \quad (5.29)$$

Le espressioni (5.28) e (5.29) possono essere generalizzate:

$$v_{j+1} = v_j + \Delta t [(1 - \gamma)a_j + \gamma a_{j+1}] \quad (5.30)$$

$$u_{j+1} = u_j + \Delta t v_j + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - 2\beta)a_j + 2\beta a_{j+1}] \quad (5.31)$$

L'equazione di bilancio all'istante t_{j+1} è la seguente:

$$Ma_{j+1} + Ku_{j+1} = f_{j+1} \quad (5.32)$$

Sostituendo l'equazione (5.31) nella (5.32) si ottiene la seguente equazione:

$$Ma_{j+1} + Ku_j + \Delta t K v_j + \frac{\Delta t^2}{2} K [(1 - 2\beta)a_j + 2\beta a_{j+1}] = f_{j+1} \quad (5.33)$$

nella quale a_{j+1} è l'unica incognita. Considerando i seguenti termini:

$$K^* = M + \beta \Delta t^2 K \quad (5.34)$$

$$P_{j+1}^* = f_{j+1} - Ku_j - \Delta t K v_j - \frac{\Delta t^2}{2} (1 - 2\beta) K a_j \quad (5.35)$$

l'equazione (5.33) diventa:

$$K^* a_{j+1} = P_{j+1}^* \quad (5.36)$$

da cui si ricava l'incognita a_{j+1} :

$$a_{j+1} = \frac{P_{j+1}^*}{K^*} \quad (5.37)$$

Inserendo a_{j+1} nelle equazioni (5.30) e (5.31) si ricava la soluzione all'istante t_{j+1} , che diventa la condizione iniziale per la determinazione della soluzione all'istante successivo.

L'algoritmo di Newmark non è *self-starting* in quanto le condizioni iniziali all'istante t_0 riguardano velocità e spostamento, ma non si conosce l'accelerazione a_0 . Per determinarla si impone l'equazione di bilancio all'istante t_0 :

$$Ma_0 + Ku_0 = f_0 \quad \Rightarrow \quad a_0 = \frac{f_0 - Ku_0}{M} \quad (5.38)$$

Al variare dei coefficienti β e γ il metodo di Newmark assume denominazioni specifiche:

- con $\beta = 0, \gamma = \frac{1}{2}$ si ottiene il **metodo delle differenze centrali**;

- con $\beta = \frac{1}{12}$, $\gamma = \frac{1}{2}$ si ottiene il **metodo di Fox Goodwin II**;
- con $\beta = \frac{1}{6}$, $\gamma = \frac{1}{2}$ si ottiene il **metodo dell'accelerazione lineare I**;
- con $\beta = \frac{1}{4}$, $\gamma = \frac{1}{2}$ si ottiene il **metodo dell'accelerazione costante**;
- con $\beta = \frac{1}{3}$, $\gamma = \frac{1}{2}$ si ottiene il **metodo dell'accelerazione lineare II**;
- con $\beta = \frac{1}{2}$, $\gamma = \frac{1}{2}$ si ottiene il **metodo dell'accelerazione costante media**;
- con $\beta = \frac{8}{5}$, $\gamma = \frac{3}{2}$ si ottiene il **metodo di Galerkin**;
- con $\beta = 2$, $\gamma = \frac{3}{2}$ si ottiene il **metodo delle differenze all'indietro**;
- con $\beta = \frac{1}{4}(1 - \alpha)^2$, $\gamma = \frac{1}{2}(1 - 2\alpha)$ si ottiene il **metodo HHT- α** .

Definendo *stabilità dell'algoritmo* la condizione per cui un piccolo errore ad un passo temporale determina errori cumulativi più piccoli nei passi temporali successivi, il metodo di Newmark risulta *incondizionatamente stabile* se:

$$2\beta \geq \gamma \geq \frac{1}{2} \quad (5.39)$$

Se la condizione (5.39) non viene rispettata, allora il metodo diventa *condizionatamente stabile*, ovvero risulta stabile se viene rispettata la seguente condizione sulla scelta dell'incremento temporale:

$$\Delta t \leq \left(\frac{\gamma}{2} - \beta\right)^{-\frac{1}{2}} \frac{1}{\omega_{\max}} \quad (5.40)$$

dove $\omega_{\max}$ è il massimo autovalore derivante dalla risoluzione del problema agli autovalori:

$$(K - \omega^2 M)u = 0 \quad (5.41)$$

Più è fitta la discretizzazione del dominio spaziale, maggiore è $\omega_{\max}$, di conseguenza la condizione sul Δt risulta essere più severa.[70]

In questo lavoro si è scelto di utilizzare il metodo ad accelerazione costante. Il metodo assume che le accelerazioni si mantengano costanti nel generico Δt_k e sia pari alla media tra i valori ad inizio e fine passo, ciò implica che le condizioni di continuità dell'accelerazione in corrispondenza degli estremi del passo non siano soddisfatte. Tale metodo risulta essere incondizionatamente stabile.

5.4.3. Criteri di selezione degli accelerogrammi spettro-compatibili

Nel presente paragrafo si riportano le procedure comuni ai tre viadotti che hanno permesso di determinare gli accelerogrammi necessari allo sviluppo della

modellazione FEM, nonché le considerazioni di carattere teorico insite nella trattazione.

L'operazione propedeutica preliminare, dunque, all'avvio delle analisi Time History, è stata definire un *set* di accelerogrammi naturali spettro-compatibili relativamente al sito ove sono localizzati ciascuno dei viadotti.

Il software utilizzato è REXEL v 3.5, sviluppato dall'Università degli Studi di Napoli Federico II, e consente di ricercare una combinazione di accelerogrammi naturali compatibili con gli spettri delle NTC 2018 e con L'Eurocodice 8, minimizzando la dispersione dei singoli spettri rispetto allo spettro obiettivo [68].

Il programma presenta differenti database per la ricerca del *set* di accelerogrammi, per il lavoro in oggetto è stato utilizzato lo *European Strong-motion Database* (ESD), in cui si fa riferimento a terremoti registrati con magnitudo di minimo 4, in condizioni *free-field*, ovvero condizioni di campo libero.

Il database ESD copre diversi intervalli di magnitudo e distanza che risultano opportuni per le coppie magnitudo-distanza di interesse per i tre viadotti. Si riporta di seguito la distribuzione dei record del database.

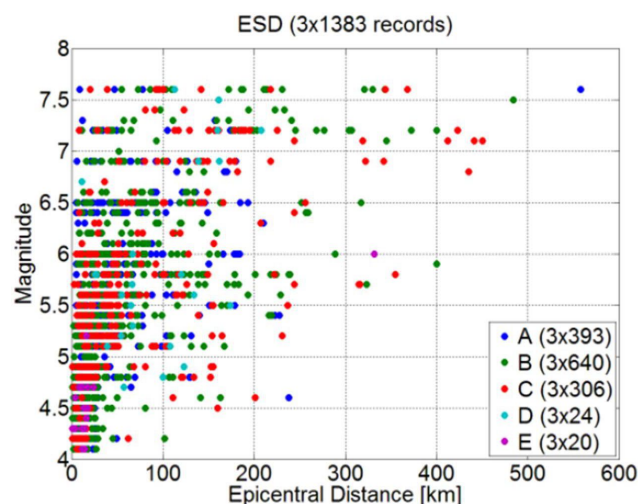


Figura 5.10 – Distribuzione dei record dell'ESD contenuti in REXEL

La ricerca delle combinazioni di accelerogrammi compatibili con le normative avviene fondamentalmente in quattro passaggi successivi tramite la finestra di dialogo che si apre all'avvio del *software*.

Definizione dello spettro di risposta (*Target Spectrum*)

L'operazione iniziale consiste nella costruzione dello spettro di risposta elastico in accelerazione per il sito in oggetto. Per eseguire il lavoro in conformità con le NTC 2018 è indispensabile inserire nel programma i seguenti dati (forniti come documentazione annessa ad ogni viadotto):

- Categoria di sottosuolo;
- Categoria topografica;
- Vita nominale;
- Classe d'uso;
- Stato limite;
- Componente dell'azione sismica da considerare.

Il programma considera poi due aspetti fondamentali per la ricerca dei *set* compatibili: la disaggregazione e la pericolosità condizionata.

La disaggregazione permette di conoscere il contributo alla sismicità relativa ad un sito di qualsiasi variabile del problema; nel caso in esame le variabili sono Magnitudo (M), distanza epicentrale (R) ed epsilon (ε) [71]; quest'ultima è definita dalla seguente relazione:

$$\varepsilon = \frac{\log(S_a) - \overline{\log(S_a)}}{\sigma_{\log(S_a)}} \quad (5.42)$$

Che rappresenta il numero di deviazioni *standard* da cui il logaritmo dell'intensità sismica registrata si discosta secondo un determinato modello di propagazione GMPE, *Ground Motion Prediction Equation*. S_a è l'accelerazione spettrale registrata e di cui si calcola il logaritmo e il valor medio del logaritmo ottenuto dall'attenuazione della GMPE.

Per completezza della trattazione si specifica che la GMPE utilizzata dagli sviluppatori del programma deriva da un modello ricavato da segnali appartenenti ad intervalli di magnitudo M_s e distanza sito-sorgente pari a 4,0 – 7,5 e 0 – 200 km.

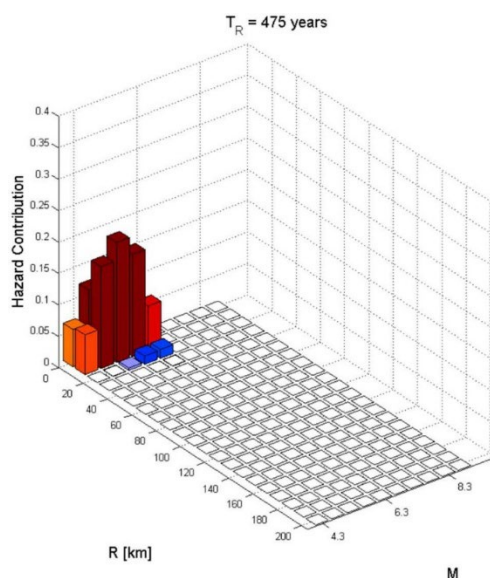


Figura 5.11 – Disaggregazione dei dati

Ricerca nel database degli accelerogrammi

La ricerca è stata eseguita utilizzando il database ESD, per cui sono stati inseriti i valori basati sulla coppia M e R. Il programma precisa che per il database ESD, M è valido se associato a suoli di classe compresa tra A e D; i casi in esame hanno una classe C, quindi la scelta è idonea.

I valori associati alla magnitudo momento sono tra 5 e 7, mentre per la distanza epicentrale l'intervallo è di 10-40 km in modo da escludere le registrazioni epicentrali in quanto rappresentano casistiche particolari. Si è inoltre scelto di considerare accelerogrammi provenienti dalla stessa geologia locale del sito in esame, possibilità fornita dal programma in modo da avere dati di *output* in linea con i possibili casi di terremoto delle zone in oggetto.

Definiti questi valori il *software* restituisce il numero di records disponibili per questi intervalli e tra cui eseguire la successiva selezione.

Definizione delle specifiche di compatibilità spettrale

Successivamente viene specificata la tolleranza con cui lo spettro medio deve rispettare quello target.

Per i limiti inferiore e superiore è stato scelto rispettivamente 10% e 30% per l'intervallo di periodo, T_1 e T_2 , tra 0,15 s e 2 s.

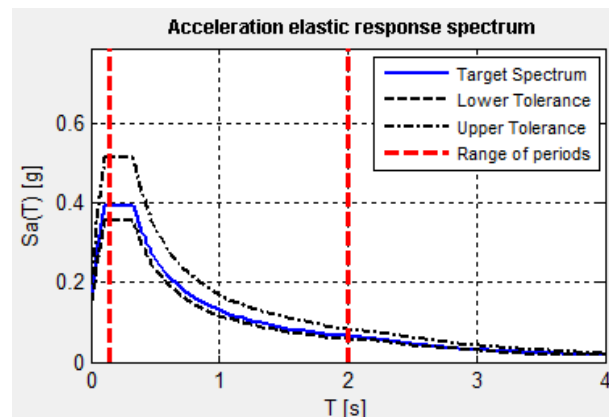


Figura 5.12 – Rappresentazione delle tolleranze e dell'intervallo dei periodi per la costruzione della combinazione

Specifiche di ricerca della combinazione

Si è scelto che le combinazioni compatibili da trovare siano formate da sette accelerogrammi, da applicare nelle due direzioni piane (componente x e y), tramite il comando *2 component*. Le registrazioni possono essere moltiplicate per un fattore di scala massimo pari a 5.

Una volta ottenuta la prima combinazione degli spettri segue un procedimento iterativo volto ad epurare il risultato finale dalle registrazioni che si scostano in modo eccessivo dai parametri di tolleranza definiti in precedenza.

Di seguito si riporta a titolo di esempio i risultati delle analisi realizzate per il viadotto B83.

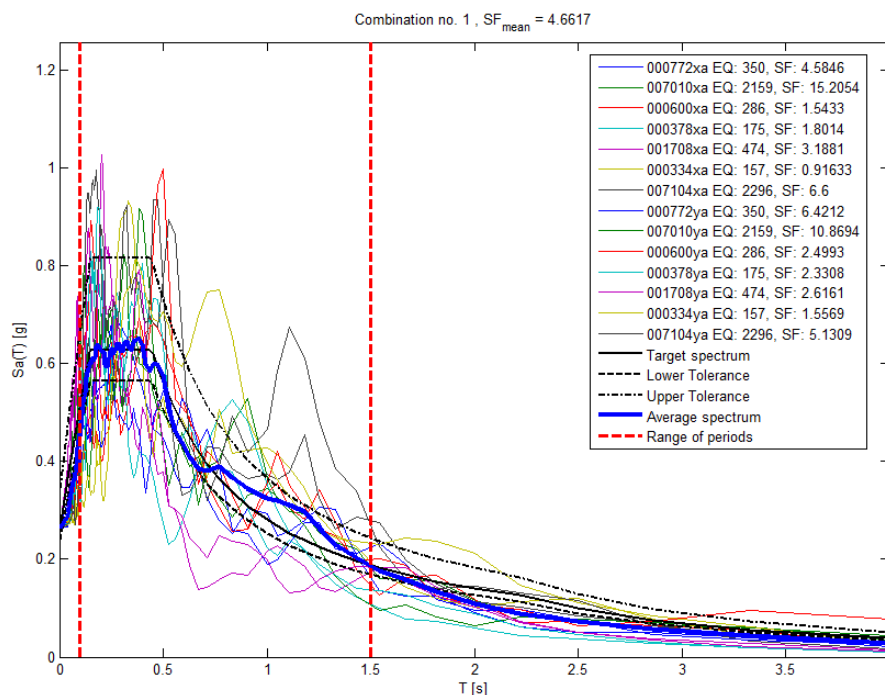


Figura 5.13 – Combinazione degli spettri per analisi TH del viadotto B83

5.4.4. Impostazioni per l'analisi Time History nel modello FEM

Partendo dal modello base vengono immesse nel programma differenti impostazioni necessarie per poter eseguire l'analisi.

Per iniziare viene creato un caso di carico dinamico per ogni evento sismico considerato attraverso la finestra *Load Cases*. Per ogni caso di carico vengono definiti i seguenti parametri:

- Nome: codice dell'evento sismico considerato
- Tipologia di analisi: non lineare
- Metodo di analisi: Integrazione diretta delle equazioni di moto
- Durata dell'evento sismico: viene scelta in funzione della durata della registrazione corrispondente.
- Periodo del passo delle analisi: viene indicato un valore di 0.001 sec per ottenere risultati precisi
- Passo degli incrementi dei risultati: l'output dell'analisi riporterà i risultati ottenuti ogni 5 incrementi (0.005 s).

- Carico sequenziale al caso di carico NSLE. In questo modo l'analisi viene svolta considerando i carichi propri della struttura già applicati su di essa prima dell'applicazione dell'evento sismico.
- Metodo di smorzamento: proporzionale a massa e rigidezza. I coefficienti di massa e rigidezza vengono ottenuti attraverso lo smorzamento modale, quindi indicando il periodo e il coefficiente di smorzamento corrispondente ai due modi maggiormente contribuenti nelle due direzioni.
- Parametri di integrazione del metodo Newmark: ad accelerazione costante come indicato nel paragrafo 5.4.2.
- Parametri di controllo dell'analisi non lineare: viene impostato un numero massimo di iterazioni pari a 10 ed una tolleranza di convergenza dello spostamento normalizzato pari a 0.001.

Figura 5.14 – Parametri di input per ogni caso di carico corrispondente ad un evento sismico

Sempre nella finestra *Load Cases* viene definito il caso di carico *Dead Load* con i parametri indicati nella Figura 5.15. Questo caso di carico risulterà necessario negli step successivi per considerare i carichi propri della struttura.

Figura 5.15 – Parametri per il caso di carico dinamico *Dead Load*

Successivamente vengono importati in Midas gli accelerogrammi tramite la finestra *Time History Function*. In questa finestra vengono importati singolarmente e nominati in base al codice dell'evento sismico ed alla direzione corrispondente. Viene anche inserito il fattore di scala relativo all'evento considerato. Facendo riferimento agli eventi riportati in Figura 5.13, il primo evento inserito sarà nominato "000334X" con un fattore di scala di 0.916. Nella figura successiva viene mostrato il risultato ottenuto inserendo gli accelerogrammi.

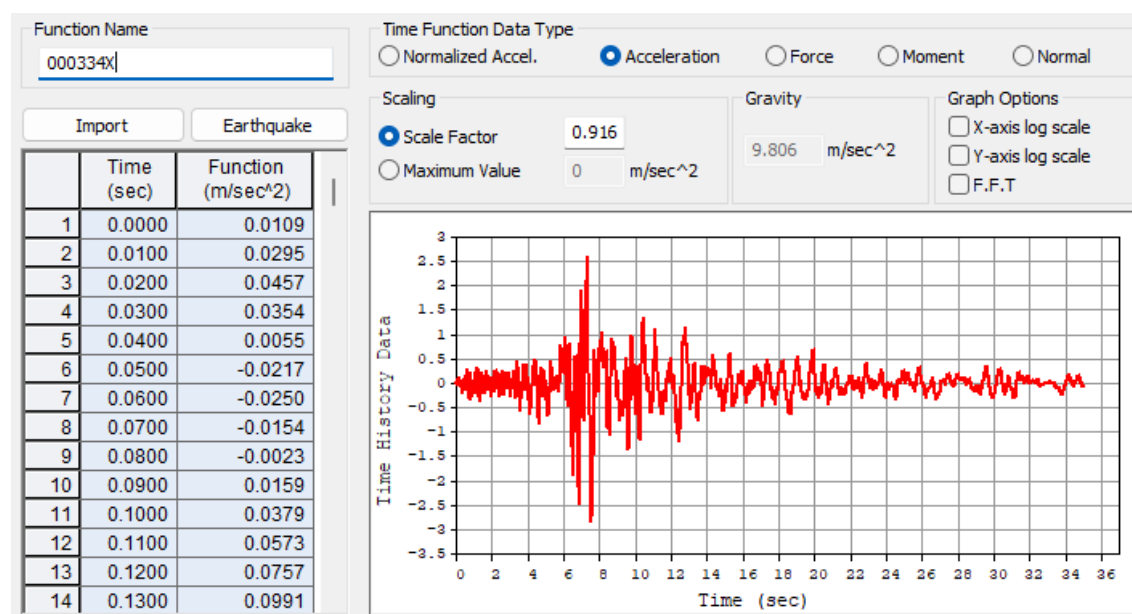


Figura 5.16 – Esempio accelerogramma inserito in MidasCivil

Per tenere conto dei carichi associati alla struttura è necessario creare il carico statico NSLE in *Static Load Cases*, importando la combinazione SLE tramite il comando *Using load Combination*. La combinazione NSLE è della tipologia *User Defined Load (USER)* e considera tutti i carichi della struttura, tra cui il peso proprio e i carichi permanenti non strutturali.

Viene poi inserita una funzione *Ramp* di durata 5 secondi nelle *Time History Functions*, ovvero una funzione crescente linearmente fino a cinque secondi avendo una forzante non definita, da assegnare successivamente nella definizione della funzione *Time Varying Static Loads*. Questa funzione associa il caso di carico statico NSLE al caso di carico dinamico *Dead Load* che si sviluppa nel tempo in base all'andamento della funzione *Ramp*. Questo passaggio ha la funzione di considerare e stabilizzare i carichi propri della struttura nell'analisi *Time History*.

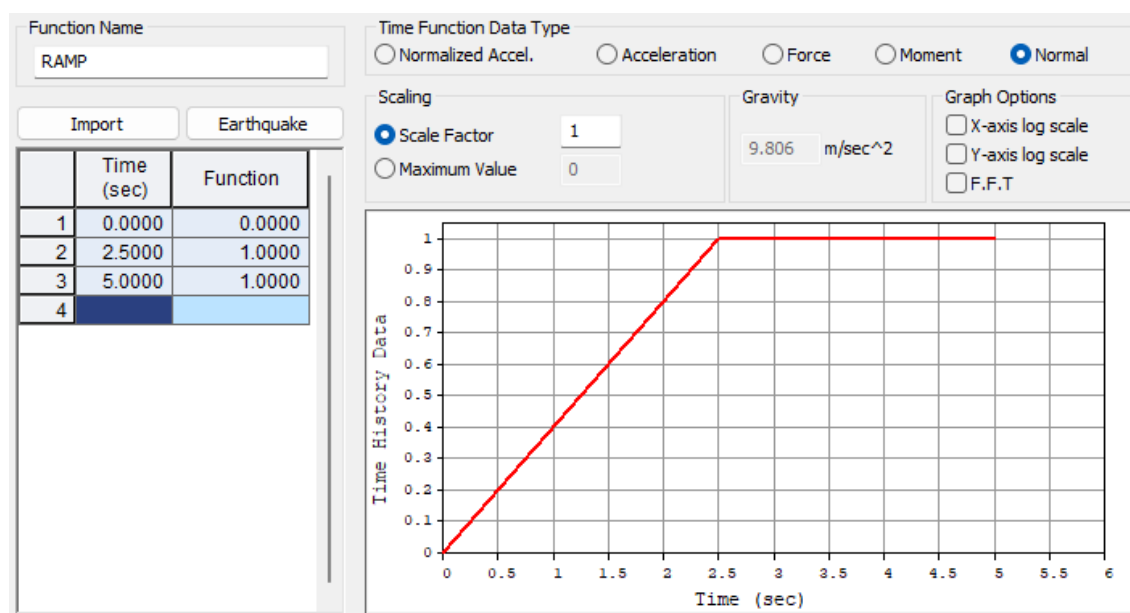


Figura 5.17 – Funzione Ramp

Attraverso il comando *Ground Acceleration* ogni *Time History Load Case* viene associato ai due accelerogrammi corrispondenti nelle due direzioni. Viene impostato un periodo di arrivo di 5 secondi in modo da applicare il carico solo dopo che la funzione Ramp sia terminata.

Come angolo di applicazione dell'accelerazione al suolo sul piano orizzontale viene applicato un valore per cui l'orientamento degli eventi sismici registrati coincida con la realtà, quindi un angolo che corrisponde alla rotazione degli assi locali del modello in modo che coincidano con quelli globali (direzione y – Nord; direzione X – Est).

Nella finestra si può inserire anche un fattore di scala da applicare agli accelerogrammi. Tramite questo parametro verrà ottenuto l'indice di rischio associato al viadotto attraverso una procedura iterativa che viene spiegata al Paragrafo 5.4.7.

Nel modello vengono poi inserite le differenti cerniere plastiche associate ai meccanismi fragile e duttile contemporaneamente, modellando il ciclo di isteresi secondo il legame *Modified Takeda Tetralinear*. Questa procedura viene trattata nel dettaglio nel paragrafo successivo.

5.4.5. Definizione ed inserimento delle cerniere plastiche

Le cerniere plastiche vengono introdotte nel modello seguendo i medesimi criteri descritti per l'analisi Pushover, dunque per la trattazione teorica e la definizione

dei vari parametri necessari per la costruzione del modello di isteresi si rimanda al Paragrafo 5.3.4.1.

Tuttavia, le modalità di inserimento nel modello FEM delle cerniere plastiche si discostano da quelle dell'analisi Pushover in quanto bisogna considerare un legame costitutivo ciclico e che tenga conto della riduzione di rigidità alla plasticizzazione.

Si è scelto di utilizzare come modello isteretico il *Modified Takeda Tetralinear* sia per il meccanismo di rottura duttile che per il meccanismo fragile. Il motivo che ha portato a questa scelta è la possibilità di costruire il legame attraverso gli stessi parametri di input utilizzati nell'analisi Pushover. È importante specificare inoltre che, a differenza dell'analisi Pushover, in questo tipo di analisi vengono considerati insieme i due meccanismi di rottura, quindi le cerniere plastiche inserite avranno associato sia il loro comportamento duttile che fragile. Di seguito viene approfondita la realizzazione del diagramma per il meccanismo duttile e fragile.

5.4.5.1. Meccanismo duttile

Il modello *Modified Takeda Tetralinear* costruisce il diagramma di carico attraverso la definizione di quattro tratti. Questi vengono a sua volta definiti attraverso l'individuazione di quattro punti di cui vengono immesse dall'utente le coordinate: il momento (P) e la rotazione (D). Di seguito si riporta lo schema del modello *Modified Takeda Tetralinear* con l'indicazione dei punti da definire.

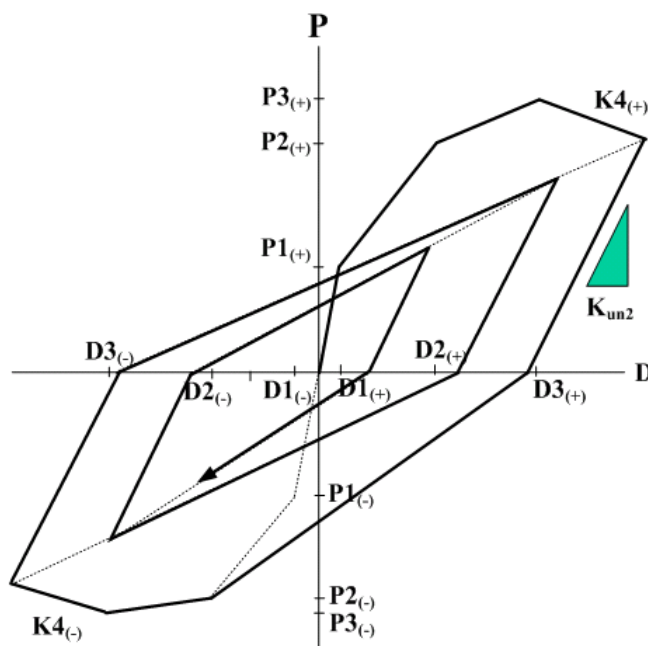


Figura 5.18 – Schema del modello *Modified Takeda Tetralinear*

Gli altri parametri che sono stati inseriti sono i seguenti:

- Grafico simmetrico per valori positivi e negativi
- Esponente applicato alla rigidezza in fase di scarico: è il parametro che tiene conto della riduzione della rigidezza una volta avvenuta la plasticizzazione della cerniera a cui viene assegnato un valore di 0.4.

5.4.5.2. Meccanismo fragile

Per il meccanismo fragile viene sempre utilizzato il modello *Modified Takeda Tetralinear* mediante la definizione dei quattro punti attraverso l'immissione delle coordinate: forza (P) e spostamento (D). Essendo una modalità di rottura fragile la cerniera avrà un comportamento elastico fino al punto di rottura, per questo motivo i quattro punti vengono definiti in modo da ottenere un andamento lineare fino al (P3:D3) che corrisponde alla forza e spostamento di rottura. Non essendoci il tratto plastico, il coefficiente di riduzione della rigidezza in fase di scarico è 1, ovvero non vi è riduzione di rigidezza.

Di seguito si riportano a scopo esemplificativo le schermate di definizione dei diagrammi di carico per meccanismo duttile e meccanismo fragile

Input Method
☒ User Input ☐ Auto-Calculation

Input Type
☐ Strength - Stiffness Reduction Ratio
☒ Strength - Yield Displacement

Value Type of I-End J-End
☒ Symmetric ☐ Asymmetric

Properties
 Type: ☒ Symmetric ☐ Asymmetric

Yield Strength

	(+)	(-)	
P1	1456.990	1456.990	kN*m
P2	2913.981	2913.981	kN*m
P3	3444.496	3444.496	kN*m
P4	582.7962	582.7962	kN*m

Yield Displacement

	(+)	(-)	
D1	0.001325	0.001325	[rad]
D2	0.002651	0.002651	[rad]
D3	0.024161	0.024161	[rad]
D4	0.024188	0.024188	[rad]

Deformation Indexes
 Initial Stiffness: ☐ 6EI/L ☐ 3EI/L ☐ 2EI/L
☐ User 1 kN*m
☐ Elastic Stiffness
☒ Skeleton Curve

Unloading Stiffness Parameter
 Exponent in Unloading Stiffness Calculation: 0.4
 Inner Loop Unloading Stiffness Reduction Factor: 1

Figura 5.19 – Meccanismo duttile

Input Method
☒ User Input ☐ Auto-Calculation

Input Type
☐ Strength - Stiffness Reduction Ratio
☒ Strength - Yield Displacement

Value Type of I-End J-End
☒ Symmetric ☐ Asymmetric

Properties
 Type: ☒ Symmetric ☐ Asymmetric

Yield Strength

	(+)	(-)	
P1	1122.156	1122.156	kN
P2	2244.312	2244.312	kN
P3	4488.625	4488.625	kN
P4	1	1	kN

Yield Displacement

	(+)	(-)	
D1	4.794498	4.794498	
D2	9.588996	9.588996	
D3	0.000191	0.000191	
D4	0.000193	0.000193	

Deformation Indexes
 Initial Stiffness: ☐ 6EI/L ☐ 3EI/L ☐ 2EI/L
☐ User 1 kN
☐ Elastic Stiffness
☒ Skeleton Curve

Unloading Stiffness Parameter
 Exponent in Unloading Stiffness Calculation: 1
 Inner Loop Unloading Stiffness Reduction Factor: 1

Figura 5.20 – Meccanismo Fragile

5.4.6. Validazione delle cerniere plastiche con forzante arbitraria

Una volta definiti i diagrammi di carico per meccanismo di rottura duttile e fragile è necessario verificare che il comportamento delle cerniere plastiche sia coerente con quanto atteso. La verifica viene differenziata per i due meccanismi di

rottura in modo da studiarne la correttezza di entrambi senza che uno influenzi i risultati dell'altro. Il procedimento è comunque analogo per i due casi ed è il seguente:

Viene realizzato un modello a singola pila a cui viene applicata una *Ground Acceleration* associata ad un accelerogramma fittizio definito come in Figura 5.20.

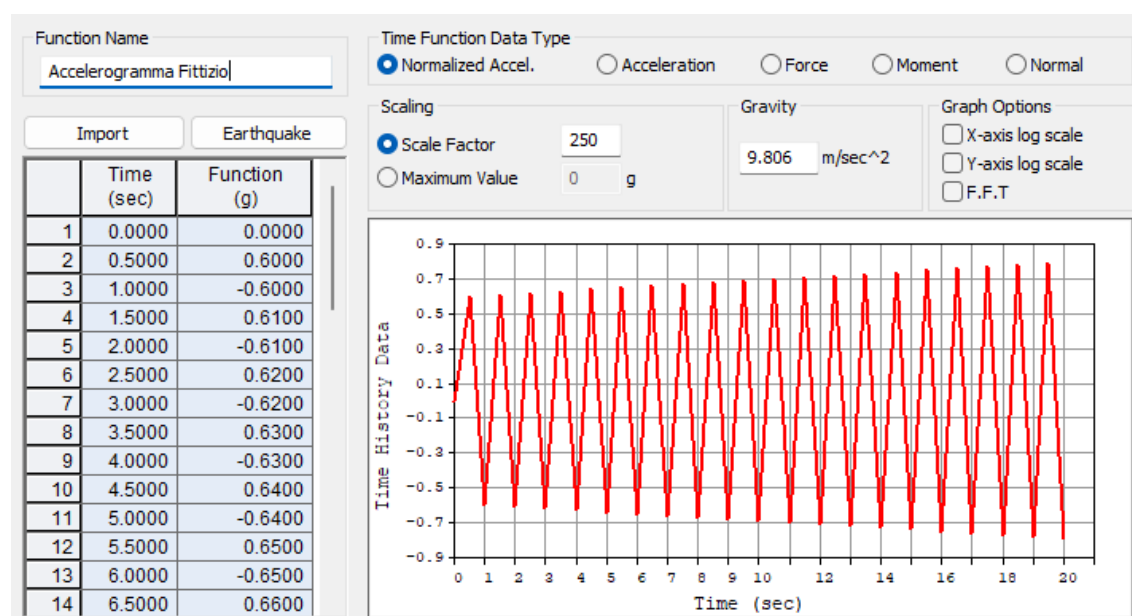


Figura 5.21 – Accelerogramma Fittizio

L'accelerazione al suolo viene applicata nella direzione di cui si vuole verificare il modello isteretico e viene scalata fino a raggiungere il cedimento della cerniera plastica. Una volta raggiunto il cedimento si ottiene il diagramma di carico e scarico durante l'evento in modo da verificare il corretto comportamento ciclico del legame e controllare che il valore di momento o forza massimo sia congruente a quello indicato. Questo procedimento viene ripetuto per le due direzioni principali e per meccanismo di rottura, specificando che per il comportamento fragile viene verificato anche la corrispondenza con il valore della rigidezza della fase elastica con quello ottenuto tramite calcolo analitico.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti per il viadotto B83 e si specifica che la validazione è stata effettuata per i tre viadotti analizzati.

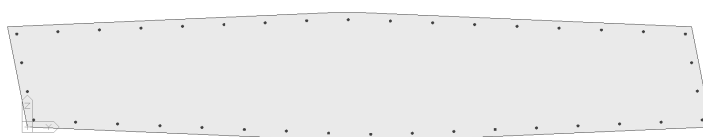


Figura 5.22 – Geometria della sezione caratteristica delle pile con armature longitudinali

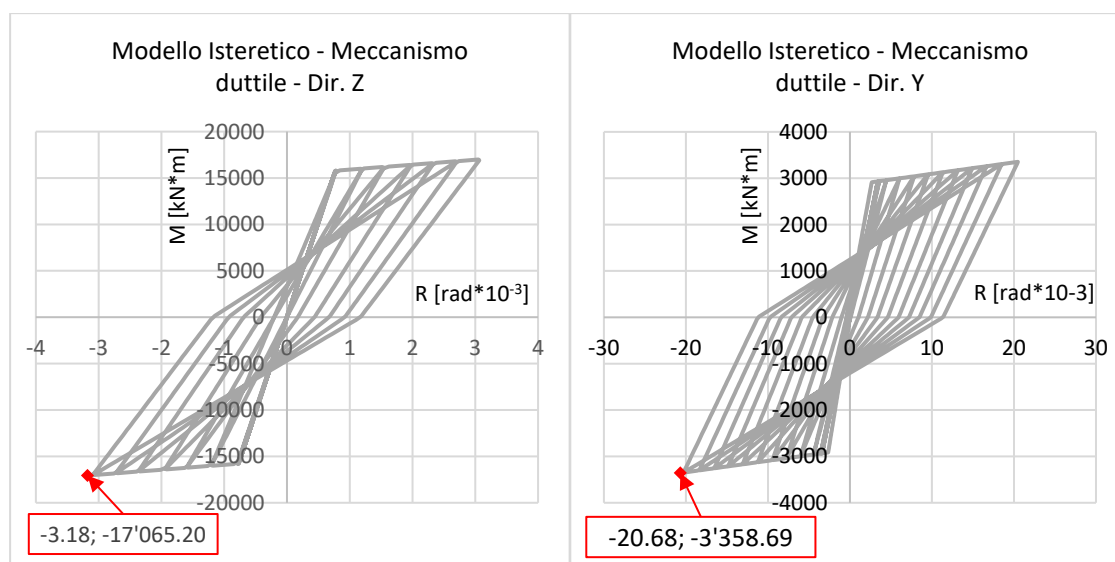


Figura 5.23 - Ciclo di carico per meccanismo di rottura duttile

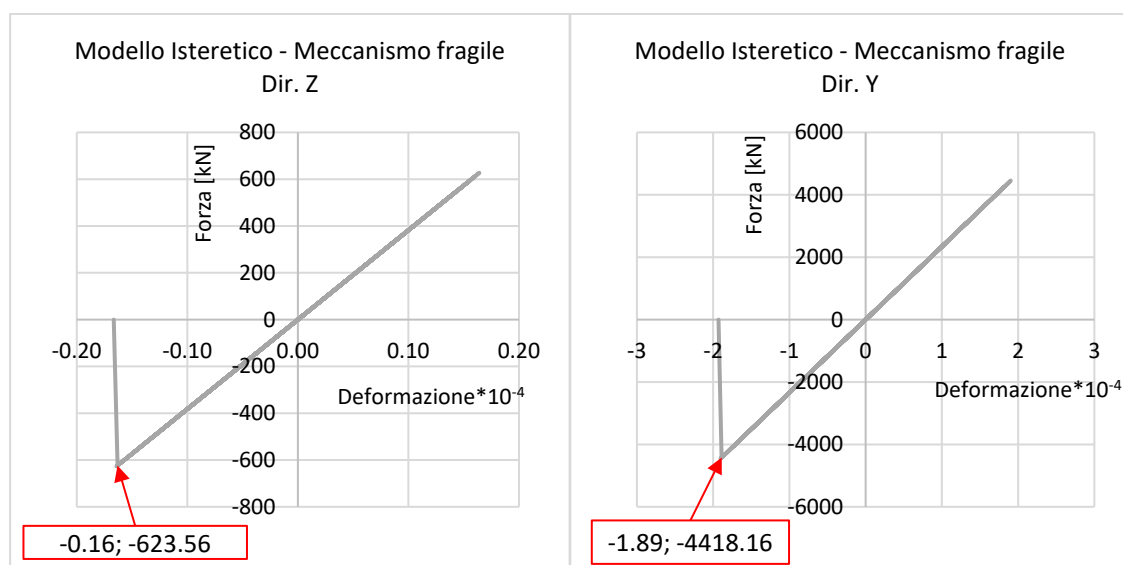


Figura 5.24 - Ciclo di carico per meccanismo di rottura fragile

Parametri di controllo meccanismo duttile:

Tabella 5.3 – Parametri di controllo meccanismo duttile

direzione	Momento di cedimento [kN*m] Metodo analitico	Momento di cedimento [kN*m] Da modello FEM
Y	3444.50	3358.69
Z	18652.12	17065.20

Parametri di controllo meccanismo fragile:

Tabella 5.4 – Parametri di controllo meccanismo fragile

direzione	Forza [kN] Metodo analitico	Forza [kN] Modello FEM	Def.*10 ⁻⁴ Metodo analitico	Def.*10 ⁻⁴ Modello FEM
Y	4488.63	4418.16	1.92	1.89
Z	636.25	623.56	0.17	0.16

Rigidezza [kN/m] Metodo analitico	Rigidezza [kN/m] Modello FEM
23'405'086	23'405'057
38'216'057	38'215'949

La cerniera rispetta il comportamento atteso da metodo analitico registrando una deviazione dei valori massima del 5.61%, dunque l'implementazione del modello isteretico si può considerare validata.

5.4.7. Determinazione dell'indice di rischio

A questo punto è possibile procedere con la determinazione dell'indice di rischio in termini di accelerazione, definito ad inizio capitolo come segue:

$$IR_a = \frac{PGA_{\text{resistente}}}{PGA_{\text{normativa}}} \quad (5.43)$$

Come anticipato al Paragrafo 5.4.4, è possibile applicare un fattore di scala ad ogni accelerogramma facente parte della combinazione spettro-compatibile. Attraverso un procedimento iterativo, partendo dall'applicazione di un fattore di scala ad ogni accelerogramma che non comporta la crisi della struttura, si incrementa tale fattore di 0.05 fino a raggiungere il cedimento di una delle cerniere plastiche. Il valore del fattore di scala associato allo scenario di crisi rappresenta l'indice di rischio della struttura per quel dato evento sismico, per definizione. Sviluppando questo procedimento per ogni registrazione si otterranno sette valori di fattore di scala la cui media rappresenta l'indice di rischio della struttura, essendo la combinazione degli eventi spettro-compatibile con lo spettro di risposta di progetto. Bisogna specificare che, per mantenere la coerenza dei risultati, devono essere applicati fattori di scala uguali per le due direzioni che caratterizzano lo stesso evento sismico.

Oltre al calcolo dell'indice di rischio, le analisi che verranno effettuate hanno l'obiettivo di determinare lo stato della struttura al momento della crisi. In particolare, si vuole studiare l'interazione tra i meccanismi di rottura, ovvero comprendere se, per esempio, al verificarsi della crisi prevista per comportamento fragile le cerniere siano plasticizzate per via del meccanismo duttile.

5.5. Introduzione ai casi studio

Dal capitolo successivo verranno riportate le analisi dinamiche lineari e non lineari di tre viadotti: B83, B88, R13. Questi tre viadotti presentano delle caratteristiche strutturali differenti e sono stati selezionati in modo da studiare come variasse il comportamento della struttura in base a differenti parametri quali schema strutturale e tipologia di sezione delle pile. Il primo ponte, infatti, presenta delle pile rette a sezione piena, il secondo delle pile a telaio, il terzo delle pile rette a sezione cava. Per ogni viadotto è stato ottenuto lo sviluppo temporale dell'indice di rischio per tre gradi di corrosione: bassa, media e alta. L'andamento di tale indice è stato calcolato attraverso l'analisi dinamica lineare (MPA) e analisi dinamica non lineare (Time History Analysis).

In conclusione, sono stati confrontati i risultati ottenuti e combinati con quelli corrispondenti ad altri viadotti analizzati in lavori di ricerca precedenti con la stessa metodologia in modo da sviluppare delle considerazioni sullo scenario di crisi comuni ad una determinata tipologia di viadotti.

Capitolo 6

Il viadotto B83

Si riporta di seguito l'analisi di vulnerabilità del primo dei tre viadotti in esame. Dopo una breve descrizione dell'opera, vengono riportati le caratteristiche ed i dati maggiormente rilevanti per le analisi effettuate, infine verranno riportati i risultati.

I risultati delle analisi verranno presentati con due approcci differenti:

Il primo prevede che i risultati vengano ottenuti per tre differenti scenari temporali (25 anni, 50 anni, 75 anni) e confrontati al variare di tre scenari di degrado (basso, medio, alto). Ciò comporta un confronto più immediato ad un tempo prefissato, tuttavia i risultati sono soggetti ad una maggiore imprecisione dovuta all'arrotondamento dei diametri delle armature longitudinali a valori commerciali; ad esempio se si considera lo scenario di corrosione alta per una sezione che presenta delle armature longitudinali con diametro iniziale di 18 mm, a 25 anni il diametro delle armature dovrebbe essere 16.77 mm, però l'analisi deve essere effettuata con il valore commerciale di 16 mm generando così una diminuzione del 4,59% rispetto al valore corretto.

Il secondo approccio invece prevede che i risultati vengano ottenuti per cinque differenti configurazioni della sezione che variano in base al diametro commerciale delle armature longitudinali considerato (20 mm, 18 mm, 16 mm, 14 mm, 12 mm, ...). Successivamente viene determinato l'istante temporale in cui la sezione raggiunge la configurazione in oggetto in base allo scenario di degrado così da ottenere la variazione dell'indice di rischio nel tempo. Attraverso questo approccio si ottengono dei risultati più precisi non dovendo ricorrere ad approssimazioni, tuttavia il confronto dei risultati ad uno scenario temporale prefissato risulta meno immediato dovendo ricorrere necessariamente ad un'interpolazione.

A conclusione del capitolo verrà presentato un confronto dei risultati ottenuti dai due approcci mettendo in evidenza le loro differenze.

6.1. Descrizione della struttura

Il viadotto B83 è situato in provincia di Pisa, sorge in una zona pianeggiante ad una quota di circa 3 m s.l.m. Fa parte dell'Autostrada A12.

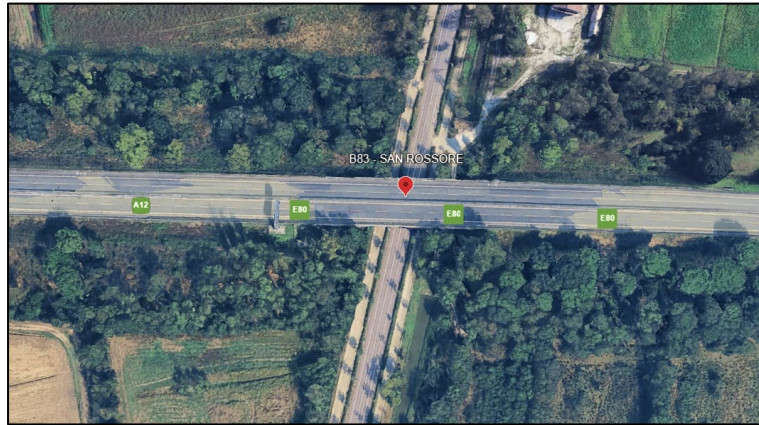


Figura 6.1 – Immagine satellitare del viadotto

L'infrastruttura è caratterizzata da due pile e tre campate. Presenta un andamento planimetrico rettilineo e si estende per una lunghezza di 77 metri. Il viadotto è costituito da due carreggiate indipendenti, una per ciascuna direzione, e presenta lo schema statico di ponte a travata. I tre impalcati che caratterizzano la struttura possono essere considerati come semplicemente appoggiati.

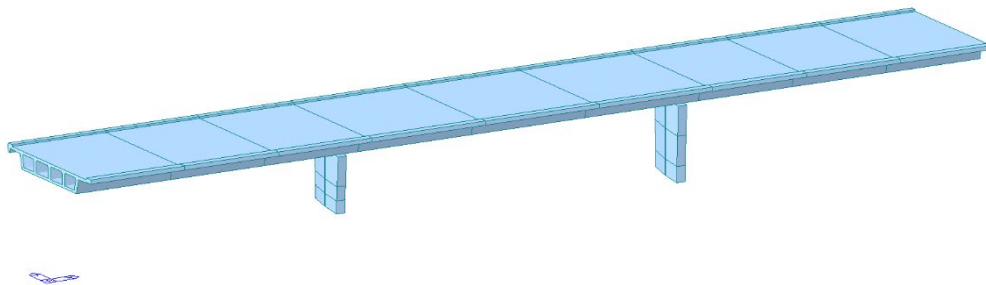


Figura 6.2 – Modello di calcolo MidasCivil di una carreggiata del viadotto

La lunghezza degli impalcati tra appoggio e pila è 24 m, mentre tra le due pile 29 m e la loro larghezza è di 7.4 m per carreggiata. Gli impalcati sono caratterizzati da cinque travi in calcestruzzo armato a sezione costante a I con anima di 35 cm e altezza pari a 1.18 m.



Figura 6.3 – Geometria della sezione caratteristica delle pile con armature longitudinali

Le pile sono caratterizzate da una sezione poligonale (Figura 6.3) le cui dimensioni variano lungo l'altezza. La sezione alla base è larga 4.8 m e spessa 0.7 m alle estremità e 0.9 metri nella parte centrale della sezione, mentre la sezione in sommità ha una larghezza di 5.5 m e uguale spessore. Il rinforzo armato è composto da 38 barre di armature longitudinali di diametro 18 mm e 2 bracci di armature trasversali in direzione Y e 6 in direzione Z con diametro di 10 mm. Gli assi locali della sezione Y e Z corrispondono rispettivamente agli assi globali del viadotto Y e X.

In Tabella 6.1 vengono riportate le caratteristiche dei materiali che caratterizzano le pile.

Tabella 6.1 – Caratteristiche dei materiali delle pile

Calcestruzzo	C20/25
Armatura longitudinale	AQ50
Armatura trasversale	AQ50
Deformazione ultima acciaio	$\varepsilon_{su} = 2\%$

Le pile presentano altezze differenti: una pila è caratterizzata da una lunghezza del fusto di 5.7 m, l'altra di 7.2 m. In Figura 6.2 si riporta il modello FEM realizzato utilizzando il software MidasCivil.

6.2. Analisi per scenario temporale

Il primo approccio prevede lo studio della vulnerabilità a tre differenti scenari temporali (25 anni, 50 anni, 75 anni) per tre differenti livelli di degrado:

- Corrosione bassa: $i_{corr} = 0.1 \mu A/cm^2$
- Corrosione media: $i_{corr} = 1.0 \mu A/cm^2$
- Corrosione alta: $i_{corr} = 5.0 \mu A/cm^2$

Prima di iniziare l'analisi occorre definire il tempo d'innescio del fenomeno corrosivo. Esso rappresenta il tempo necessario affinché l'anidride carbonica

raggiunga le barre di armatura delle sezioni ed è stato considerato come variabile statistica ed il suo valore è stato assunto pari a 13.5 anni come suggerito dalla letteratura scientifica [25], [28], ipotizzando di avere un calcestruzzo con qualità medio-basse e un rapporto acqua/cemento pari a 0.6. La deformazione limite dell'acciaio si assume pari al 2%, in quanto il viadotto è soggetto ad azioni di tipo ciclico.

L'effetto della corrosione viene considerato in termini di riduzione del diametro e della deformazione ultima a rottura delle barre attraverso le seguenti formulazioni riportate in letteratura scientifica [4], [23], [52].

Riduzione di diametro

$$\phi(t) = \phi_0 - 2P_x = \phi_0 - 2i_{corr} * k * (t - t_{in}) \quad (6.1)$$

Dove i termini hanno il significato seguente:

- ϕ_0 è il diametro nominale della barra in *mm*;
- P_x è il valore medio della penetrazione in *mm*;
- t_{in} è il tempo di innesco della corrosione in *anni*;
- i_{corr} è l'intensità di corrosione in $\mu A/cm^2$;
- k rappresenta un fattore di conversione dell'intensità di corrosione [$\mu A/cm^2$] in velocità di corrosione [*mm/anno*], pari a 0.0116;

Riduzione della deformazione ultima a rottura

$$\varepsilon_{su,corr} = (1 - 0.0195\psi) * \varepsilon_{su} \quad (6.2)$$

Dove i termini hanno il significato seguente:

- ε_{su} è la deformazione ultima a rottura in assenza di corrosione;
- $\psi = \left(1 - \frac{A_{s,t}}{A_{s,i}}\right) * 100$ è la percentuale della massa corrosa.

6.2.1. Degrado del viadotto a 25 anni

Per iniziare, in Tabella 6.2 vengono riportati gli effetti della corrosione sul diametro e deformazione ultima a rottura per lo scenario temporale considerato in base al livello di corrosione.

Tabella 6.2 – Effetti della corrosione su diametro e deformazione ultima a rottura delle armature

Scenario Temporale - 25 anni							
Corrosione Bassa							
	$\varnothing_0$	$\varnothing_t$	$\varnothing_{com}$	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
Armatura Longitudinale	18	17.97	18	0.13	0.30	0.129	0.020
Armatura Trasversale	10	9.97	-	0.13	0.53	0.129	0.020
Corrosione Media							
	$\varnothing_0$	$\varnothing_t$	$\varnothing_{com}$	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
Armatura Longitudinale	18	17.73	18	0.13	2.94	0.123	0.020
Armatura Trasversale	10	9.73	-	0.13	5.26	0.117	0.020
Corrosione Alta							
	$\varnothing_0$	$\varnothing_t$	$\varnothing_{com}$	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
Armatura Longitudinale	18	16.67	16	0.13	14.27	0.094	0.020
Armatura Trasversale	10	8.67	-	0.13	24.90	0.067	0.020

Diagrammi Momento-Curvatura

L'analisi delle sezioni è stata effettuata per mezzo dell'applicativo GSD di MidasCivil. In tal modo sono stati ricavati i diagrammi Momento - Curvatura delle sezioni delle pile nelle due direzioni. In Figura 6.4 si riportano i diagrammi Momento - Curvatura caratteristici della sezione delle pile del viadotto. Tali curve non registrano differenze significative al variare della pila poiché le azioni assiali alla base delle pile hanno valori simili, pari a 6442.2 kN e 6594 kN agenti rispettivamente sulla pila 1 e pila 2. All'aumentare del fenomeno corrosivo, l'evoluzione dei diagrammi $M-\chi$ della sezione delle pile mostra una chiara riduzione in termini di momento massimo, mentre la differenza in termini di duttilità rimane pressoché invariata. Ciò deriva dal fatto che il legame costitutivo dell'acciaio è stato limitato ad una deformazione ultima del 2% e per lo scenario in esame non si sono mai raggiunti valori di ε_{su} inferiori a questa soglia. Si nota inoltre come tra le curve a basso e medio degrado non vi sia differenza, in quanto la variazione tra i due scenari non risulta essere significativa ed il diametro commerciale adoperato è il medesimo.

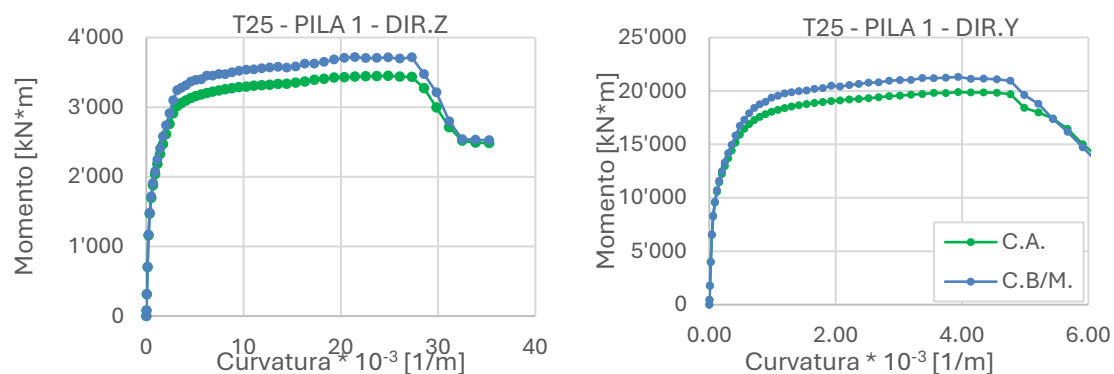


Figura 6.4 – Grafici Momento-Curvatura delle sezioni per gli assi principali

Momenti di inerzia

Disponendo dei diagrammi $M-\chi$, si determinano i momenti di inerzia delle sezioni per ogni scenario di degrado. Come è possibile notare da Tabella 6.3, tali quantità diminuiscono all'aumentare del degrado considerato. La riduzione è trascurabile nel passaggio da degrado basso a degrado medio, in quanto i diametri commerciali che sono stati utilizzati sono gli stessi.

Tabella 6.3 – Momento di inerzia efficace per scenario di corrosione

Momento di inerzia efficace [m ⁴]				
Pila	Asse	Corrosione bassa - media	Corrosione alta	Δ
PILA 1 - PILA 2	Z	0.0555	0.0551	-0.75%
	Y	1.7744	1.7681	-0.35%

6.2.1.1. Analisi modale

La riduzione del momento di inerzia comporta una riduzione della rigidezza del sistema, che si traduce in un aumento del periodo proprio della struttura. L'incremento dei periodi naturali di vibrazione si ha soprattutto per i modi principali, ossia quei modi che mobilitano la maggior parte della massa partecipante. Si riportano di seguito i risultati dell'analisi modale, in termini di periodi e masse partecipanti dei singoli modi. In Tabella 6.4 vengono rappresentati i risultati relativi ad un livello di corrosione bassa/media, mentre in Tabella 6.5 i valori ottenuti nel caso di corrosione alta.

Tabella 6.4 – Analisi modale per scenario di corrosione bassa e media

Scenario Temporale a 25 anni - Corrosione bassa/media						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	6.80	0.92	92.27	92.27	3.88	3.88
2	7.87	0.80	3.82	96.10	90.53	94.41
3	8.78	0.72	0.02	96.11	0.05	94.45
4	22.94	0.27	0.00	96.11	0.00	94.45
5	32.60	0.19	0.00	96.11	0.00	94.45
6	35.87	0.18	0.00	96.11	0.01	94.46
7	38.39	0.16	0.00	96.11	0.00	94.46
8	60.51	0.10	0.95	97.06	0.04	94.50
9	73.67	0.09	0.00	97.06	0.00	94.50
10	81.40	0.08	0.00	97.07	0.00	94.50
11	88.97	0.07	0.98	98.05	0.04	94.54
12	97.41	0.06	0.00	98.05	0.00	94.54
13	98.04	0.06	0.00	98.05	0.00	94.54
14	122.67	0.05	0.00	98.05	0.00	94.54
15	144.02	0.04	0.00	98.05	0.00	94.54
16	187.28	0.03	0.00	98.05	0.00	94.54

17	196.12	0.03	0.00	98.05	0.00	94.54
18	204.91	0.03	0.00	98.05	0.00	94.54
19	235.15	0.03	0.09	98.14	2.31	96.85
20	241.85	0.03	0.00	98.14	0.01	96.87

Tabella 6.5 - Analisi modale per scenario di corrosione alta

Scenario Temporale a 25 anni - Corrosione alta						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	6.80	0.92	92.28	92.28	3.88	3.88
2	7.87	0.80	3.82	96.10	90.53	94.41
3	8.78	0.72	0.02	96.12	0.05	94.45
4	22.94	0.27	0.00	96.12	0.00	94.45
5	32.60	0.19	0.00	96.12	0.00	94.45
6	35.87	0.18	0.00	96.12	0.01	94.46
7	38.39	0.16	0.00	96.12	0.00	94.46
8	60.41	0.10	0.95	97.07	0.04	94.50
9	73.67	0.09	0.00	97.07	0.00	94.50
10	81.40	0.08	0.00	97.07	0.00	94.50
11	88.78	0.07	0.98	98.05	0.04	94.54
12	97.41	0.06	0.00	98.05	0.00	94.54
13	98.04	0.06	0.00	98.05	0.00	94.54
14	122.67	0.05	0.00	98.05	0.00	94.54
15	144.02	0.04	0.00	98.05	0.00	94.54
16	187.28	0.03	0.00	98.05	0.00	94.54
17	196.12	0.03	0.00	98.05	0.00	94.54
18	204.91	0.03	0.00	98.05	0.00	94.54
19	235.40	0.03	0.09	98.14	2.31	96.85
20	241.85	0.03	0.00	98.14	0.02	96.87

La differenza di periodo non si riesce ancora a riscontrare, a conferma del fatto che a 25 anni lo scostamento in funzione dell'intensità del degrado è presente ma non apprezzabile.

In verde sono stati evidenziati i modi che risultano contribuenti per l'analisi *Pu-shover*, ovvero quelli che movimentano almeno l'1% di massa in una delle due direzioni.

6.2.1.2. Meccanismo duttile

È possibile quindi analizzare le caratteristiche delle cerniere plastiche, poste alla base delle pile (Figura 6.5). La scelta è giustificata dal fatto che le pile del viadotto presentano un comportamento a mensola. Si considera inizialmente il meccanismo di rottura a rotazione.

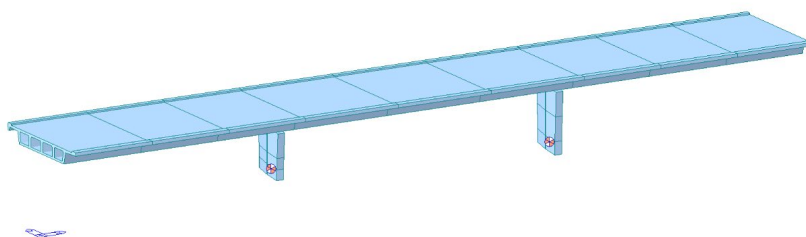
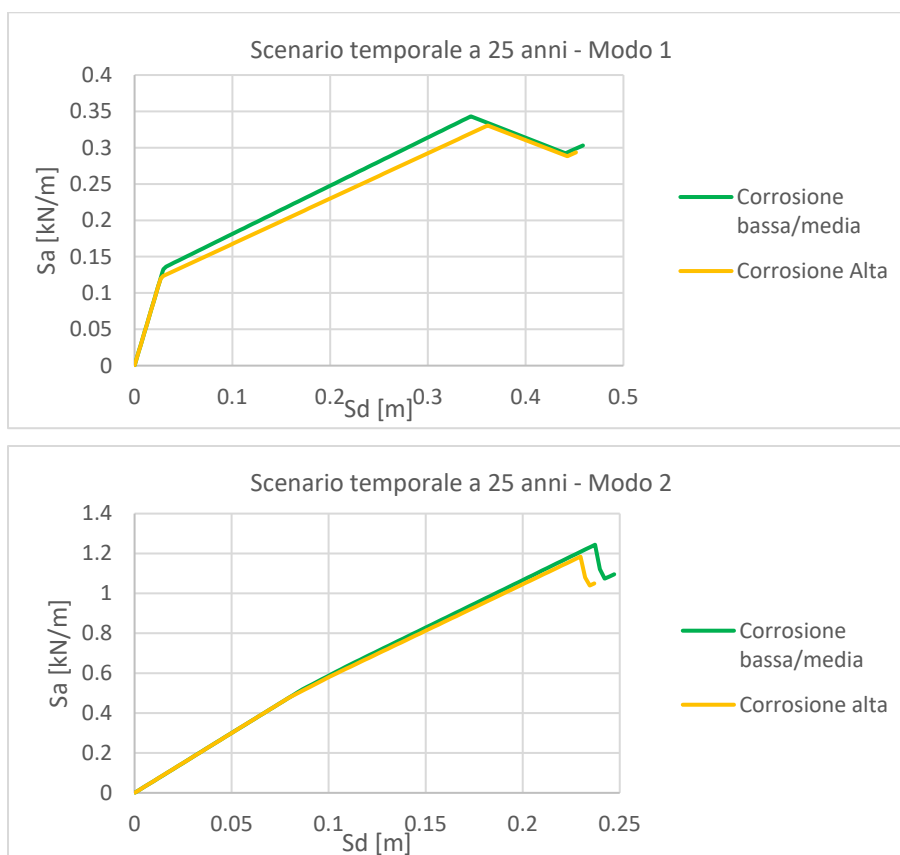


Figura 6.5 – Posizionamento delle cerniere plastiche all'interno del modello di calcolo MidasCivil

Analisi Pushover

Una volta definiti i legami costitutivi delle cerniere plastiche (Paragrafo 5.3.4.1), è stata effettuata un'analisi dinamica lineare, detta *Pushover*, che permette di studiare l'evoluzione dei meccanismi plastici all'interno del sistema strutturale. Tale analisi è stata eseguita per i soli modi aventi massa partecipante superiore all'1%, evidenziati nella Tabella 6.4 e Tabella 6.5. Le curve di capacità sono state trasformate dal piano Taglio - Spostamento al piano *ADRS*, come spiegato al Paragrafo 5.3.2, per poi essere messe a confronto tra loro per i diversi scenari (Figura 6.6). Esse presentano un tratto iniziale lineare, cui segue un secondo tratto con limite di rottura di coordinate decrescenti all'aumentare del fenomeno corrosivo. Le condizioni di corrosione bassa e media si equivalgono, in quanto per i due casi in esame sono stati considerati gli stessi diametri commerciali.



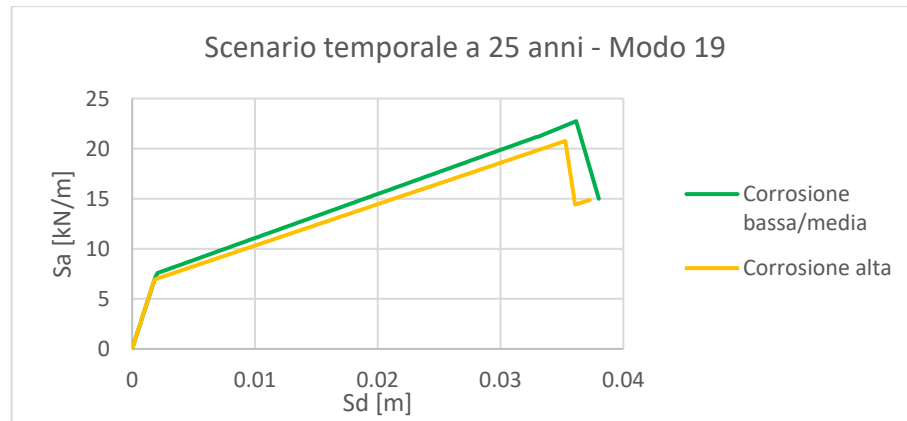


Figura 6.6 – Grafici ADRS dei modi contribuenti all'analisi Pushover a diversi scenari di corrosione

Analisi Pushover modale MPA

Per completare la verifica di vulnerabilità, è stata effettuata l'analisi MPA, seguendo quanto presentato nel Paragrafo 5.3.4. I risultati possono essere espressi in termini di indici di rischio di accelerazione e tempo di ritorno (Tabella 6.6). Per il periodo di osservazione considerato, si ottiene una riduzione degli indici di rischio a partire dalla condizione di degrado elevato. Per quanto riguarda i due casi di degrado più lievi, i due indici si equivalgono a conferma di quanto già discusso.

Tabella 6.6 – Indici di rischio a diversi scenari di corrosione

Scenario temporale a 25 anni			
Indice di rischio	Corrosione	Direzione X	Direzione Y
IR _a	Bassa/Media	3.367	3.367
	Alta	3.275 (-2.73%)	3.275 (-2.73%)
IR _t	Bassa/Media	4.894	4.894
	Alta	4.72 (-3.56%)	4.72 (-3.56%)

6.2.1.3. Meccanismo fragile

Si procede per il meccanismo fragile in modo analogo a quanto svolto per il meccanismo a rotazione. In particolare, si utilizza un secondo modello FEM in cui vengono modificate le caratteristiche delle cerniere plastiche, in accordo con quanto visto nel Paragrafo 5.3.4.1.

Analisi Pushover

Le cerniere vengono nuovamente poste alla base delle pile. Si ripete l'analisi dinamica lineare (Pushover) con le stesse modalità seguite per il meccanismo duttile. Nella Figura 6.7 viene mostrato il confronto a taglio tra i tre scenari di corrosione a 25 anni. Anche in questo caso non si notano differenze tra le condizioni di degrado basso e medio, mentre l'andamento risulta essere lineare fino al

raggiungimento del punto di rottura, con accelerazione spettrale che diminuisce all'aumentare della corrosione.

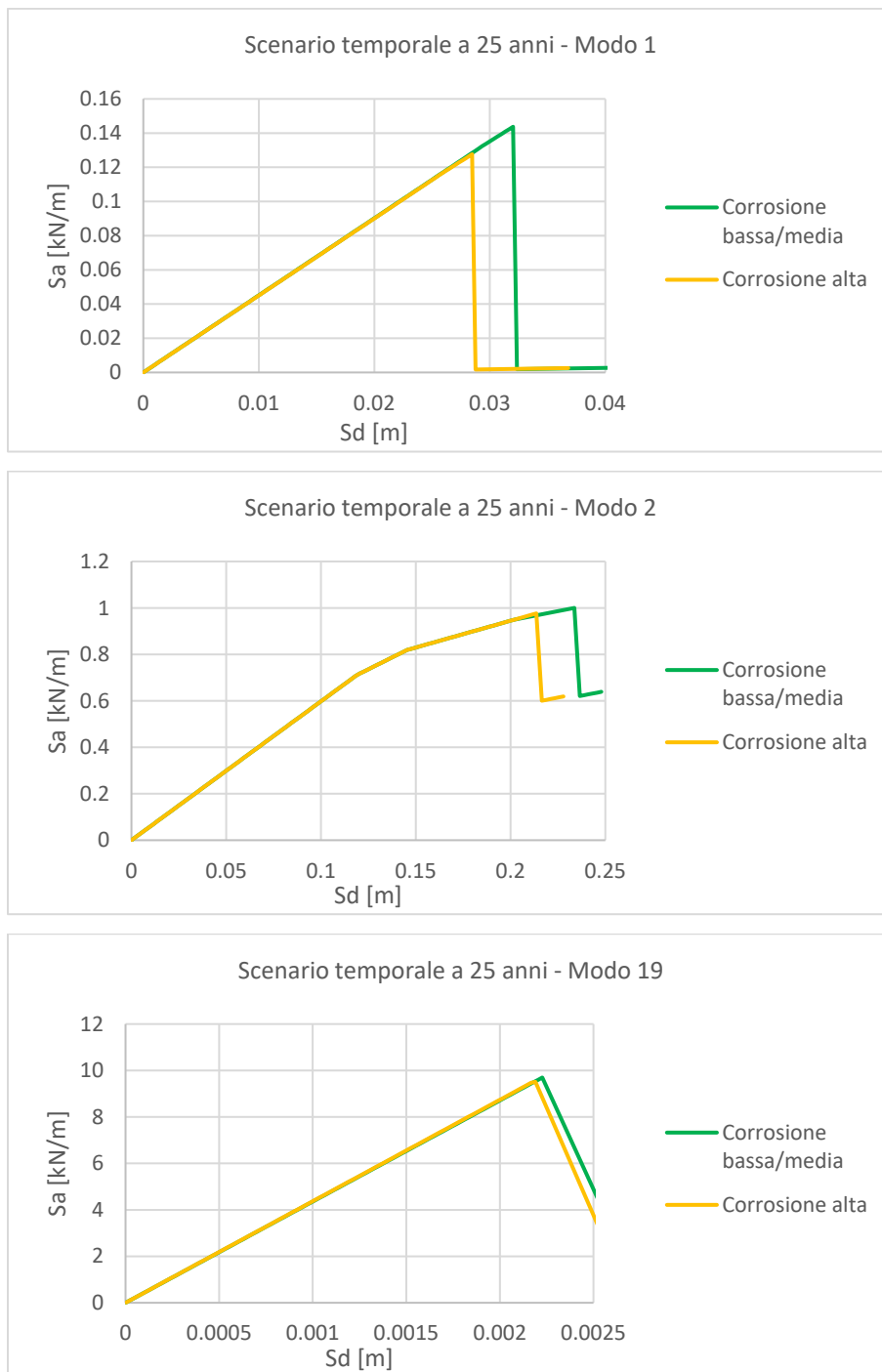


Figura 6.7 - Grafici ADRS dei modi contribuenti all'analisi Pushover a diversi scenari di corrosione

Analisi Pushover modale MPA

Successivamente è stato possibile procedere con l'analisi di Pushover modale. I risultati per il meccanismo di rottura a taglio vengono mostrati in Tabella 6.7. Anche per il meccanismo fragile, gli indici di rischio per gli scenari di degrado basso e medio si equivalgono, ma differiscono per il caso in cui si è considerato

un livello di corrosione elevato. Questo perché nei primi due scenari sono stati adottati gli stessi diametri commerciali.

Tabella 6.7 - Indici di rischio a diversi scenari di corrosione

Scenario temporale a 25 anni - Meccanismo fragile			
Indice di rischio	Corrosione	Direzione X	Direzione Y
IR _a	Bassa/Media	0.394	0.394
	Alta	0.364 (-7.61%)	0.364 (-7.61%)
IR _t	Bassa/Media	0.392	0.392
	Alta	0.359 (-8.42%)	0.359 (-8.42%)

6.2.2. Degrado del viadotto a 50 anni

Per iniziare, in Tabella 6.8 vengono riportati gli effetti della corrosione sul diametro e deformazione ultima a rottura per lo scenario temporale considerato in base al livello di corrosione.

Tabella 6.8 – Effetti della corrosione su diametro e deformazione ultima a rottura delle armature

Scenario Temporale - 50 anni							
Corrosione Bassa							
	$\varnothing_0$	$\varnothing_t$	$\varnothing_{com}$	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
Armatura Longitudinale	18	17.92	18	0.13	0.94	0.128	0.020
Armatura Trasversale	10	9.92	-	0.13	1.69	0.126	0.020
Corrosione Media							
	$\varnothing_0$	$\varnothing_t$	$\varnothing_{com}$	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
Armatura Longitudinale	18	17.15	18	0.13	9.19	0.107	0.020
Armatura Trasversale	10	9.15	-	0.13	16.22	0.089	0.020
Corrosione Alta							
	$\varnothing_0$	$\varnothing_t$	$\varnothing_{com}$	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
Armatura Longitudinale	18	13.77	14	0.13	41.51	0.025	0.020
Armatura Trasversale	10	5.77	-	0.13	66.75	-0.039	0.011

Diagrammi Momento-Curvatura

In Figura 6.8 si riportano i diagrammi Momento - Curvatura caratteristici della sezione delle pile del viadotto. All'aumentare del fenomeno corrosivo, l'evoluzione dei diagrammi $M-\chi$ della sezione delle pile mostra una chiara riduzione in termini di momento massimo, mentre la differenza in termini di duttilità rimane pressoché invariata. Ciò deriva dal fatto che il legame costitutivo dell'acciaio è stato limitato ad una deformazione ultima del 2% e per lo scenario in esame non si sono mai raggiunti valori di ε_{su} inferiori a questa soglia. Si nota inoltre come tra le curve a basso e medio degrado non vi sia differenza, in quanto la variazione

tra i due scenari non risulta essere significativa ed il diametro commerciale adottato è il medesimo.

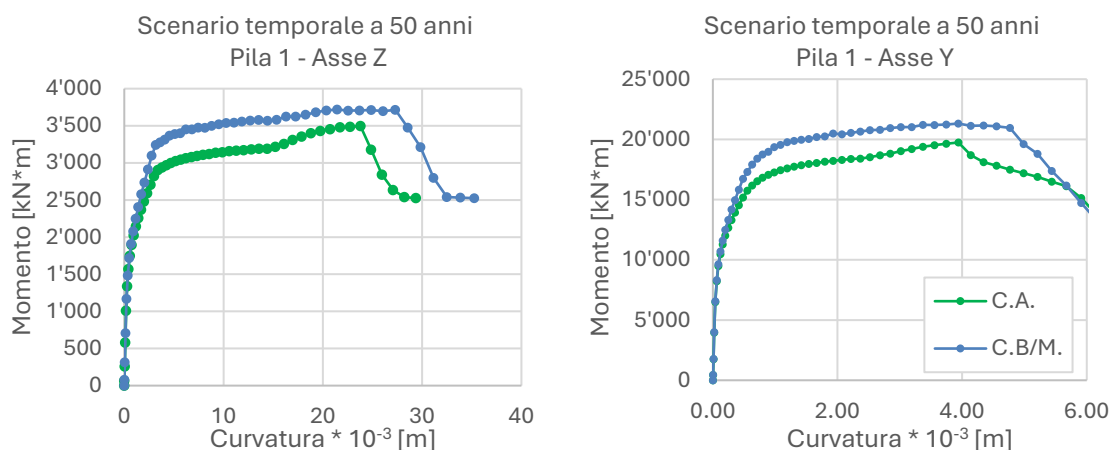


Figura 6.8 – Grafici Momento-Curvatura delle sezioni per gli assi principali

Momenti di inerzia

Disponendo dei diagrammi $M-\chi$, si determinano i momenti di inerzia delle sezioni per ogni scenario di degrado. Come è possibile notare da Tabella 6.9, tali quantità diminuiscono all'aumentare del degrado considerato. La riduzione è trascurabile nel passaggio da degrado basso a degrado medio, in quanto i diametri commerciali che sono stati utilizzati sono gli stessi.

Tabella 6.9 – Momento di inerzia efficace per scenario di corrosione

Momento di Inerzia efficace [m ⁴]				
Pila	Asse	Corrosione bassa - media	Corrosione alta	Δ
PILA 1 - PILA 2	Z	0.0555	0.0511	-8.04%
	Y	1.7744	1.6553	-6.71%

6.2.2.1. Analisi modale

La riduzione del momento di inerzia comporta una riduzione della rigidezza del sistema, che si traduce in un aumento del periodo proprio della struttura. L'incremento dei periodi naturali di vibrazione si ha soprattutto per i modi principali, ossia quei modi che mobilitano la maggior parte della massa partecipante. Si riportano di seguito i risultati dell'analisi modale, in termini di periodi e masse partecipanti dei singoli modi. In Tabella 6.10 vengono rappresentati i risultati relativi ad un livello di corrosione bassa/media, mentre in Tabella 6.11 i valori ottenuti nel caso di corrosione alta.

Tabella 6.10 – Analisi modale per scenario di corrosione bassa e media

Scenario Temporale a 50 anni - Corrosione bassa/media						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	6.80	0.92	92.27	92.27	3.88	3.88
2	7.87	0.80	3.82	96.10	90.53	94.41
3	8.78	0.72	0.02	96.11	0.05	94.45
4	22.94	0.27	0.00	96.11	0.00	94.45
5	32.60	0.19	0.00	96.11	0.00	94.45
6	35.87	0.18	0.00	96.11	0.01	94.46
7	38.39	0.16	0.00	96.11	0.00	94.46
8	60.51	0.10	0.95	97.06	0.04	94.50
9	73.67	0.09	0.00	97.06	0.00	94.50
10	81.40	0.08	0.00	97.07	0.00	94.50
11	88.97	0.07	0.98	98.05	0.04	94.54
12	97.41	0.06	0.00	98.05	0.00	94.54
13	98.04	0.06	0.00	98.05	0.00	94.54
14	122.67	0.05	0.00	98.05	0.00	94.54
15	144.02	0.04	0.00	98.05	0.00	94.54
16	187.28	0.03	0.00	98.05	0.00	94.54
17	196.12	0.03	0.00	98.05	0.00	94.54
18	204.91	0.03	0.00	98.05	0.00	94.54
19	235.15	0.03	0.09	98.14	2.31	96.85
20	241.85	0.03	0.00	98.14	0.01	96.87

Tabella 6.11 - Analisi modale per scenario di corrosione alta

Scenario Temporale a 25 anni - Corrosione alta						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	6.75	0.93	92.35	92.35	3.87	3.87
2	7.87	0.80	3.82	96.16	90.54	94.41
3	8.78	0.72	0.02	96.18	0.05	94.46
4	22.94	0.27	0.00	96.18	0.00	94.46
5	32.60	0.19	0.00	96.18	0.00	94.46
6	35.87	0.18	0.00	96.18	0.01	94.47
7	38.39	0.16	0.00	96.18	0.00	94.47
8	59.41	0.11	0.92	97.10	0.04	94.51
9	73.67	0.09	0.00	97.10	0.00	94.51
10	81.39	0.08	0.01	97.10	0.00	94.51
11	86.81	0.07	0.96	98.06	0.04	94.55
12	97.41	0.06	0.00	98.06	0.00	94.55
13	98.04	0.06	0.00	98.06	0.00	94.55
14	122.67	0.05	0.00	98.06	0.00	94.55
15	144.02	0.04	0.00	98.06	0.00	94.55
16	187.28	0.03	0.00	98.06	0.00	94.55
17	196.12	0.03	0.00	98.06	0.00	94.55

Scenario Temporale a 25 anni - Corrosione alta						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
18	204.91	0.03	0.00	98.06	0.00	94.55
19	230.44	0.03	0.09	98.15	2.32	96.87
20	241.83	0.03	0.00	98.15	0.00	96.87

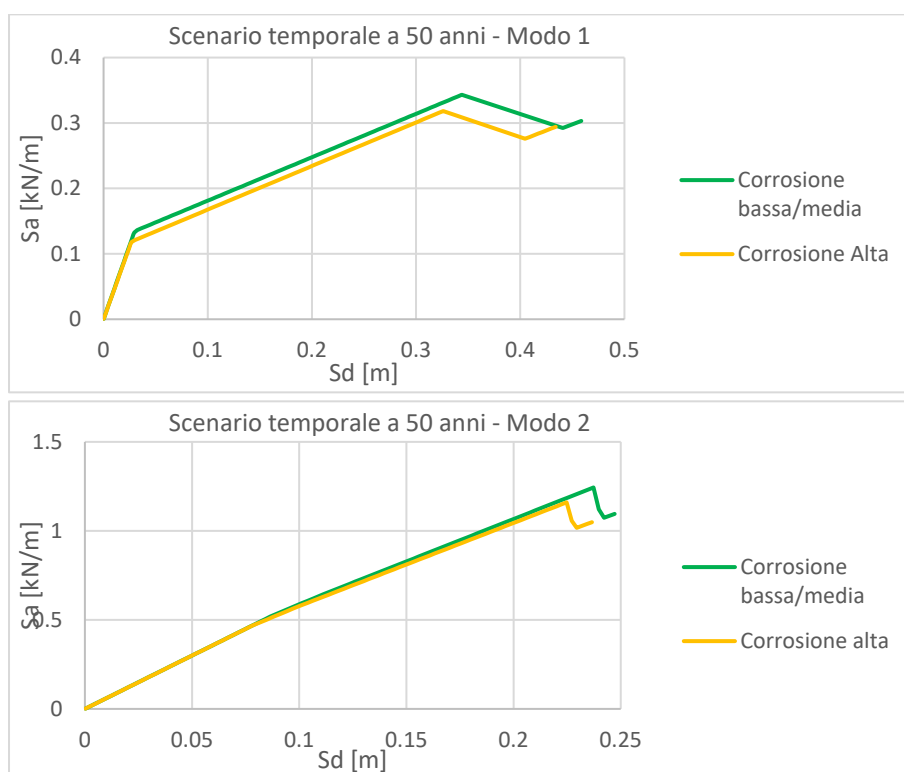
La differenza di periodo risulta minima. In verde sono stati evidenziati i modi che risultano contribuenti per l'analisi Pushover, ovvero quelli che movimentano almeno l'1% di massa in una delle due direzioni.

6.2.2.2. Meccanismo duttile

È possibile quindi analizzare le caratteristiche delle cerniere plastiche, posizionate analogamente a quanto enunciato al paragrafo 6.2.1.2. Si considera inizialmente il meccanismo di rottura a rotazione.

Analisi Pushover

Le curve di capacità riportate in Figura 6.9 vengono costruite seguendo il procedimento spiegato nel paragrafo 6.2.1.2. Esse presentano un tratto iniziale lineare, cui segue un secondo tratto con limite di rottura di coordinate decrescenti all'aumentare del fenomeno corrosivo. Le condizioni di corrosione bassa e media si equivalgono, in quanto per i due casi in esame sono stati considerati gli stessi diametri commerciali.



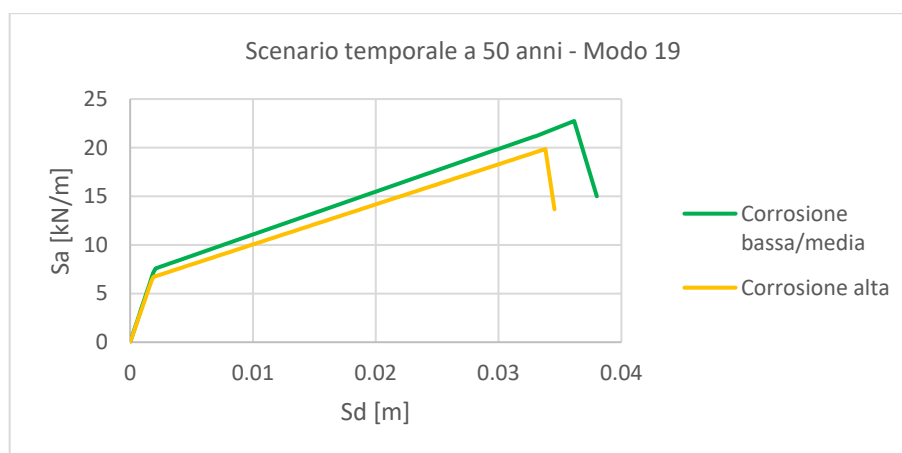


Figura 6.9 – Grafici ADRS dei modi contribuenti all'analisi Pushover a diversi scenari di corrosione

Analisi Pushover modale MPA

Per completare la verifica di vulnerabilità, è stata effettuata l'analisi MPA, seguendo quanto presentato nel Paragrafo 5.3.4. I risultati possono essere espressi in termini di indici di rischio di accelerazione e tempo di ritorno (Tabella 6.12). Per il periodo di osservazione considerato, si ottiene una riduzione degli indici di rischio a partire dalla condizione di degrado elevato. Per quanto riguarda i due casi di degrado più lievi, i due indici si equivalgono a conferma di quanto già discusso.

Tabella 6.12 – Indici di rischio a diversi scenari di corrosione

Scenario temporale a 50 anni - Meccanismo duttile			
Indice di rischio	Corrosione	Direzione X	Direzione Y
IR _a	Bassa/Media	3.367	3.367
	Alta	2.981 (-11.46%)	2.981 (-11.46%)
IR _t	Bassa/Media	4.894	4.894
	Alta	4.174 (-14.71%)	4.174 (-14.71%)

6.2.2.3. Meccanismo fragile

Si procede per il meccanismo fragile in modo analogo a quanto svolto per il meccanismo a rotazione. In particolare, si utilizza un secondo modello FEM in cui vengono modificate le caratteristiche delle cerniere plastiche, in accordo con quanto visto nel Paragrafo 5.3.4.1.

Analisi Pushover

Le cerniere vengono nuovamente poste alla base delle pile. Si ripete l'analisi dinamica lineare (*Pushover*) con le stesse modalità seguite per il meccanismo duttile. Nella Figura 6.10 viene mostrato il confronto a taglio tra i tre scenari di corrosione a 50 anni. Anche in questo caso non si notano differenze tra le condizioni di degrado basso e medio, mentre l'andamento risulta essere lineare fino al

raggiungimento del punto di rottura, con accelerazione spettrale che diminuisce all'aumentare della corrosione.

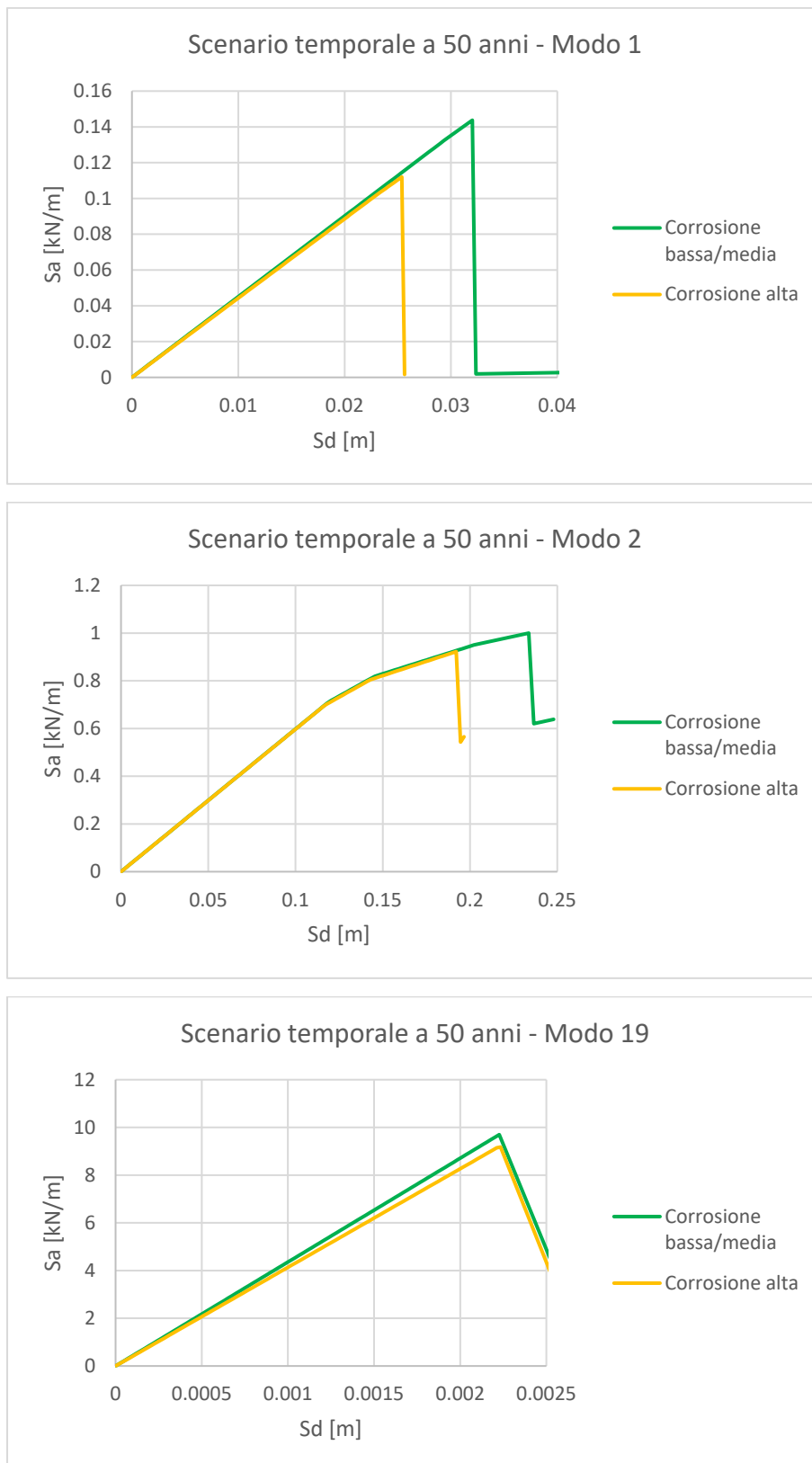


Figura 6.10 - Grafici ADRS dei modi contribuenti all'analisi Pushover a diversi scenari di corrosione

Analisi Pushover modale MPA

Successivamente è stato possibile procedere con l'analisi di Pushover modale. I risultati per il meccanismo di rottura a taglio vengono mostrati in Tabella 6.13. Anche per il meccanismo fragile, gli indici di rischio per gli scenari di degrado basso e medio si equivalgono, ma differiscono per il caso in cui si è considerato un livello di corrosione elevato. Questo perché nei primi due scenari sono stati adottati gli stessi diametri commerciali.

Tabella 6.13 - Indici di rischio a diversi scenari di corrosione

Scenario temporale a 50 anni - Meccanismo fragile			
Indice di rischio	Corrosione	Direzione X	Direzione Y
IR _a	Bassa/Media	0.394	0.394
	Alta	0.336 (-14.72%)	0.336 (-14.72%)
IR _t	Bassa/Media	0.392	0.392
	Alta	0.328 (-16.33%)	0.328 (-16.33%)

6.2.3. Degrado del viadotto a 75 anni

Per iniziare, in Tabella 6.14 vengono riportati gli effetti della corrosione sul diametro e deformazione ultima a rottura per lo scenario temporale considerato in base al livello di corrosione.

Tabella 6.14 – Effetti della corrosione su diametro e deformazione ultima a rottura delle armature

Scenario Temporale - 75 anni							
Corrosione Bassa							
	Ø ₀	Ø _t	Ø _{com}	ε _{su}	Ψ	ε _{su, corr}	ε _{su, rid}
Armatura Longitudinale	18	17.86	18	0.13	1.58	0.126	0.020
Armatura Trasversale	10	9.86	-	0.13	2.83	0.123	0.020
Corrosione Media							
	Ø ₀	Ø _t	Ø _{com}	ε _{su}	Ψ	ε _{su, corr}	ε _{su, rid}
Armatura Longitudinale	18	16.57	16	0.13	15.23	0.091	0.020
Armatura Trasversale	10	8.57	-	0.13	26.50	0.063	0.020
Corrosione Alta							
	Ø ₀	Ø _t	Ø _{com}	ε _{su}	Ψ	ε _{su, corr}	ε _{su, rid}
Armatura Longitudinale	18	10.87	10	0.13	63.56	-0.031	0.011
Armatura Trasversale	10	2.87	-	0.13	91.79	-0.103	0.011

Diagrammi Momento-Curvatura

In Figura 6.11 si riportano i diagrammi Momento - Curvatura caratteristici della sezione delle pile del viadotto. All'aumentare del fenomeno corrosivo, l'evoluzione dei diagrammi M-χ della sezione delle pile mostra una chiara riduzione in

termini di momento ed una differenza in termini di duttilità poiché la deformazione ultima dell'acciaio passa dal 2% al 1.1% per il livello di corrosione elevato.

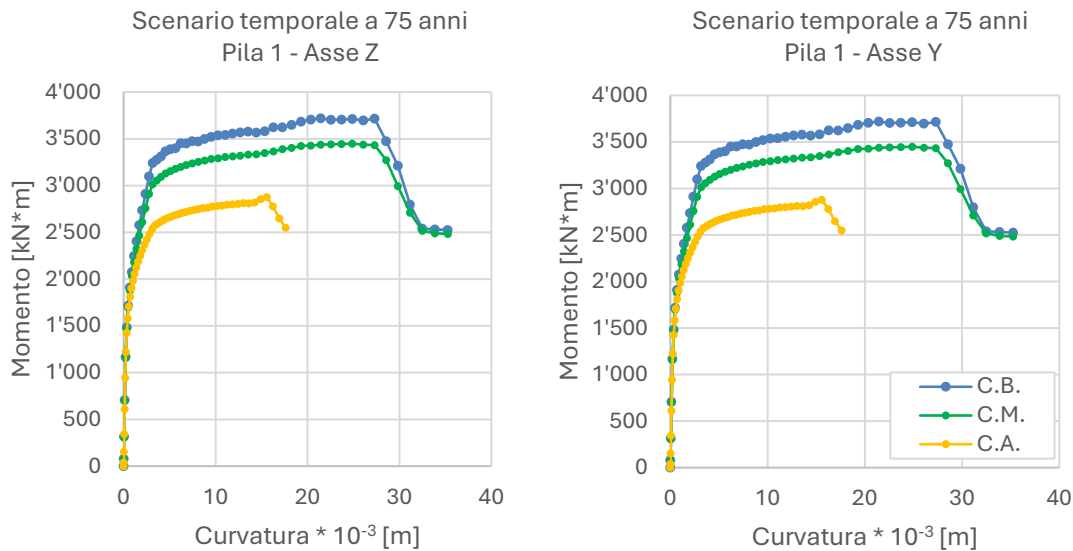


Figura 6.11 – Grafici Momento-Curvatura delle sezioni per gli assi principali

Momenti di inerzia

Disponendo dei diagrammi $M-\chi$, si determinano i momenti di inerzia delle sezioni per ogni scenario di degrado. Come è possibile notare da Tabella 6.15, tali quantità diminuiscono all’aumentare del degrado considerato.

Tabella 6.15 – Momento di inerzia efficace per scenario di corrosione

Momento di Inerzia efficace [m ⁴]				
Pila	Asse	Corrosione bassa	Corrosione media	Corrosione alta
PILA 1 - PILA 2	Z	0.0555	0.0551 (-0.75%)	0.0476 (-14.29%)
	Y	1.7744	1.7681 (-0.35%)	1.5692 (-11.56%)

6.2.3.1. Analisi modale

La riduzione del momento di inerzia comporta una riduzione della rigidezza del sistema, che si traduce in un aumento del periodo proprio della struttura. L’incremento dei periodi naturali di vibrazione si ha soprattutto per i modi principali, ossia quei modi che mobilitano la maggior parte della massa partecipante. Si riportano di seguito i risultati dell’analisi modale, in termini di periodi e masse partecipanti dei singoli modi. In Tabella 6.16 vengono rappresentati i risultati relativi ad un livello di corrosione bassa, in Tabella 6.17 i valori ottenuti nel caso di corrosione media, infine in Tabella 6.18 i valori ottenuti nel caso di corrosione alta.

Tabella 6.16 – Analisi modale per scenario di corrosione bassa

Scenario Temporale a 75 anni - Corrosione bassa						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	6.80	0.92	92.27	92.27	3.88	3.88
2	7.87	0.80	3.82	96.10	90.53	94.41
3	8.78	0.72	0.02	96.11	0.05	94.45
4	22.94	0.27	0.00	96.11	0.00	94.45
5	32.60	0.19	0.00	96.11	0.00	94.45
6	35.87	0.18	0.00	96.11	0.01	94.46
7	38.39	0.16	0.00	96.11	0.00	94.46
8	60.51	0.10	0.95	97.06	0.04	94.50
9	73.67	0.09	0.00	97.06	0.00	94.50
10	81.40	0.08	0.00	97.07	0.00	94.50
11	88.97	0.07	0.98	98.05	0.04	94.54
12	97.41	0.06	0.00	98.05	0.00	94.54
13	98.04	0.06	0.00	98.05	0.00	94.54
14	122.67	0.05	0.00	98.05	0.00	94.54
15	144.02	0.04	0.00	98.05	0.00	94.54
16	187.28	0.03	0.00	98.05	0.00	94.54
17	196.12	0.03	0.00	98.05	0.00	94.54
18	204.91	0.03	0.00	98.05	0.00	94.54
19	235.15	0.03	0.09	98.14	2.31	96.85
20	241.85	0.03	0.00	98.14	0.01	96.87

Tabella 6.17 - Analisi modale per scenario di corrosione media

Scenario Temporale a 75 anni - Corrosione media						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	6.80	0.92	92.28	92.28	3.88	3.88
2	7.87	0.80	3.82	96.10	90.53	94.41
3	8.78	0.72	0.02	96.12	0.05	94.45
4	22.94	0.27	0.00	96.12	0.00	94.45
5	32.60	0.19	0.00	96.12	0.00	94.45
6	35.87	0.18	0.00	96.12	0.01	94.46
7	38.39	0.16	0.00	96.12	0.00	94.46
8	60.41	0.10	0.95	97.07	0.04	94.50
9	73.67	0.09	0.00	97.07	0.00	94.50
10	81.40	0.08	0.00	97.07	0.00	94.50
11	88.78	0.07	0.98	98.05	0.04	94.54
12	97.41	0.06	0.00	98.05	0.00	94.54
13	98.04	0.06	0.00	98.05	0.00	94.54
14	122.67	0.05	0.00	98.05	0.00	94.54
15	144.02	0.04	0.00	98.05	0.00	94.54
16	187.28	0.03	0.00	98.05	0.00	94.54
17	196.12	0.03	0.00	98.05	0.00	94.54

Scenario Temporale a 75 anni - Corrosione media						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
18	204.91	0.03	0.00	98.05	0.00	94.54
19	235.40	0.03	0.09	98.14	2.31	96.85
20	241.85	0.03	0.00	98.14	0.02	96.87

Tabella 6.18 - Analisi modale per scenario di corrosione alta

Scenario Temporale a 75 anni - Corrosione alta						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	6.71	0.94	92.41	92.41	3.87	3.87
2	7.86	0.80	3.81	96.22	90.55	94.42
3	8.77	0.72	0.02	96.24	0.05	94.47
4	22.94	0.27	0.00	96.24	0.00	94.47
5	32.60	0.19	0.00	96.24	0.00	94.47
6	35.87	0.18	0.00	96.24	0.01	94.48
7	38.39	0.16	0.00	96.24	0.00	94.48
8	58.52	0.11	0.89	97.13	0.03	94.52
9	73.67	0.09	0.00	97.13	0.00	94.52
10	81.38	0.08	0.01	97.14	0.00	94.52
11	85.07	0.07	0.93	98.07	0.04	94.55
12	97.41	0.06	0.00	98.07	0.00	94.55
13	98.04	0.06	0.00	98.07	0.00	94.55
14	122.67	0.05	0.00	98.07	0.00	94.55
15	144.02	0.04	0.00	98.07	0.00	94.55
16	187.28	0.03	0.00	98.07	0.00	94.55
17	196.12	0.03	0.00	98.07	0.00	94.55
18	204.91	0.03	0.00	98.07	0.00	94.55
19	226.65	0.03	0.09	98.16	2.33	96.88
20	241.82	0.03	0.00	98.16	0.00	96.88

La differenza di periodo risulta minima. In verde sono stati evidenziati i modi che risultano contribuenti per l'analisi *Pushover*, ovvero quelli che movimentano almeno l'1% di massa in una delle due direzioni.

6.2.3.2. Meccanismo duttile

È possibile quindi analizzare le caratteristiche delle cerniere plastiche, posizionate analogamente a quanto enunciato al paragrafo 6.2.1.2. Si considera inizialmente il meccanismo di rottura a rotazione.

Analisi Pushover

Le curve di capacità riportate in Figura 6.12 vengono costruite seguendo il procedimento spiegato nel paragrafo 6.2.1.2. Esse presentano un tratto iniziale

lineare, cui segue un secondo tratto con limite di rottura di coordinate decrescenti all'aumentare del fenomeno corrosivo.

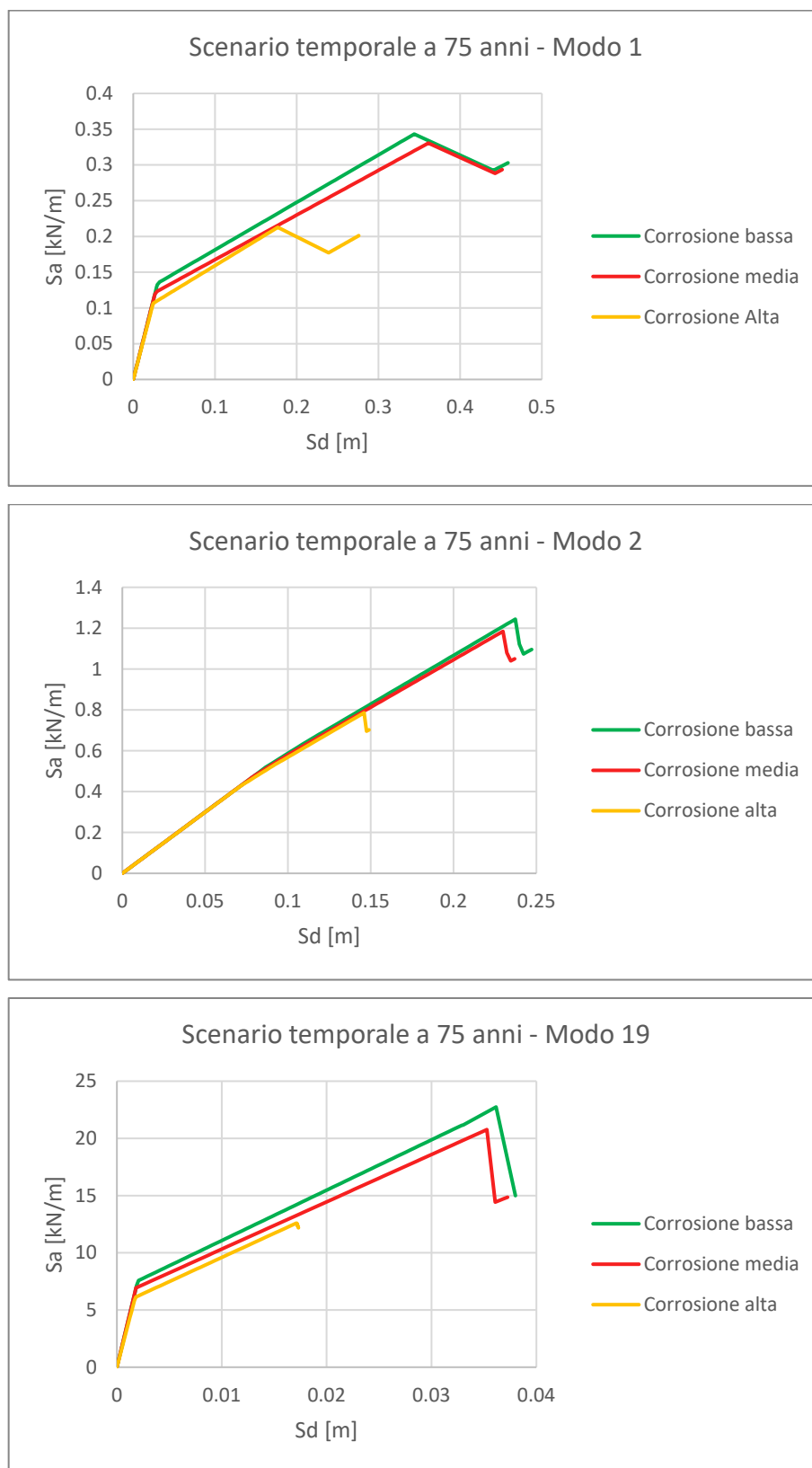


Figura 6.12 – Grafici ADRS dei modi contribuenti all'analisi Pushover a diversi scenari di corrosione

Analisi Pushover modale MPA

Per completare la verifica di vulnerabilità, è stata effettuata l'analisi MPA, seguendo quanto presentato nel Paragrafo 5.3.4. I risultati possono essere espressi in termini di indici di rischio di accelerazione e tempo di ritorno (Tabella 6.19).

Tabella 6.19 – Indici di rischio a diversi scenari di corrosione

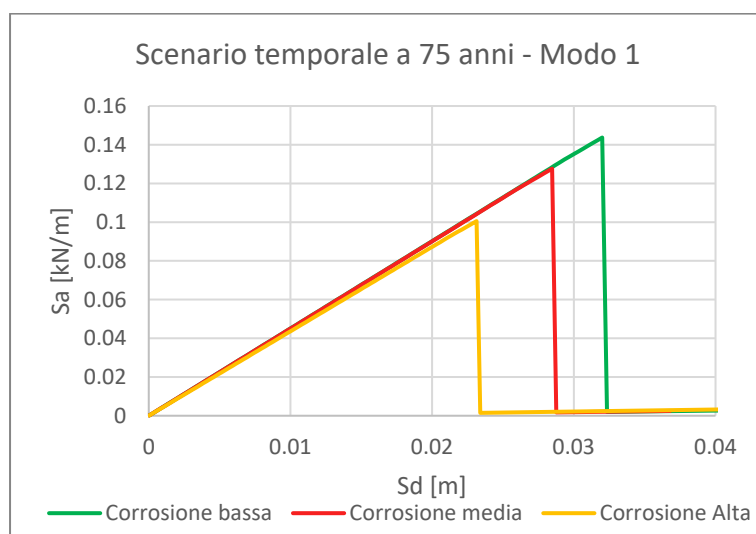
Scenario temporale a 75 anni - Meccanismo duttile			
Indice di rischio	Corrosione	Direzione X	Direzione Y
IR _a	Bassa	3.367	3.367
	Media	3.275 (-2.73%)	3.275 (-2.73%)
	Alta	1.606 (-52.30%)	1.606 (-52.30%)
IR _t	Bassa	4.894	4.894
	Media	4.72 (-3.56%)	4.72 (-3.56%)
	Alta	4.174 (-14.71%)	4.174 (-14.71%)

6.2.3.3. Meccanismo fragile

Si procede per il meccanismo fragile in modo analogo a quanto svolto per il meccanismo a rotazione. In particolare, si utilizza un secondo modello FEM in cui vengono modificate le caratteristiche delle cerniere plastiche, in accordo con quanto visto nel Paragrafo 5.3.4.1.

Analisi Pushover

Le cerniere vengono nuovamente poste alla base delle pile. Si ripete l'analisi dinamica lineare (*Pushover*) con le stesse modalità seguite per il meccanismo duttile. Nella Figura 6.13 viene mostrato il confronto a taglio tra i tre scenari di corrosione. L'andamento delle curve risulta essere lineare fino al raggiungimento del punto di rottura, con accelerazione spettrale che diminuisce all'aumentare della corrosione.



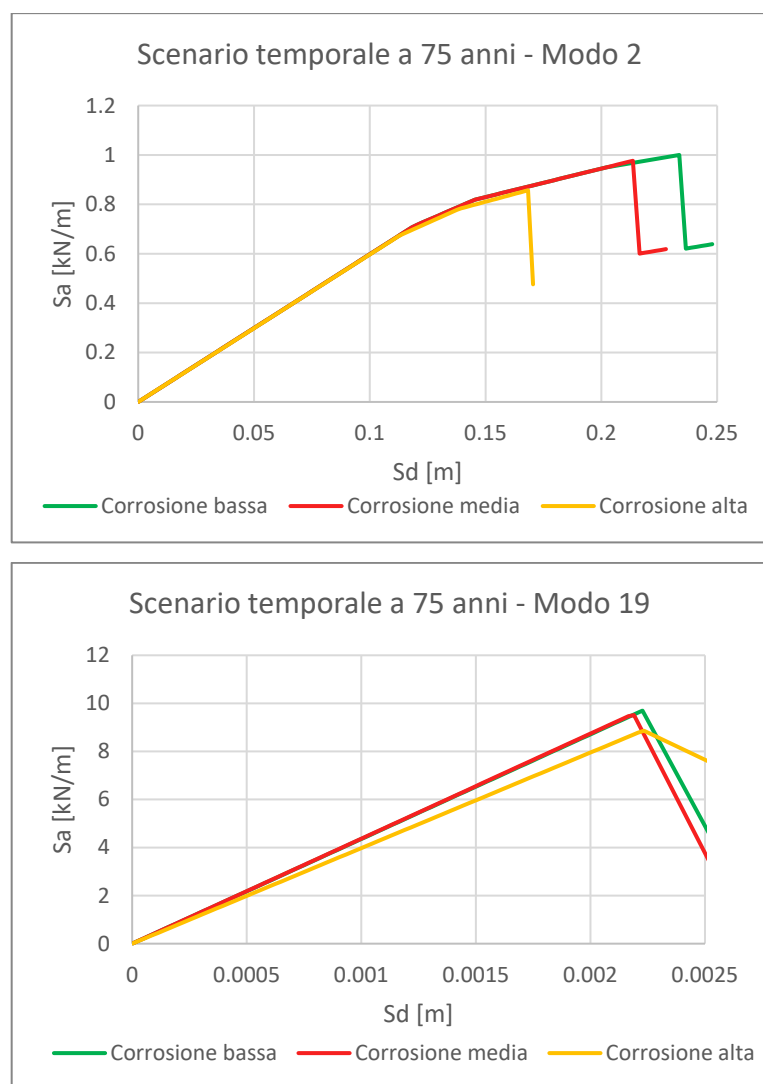


Figura 6.13 - Grafici ADRS dei modi contribuenti all'analisi Pushover a diversi scenari di corrosione

Analisi Pushover modale MPA

Successivamente è stato possibile procedere con l'analisi Pushover modale. I risultati per il meccanismo di rottura a taglio vengono mostrati in Tabella 6.20.

Tabella 6.20 - Indici di rischio a diversi scenari di corrosione

Scenario temporale a 75 anni - Meccanismo fragile			
Indice di rischio	Corrosione	Direzione X	Direzione Y
IR_a	Bassa	0.394	0.394
	Media	0.364 (-7.61%)	0.364 (-7.61%)
	Alta	0.31 (-21.32%)	0.31 (-21.32%)
IR_t	Bassa	0.392	0.392
	Media	0.359 (-8.42%)	0.359 (-8.42%)
	Alta	0.302 (-22.96%)	0.302 (-22.96%)

6.2.4. Analisi dei risultati

I valori degli indici di rischio sono stati normalizzati e confrontati per i diversi scenari di tempo e livello di corrosione. L’operazione è stata svolta per entrambe le tipologie di meccanismi di rottura e in entrambe le direzioni.

Si riporta l’andamento dei soli indici di rischio in accelerazione, nonostante il confronto sia stato effettuato anche per gli indici relativi al tempo di ritorno, poiché normalizzando i valori si ottengono risultati simili. I grafici in Figura 6.14 mostrano la progressiva riduzione degli indici di rischio per i due meccanismi di rottura analizzati e sono stati costruiti sui valori numerici riportati in Tabella 6.21 e Tabella 6.22 e sono validi per entrambe le direzioni in quanto caratterizzate dagli stessi risultati. Il decadimento dell’indice di rischio risulta particolarmente critico nel caso di meccanismo duttile e condizione di degrado elevato. Si evidenzia quindi l’importanza di una valida attività di monitoraggio e contenimento del degrado dei viadotti nel tempo.

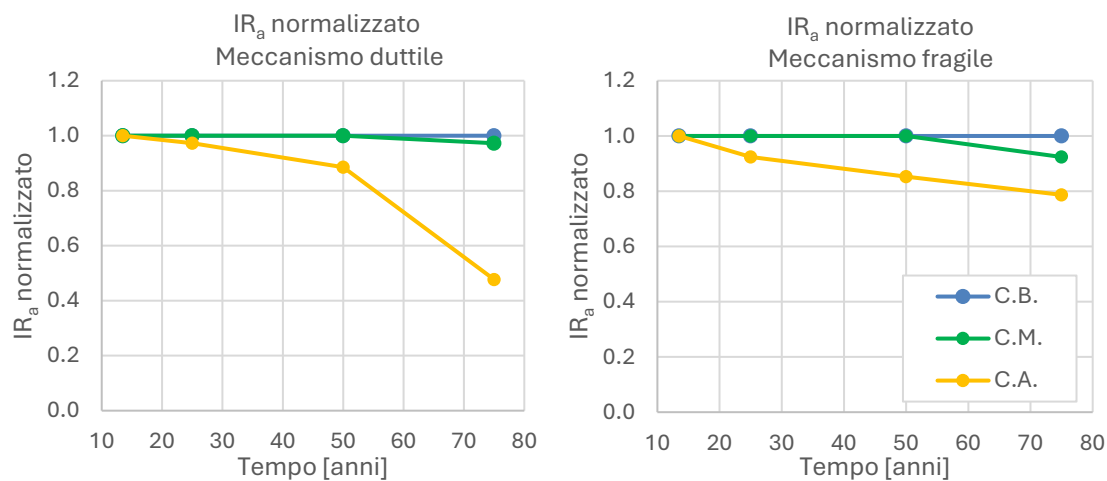


Figura 6.14 – Decadimento dell’indice di rischio
Tabella 6.21 – Resoconto dei valori di indice di rischio per meccanismo di rottura duttile

IRa - Meccanismo duttile			
Tempo [anni]	Corrosione Bassa	Corrosione Media	Corrosione Alta
13.5	3.367	3.367	3.367
25	3.367	3.367	3.275
50	3.367	3.367	2.981
75	3.367	3.275	1.606
IRa normalizzato - Meccanismo duttile			
Tempo [anni]	Corrosione Bassa	Corrosione Media	Corrosione Alta
13.5	1.000	1.000	1.000
25	1.000	1.000	0.973
50	1.000	1.000	0.885
75	1.000	0.973	0.477

Tabella 6.22 - Resoconto dei valori di indice di rischio per meccanismo di rottura fragile

IR _a - Meccanismo fragile			
Tempo [anni]	Corrosione Bassa	Corrosione Media	Corrosione Alta
13.5	0.394	0.394	0.394
25	0.394	0.394	0.364
50	0.394	0.394	0.336
75	0.394	0.364	0.310
IR _a normalizzato - Meccanismo fragile			
Tempo [anni]	Corrosione Bassa	Corrosione Media	Corrosione Alta
13.5	1.000	1.000	1.000
25	1.000	1.000	0.924
50	1.000	1.000	0.853
75	1.000	0.924	0.787

6.3. Analisi per configurazioni di sezione

Riprendendo i concetti chiave di quanto già esposto nell'introduzione del Capitolo 6 sul secondo approccio all'analisi, verrà effettuata l'analisi della vulnerabilità della struttura per le principali configurazioni di sezione diversificate dal diametro commerciale delle armature. Successivamente verrà identificato lo scenario temporale corrispondente alla configurazione della sezione per i tre livelli di corrosione. Infine, verranno presentati i grafici di decadimento dell'indice di rischio e si effettuerà un confronto dei risultati rispetto al primo approccio adottato nel paragrafo 6.2.

6.3.1. Definizione delle configurazioni

Di seguito vengono riportati i diametri e la deformazione a rottura caratteristiche delle cinque configurazioni di sezione analizzate (Tabella 6.23). È importante specificare che questo metodo non necessita di alcuna approssimazione delle armature dei diametri, dunque i risultati possono essere considerati più attendibili. La formulazione utilizzata per il calcolo del decadimento della deformazione ultima delle barre d'armatura, riportata al Paragrafo 4.4, ammette valori negativi e minori del valore di 0.01, ovvero la deformazione di snervamento, anche se irrealistici. Per questo motivo i valori minori di 0.01 vengono arrotondati a 0.011.

Tabella 6.23 – Diametri e deformazione ultima a rottura delle armature per configurazione di sezione

Armatura Longitudinale					
N° Configurazione	$\varnothing_t$	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
1 – D18/D10	18	0.13	0.000	0.13	0.02
2 – D16/D8	16	0.13	20.98765	0.076796	0.02
3 – D14/D6	14	0.13	39.50617	0.029852	0.02
4 – D12/D4	12	0.13	55.55556	-0.01083	0.011
5 – D10/D2	10	0.13	69.1358	-0.04526	0.011
Armatura Trasversale					
N° Configurazione	$\varnothing_t$	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
1 – D18/D10	10	0.13	0.00	0.13	0.02
2 – D16/D8	8	0.13	36.00	0.03874	0.02
3 – D14/D6	6	0.13	64.00	-0.03224	0.011
4 – D12/D4	4	0.13	84.00	-0.08294	0.011
5 – D10/D2	2	0.13	96.00	-0.11336	0.011

Diagrammi Momento-Curvatura

Il primo passo è stato quello di modificare il diametro delle barre longitudinali per ogni configurazione e di ricavare i nuovi diagrammi Momento – Curvatura (Figura 6.15). In questo caso è possibile notare che la corrosione provoca una visibile perdita di resistenza meccanica.

Momenti di inerzia

Si procede quindi determinando i momenti di inerzia delle sezioni. Il confronto tra le diverse configurazioni viene mostrato in Tabella 6.24. È evidente come si abbia una diminuzione delle inerzie delle pile al diminuire del diametro delle armature.

Tabella 6.24 – Momenti di inerzia efficace per configurazione di sezione

Momento di Inerzia efficace [m ⁴]						
Pila	Asse	1 – D18	2 – D16	3 – D14	4 – D12	5 – D10
PILA 1 PILA 2	Z	0.0555	0.0551 (-0.75%)	0.0511 (-8.04%)	0.0492 (-11.45%)	0.0476 (-14.29%)
	Y	1.7744	1.7681 (-0.35%)	1.6553 (-6.71%)	1.6087 (-9.34%)	1.5692 (-11.56%)

Nei grafici seguenti si sono indicate le diverse configurazioni in base al diametro delle armature longitudinali per facilitare la comprensione dei risultati:

- Configurazione 1: D18/D10
- Configurazione 2: D16/D8
- Configurazione 3: D14/D6
- Configurazione 4: D12/D4
- Configurazione 5: D10/D2

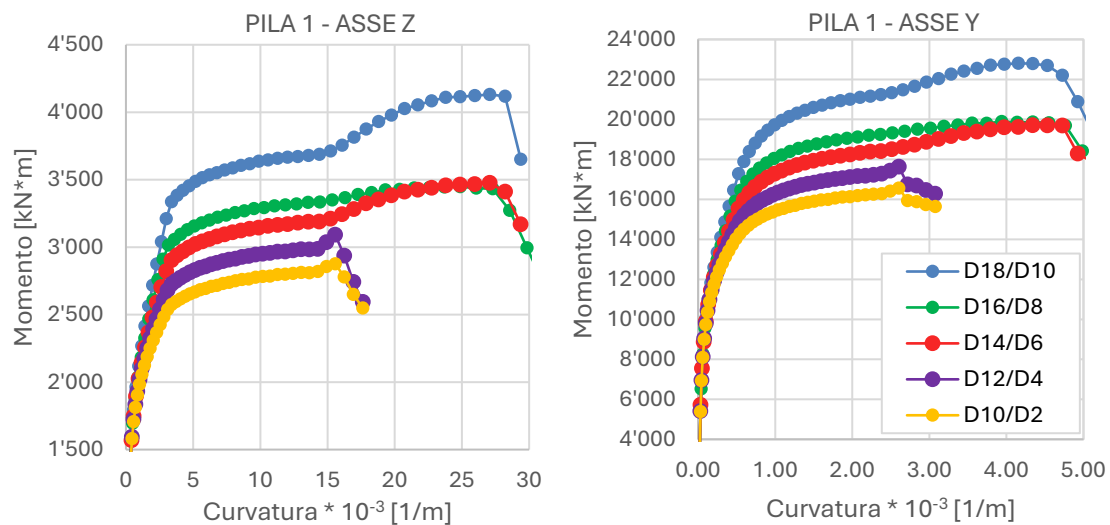


Figura 6.15 - Diagramma Momento – Curvatura per configurazione di sezione, asse y

6.3.2. Analisi modale

In questo paragrafo si riportano i periodi e le masse partecipanti che derivano dall'analisi modale delle cinque configurazioni. La diminuzione dei momenti di inerzia provoca una diminuzione della rigidezza della struttura, che si manifesta tramite un aumento del suo periodo come evidenziato in Figura 6.16.

Tabella 6.25 – Analisi modale per configurazione 1

Configurazione 1 – D18/D10						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	6.8005	0.9239	92.27	92.27	3.88	3.88
2	7.8706	0.7983	3.82	96.10	90.53	94.41
3	8.7774	0.7158	0.02	96.11	0.05	94.45
4	22.9446	0.2738	0.00	96.11	0.00	94.45
5	32.6003	0.1927	0.00	96.11	0.00	94.45
6	35.8682	0.1752	0.00	96.11	0.01	94.46
7	38.3938	0.1637	0.00	96.11	0.00	94.46
8	60.5129	0.1038	0.95	97.06	0.04	94.50
9	73.6695	0.0853	0.00	97.06	0.00	94.50
10	81.3979	0.0772	0.00	97.07	0.00	94.50
11	88.9744	0.0706	0.98	98.05	0.04	94.54
12	97.4094	0.0645	0.00	98.05	0.00	94.54
13	98.0448	0.0641	0.00	98.05	0.00	94.54
14	122.6734	0.0512	0.00	98.05	0.00	94.54
15	144.0246	0.0436	0.00	98.05	0.00	94.54
16	187.2841	0.0335	0.00	98.05	0.00	94.54

Configurazione 1 – D18/D10						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
17	196.1234	0.0320	0.00	98.05	0.00	94.54
18	204.9107	0.0307	0.00	98.05	0.00	94.54
19	235.1478	0.0267	0.09	98.14	2.31	96.85
20	241.8490	0.0260	0.00	98.14	0.01	96.87

Tabella 6.26 – Analisi modale per configurazione 2

Configurazione 2 – D16/D8						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	6.7960	0.9245	92.28	92.28	3.88	3.88
2	7.8709	0.7983	3.82	96.10	90.53	94.41
3	8.7774	0.7158	0.02	96.12	0.05	94.45
4	22.9446	0.2738	0.00	96.12	0.00	94.45
5	32.6003	0.1927	0.00	96.12	0.00	94.45
6	35.8682	0.1752	0.00	96.12	0.01	94.46
7	38.3938	0.1637	0.00	96.12	0.00	94.46
8	60.4115	0.1040	0.95	97.07	0.04	94.50
9	73.6693	0.0853	0.00	97.07	0.00	94.50
10	81.3975	0.0772	0.00	97.07	0.00	94.50
11	88.7762	0.0708	0.98	98.05	0.04	94.54
12	97.4093	0.0645	0.00	98.05	0.00	94.54
13	98.0447	0.0641	0.00	98.05	0.00	94.54
14	122.6733	0.0512	0.00	98.05	0.00	94.54
15	144.0246	0.0436	0.00	98.05	0.00	94.54
16	187.2841	0.0335	0.00	98.05	0.00	94.54
17	196.1234	0.0320	0.00	98.05	0.00	94.54
18	204.9108	0.0307	0.00	98.05	0.00	94.54
19	235.4018	0.0267	0.09	98.14	2.31	96.85
20	241.8510	0.0260	0.00	98.14	0.02	96.87

Tabella 6.27 – Analisi modale per configurazione 3

Configurazione 3 – D14/D6						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	6.7503	0.9308	92.35	92.35	3.87	3.87
2	7.8662	0.7988	3.82	96.16	90.54	94.41
3	8.7754	0.7160	0.02	96.18	0.05	94.46
4	22.9427	0.2739	0.00	96.18	0.00	94.46
5	32.5993	0.1927	0.00	96.18	0.00	94.46
6	35.8677	0.1752	0.00	96.18	0.01	94.47
7	38.3937	0.1637	0.00	96.18	0.00	94.47

6.3. Analisi per configurazioni di sezione

8	59.4111	0.1058	0.92	97.10	0.04	94.51
9	73.6679	0.0853	0.00	97.10	0.00	94.51
10	81.3912	0.0772	0.01	97.10	0.00	94.51
11	86.8149	0.0724	0.96	98.06	0.04	94.55
12	97.4088	0.0645	0.00	98.06	0.00	94.55
13	98.0438	0.0641	0.00	98.06	0.00	94.55
14	122.6722	0.0512	0.00	98.06	0.00	94.55
15	144.0244	0.0436	0.00	98.06	0.00	94.55
16	187.2841	0.0335	0.00	98.06	0.00	94.55
17	196.1234	0.0320	0.00	98.06	0.00	94.55
18	204.9100	0.0307	0.00	98.06	0.00	94.55
19	230.4420	0.0273	0.09	98.15	2.32	96.87
20	241.8273	0.0260	0.00	98.15	0.00	96.87

Tabella 6.28 – Analisi modale per configurazione 4

Configurazione 4 – D12/D4						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	6.7271	0.9340	92.38	92.38	3.87	3.87
2	7.8642	0.7990	3.82	96.19	90.54	94.42
3	8.7745	0.7161	0.02	96.21	0.05	94.47
4	22.9419	0.2739	0.00	96.21	0.00	94.47
5	32.5989	0.1927	0.00	96.21	0.00	94.47
6	35.8674	0.1752	0.00	96.21	0.01	94.48
7	38.3936	0.1637	0.00	96.21	0.00	94.48
8	58.9295	0.1066	0.90	97.11	0.04	94.51
9	73.6671	0.0853	0.00	97.11	0.00	94.51
10	81.3865	0.0772	0.01	97.12	0.00	94.51
11	85.8681	0.0732	0.94	98.06	0.04	94.55
12	97.4086	0.0645	0.00	98.06	0.00	94.55
13	98.0434	0.0641	0.00	98.07	0.00	94.55
14	122.6718	0.0512	0.00	98.07	0.00	94.55
15	144.0244	0.0436	0.00	98.07	0.00	94.55
16	187.2841	0.0335	0.00	98.07	0.00	94.55
17	196.1233	0.0320	0.00	98.07	0.00	94.55
18	204.9096	0.0307	0.00	98.07	0.00	94.55
19	228.4112	0.0275	0.09	98.16	2.33	96.87
20	241.8226	0.0260	0.00	98.16	0.00	96.88

Tabella 6.29 – Analisi modale per configurazione 5

Configurazione 5 – D10/D2						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	6.7069	0.9368	92.41	92.41	3.87	3.87
2	7.8624	0.7991	3.81	96.22	90.55	94.42

Configurazione 5 – D10/D2						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
3	8.7737	0.7161	0.02	96.24	0.05	94.47
4	22.9412	0.2739	0.00	96.24	0.00	94.47
5	32.5985	0.1927	0.00	96.24	0.00	94.47
6	35.8672	0.1752	0.00	96.24	0.01	94.48
7	38.3936	0.1637	0.00	96.24	0.00	94.48
8	58.5214	0.1074	0.89	97.13	0.03	94.52
9	73.6663	0.0853	0.00	97.13	0.00	94.52
10	81.3807	0.0772	0.01	97.14	0.00	94.52
11	85.0654	0.0739	0.93	98.07	0.04	94.55
12	97.4084	0.0645	0.00	98.07	0.00	94.55
13	98.0432	0.0641	0.00	98.07	0.00	94.55
14	122.6714	0.0512	0.00	98.07	0.00	94.55
15	144.0243	0.0436	0.00	98.07	0.00	94.55
16	187.2841	0.0335	0.00	98.07	0.00	94.55
17	196.1233	0.0320	0.00	98.07	0.00	94.55
18	204.9092	0.0307	0.00	98.07	0.00	94.55
19	226.6487	0.0277	0.09	98.16	2.33	96.88
20	241.8195	0.0260	0.00	98.16	0.00	96.88

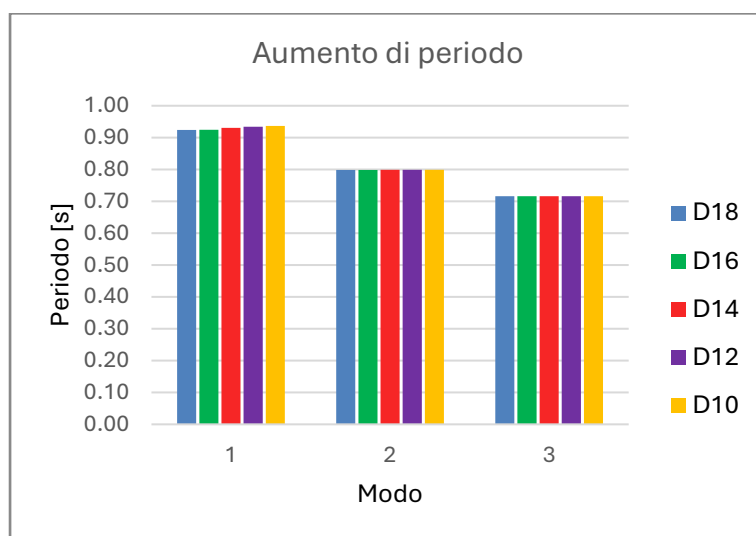


Figura 6.16 – Aumento del periodo per configurazione di sezione

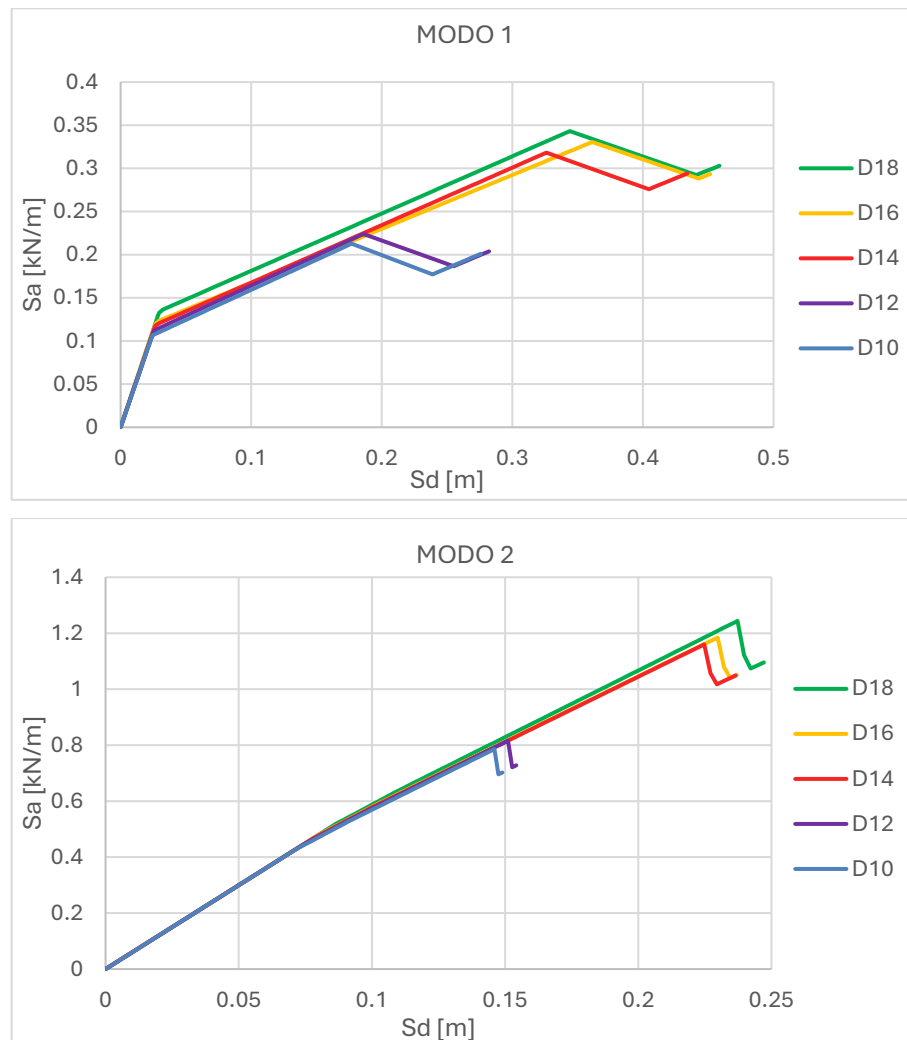
L'aumento di periodo al variare della configurazione risulta poco rilevante e si può notare solo analizzando il primo modo.

6.3.3. Meccanismo duttile

Una volta definito il legame costitutivo delle cerniere plastiche a rotazione, è stato possibile eseguire l'analisi per le cinque configurazioni. Le cerniere plastiche sono state posizionate come visto al paragrafo 6.2.1.2.

Analisi Pushover

Nella Figura 6.17 vengono confrontate le curve di capacità nel piano ADRS delle cinque configurazioni. Tali curve rappresentano la capacità sismica della struttura in termini di accelerazioni e spostamenti spettrali. Il confronto viene effettuato per tutti i modi che presentano una massa partecipante superiore all'1%. Analizzando le curve, è evidente l'ulteriore riduzione in termini di resistenza, a causa della corrosione delle barre.



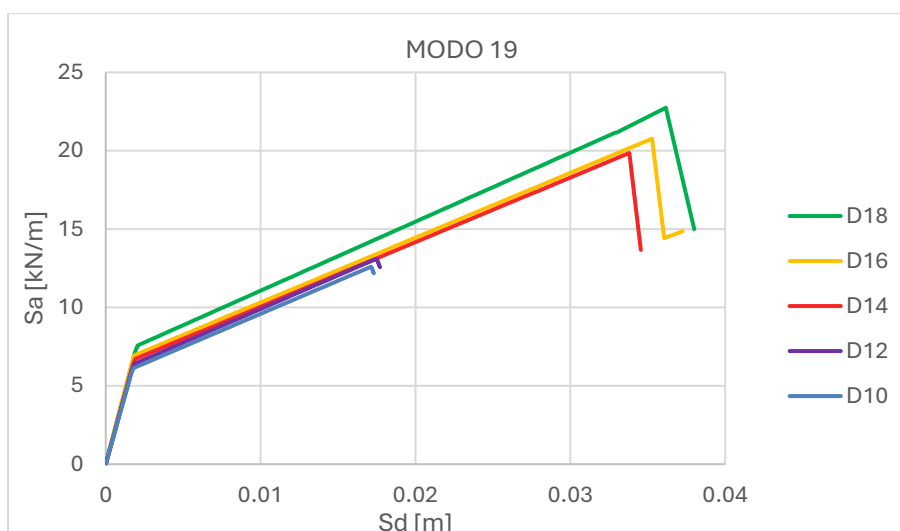


Figura 6.17 – Grafici ADRS dei modi contribuenti per meccanismo duttile a diverse configurazioni di sezione

Analisi Pushover modale MPA

Si procede quindi con l'analisi Pushover modale del viadotto. I risultati, riportati in Tabella 6.30, mostrano un evidente decremento degli indici di rischio soprattutto nel passaggio dalla terza alla quarta configurazione. Questo avviene poiché vi è un decadimento della duttilità dovuto al decremento della deformazione a rottura da 2% a 1.1% oltre che alla riduzione del diametro.

Tabella 6.30 – Indici di rischio per meccanismo di rottura duttile a diverse configurazioni di sezione

Meccanismo duttile			
Indice di rischio	Configurazione	Direzione X	Direzione Y
IR _a	1 - D18/D10	3.367	3.367
	2 - D16/D8	3.275 (-2.73%)	3.275 (-2.73%)
	3 - D14/D6	2.981 (-11.46%)	2.981 (-11.46%)
	4 - D12/D4	1.717 (-49.01%)	1.717 (-49.01%)
	5 - D10/D2	1.606 (-52.30%)	1.606 (-52.30%)
IR _t	1 - D18/D10	4.894	4.894
	2 - D16/D8	4.72 (-3.56%)	4.72 (-3.56%)
	3 - D14/D6	4.174 (-14.71%)	4.174 (-14.71%)
	4 - D12/D4	2.027 (-58.58%)	2.027 (-58.58%)
	5 - D10/D2	1.856 (-62.08%)	1.856 (-62.08%)

6.3.4. Meccanismo fragile

Una volta definito il legame costitutivo delle cerniere plastiche a taglio, è stato possibile eseguire l'analisi per le cinque configurazioni.

Analisi Pushover

Nella Figura 6.18 vengono confrontate le curve di capacità nel piano ADRS delle cinque configurazioni. Tali curve rappresentano la capacità sismica della struttura in termini di accelerazioni e spostamenti spettrali. Il confronto viene effettuato per tutti i modi che presentano una massa partecipante superiore all'1%. Analizzando le curve, è evidente l'ulteriore riduzione in termini di resistenza, a causa della corrosione delle barre.

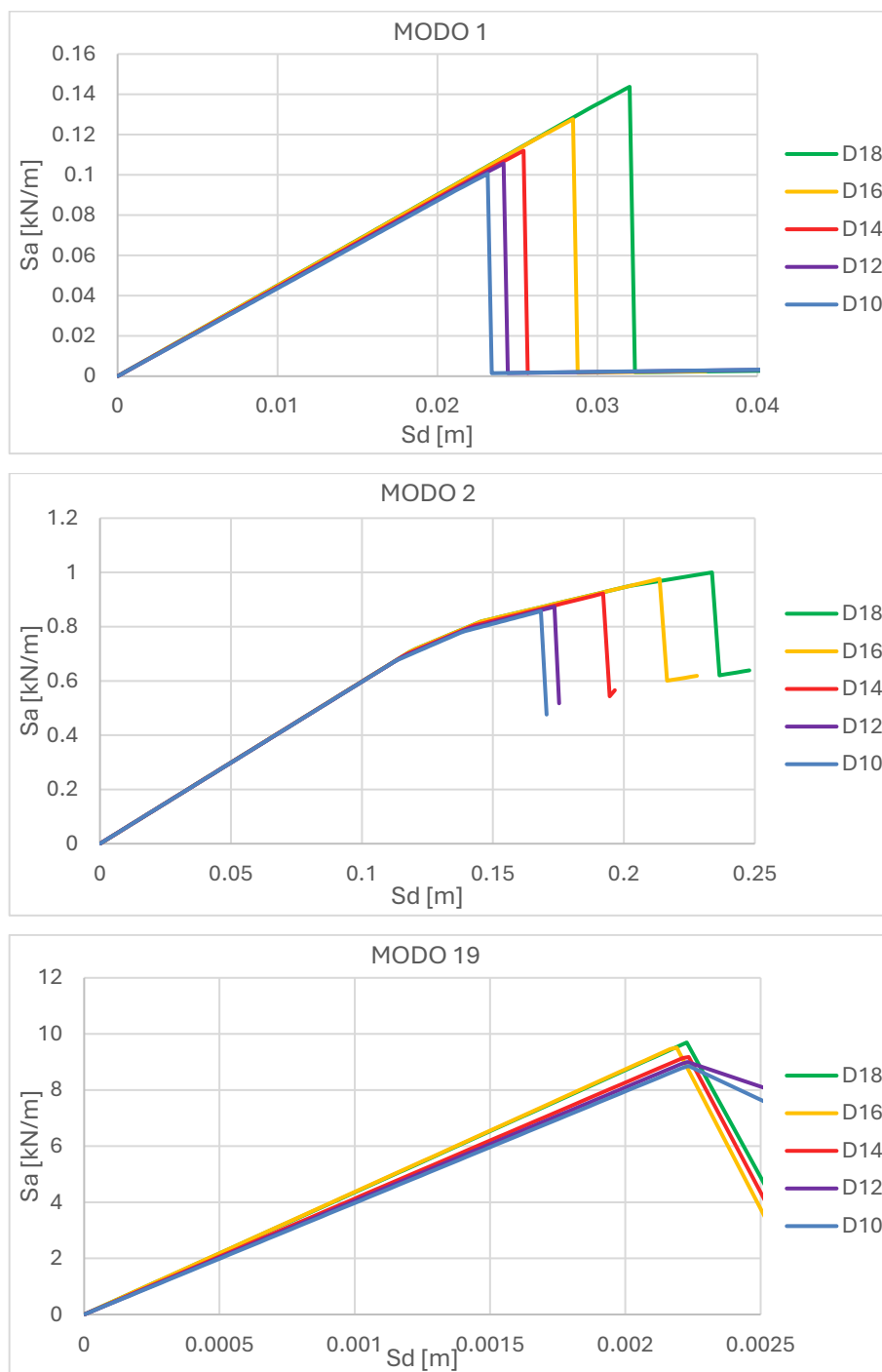


Figura 6.18 - Grafici ADRS dei modi contribuenti per meccanismo fragile a diverse configurazioni di sezione

Analisi Pushover Modale MPA

Si procede quindi con l'analisi Pushover modale del viadotto. I risultati, riportati in Tabella 6.31, mostrano un decremento degli indici di rischio costante e meno evidente rispetto al meccanismo di rottura duttile. Questo risultato è anche dovuto ad i valori critici anche nella configurazione iniziale che limitano un decadimento degli indici di rischio eccessivo.

Tabella 6.31 - Indici di rischio per meccanismo di rottura fragile a diverse configurazioni di sezione

Meccanismo fragile			
Indice di rischio	Configurazione	Direzione X	Direzione Y
IR _a	1 - D18/D10	0.394	0.394
	2 - D16/D8	0.364 (-7.61%)	0.364 (-7.61%)
	3 - D14/D6	0.336 (-14.72%)	0.336 (-14.72%)
	4 - D12/D4	0.323 (-18.02%)	0.323 (-18.02%)
	5 - D10/D2	0.31 (-21.32%)	0.31 (-21.32%)
IR _t	1 - D18/D10	0.392	0.392
	2 - D16/D8	0.359 (-8.42%)	0.359 (-8.42%)
	3 - D14/D6	0.328 (-16.33%)	0.328 (-16.33%)
	4 - D12/D4	0.316 (-19.39%)	0.316 (-19.39%)
	5 - D10/D2	0.302 (-22.96%)	0.302 (-22.96%)

6.3.5. Analisi dei risultati

Una volta ottenuti gli indici di rischio delle configurazioni si determinano gli scenari temporali associati al raggiungimento di ogni configurazione per ciascun livello di corrosione (Tabella 6.32). Di seguito viene riportata la formulazione utilizzata ed i risultati ottenuti.

$$t = \frac{\phi_0 - \phi_t}{2i_{corr} * k} + t_{in} \quad (6.3)$$

Dove i termini hanno il seguente significato e valore:

- $\phi_0 = 18 \text{ mm}$ è il diametro iniziale della barra;
- $t_{in} = 13.5 \text{ anni}$ è il tempo di innesco della corrosione;
- $k = 0.0116$ rappresenta un fattore di conversione dell'intensità di corrosione [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$] in velocità di corrosione [mm/anno];
- i_{corr} è l'intensità di corrosione ed assume valori differenti in base al livello di corrosione:
 - Corrosione bassa - $i_{corr} = 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$;
 - Corrosione media - $i_{corr} = 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$;
 - Corrosione alta - $i_{corr} = 5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$;

Tabella 6.32 – Scenari temporali per diverse configurazioni di sezione e livello di corrosione

Scenari temporali			
N° Configurazione	$t_{\text{corr. bassa}}$	$t_{\text{corr. media}}$	$t_{\text{corr. alta}}$
-	[anni]	[anni]	[anni]
1 - D18/D10	13.5	13.5	13.5
2 - D16/D8	875.6	99.7	30.7
3 - D14/D6	1737.6	185.9	48
4 - D12/D4	2599.7	272.1	65.2
5 - D10/D2	3461.8	358.3	82.5

Dopo aver determinato gli scenari temporali si può definire l'andamento nel tempo degli indici di rischio per ogni livello di corrosione. Si riporta l'andamento dei soli indici di rischio in accelerazione, nonostante il confronto sia stato effettuato anche per gli indici relativi al tempo di ritorno, poiché normalizzando i valori si ottengono risultati simili. I grafici in Figura 6.19 mostrano la progressiva riduzione degli indici di rischio per i due meccanismi di rottura analizzati e sono stati costruiti sui valori numerici riportati in Tabella 6.30 e Tabella 6.31. I grafici sono validi per entrambe le direzioni in quanto caratterizzate dagli stessi risultati. Il decadimento dell'indice di rischio risulta particolarmente critico nel caso di meccanismo duttile e condizione di degrado elevato.

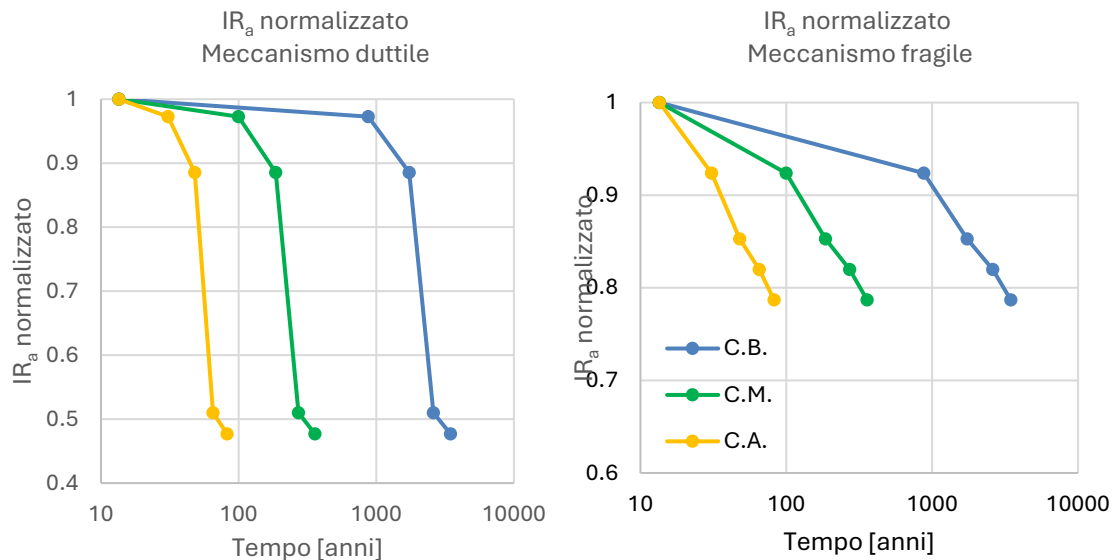


Figura 6.19 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo (scala logaritmica) per livello di corrosione

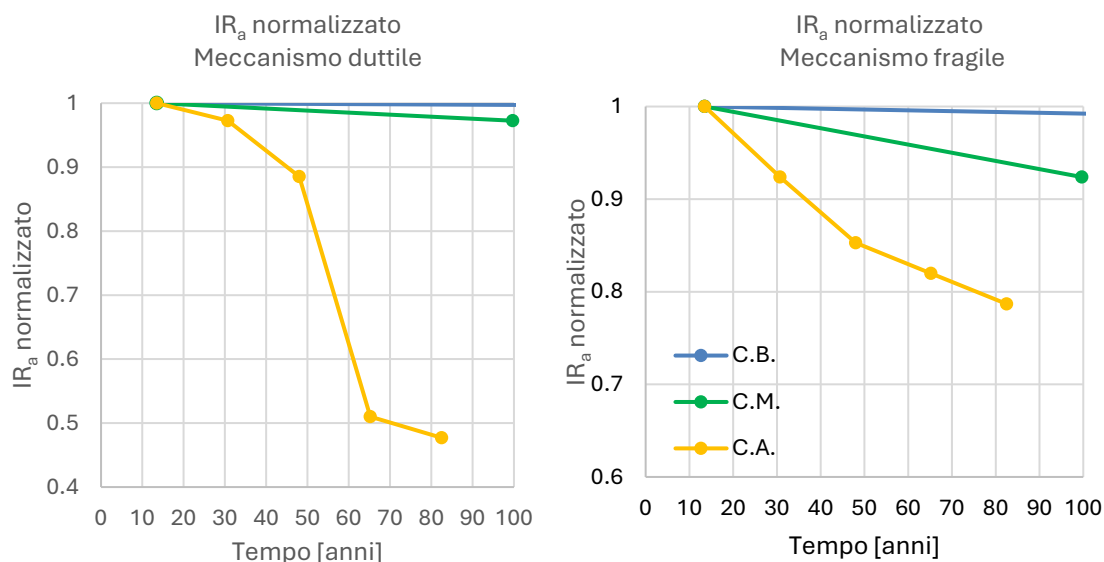


Figura 6.20 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo per livello di corrosione

6.4. Confronto tra i due approcci

Come già spiegato in introduzione al Capitolo 6, il primo approccio garantisce un confronto più immediato tra i vari livelli di corrosione a discapito della precisione dei risultati a seguito dell'arrotondamento dei diametri corrosi ad una misura commerciale. Tramite il secondo approccio invece si ottengono risultati precisi a fronte di un procedimento maggiormente complesso e maggior numero di analisi da effettuare.

In questo paragrafo verrà quantificata la differenza di precisione tra i due metodi attraverso il confronto degli indici di rischio per i tre scenari temporali a 25, 50 e 75 anni per ogni livello di corrosione (Figura 6.21, Figura 6.22). I valori ottenuti attraverso il primo approccio sono stati presentati precedentemente, mentre quelli corrispondenti al secondo approccio verranno ottenuti tramite interpolazione lineare tra i due punti che delimitano lo scenario temporale analizzato. I valori iniziali di indice di rischio a 13.5 anni sono i seguenti:

- IR_a per meccanismo di rottura duttile: 3.367
- IR_t per meccanismo di rottura duttile: 4.894
- IR_a per meccanismo di rottura fragile: 0.394
- IR_t per meccanismo di rottura fragile: 0.392

Meccanismo duttile

Tabella 6.33 – Variazione degli indici di rischio tra i due metodi per meccanismo di rottura duttile a 25 anni

Scenario temporale a 25 anni - Meccanismo duttile			
Indice di rischio	corrosione	1° Metodo	2° Metodo
IR _a	Bassa	3.367	3.366
	Media	3.367	3.355 (-0.33%)
	Alta	3.275 (-2.73%)	3.305 (-1.79%)
IR _t	Bassa	4.894	4.892
	Media	4.894	4.871 (-0.43%)
	Alta	4.72 (-3.56%)	4.778 (-2.33%)

Tabella 6.34 – Variazione degli indici di rischio tra i due metodi per meccanismo di rottura duttile a 50 anni

Scenario temporale a 50 anni - Meccanismo duttile			
Indice di rischio	corrosione	1° Metodo	2° Metodo
IR _a	Bassa	3.367	3.363
	Media	3.367	3.328 (-1.04%)
	Alta	2.981 (-11.46%)	2.834 (-15.73%)
IR _t	Bassa	4.894	4.887
	Media	4.894	4.820 (-1.36%)
	Alta	4.174 (-14.71%)	3.924 (-19.69%)

Tabella 6.35 – Variazione degli indici di rischio tra i due metodi per meccanismo di rottura duttile a 75 anni

Scenario temporale a 75 anni - Meccanismo duttile			
Indice di rischio	corrosione	1° Metodo	2° Metodo
IR _a	Bassa	3.367	3.360
	Media	3.275 (-2.73%)	3.301 (-1.76%)
	Alta	1.606 (-52.30%)	1.654 (-50.78%)
IR _t	Bassa	4.894	4.882
	Media	4.72 (-3.56%)	4.770 (-2.29%)
	Alta	4.174 (-14.71%)	1.930 (-60.46%)

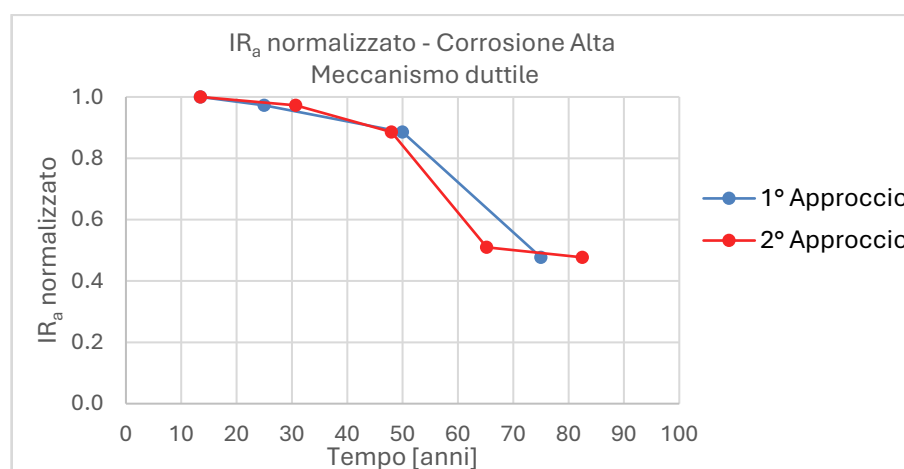


Figura 6.21 – Confronto tra le curve di andamento degli indici di rischio per meccanismo di rottura duttile nel tempo dei due approcci

La differenza tra i valori ottenuti risulta essere significativa: il secondo approccio produce una curva di andamento dell'indice di rischio soggetta a minor imprecisione e più definita. Lo scostamento massimo dei punti tra le due curve si registra tra i valori dai 50 ai 75 anni poiché oltre alla riduzione di diametro vi è anche il decadimento della deformazione ultima a rottura che il secondo approccio riesce a identificare in modo più preciso. Un altro vantaggio del secondo metodo è che si riescono ad ottenere indici di rischio distinti tra livello di corrosione basso e medio anche negli scenari temporali iniziali (tra i 13.5 e 50 anni) attraverso il procedimento di interpolazione.

Meccanismo fragile

Tabella 6.36 – Variazione degli indici di rischio tra i due metodi per meccanismo di rottura fragile a 25 anni

Scenario temporale a 25 anni - Meccanismo fragile			
Indice di rischio	corrosione	1° Metodo	2° Metodo
IR _a	Bassa	0.394	0.394
	Media	0.394	0.390 (-0.92%)
	Alta	0.364 (-7.61%)	0.374 (-4.99%)
IR _t	Bassa	0.392	0.392
	Media	0.392	0.388 (-1.01%)
	Alta	0.359 (-8.42%)	0.370 (-5.52%)

Tabella 6.37 – Variazione degli indici di rischio tra i due metodi per meccanismo di rottura fragile a 50 anni

Scenario temporale a 50 anni - Meccanismo fragile			
Indice di rischio	corrosione	1° Metodo	2° Metodo
IR _a	Bassa	0.394	0.393
	Media	0.394	0.381 (-2.91%)
	Alta	0.336 (-14.72%)	0.334 (-14.83%)
IR _t	Bassa	0.392	0.391
	Media	0.392	0.378 (-3.22%)
	Alta	0.328 (-16.33%)	0.327 (-16.38%)

Tabella 6.38 – Variazione degli indici di rischio tra i due metodi per meccanismo di rottura fragile a 75 anni

Scenario temporale a 75 anni - Meccanismo fragile			
Indice di rischio	corrosione	1° Metodo	2° Metodo
IR _a	Bassa	0.394	0.392
	Media	0.364 (-7.61%)	0.373 (-4.92%)
	Alta	0.310 (-21.32%)	0.316 (-19.45%)
IR _t	Bassa	0.392	0.390
	Media	0.359 (-8.42%)	0.368 (-5.44%)
	Alta	0.302 (-22.96%)	0.308 (-20.94%)

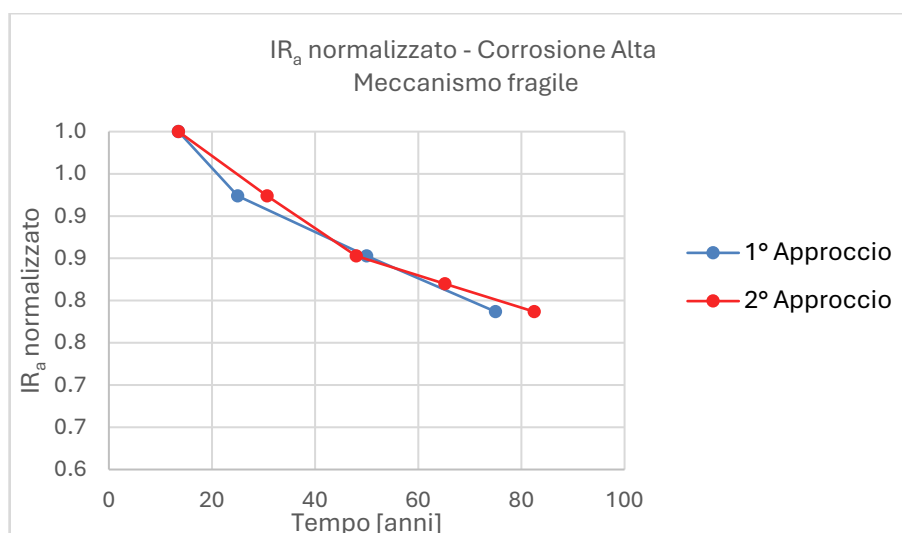


Figura 6.22 - Confronto tra le curve di andamento degli indici di rischio per meccanismo di rottura fragile nel tempo dei due approcci

La differenza tra i valori ottenuti risulta essere meno evidente rispetto al meccanismo a rottura duttile: il secondo approccio produce comunque una curva di andamento dell'indice di rischio soggetta a minor imprecisione e più definita. Lo scostamento massimo dei punti tra le due curve si registra sul tratto iniziale della curva tra i valori dai 25 ai 35 anni, in corrispondenza dell'arrotondamento più significativo del primo approccio.

A seguito di quanto analizzato il secondo approccio risulta maggiormente funzionale all'analisi, per questo motivo verrà utilizzato solo quest'ultimo per la trattazione dei successivi viadotti.

6.5. Analisi Time History

In questo paragrafo verranno mostrati i risultati ottenuti dall'analisi dinamica non lineare (Time History) ripercorrendo i passaggi descritti precedentemente al Paragrafo 5.4.

L'analisi viene effettuata per ogni configurazione di sezione precedentemente analizzata nella MPA.

6.5.1. Accelerogrammi spettro-compatibili

Di seguito viene riportata la combinazione degli accelerogrammi spettro-compatibili in relazione allo spettro di risposta di progetto del viadotto. I criteri di selezione adottati sono illustrati al Paragrafo 5.4.3.

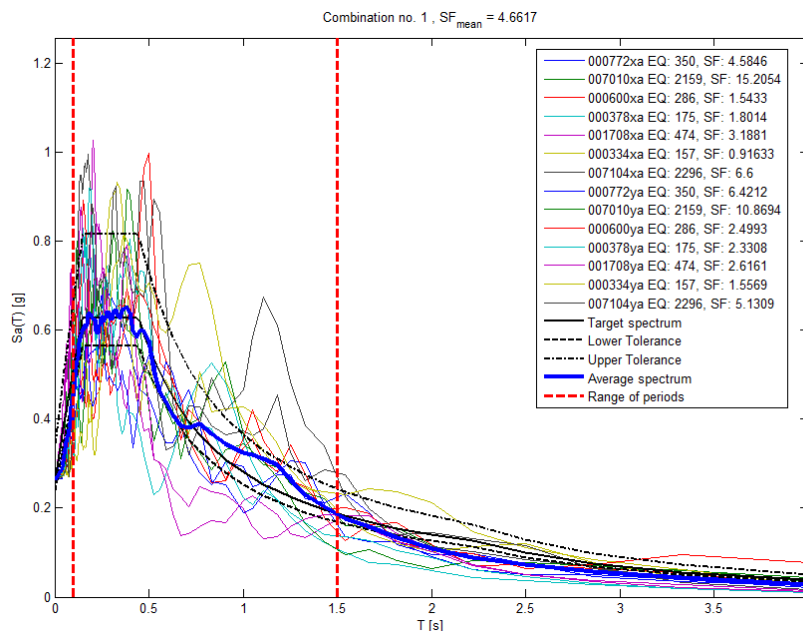


Figura 6.23 – Combinazione degli spettri per analisi TH del viadotto B83

6.5.2. Analisi di una singola configurazione di sezione

Di seguito verrà riportato il procedimento di calcolo dell'indice di rischio e l'analisi dello scenario di crisi del viadotto per la prima configurazione.

6.5.2.1. Calcolo dell'indice di rischio

L'ottenimento dell'indice di rischio per ogni configurazione di sezione consiste in una procedura iterativa descritta al Paragrafo 5.4.7.

Partendo dall'applicazione di un fattore di scala ad ogni accelerogramma che non comporta la crisi della struttura, si incrementa tale fattore fino a raggiungere la crisi di una delle cerniere plastiche. Il valore del fattore di scala associato allo scenario di crisi rappresenta l'indice di rischio della struttura per quel dato evento sismico. Sviluppando questo procedimento per ogni registrazione si otterranno sette valori di fattore di scala la cui media rappresenta l'indice di rischio della struttura, essendo la combinazione degli eventi spettro-compatibili con lo spettro di risposta di progetto.

Di seguito verranno riportati i fattori di scala associati ad ogni evento sismico utilizzati per ogni iterazione. I valori associati all'ultima iterazione sono associati alla crisi del viadotto per ogni evento sismico.

Tabella 6.39 – Fattori di scala degli accelerogrammi per analisi della configurazione D18

ID HEARTHQUAKE	ITER 1	ITER 2	ITER 3	ITER 4	ITER 5
000772	0.35	0.4	0.45	0.5	0.5
007010	0.35	0.4	0.4	0.4	0.4
000600	0.35	0.4	0.45	0.5	0.5
000378	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55
001708	0.55	0.6	0.65	0.65	0.65
000334	0.3	0.35	0.35	0.35	0.35
007104	0.3	0.35	0.4	0.4	0.4

Come verrà esplicitato nel paragrafo successivo attraverso lo studio delle sollecitazioni a rottura, la crisi avviene per meccanismo di rottura fragile sull'asse z della sezione relativa alla cerniera plastica della Pila 1. Di seguito verranno quindi riportati i valori di sollecitazione tagliante corrispondenti alla direzione della crisi e la frazione sulla capacità resistente ultima della sezione (718.09 kN) in percentuale per ogni iterazione così da evidenziare la procedura iterativa utilizzata.

Tabella 6.40 – Forze sollecitanti la cerniera plastica per ogni iterazione

	ITER 1	ITER 2	ITER 3	ITER 4	ITER 5
ID	F _z [kN]	F _z [kN]	F _z [kN]	F _z [kN]	F _z [kN]
000334	635.64 (89%)	716.89 (100%)	716.89 (100%)	716.89 (100%)	716.89 (100%)
000378	490.28 (68%)	560.34 (78%)	630.41 (88%)	700.48 (98%)	718.04 (100%)
000772	530.62 (74%)	606.46 (84%)	682.29 (95%)	717.50 (100%)	717.50 (100%)
007010	636.19 (89%)	717.30 (100%)	717.30 (100%)	717.30 (100%)	717.30 (100%)
000600	504.71 (70%)	576.83 (80%)	648.96 (90%)	717.63 (100%)	717.63 (100%)
001708	635.41 (88%)	704.49 (98%)	717.20 (100%)	717.20 (100%)	717.20 (100%)
007104	555.17 (77%)	647.73 (90%)	717.36 (100%)	717.36 (100%)	717.36 (100%)

L'indice di rischio associato al viadotto per la prima configurazione sarà il seguente:

$$IR = \frac{\sum IR_{\text{hearthquake}}}{n_{\text{hearthquake}}} = 0.478 \quad (6.4)$$

6.5.2.2. Analisi dello scenario di crisi

In questo paragrafo si vuole studiare il comportamento del viadotto al momento della crisi di una delle cerniere plastiche per la configurazione in oggetto. In particolare, si vuole indagare il grado di plasticizzazione della cerniera arrivata a cedimento e delle altre cerniere plastiche in modo da cogliere la combinazione del meccanismo fragile e duttile.

Di seguito vengono riportati i valori delle sollecitazioni a momento e taglio ottenuti dallo studio di ogni evento sismico. Si può notare come le sollecitazioni massime generate nella direzione soggetta a cedimento registrano delle differenze irrilevanti al cambiare dell'accelerogramma considerato. Il parametro che varia è l'istante (Time [s]) in cui la struttura collassa che risulta influente per lo studio del comportamento della struttura. Nelle tabelle viene evidenziato lo scenario di crisi, per questa configurazione il viadotto collassa per meccanismo di rottura fragile sull'asse z della sezione della cerniera plastica situata in corrispondenza della pila 1. Inoltre, si vuole evidenziare come la cerniera collassata e quelle non arrivate a rottura non risultino plasticizzate per meccanismo duttile, in quanto non raggiungono il valore di momento e rotazione di plasticizzazione. Tra parentesi viene riportata la frazione in percentuale tra i valori ottenuti ed i valori di rottura, in caso di taglio, e snervamento, in caso di momento.

Tabella 6.41 – Valori di snervamento e rottura delle cerniere plastiche per meccanismo di rottura duttile e fragile.

Config.	C.P.	Asse	V_u [kN]	D_u [m]	M_y [kN*m]	R_y [rad]	R_u [rad]
D18/D10	PILA 1	Y	4586.09	2.00E-04	3219.84	2.99E-03	2.73E-02
		Z	718.10	1.94E-05	17154.41	8.57E-04	7.81E-03
	PILA 2	Y	3859.58	1.83E-04	3219.84	3.45E-03	3.14E-02
		Z	656.19	2.04E-05	17154.41	9.34E-04	8.51E-03

Tabella 6.42 – Sollecitazioni a taglio per ogni evento sismico

C.P.	ID EQ	Taglio - Asse z		Taglio - Asse y	
		Time [s]	T [kN]	Time [s]	T [kN]
PILA 1	000772	12.45	712.47 (99%)	12.26	801.50 (17%)
	007010	18.86	709.57 (99%)	17.12	691.00 (15%)
	000600	18.20	715.39 (100%)	9.58	663.75 (14%)
	000378	11.37	708.26 (99%)	11.37	1389.74 (30%)
	001708	16.55	715.26 (100%)	14.12	418.21 (9%)
	000334	12.13	714.69 (100%)	11.70	568.45 (12%)
	007104	33.87	711.74 (99%)	31.63	745.98 (16%)
PILA 2	000772	12.45	530.24 (81%)	12.27	794.19 (21%)
	007010	18.86	523.39 (80%)	17.10	697.66 (18%)
	000600	18.20	525.31 (80%)	9.58	647.95 (17%)

C.P.	ID EQ	Taglio - Asse z		Taglio - Asse y	
		Time [s]	T [kN]	Time [s]	T [kN]
	000378	11.37	537.49 (82%)	11.37	1408.58 (36%)
	001708	16.55	522.65 (80%)	14.13	425.72 (11%)
	000334	12.13	525.83 (80%)	11.70	559.22 (14%)
	007104	33.87	526.96 (80%)	31.65	733.20 (19%)

Tabella 6.43 – Sollecitazioni a rotazione per ogni evento sismico

C.P.	ID EQ	Momento - Asse z			Momento - Asse y		
		Time [s]	M [kN*m]	R [rad]	Time [s]	M [kN*m]	R [rad]
PILA 1	000772	12.27	4746.05 (28%)	2.37E-4 (28%)	12.45	3076.21 (96%)	2.86E-4 (96%)
	007010	17.50	3930.25 (23%)	1.96E-4 (23%)	18.86	3074.65 (95%)	2.86E-4 (95%)
	000600	9.59	4075.10 (24%)	2.03E-4 (24%)	18.20	3112.46 (97%)	2.89E-4 (97%)
	000378	10.95	8166.94 (48%)	4.08E-4 (48%)	11.37	2992.54 (93%)	2.78E-4 (93%)
	001708	14.12	2609.94 (15%)	1.30E-4 (15%)	16.55	3089.83 (96%)	2.87E-4 (96%)
	000334	12.13	2999.17 (17%)	1.50E-4 (17%)	12.13	3067.62 (95%)	2.85E-4 (95%)
	007104	32.08	4272.11 (25%)	2.13E-4 (25%)	33.87	3060.10 (95%)	2.85E-4 (95%)
PILA 2	000772	12.27	4979.47 (29%)	2.71E-4 (29%)	12.45	3000.39 (93%)	3.21E-4 (93%)
	007010	17.13	4976.33 (29%)	2.71E-4 (29%)	18.86	2967.85 (92%)	3.18E-4 (92%)
	000600	9.22	4783.28 (28%)	2.60E-4 (28%)	18.20	3024.97 (94%)	3.24E-4 (94%)
	000378	11.37	9855.73 (57%)	5.37E-4 (57%)	11.37	2961.57 (92%)	3.17E-4 (92%)
	001708	13.75	2836.24 (17%)	1.54E-4 (17%)	16.55	2999.49 (93%)	3.21E-4 (93%)
	000334	11.69	3996.53 (23%)	2.18E-4 (23%)	12.13	2982.40 (93%)	3.20E-4 (93%)
	007104	31.64	5353.81 (31%)	2.91E-4 (31%)	33.87	2984.23 (93%)	3.20E-4 (93%)

6.5.3. Analisi delle configurazioni di sezione

Di seguito verrà riportato il procedimento di calcolo dell'indice di rischio e l'analisi dello scenario di crisi del viadotto per ogni configurazione di sezione seguendo il procedimento descritto nel Paragrafo 6.5.2

6.5.3.1. Calcolo dell'indice di rischio

L'ottenimento dell'indice di rischio per ogni configurazione di sezione consiste in una procedura iterativa descritta al Paragrafo 5.4.7.

Partendo dall'applicazione di un fattore di scala ad ogni accelerogramma che non comporta la crisi della struttura, si incrementa tale fattore fino a raggiungere il cedimento di una delle cerniere plastiche. Il valore del fattore di scala associato allo scenario di crisi rappresenta l'indice di rischio della struttura per quel dato evento sismico. Sviluppando questo procedimento per ogni registrazione si otterranno sette valori di fattore di scala la cui media rappresenta l'indice di rischio della struttura, essendo la combinazione degli eventi spettro-compatibili con lo spettro di risposta di progetto.

Di seguito verranno riportati i fattori di scala associati ad ogni evento sismico corrispondenti all'iterazione che porta alla crisi della struttura.

Tabella 6.44 – Fattori di scala degli accelerogrammi corrispondenti alla crisi del viadotto

Fattori di scala e Indice di Rischio					
ID HEARTHQUAKE	D18	D16	D14	D12	D10
000772	0.5	0.45	0.4	0.4	0.35
007010	0.4	0.35	0.35	0.3	0.3
000600	0.5	0.45	0.4	0.4	0.35
000378	0.55	0.5	0.45	0.4	0.4
001708	0.65	0.55	0.5	0.5	0.45
000334	0.35	0.3	0.3	0.25	0.25
007104	0.4	0.35	0.35	0.35	0.3
IR	0.48	0.42	0.39	0.37	0.34

6.5.3.2. Analisi dello scenario di crisi

In questo paragrafo si vuole studiare la crisi del viadotto. In particolare, si vuole indagare il grado di plasticizzazione della cerniera arrivata a cedimento e delle altre cerniere plastiche in modo da cogliere la combinazione del meccanismo fragile e duttile.

Di seguito vengono riportati i valori delle sollecitazioni a momento e taglio ottenuti dallo studio di un singolo evento sismico (000772), poiché la ridondanza dei risultati ottenuti è stata dimostrata nel Paragrafo 6.5.2.2.

Nelle tabelle viene evidenziato lo scenario di crisi: per ogni configurazione il viadotto collassa per meccanismo di rottura fragile sull'asse z della sezione della cerniera plastica situata in corrispondenza della pila 1. Inoltre, si vuole evidenziare come la cerniera collassata e quelle non arrivate a rottura non risultino plasticizzate per meccanismo duttile, in quanto non raggiungono il valore di momento e

rotazione di plasticizzazione. Tra parentesi viene riportata la frazione in percentuale tra i valori ottenuti ed i valori di rottura, in caso di taglio, e snervamento, in caso di momento.

Tabella 6.45 – Valori di snervamento e rottura delle cerniere plastiche per meccanismo di rottura duttile e fragile.

Config.	C.P.	Asse	V_u [kN]	D_u [m]	M_y [kN*m]	R_y [rad]	R_u [rad]
D18/D10	PILA 1	Y	4586.09	2.00E-04	3219.84	2.99E-03	2.73E-02
		Z	718.10	1.94E-05	17154.41	8.57E-04	7.81E-03
	PILA 2	Y	3859.58	1.83E-04	3219.84	3.45E-03	3.14E-02
		Z	656.19	2.04E-05	17154.41	9.34E-04	8.51E-03
D16/D8	PILA 1	Y	4488.63	1.92E-04	2913.98	2.65E-03	2.42E-02
		Z	636.25	1.66E-05	15779.35	7.69E-04	7.01E-03
	PILA 2	Y	3777.56	1.76E-04	2913.98	3.07E-03	2.80E-02
		Z	572.83	1.74E-05	15779.35	8.40E-04	7.65E-03
D14/D6	PILA 1	Y	4402.62	1.85E-04	2820.28	2.78E-03	2.31E-02
		Z	558.10	1.41E-05	15409.99	8.16E-04	6.80E-03
	PILA 2	Y	3705.18	1.70E-04	2820.28	3.23E-03	2.69E-02
		Z	505.82	1.49E-05	15409.99	8.93E-04	7.44E-03
D12/D4	PILA 1	Y	4328.09	1.78E-04	2652.77	2.67E-03	1.39E-02
		Z	529.22	1.30E-05	14698.31	7.97E-04	4.15E-03
	PILA 2	Y	3642.45	1.64E-04	2652.77	3.12E-03	1.62E-02
		Z	457.42	1.31E-05	14698.31	8.73E-04	4.55E-03
D10/D2	PILA 1	Y	4265.02	1.72E-04	2514.29	2.56E-03	1.34E-02
		Z	499.75	1.18E-05	14097.95	7.78E-04	4.05E-03
	PILA 2	Y	3589.38	1.59E-04	2514.29	3.01E-03	1.57E-02
		Z	428.55	1.19E-05	14097.95	8.54E-04	4.45E-03

In Figura 6.23 viene riportato lo stato delle cerniere plastiche al momento del cedimento per meccanismo fragile: in rosso viene raffigurata la cerniera arrivata a rottura, mentre in giallo lo stato elastico.

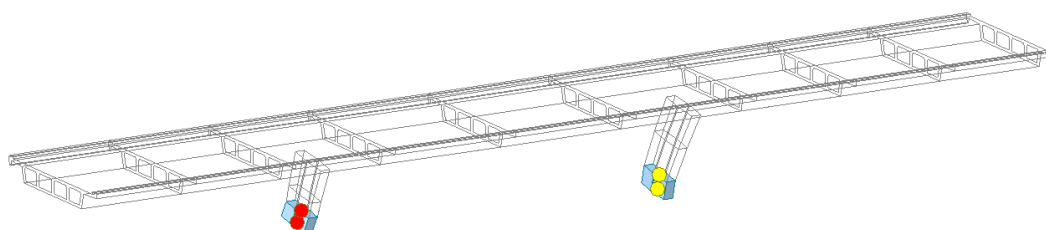


Figura 6.24 – Stato delle cerniere plastiche a meccanismo fragile – Direzione Z

Tabella 6.46 – Sollecitazioni a taglio allo scenario di crisi

Cerniere Plastiche	Config.	Taglio - Asse z		Taglio - Asse y	
		Time [s]	T [kN]	Time [s]	T [kN]
PILA 1	D18/D10	12.45	712.47 (99%)	12.26	801.50 (17%)
	D16/D8	12.44	623.68 (98%)	12.26	721.32 (16%)
	D14/D6	12.45	556.47 (100%)	12.265	639.87 (15%)
	D12/D4	12.44	520.29 (98%)	12.265	639.33 (15%)
	D10/D2	12.47	497.00 (99%)	12.265	558.93 (13%)
PILA 2	D18/D10	12.45	530.24 (81%)	12.265	794.19 (21%)
	D16/D8	12.44	464.85 (81%)	12.265	714.83 (19%)
	D14/D6	12.45	410.00 (81%)	12.265	633.52 (17%)
	D12/D4	12.44	382.06 (86%)	12.265	632.62 (15%)
	D10/D2	12.47	361.40 (86%)	12.265	552.95 (13%)

Tabella 6.47 – Sollecitazioni a rotazione allo scenario di crisi

C.P.	Config.	Momento - Asse z		Momento - Asse y	
		M [kN*m]	R [rad]	M [kN*m]	R [rad]
PILA 1	D18/D10	4746.05 (28%)	2.37E-4 (28%)	3076.21 (96%)	2.86E-4 (96%)
	D16/D8	4303.59 (27%)	2.10E-4 (27%)	2690.97 (92%)	2.45E-4 (92%)
	D14/D6	3840.35 (25%)	2.03E-4 (25%)	2398.29 (85%)	2.36E-4 (85%)
	D12/D4	3831.02 (26%)	2.08E-4 (26%)	2238.59 (84%)	2.25E-4 (84%)
	D10/D2	3384.59 (24%)	1.87E-4 (24%)	2143.92 (85%)	2.19E-4 (85%)
PILA 2	D18/D10	4979.47 (29%)	2.71E-4 (29%)	3000.39 (93%)	3.21E-4 (93%)
	D16/D8	4454.58 (28%)	2.37E-4 (28%)	2626.42 (90%)	2.77E-4 (90%)
	D14/D6	3962.58 (26%)	2.30E-4 (26%)	2313.47 (82%)	2.65E-4 (82%)
	D12/D4	3948.04 (27%)	2.34E-4 (29%)	2149.14 (81%)	2.53E-4 (81%)
	D10/D2	3482.12 (25%)	2.11E-4 (27%)	2044.05 (81%)	2.45E-4 (81%)

6.5.4. Andamento dell'indice di rischio

Una volta ottenuti gli indici di rischio delle configurazioni si determinano gli scenari temporali associati al raggiungimento di ogni configurazione per ciascun livello di corrosione seguendo la procedura illustrata al Paragrafo 6.3.5.

Dopo aver determinato gli scenari temporali si può definire l'andamento nel tempo degli indici di rischio (Paragrafo 6.5.3.1) per ogni livello di corrosione.

Tabella 6.48 – Scenari temporali per diverse configurazioni di sezione e livello di corrosione

Scenari temporali			
N° Configurazione	$t_{\text{corr. bassa}}$	$t_{\text{corr. media}}$	$t_{\text{corr. alta}}$
-	[anni]	[anni]	[anni]
1 - D18/D10	13.5	13.5	13.5
2 - D16/D8	875.6	99.7	30.7
3 - D14/D6	1737.6	185.9	48
4 - D12/D4	2599.7	272.1	65.2
5 - D10/D2	3461.8	358.3	82.5

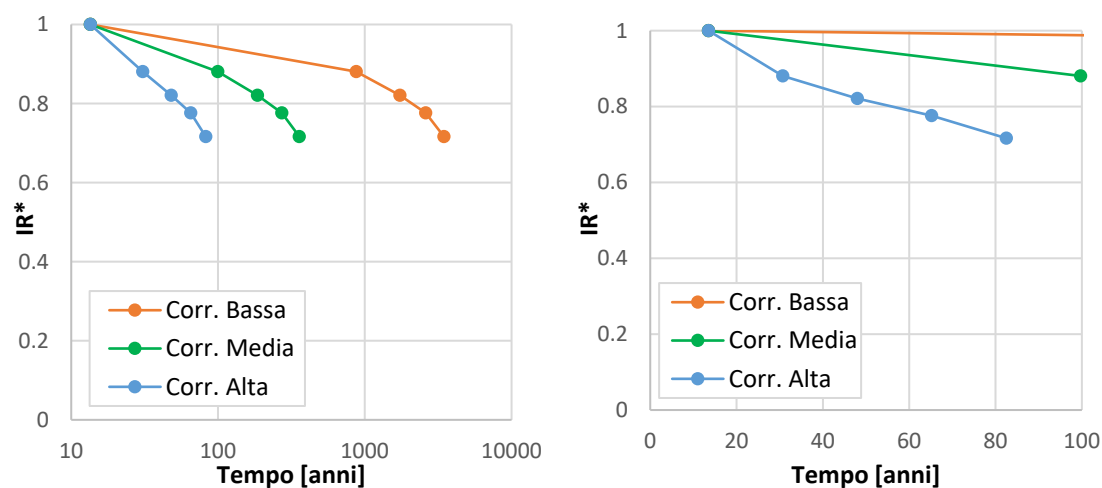


Figura 6.25 - Andamento dell'indice di rischio nel tempo

Di seguito vengono riportati i valori di indici di rischio per tre scenari temporali (25, 50, 75 anni) per i diversi scenari di corrosione in modo da evidenziare la differenza tra i diversi livelli di degrado. I valori sono stati ottenuti tramite interpolazione tra due punti dalla Figura 6.25 per l'anno corrispondente.

Tabella 6.49 – Variazione dell'indice di rischio per scenari temporali prefissati a differenti livelli di degrado

IR _a per scenario temporale				
corrosione	13.5 anni	25 anni	50 anni	75 anni
Bassa	0.478	0.478	0.476 (-0.42%)	0.474 (-0.83%)
Media	0.478	0.471 (-1.44%)	0.454 (-4.57%)	0.438 (-7.73%)
Alta	0.478	0.440 (-7.84%)	0.390 (-18.02%)	0.355 (-25.13%)

Capitolo 7

Il viadotto B88

Si riporta di seguito l'analisi di vulnerabilità del secondo dei tre viadotti in esame. Dopo una breve descrizione dell'opera, vengono riportati le caratteristiche ed i dati maggiormente rilevanti per le analisi effettuate, infine verranno riportati i risultati.

Si procederà alla trattazione dei risultati ottenuti attraverso il solo secondo approccio, scelta giustificata ed analizzata nel paragrafo conclusivo del capitolo precedente nel quale vengono confrontati i due metodi differenti. Di seguito si riporta brevemente la descrizione del metodo utilizzato: i risultati vengono ottenuti per cinque differenti configurazioni della sezione che variano in base al diametro commerciale delle armature longitudinali considerato (20 mm, 18 mm, 16 mm, 14 mm, 12 mm, ...). Successivamente viene determinato l'istante in cui la sezione raggiunge la configurazione in oggetto in base allo scenario di degrado così da ottenere la variazione dell'indice di rischio nel tempo. Attraverso questo approccio si ottengono dei risultati più precisi non dovendo ricorrere all'approssimazione del diametro delle barre di armatura longitudinali.

7.1. Descrizione della struttura

Il viadotto B88 è situato in provincia di Pisa, sorge in una zona pianeggiante ad una quota di circa 3 m s.l.m. Fa parte dell'Autostrada A12.

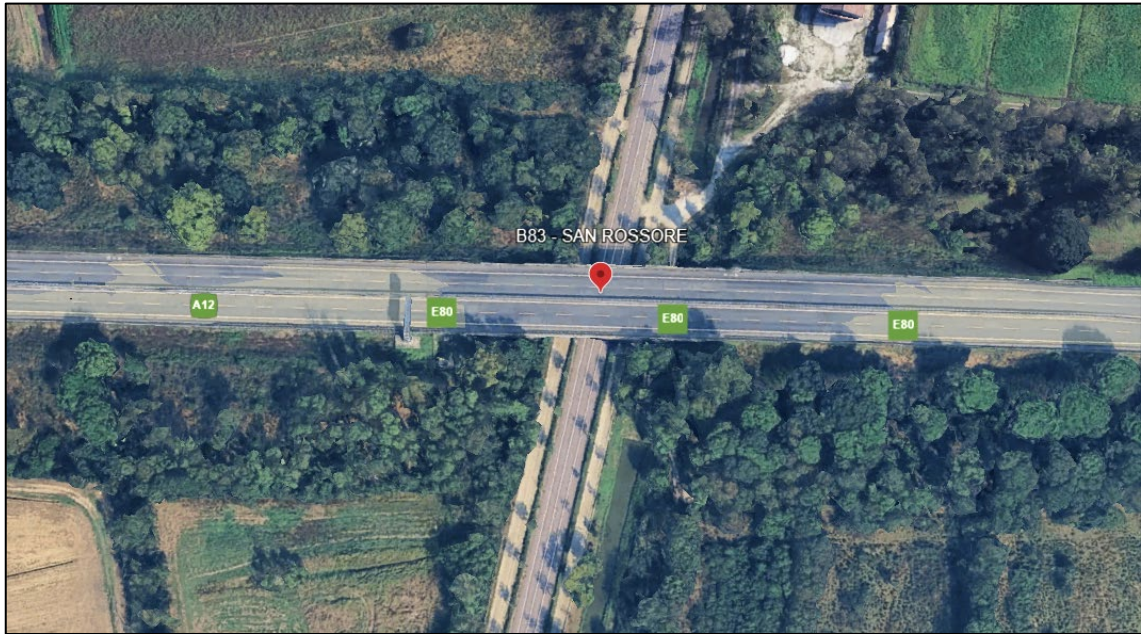


Figura 7.1 – Immagine satellitare del viadotto

L'infrastruttura è caratterizzata da quattro pile composte da quattro fusti ciascuna e cinque campate. Presenta un andamento planimetrico rettilineo e si estende per una lunghezza di 127 metri. Il viadotto è costituito da due carreggiate indipendenti, una per ciascuna direzione, e presenta lo schema statico di ponte a travata. I cinque impalcati che caratterizzano la struttura possono essere considerati come semplicemente appoggiati.

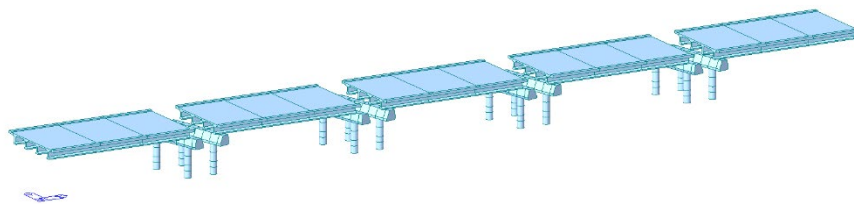


Figura 7.2 – Modello di calcolo MidasCivil del viadotto

La lunghezza degli impalcati è 22 m. Gli impalcati sono caratterizzati da quattro travi in calcestruzzo armato con sezione rettangolare agli appoggi con anima di 67 cm e altezza pari a 1.22 m, mentre in campata presenta una sezione ad I con anima di 20cm ed altezza 1.22 m.

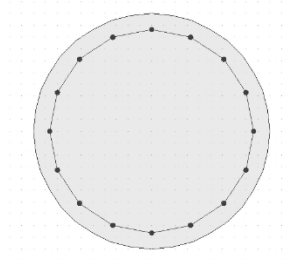


Figura 7.3 – Geometria della sezione caratteristica delle pile con armature longitudinali

Le pile sono caratterizzate da quattro fusti ciascuna a sezione circolare (Figura 7.3) le cui dimensioni sono costanti lungo l'altezza. La sezione presenta un diametro di 1 m. Il rinforzo armato è composto da 16 barre di armatura longitudinali di diametro 20 mm e staffe a spirale di 8 mm per un totale di due bracci. Gli assi locali della sezione Y e Z corrispondono rispettivamente agli assi globali del viadotto Y e X. In Tabella 7.1 vengono riportate le caratteristiche dei materiali che caratterizzano le pile.

Tabella 7.1 – Caratteristiche dei materiali delle pile

Calcestruzzo	C25/30
Armatura longitudinale	AQ50
Armatura trasversale	AQ50
Deformazione ultima acciaio	$\varepsilon_{su} = 2\%$

Le pile presentano altezze uguali tra loro pari a 5 m. Figura 7.2 si riporta il modello FEM realizzato utilizzando il software MidasCivil.

7.2. Definizione delle configurazioni

Di seguito vengono riportati i diametri e la deformazione a rottura caratteristiche delle cinque configurazioni di sezione analizzate (Tabella 7.2). La formulazione utilizzata per il calcolo del decadimento della deformazione ultima delle barre d'armatura, riportata al Paragrafo 4.4, ammette valori negativi e minori del valore di 0.01, ovvero la deformazione di snervamento, anche se irrealistici. Per questo motivo i valori minori di 0.01 vengono arrotondati a 0.011.

Tabella 7.2 – Diametri e deformazione ultima a rottura delle armature per configurazione di sezione

Armatura Longitudinale					
N° Configurazione	$\varnothing_t$	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
1 - D20/D8	20	0.13	0.000	0.13	0.02
2 - D18/D6	18	0.13	19	0.081835	0.02
3 - D16/D4	16	0.13	36	0.03874	0.02
4 - D14/D2	14	0.13	51	0.000715	0.011
5 - D12/D0	12	0.13	64	-0.03224	0.011
Armatura Trasversale					
N° Configurazione	$\varnothing_t$	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
1 - D20/D8	8	0.13	0.00	0.13	0.02
2 - D18/D6	6	0.13	43.75	0.019094	0.019094
3 - D16/D4	4	0.13	75.00	-0.06013	0.011
4 - D14/D2	2	0.13	93.75	-0.10766	0.011
5 - D12/D0	0	0.13	100.00	-0.1235	0.011

Diagrammi Momento-Curvatura

Il primo passo è stato quello di modificare il diametro delle barre longitudinali per ogni configurazione e di ricavare i nuovi diagrammi Momento – Curvatura (Figura 7.4). In questo caso è possibile notare che la corrosione provoca una visibile perdita di resistenza meccanica.

Momenti di inerzia

Si procede quindi determinando i momenti di inerzia delle sezioni. Il confronto tra le diverse configurazioni viene mostrato in Tabella 7.3. È evidente come si abbia una diminuzione delle inerzie delle pile al diminuire del diametro delle armature. In questo caso i valori ottenuti sono analoghi per i due assi della sezione in quanto è circolare, quindi simmetrica sui due assi

Tabella 7.3 – Momenti di inerzia efficace per configurazione di sezione

Momento di Inerzia efficace [m ⁴]						
Pila	Asse	1	2	3	4	5
PILE	Y-Z	0.0165	0.0151 (-8.35%)	0.0143 (-13.45%)	0.0135 (-18.18%)	0.0128 (-22.36%)

Nei grafici seguenti si sono indicate le diverse configurazioni in base al diametro delle armature longitudinali per facilitare la comprensione dei risultati:

- Configurazione 1: D20
- Configurazione 2: D18
- Configurazione 3: D16
- Configurazione 4: D14
- Configurazione 5: D12

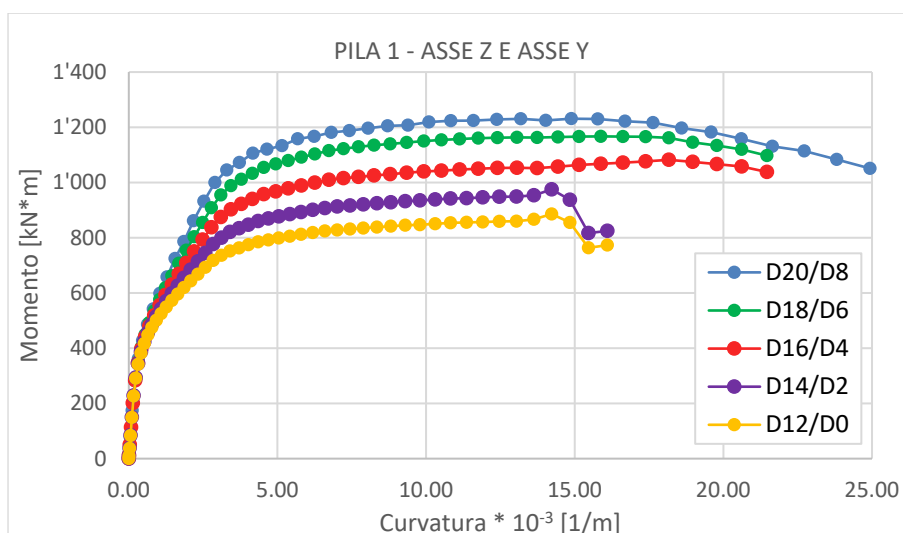


Figura 7.4 – Diagramma Momento – Curvatura per configurazione di sezione.

7.3. Analisi modale

In questo paragrafo si riportano i periodi e le masse partecipanti che derivano dall'analisi modale delle cinque configurazioni. La diminuzione dei momenti di inerzia provoca una diminuzione della rigidezza della struttura, che si manifesta tramite un aumento del suo periodo come evidenziato in Figura 7.5. In azzurro sono stati evidenziati i modi che risultano contribuenti per l'analisi *Pushover*, ovvero quelli che movimentano almeno l'1% di massa in una delle due direzioni.

Tabella 7.4 – Analisi modale per configurazione 1

Configurazione 1 - D20/D8						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	9.931008	0.632684	0.82	0.82	70.49	70.49
2	10.0576	0.6247	73.05	73.87	0.78	71.27
3	10.2029	0.6158	0.00	73.87	0.00	71.27
4	10.4749	0.5998	0.00	73.87	0.00	71.27
5	10.6222	0.5915	0.01	73.88	10.27	81.54
6	10.9755	0.5725	10.02	83.90	0.01	81.54
7	11.0949	0.5663	0.00	83.90	0.00	81.54
8	11.2619	0.5579	0.00	83.90	5.20	86.74
9	11.3695	0.5526	0.00	83.90	0.00	86.74
10	11.5144	0.5457	3.22	87.12	0.00	86.74
11	14.5316	0.4324	0.00	87.12	0.00	86.74
12	15.1908	0.4136	0.00	87.12	0.25	86.99
13	15.8606	0.3962	0.00	87.12	0.00	86.99
14	16.3411	0.3845	0.00	87.12	0.30	87.29
15	16.4870	0.3811	0.00	87.12	0.00	87.29

Configurazione 1 - D20/D8						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
16	27.8231	0.2258	0.00	87.12	0.00	87.29
17	27.8430	0.2257	0.00	87.12	0.00	87.29
18	27.8643	0.2255	0.00	87.12	0.00	87.29
19	27.9593	0.2247	0.00	87.12	0.00	87.29
20	27.9594	0.2247	0.00	87.12	0.00	87.29
21	42.073214	0.149339	0	87.12	0	87.29
22	42.172371	0.148988	0.59	87.71	0.01	87.3
23	42.270635	0.148642	1.23	88.94	9.31	96.61
24	42.283541	0.148596	0	88.94	0	96.61
25	42.416225	0.148132	9.47	98.41	1.22	97.83

Tabella 7.5 – Analisi modale per configurazione 2

Configurazione 2 - D18/D6						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	9.921495	0.63329	0.81	0.81	70.54	70.54
2	10.0487	0.6253	73.11	73.92	0.77	71.32
3	10.1945	0.6163	0.00	73.92	0.00	71.32
4	10.4685	0.6002	0.00	73.92	0.00	71.32
5	10.6159	0.5919	0.01	73.92	10.27	81.59
6	10.9723	0.5726	10.03	83.95	0.01	81.59
7	11.0918	0.5665	0.00	83.95	0.00	81.59
8	11.2607	0.5580	0.00	83.95	5.19	86.78
9	11.3686	0.5527	0.00	83.95	0.00	86.78
10	11.5144	0.5457	3.22	87.17	0.00	86.78
11	14.5198	0.4327	0.00	87.17	0.00	86.78
12	15.1835	0.4138	0.00	87.17	0.25	87.04
13	15.8570	0.3962	0.00	87.17	0.00	87.04
14	16.3400	0.3845	0.00	87.17	0.30	87.33
15	16.4867	0.3811	0.00	87.17	0.00	87.33
16	27.8227	0.2258	0.00	87.17	0.00	87.33
17	27.8427	0.2257	0.00	87.17	0.00	87.33
18	27.8642	0.2255	0.00	87.17	0.00	87.33
19	27.9592	0.2247	0.00	87.17	0.00	87.33
20	27.9593	0.2247	0.00	87.17	0.00	87.33
21	41.957779	0.14975	0	87.17	0	87.33
22	42.057843	0.149394	0.59	87.76	0.01	87.34
23	42.161204	0.149028	1.26	89.02	9.24	96.58
24	42.170791	0.148994	0	89.02	0	96.58
25	42.303213	0.148527	9.4	98.41	1.25	97.84

Tabella 7.6 – Analisi modale per configurazione 3

Configurazione 3 - D16/D4						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	9.848711	0.63797	0.73	0.73	70.96	70.96
2	9.9801	0.6296	73.52	74.25	0.70	71.65
3	10.1301	0.6203	0.00	74.25	0.00	71.65
4	10.4202	0.6030	0.00	74.25	0.00	71.65
5	10.5676	0.5946	0.01	74.26	10.30	81.95
6	10.9474	0.5739	10.04	84.30	0.01	81.96
7	11.0680	0.5677	0.00	84.30	0.00	81.96
8	11.2522	0.5584	0.00	84.30	5.11	87.07
9	11.3618	0.5530	0.00	84.30	0.00	87.07
10	11.5144	0.5457	3.21	87.52	0.00	87.07
11	14.4307	0.4354	0.00	87.52	0.00	87.07
12	15.1285	0.4153	0.00	87.52	0.28	87.35
13	15.8302	0.3969	0.00	87.52	0.00	87.35
14	16.3317	0.3847	0.00	87.52	0.32	87.67
15	16.4843	0.3812	0.00	87.52	0.00	87.67
16	27.8193	0.2259	0.00	87.52	0.00	87.67
17	27.8406	0.2257	0.00	87.52	0.00	87.67
18	27.8635	0.2255	0.00	87.52	0.00	87.67
19	27.9585	0.2247	0.00	87.52	0.00	87.67
20	27.9586	0.2247	0.00	87.52	0.00	87.67
21	41.110328	0.152837	0	87.52	0	87.67
22	41.217157	0.152441	0.57	88.09	0	87.68
23	41.341872	0.151981	0	88.09	0	87.68
24	41.357931	0.151922	1.55	89.64	8.64	96.31
25	41.474814	0.151494	8.78	98.42	1.54	97.85

Tabella 7.7 – Analisi modale per configurazione 4

Configurazione 4 - D14/D2						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	9.77424	0.642831	0.65	0.65	71.36	71.36
2	9.9101	0.6340	73.93	74.59	0.63	71.99
3	10.0638	0.6243	0.00	74.59	0.00	71.99
4	10.3709	0.6059	0.00	74.59	0.00	71.99
5	10.5174	0.5974	0.00	74.59	10.32	82.31
6	10.9220	0.5753	10.06	84.65	0.00	82.32
7	11.0429	0.5690	0.00	84.65	0.00	82.32
8	11.2436	0.5588	0.00	84.65	5.03	87.35
9	11.3549	0.5533	0.00	84.65	0.00	87.35
10	11.5144	0.5457	3.21	87.86	0.00	87.35
11	14.3405	0.4381	0.00	87.86	0.00	87.35
12	15.0732	0.4168	0.00	87.86	0.31	87.67

13	15.8031	0.3976	0.00	87.86	0.00	87.67
14	16.3234	0.3849	0.00	87.86	0.35	88.01
15	16.4818	0.3812	0.00	87.86	0.00	88.01
16	27.8156	0.2259	0.00	87.86	0.00	88.01
17	27.8383	0.2257	0.00	87.86	0.00	88.01
18	27.8628	0.2255	0.00	87.86	0.00	88.01
19	27.9577	0.2247	0.00	87.87	0.00	88.01
20	27.9578	0.2247	0.00	87.87	0.00	88.01
21	40.303401	0.155897	0	87.87	0	88.01
22	40.416941	0.155459	0.55	88.42	0	88.01
23	40.55164	0.154943	0	88.42	0	88.01
24	40.593168	0.154784	1.99	90.41	7.88	95.89
25	40.688382	0.154422	8.01	98.42	1.98	97.87

Tabella 7.8 – Analisi modale per configurazione 5

Configurazione 5 - D12/D0						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	9.706445	0.647321	0.59	0.59	71.72	71.72
2	9.8465	0.6381	74.29	74.88	0.57	72.29
3	10.0032	0.6281	0.00	74.88	0.00	72.29
4	10.3261	0.6085	0.00	74.88	0.00	72.29
5	10.4710	0.6001	0.00	74.89	10.34	82.63
6	10.8990	0.5765	10.08	84.96	0.00	82.63
7	11.0193	0.5702	0.00	84.96	0.00	82.63
8	11.2360	0.5592	0.00	84.97	4.96	87.60
9	11.3487	0.5536	0.00	84.97	0.00	87.60
10	11.5144	0.5457	3.21	88.17	0.00	87.60
11	14.2592	0.4406	0.00	88.17	0.00	87.60
12	15.0236	0.4182	0.00	88.17	0.34	87.94
13	15.7790	0.3982	0.00	88.17	0.00	87.94
14	16.3159	0.3851	0.00	88.17	0.37	88.31
15	16.4797	0.3813	0.00	88.17	0.00	88.31
16	27.8121	0.2259	0.00	88.17	0.00	88.31
17	27.8361	0.2257	0.00	88.17	0.00	88.31
18	27.8620	0.2255	0.00	88.17	0.00	88.31
19	27.9570	0.2247	0.00	88.17	0.00	88.31
20	27.9571	0.2247	0.00	88.17	0.00	88.31
21	39.616173	0.158602	0	88.17	0	88.31
22	39.735714	0.158124	0.54	88.71	0	88.31
23	39.878586	0.157558	0	88.71	0	88.31
24	39.941617	0.157309	2.59	91.3	7.01	95.32
25	40.02084	0.156998	7.12	98.42	2.57	97.89

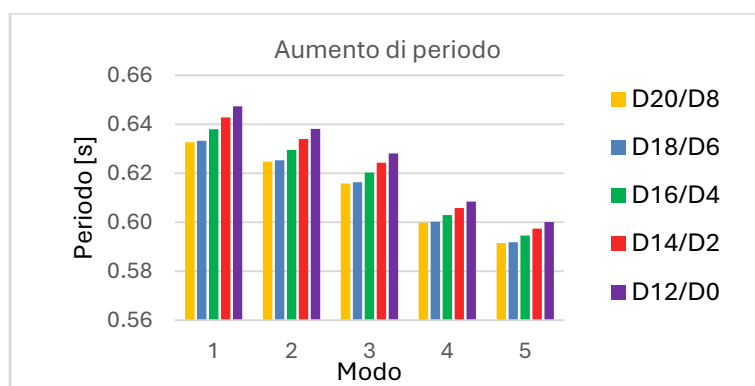


Figura 7.5 – Aumento del periodo per configurazione di sezione

7.4. Meccanismo duttile

Una volta definito il legame costitutivo delle cerniere plastiche a rotazione, è stato possibile eseguire l'analisi per le cinque configurazioni. Le cerniere vengono poste alla base delle pile (Figura 7.6). La scelta è giustificata dal fatto che le pile del viadotto presentano un comportamento a mensola. Si considera inizialmente il meccanismo di rottura a rotazione.

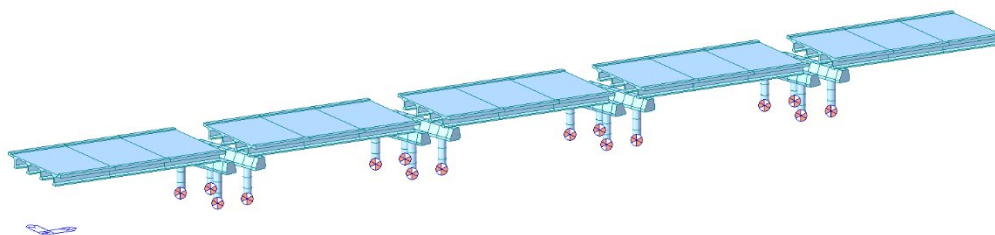


Figura 7.6 – Posizionamento delle cerniere plastiche

7.4.1. Analisi Pushover

Una volta definiti i legami costitutivi delle cerniere plastiche (Paragrafo 5.3.4.1), è stata effettuata un'analisi dinamica lineare, detta *Pushover*, che permette di studiare l'evoluzione dei meccanismi plastici all'interno del sistema strutturale. Tale analisi è stata eseguita per i soli modi aventi massa partecipante superiore all'1%. Le curve di capacità sono state trasformate dal piano Taglio - Spostamento al piano *ADRS*, come spiegato al Paragrafo 5.3.2, per poi essere messe a confronto tra loro per le diverse configurazioni (Figura 7.7). Esse presentano un tratto iniziale lineare, cui segue un secondo tratto con limite di rottura di coordinate decrescenti all'aumentare del fenomeno corrosivo.

Analizzando le curve, è evidente l'ulteriore riduzione in termini di resistenza, a causa del decadimento delle proprietà meccaniche (deformazione ultima a rottura) delle barre, in aggiunta alla riduzione della sezione, tra la configurazione D16 e D14.

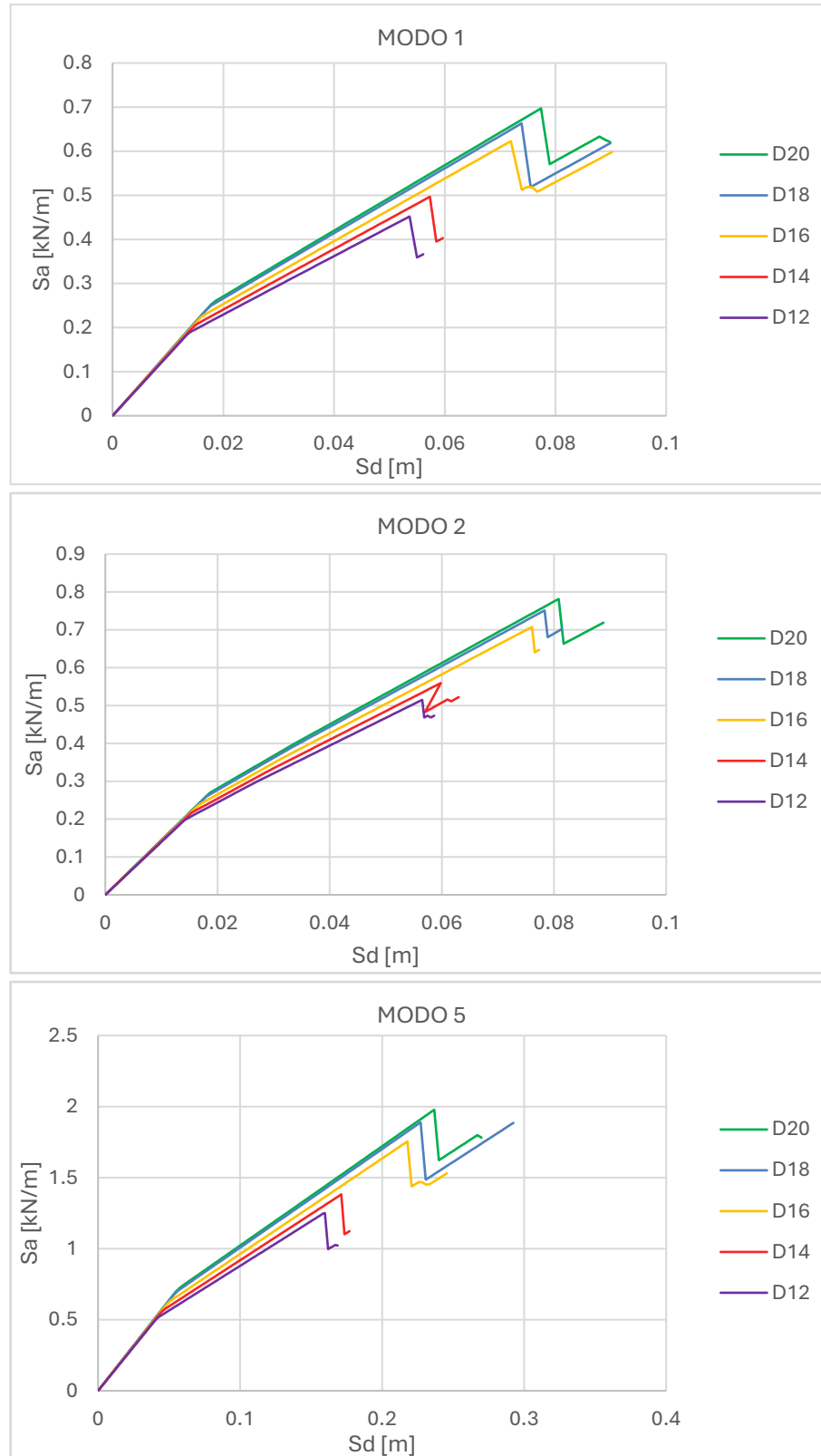


Figura 7.7 – Grafici ADRS dei modi contribuenti per meccanismo duttile a diverse configurazioni di sezione

7.4.2. Analisi Pushover modale MPA

Per completare la verifica di vulnerabilità, è stata effettuata l'analisi MPA, seguendo quanto presentato nel Paragrafo 5.3.4. I risultati, riportati in Tabella 7.9, mostrano un evidente decremento degli indici di rischio soprattutto nel passaggio dalla terza alla quarta configurazione. Questo avviene poiché vi è un decadimento della duttilità dovuto al decremento della deformazione a rottura da 2% a 1.1% oltre che alla riduzione del diametro.

Tabella 7.9 – Indici di rischio per meccanismo di rottura duttile a diverse configurazioni di sezione

Meccanismo duttile			
Indice di rischio	Configurazione	Direzione X	Direzione Y
IR _a	1 - D18/D8	1.786	1.476
	2 - D16/D6	1.693 (-5.21%)	1.382 (-6.37%)
	3 - D14/D4	1.593 (-10.81%)	1.346 (-8.81%)
	4 - D12/D2	1.241 (-30.52%)	0.992 (-32.79%)
	5 - D10/D0	1.14 (-36.17%)	0.911 (-38.28%)
IR _t	1 - D18/D8	2.042	1.615
	2 - D16/D6	1.912 (-6.37%)	1.489 (-7.80%)
	3 - D14/D4	1.773 (-13.17%)	1.442 (-10.71%)
	4 - D12/D2	1.304 (-36.14%)	0.99 (-38.70%)
	5 - D10/D0	1.174 (-42.51%)	0.894 (-44.64%)

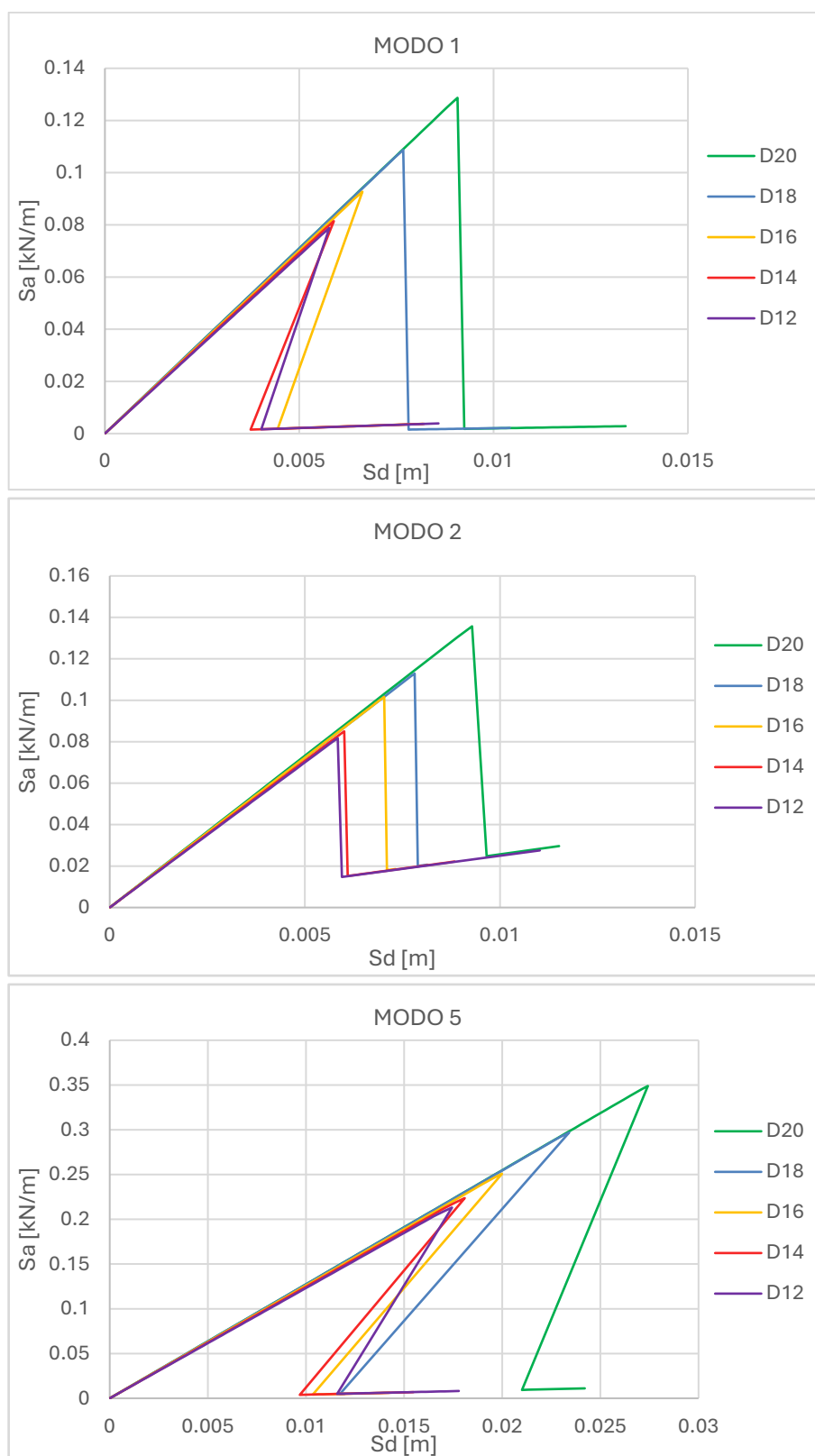
7.5. Meccanismo fragile

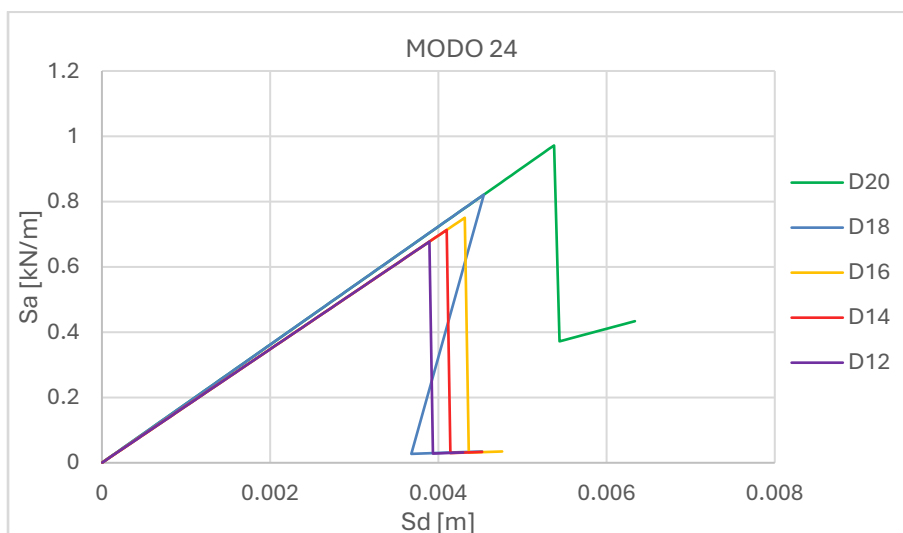
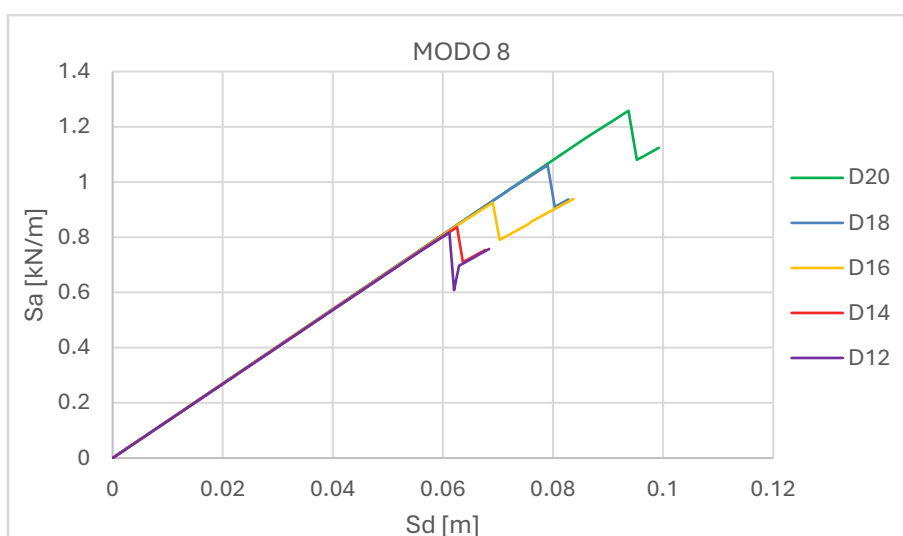
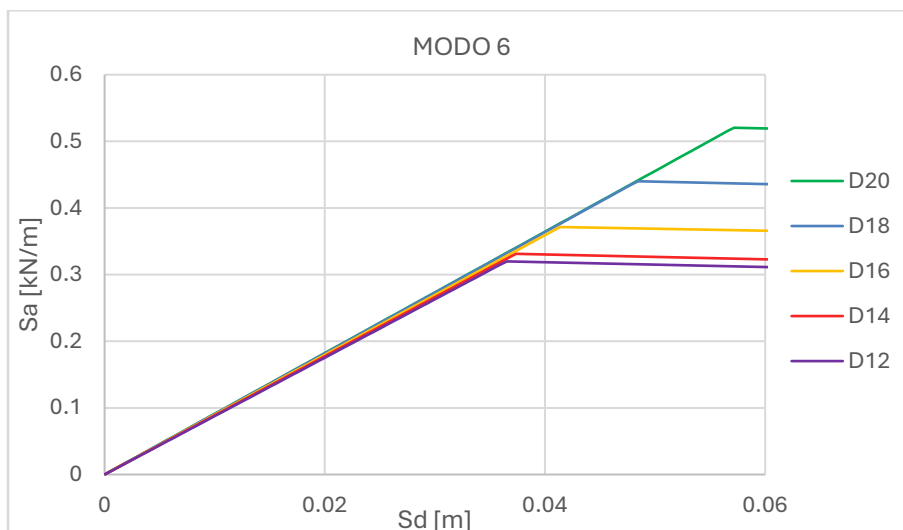
Si procede per il meccanismo fragile in modo analogo a quanto svolto per il meccanismo a rotazione. In particolare, si utilizza un secondo modello FEM in cui vengono modificate le caratteristiche delle cerniere plastiche, in accordo con quanto visto nel Paragrafo 5.3.4.1.

7.5.1. Analisi Pushover

Le cerniere vengono nuovamente poste alla base delle pile. Si ripete l'analisi dinamica lineare (Pushover) con le stesse modalità seguite per il meccanismo duttile. Nella Figura 7.8 vengono confrontate le curve di capacità nel piano ADRS delle cinque configurazioni. Tali curve rappresentano la capacità sismica della struttura in termini di accelerazioni e spostamenti spettrali. Il confronto viene effettuato per tutti i modi che presentano una massa partecipante superiore all'1%.

Analizzando le curve, è evidente l'ulteriore riduzione in termini di resistenza, a causa della corrosione delle barre.





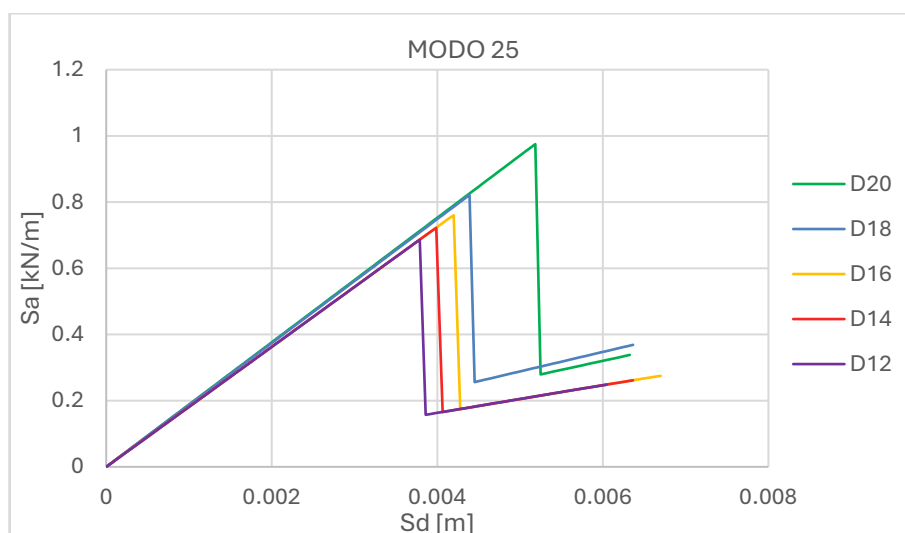


Figura 7.8 - Grafici ADRS dei modi contribuenti per meccanismo fragile a diverse configurazioni di sezione

7.5.2. Analisi Pushover modale MPA

Si procede quindi con l'analisi Pushover modale del viadotto. I risultati, riportati in Tabella 7.10, mostrano un decremento degli indici di rischio costante e meno evidente rispetto al meccanismo di rottura duttile. Questo risultato è anche dovuto ad i valori critici anche nella configurazione iniziale che limitano un decadimento degli indici di rischio eccessivo.

Tabella 7.10 - Indici di rischio per meccanismo di rottura fragile a diverse configurazioni di sezione

Meccanismo fragile			
Indice di rischio	Configurazione	Direzione X	Direzione Y
IR _a	1 - D18/D8	0.266	0.200
	2 - D16/D6	0.205 (-22.93%)	0.167 (-16.50%)
	3 - D14/D4	0.2 (-24.81%)	0.154 (-23.00%)
	4 - D12/D2	0.181 (-31.95%)	0.142 (-29.00%)
	5 - D10/D0	0.179 (-32.71%)	0.138 (-31.00%)
IR _t	1 - D18/D8	0.261	0.202
	2 - D16/D6	0.206 (-21.07%)	0.172 (-14.85%)
	3 - D14/D4	0.21 (-19.54%)	0.16 (-20.79%)
	4 - D12/D2	0.184 (-29.50%)	0.149 (-26.24%)
	5 - D10/D0	0.183 (-29.89%)	0.145 (-28.22%)

7.6. Analisi dei risultati

Una volta ottenuti gli indici di rischio delle configurazioni si determinano gli scenari temporali associati al raggiungimento di ogni configurazione per ciascun

livello di corrosione (Tabella 7.11). Di seguito viene riportata la formulazione utilizzata ed i risultati ottenuti.

$$t = \frac{\phi_0 - \phi_t}{2i_{corr} * k} + t_{in} \quad (7.1)$$

Dove i termini hanno il seguente significato e valore:

- $\phi_0 = 20 \text{ mm}$ è il diametro iniziale della barra;
- $t_{in} = 13.5 \text{ anni}$ è il tempo di innesco della corrosione;
- $k = 0.0116$ rappresenta un fattore di conversione dell'intensità di corrosione [$\mu A/cm^2$] in velocità di corrosione [$mm/anno$];
- i_{corr} è l'intensità di corrosione ed assume valori differenti in base al livello di corrosione:
 - Corrosione bassa - $i_{corr} = 0.1 \mu A/cm^2$;
 - Corrosione media - $i_{corr} = 1 \mu A/cm^2$;
 - Corrosione alta - $i_{corr} = 5 \mu A/cm^2$;

Tabella 7.11 – Scenari temporali per diverse configurazioni di sezione e livello di corrosione

Scenari temporali			
N° Configurazione	t _{corr. bassa}	t _{corr. media}	t _{corr. alta}
-	[anni]	[anni]	[anni]
1 - D18/D8	13.5	13.5	13.5
2 - D16/D6	875.6	99.7	30.7
3 - D14/D4	1737.6	185.9	48
4 - D12/D2	2599.7	272.1	65.2
5 - D10/D0	3461.8	358.3	82.5

Dopo aver determinato gli scenari temporali si può definire l'andamento nel tempo degli indici di rischio per ogni livello di corrosione. Si riporta l'andamento dei soli indici di rischio in accelerazione, nonostante il confronto sia stato effettuato anche per gli indici relativi al tempo di ritorno, poiché normalizzando i valori si ottengono risultati simili. I grafici in Figura 7.10 e Figura 7.11 mostrano la progressiva riduzione degli indici di rischio per i due meccanismi di rottura analizzati e sono stati costruiti sui valori numerici riportati in Tabella 7.9 e Tabella 7.10. I grafici sono validi per entrambe le direzioni in quanto caratterizzate dagli stessi risultati. Il decadimento dell'indice di rischio risulta particolarmente critico nel caso di meccanismo duttile e condizione di degrado elevato.

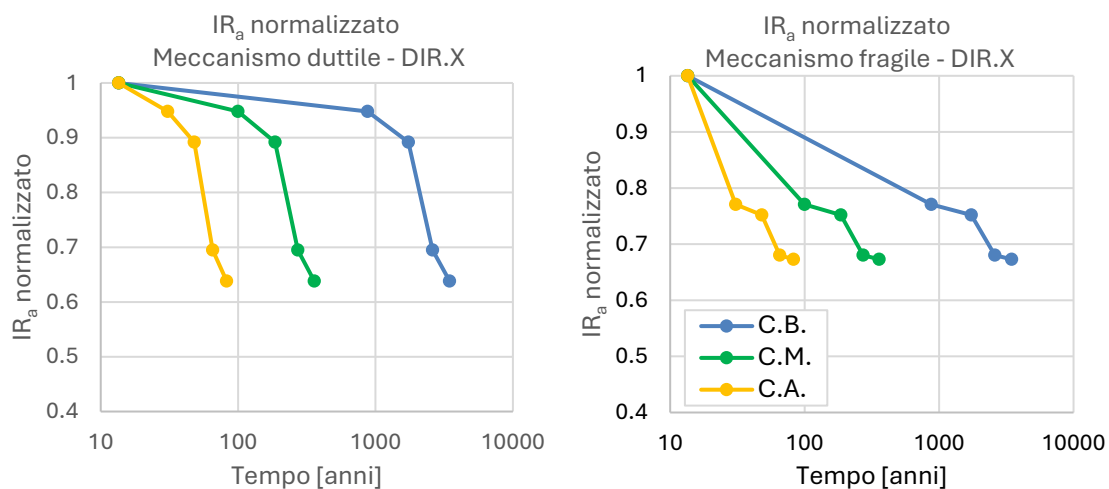


Figura 7.9 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo (scala logaritmica) per livello di corrosione, dir.x

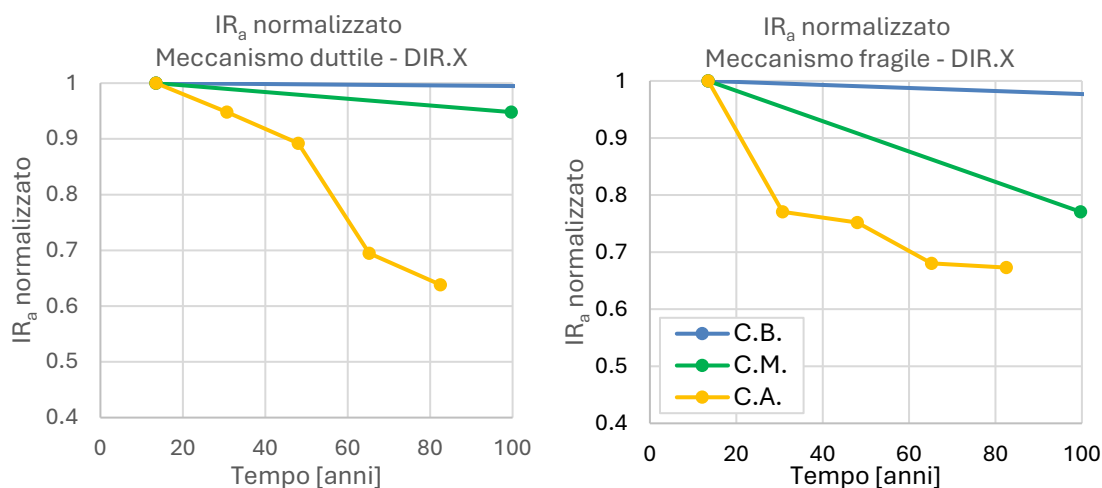


Figura 7.10 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo per livello di corrosione, dir.x

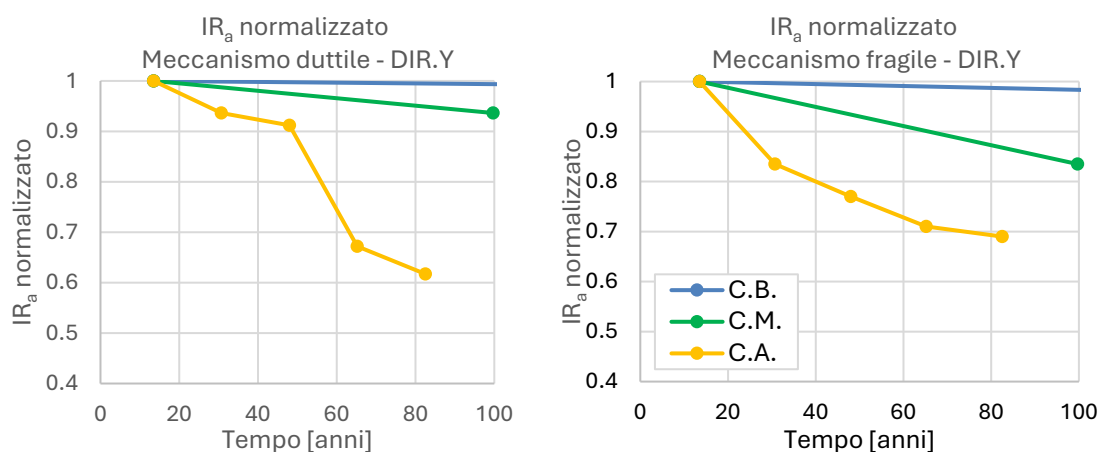


Figura 7.11 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo per livello di corrosione, dir.y

Di seguito vengono riportati i valori di indici di rischio per tre scenari temporali (25, 50, 75 anni) per i diversi scenari di corrosione in modo da evidenziare la differenza tra i diversi livelli di degrado. I valori sono stati ottenuti tramite

interpolazione tra due punti dai grafici presentati in precedenza per l'anno corrispondente. I valori iniziali di indice di rischio a 13.5 anni sono i seguenti:

- IR_a per meccanismo di rottura duttile, dir.x: 1.785
- IR_a per meccanismo di rottura duttile, dir.y: 1.475
- IR_a per meccanismo di rottura fragile, dir.x: 0.265
- IR_a per meccanismo di rottura fragile, dir.y: 0.200

Tabella 7.12 – Indici di rischio di accelerazione per meccanismo di rottura e direzione

Meccanismo di rottura: rotazione				
Indice di rischio	corrosione	25 anni	50 anni	75 anni
IR_a - DIR.X	Bassa	1.785	1.782 (-0.17%)	1.779 (-0.34%)
	Media	1.774 (-0.63%)	1.747 (-1.99%)	1.720 (-3.36%)
	Alta	1.724 (-3.41%)	1.552 (-12.91%)	1.184 (-33.47%)
IR_a - DIR.Y	Bassa	1.475	1.472 (-0.20%)	1.469 (-0.41%)
	Media	1.463 (-0.77%)	1.436 (-2.43%)	1.409 (-4.11%)
	Alta	1.413 (-4.18%)	1.305 (-11.36%)	0.946 (-35.61%)
Meccanismo di rottura: taglio				
Indice di rischio	corrosione	25 anni	50 anni	75 anni
IR_a - DIR.X	Bassa	0.265	0.263 (-0.75%)	0.262 (-1.13%)
	Media	0.258 (-2.76%)	0.240 (-8.83%)	0.222 (-14.97%)
	Alta	0.225 (-15.07%)	0.198 (-24.91%)	0.180 (-31.26%)
IR_a - DIR.Y	Bassa	0.200	0.199 (-0.50%)	0.198 (-1.00%)
	Media	0.196 (-1.99%)	0.186 (-6.33%)	0.176 (-10.72%)
	Alta	0.178 (-10.84%)	0.153 (-23.16%)	0.140 (-29.30%)

7.7. Analisi Time History

In questo paragrafo verranno mostrati i risultati ottenuti dall'analisi dinamica non lineare (Time History) ripercorrendo i passaggi descritti precedentemente al Paragrafo 5.4.

L'analisi viene effettuata per ogni configurazione di sezione precedentemente analizzata nella MPA.

7.7.1. Accelerogrammi spettro-compatibili

Di seguito viene riportata la combinazione degli accelerogrammi spettro-compatibili in relazione allo spettro di risposta di progetto del viadotto. I criteri di selezione adottati sono illustrati al Paragrafo 5.4.3.

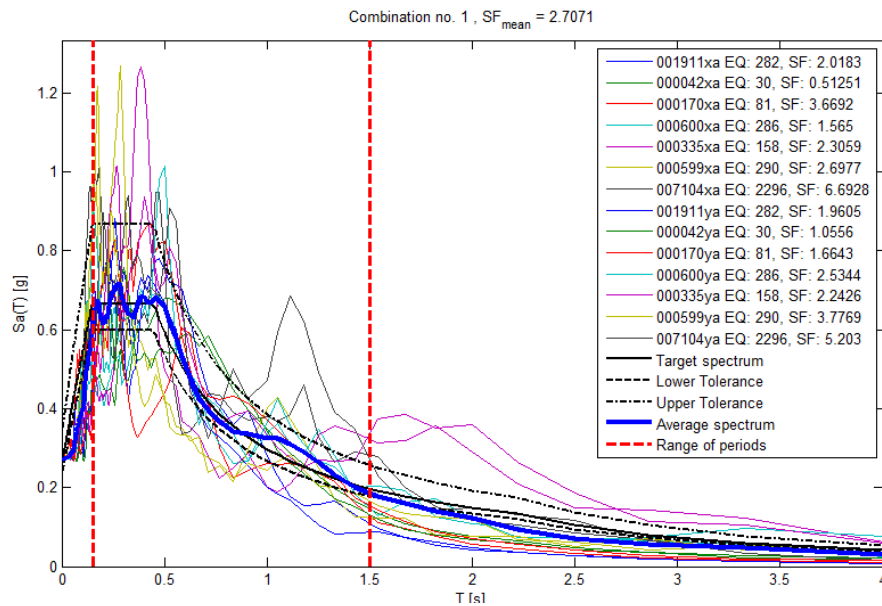


Figura 7.12 – Combinazione degli spettri per analisi TH del viadotto B88

7.7.2. Analisi delle configurazioni di sezione

Di seguito verrà riportato il procedimento di calcolo dell'indice di rischio e l'analisi della crisi del viadotto per ogni configurazione di sezione seguendo il procedimento descritto nel Paragrafo 6.5.2

7.7.2.1. Calcolo dell'indice di rischio

L'ottenimento dell'indice di rischio per ogni configurazione di sezione consiste in una procedura iterativa descritta al Paragrafo 5.4.7.

Partendo dall'applicazione di un fattore di scala ad ogni accelerogramma che non comporta la crisi della struttura, si incrementa tale fattore fino a raggiungere il cedimento di una delle cerniere plastiche. Il valore del fattore di scala associato al cedimento rappresenta l'indice di rischio della struttura per quel dato evento sismico. Sviluppando questo procedimento per ogni registrazione si otterranno sette valori di fattore di scala la cui media rappresenta l'indice di rischio della struttura, essendo la combinazione degli eventi spettro-compatibili con lo spettro di risposta di progetto.

Di seguito verranno riportati i fattori di scala associati ad ogni evento sismico corrispondenti all'iterazione che porta allo scenario di crisi della struttura.

Tabella 7.13 – Fattori di scala degli accelerogrammi corrispondenti allo scenario di crisi del viadotto

Fattori di scala e Indice di Rischio					
ID HEARTHQUAKE	D20/D8	D18/D6	D16/D4	D14/D2	D12/D0
000042	0.2	0.175	0.15	0.125	0.125
000170	0.25	0.225	0.175	0.175	0.15
000335	0.35	0.3	0.25	0.225	0.225
000599	0.55	0.45	0.375	0.35	0.325
000600	0.25	0.2	0.175	0.175	0.175
001911	0.4	0.2	0.175	0.15	0.15
007104	0.5	0.3	0.225	0.2	0.2
IR	0.36	0.26	0.22	0.20	0.19

7.7.2.2. Analisi dello scenario di crisi

In questo paragrafo si vuole studiare la crisi del viadotto. In particolare, si vuole indagare il grado di plasticizzazione della cerniera arrivata a cedimento e delle altre cerniere plastiche in modo da cogliere la combinazione del meccanismo fragile e duttile.

Di seguito vengono riportati i valori delle sollecitazioni a momento e taglio ottenuti dallo studio di un singolo evento sismico (000042), poiché la ridondanza dei risultati ottenuti è stata dimostrata nel Paragrafo 6.5.2.2.

Nelle tabelle viene evidenziato lo scenario di crisi: per ogni configurazione il viadotto collassa per meccanismo di rottura fragile sull'asse z della sezione della cerniera plastica. Per le prime tre configurazioni la cerniera cedevole è situata alla base della pila 1, mentre per le ultime due è situata in corrispondenza del cambio di sezione della pila 4. Inoltre, si vuole evidenziare come per le prime tre configurazioni e per l'ultima configurazione la cerniera collassata e quelle non arrivate a rottura non risultino plasticizzate per meccanismo duttile, in quanto non raggiungono il valore di momento e rotazione di plasticizzazione, invece la quarta configurazione presenta la plasticizzazione della cerniera plastica posta alla base della pila 5. Questo significa che prima della rottura fragile della pila 4 si verifica un danneggiamento alla base della pila 5 che può essere utilizzato come monito per la successiva crisi della struttura. Tra parentesi viene riportata la frazione in percentuale tra i valori ottenuti ed i valori di rottura, in caso di taglio, e snervamento, in caso di momento.

Tabella 7.14 - Valori di snervamento e rottura delle cerniere plastiche per meccanismo di rottura duttile e fragile.

Config.	C.P.	Asse	V_u [kN]	D_u [m]	M_y [kN*m]	R_y [rad]	R_u [rad]
D20/D8	PILA 1-4	Y	188.68	2.41E-05	956.14	2.92E-03	1.85E-02
		Z	189.20	2.42E-05	956.14	2.92E-03	1.85E-02
D18/D6	PILA 1-4	Y	160.59	2.11E-05	922.47	3.07E-03	1.84E-02
		Z	160.59	2.11E-05	922.47	3.07E-03	1.84E-02
D16/D4	PILA 1-4	Y	137.18	1.76E-05	846.13	2.96E-03	1.85E-02
		Z	137.18	1.76E-05	846.13	2.96E-03	1.85E-02
D14/D2	PILA 1-4	Y	121.98	1.52E-05	775.53	2.85E-03	1.49E-02
		Z	121.98	1.52E-05	775.53	2.85E-03	1.49E-02
D12/D0	PILA 1-4	Y	117.33	1.43E-05	714.37	2.75E-03	1.43E-02
		Z	117.33	1.43E-05	714.37	2.75E-03	1.43E-02

In Figura 7.13 viene riportato lo stato delle cerniere plastiche al momento del cedimento per meccanismo fragile: in rosso viene raffigurata la cerniera arrivata a rottura, mentre in giallo lo stato elastico.

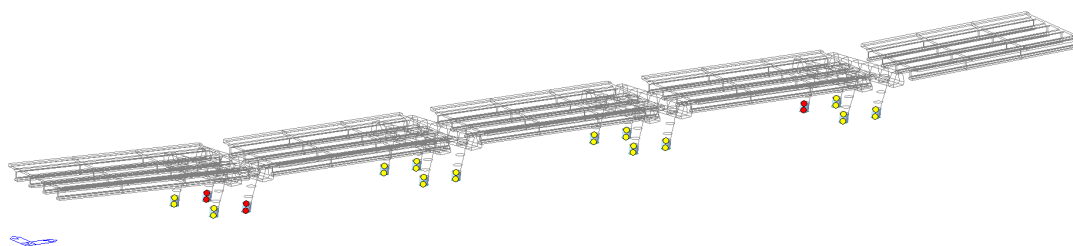


Figura 7.13 – Stato delle cerniere plastiche al momento del cedimento per meccanismo fragile – dir.y

Tabella 7.15 – Sollecitazioni a taglio allo scenario di crisi

Config.	Cerniere Plastiche	Taglio - Asse z		Taglio - Asse y	
		Time [s]	T [kN]	Time [s]	T [kN]
D20/D8	PILA 1	8.55	68.11 (36%)	8.93	184.19 (98%)
	PILA 2	8.56	73.65 (39%)	8.93	179.26 (95%)
	PILA 3	8.56	73.09 (39%)	8.93	178.42 (95%)
	PILA 4	8.56	68.48 (36%)	8.93	188.52 (100%)
D18/D6	PILA 1	8.56	59.27 (37%)	8.925	157.66 (98%)
	PILA 2	8.56	64.39 (40%)	8.925	149.86 (93%)
	PILA 3	8.56	63.84 (40%)	8.635	149.38 (93%)
	PILA 4	8.56	59.61 (37%)	8.925	160.46 (100%)
D16/D4	PILA 1	8.56	50.60 (37%)	8.925	134.17 (98%)
	PILA 2	8.57	55.13 (40%)	8.64	128.41 (94%)
	PILA 3	8.57	54.62 (40%)	8.64	128.09 (93%)
	PILA 4	8.56	50.91 (37%)	8.925	136.31 (99%)
D14/D2	PILA 1	8.56	41.96 (34%)	8.945	117.53 (96%)
	PILA 2	8.57	45.81 (38%)	8.945	113.65 (93%)

D12/D0	PILA 3	8.57	45.36 (37%)	8.945	112.84 (93%)
	PILA 4	8.57	42.21 (35%)	8.945	120.96 (99%)
	PILA 1	8.56	41.48 (35%)	8.935	113.98 (97%)
	PILA 2	8.57	45.47 (39%)	8.645	106.95 (91%)
	PILA 3	8.57	44.99 (38%)	8.645	106.60 (91%)
	PILA 4	8.57	41.74 (36%)	8.935	116.23 (99%)

Tabella 7.16 – Sollecitazioni a rotazione allo scenario di crisi

Config.	C.P.	Momento - Asse z		Momento - Asse y	
		M [kN*m]	R [rad]	M [kN*m]	R [rad]
D20/D8	PILA 1	468.83 (49%)	1.43E-4 (49%)	172.53 (18%)	5.26E-4 (18%)
	PILA 2	456.32 (48%)	1.39E-4 (48%)	186.64 (20%)	5.69E-4 (20%)
	PILA 3	454.20 (48%)	1.38E-4 (48%)	185.24 (19%)	5.65E-4 (19%)
	PILA 4	479.81 (50%)	1.46E-4 (50%)	173.61 (18%)	5.29E-4 (18%)
D18/D6	PILA 1	400.65 (43%)	1.33E-4 (43%)	150.07 (16%)	5.00E-4 (16%)
	PILA 2	382.12 (41%)	1.27E-4 (41%)	163.09 (18%)	5.43E-4 (18%)
	PILA 3	381.30 (41%)	1.27E-4 (41%)	161.71 (18%)	5.39E-4 (18%)
	PILA 4	407.77 (44%)	1.36E-4 (44%)	150.99 (16%)	5.03E-4 (16%)
D16/D4	PILA 1	340.57 (40%)	1.19E-4 (40%)	128.02 (15%)	4.48E-4 (15%)
	PILA 2	327.62 (39%)	1.15E-4 (39%)	139.61 (16%)	4.89E-4 (16%)
	PILA 3	326.81 (39%)	1.14E-4 (39%)	138.34 (16%)	4.84E-4 (16%)
	PILA 4	346.02 (41%)	1.21E-4 (41%)	128.91 (15%)	4.51E-4 (15%)
D14/D2	PILA 1	297.97 (38%)	1.10E-4 (38%)	106.16 (14%)	3.90E-4 (14%)
	PILA 2	288.15 (37%)	1.06E-4 (37%)	116.01 (15%)	4.27E-4 (15%)
	PILA 3	286.13 (37%)	1.05E-4 (37%)	114.89 (15%)	4.22E-4 (15%)
	PILA 4	306.65 (40%)	1.13E-4 (40%)	106.87 (14%)	3.93E-4 (14%)
D12/D0	PILA 1	288.78 (40%)	1.11E-4 (40%)	104.92 (15%)	4.03E-4 (15%)
	PILA 2	272.52 (38%)	1.05E-4 (38%)	115.09 (16%)	4.43E-4 (16%)
	PILA 3	271.65 (38%)	1.04E-4 (38%)	113.89 (16%)	4.38E-4 (16%)
	PILA 4	294.48 (41%)	1.13E-4 (41%)	105.65 (15%)	4.06E-4 (15%)

7.7.3. Andamento dell'indice di rischio

Una volta ottenuti gli indici di rischio delle configurazioni si determinano gli scenari temporali associati al raggiungimento di ogni configurazione per ciascun livello di corrosione seguendo la procedura illustrata al Paragrafo 6.3.5.

Dopo aver determinato gli scenari temporali si può definire l'andamento nel tempo degli indici di rischio (Paragrafo 6.5.3.1) per ogni livello di corrosione.

Tabella 7.17 – Scenari temporali per diverse configurazioni di sezione e livello di corrosione

Scenari temporali			
N° Configurazione	$t_{\text{corr. bassa}}$	$t_{\text{corr. media}}$	$t_{\text{corr. alta}}$
-	[anni]	[anni]	[anni]
1 - D18/D8	13.5	13.5	13.5
2 - D16/D6	875.6	99.7	30.7
3 - D14/D4	1737.6	185.9	48
4 - D12/D2	2599.7	272.1	65.2
5 - D10/D0	3461.8	358.3	82.5

Dopo aver determinato gli scenari temporali si può definire l'andamento nel tempo degli indici di rischio (Paragrafo 6.5.3.1) per ogni livello di corrosione.

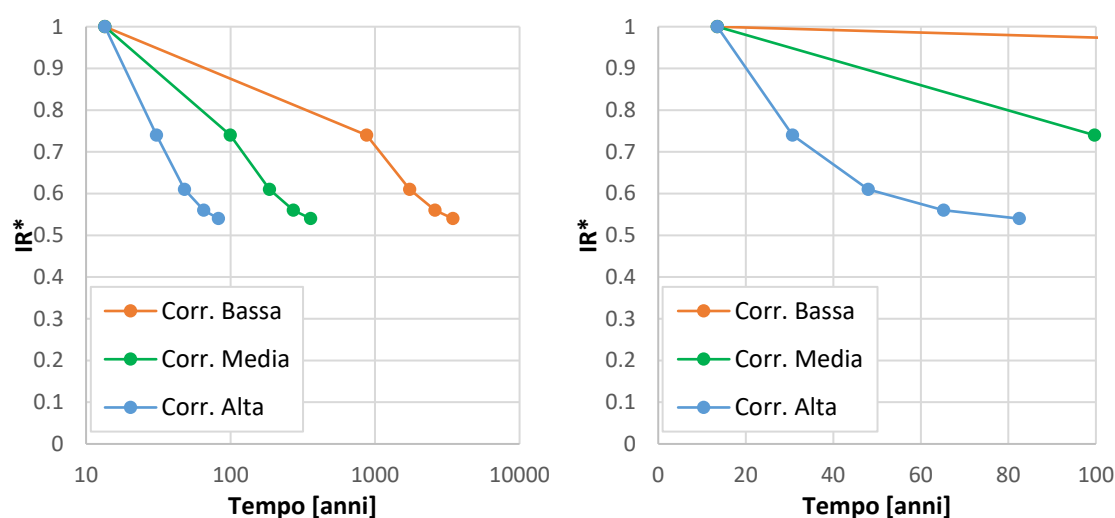


Figura 7.14 – Andamento dell'indice di rischio normalizzato nel tempo

Di seguito vengono riportati i valori di indici di rischio per tre scenari temporali (25, 50, 75 anni) per i diversi scenari di corrosione in modo da evidenziare la differenza tra i diversi livelli di degrado. I valori sono stati ottenuti tramite interpolazione tra due punti dalla Figura 7.14 per l'anno corrispondente.

Tabella 7.18 – Variazione dell'indice di rischio per scenari temporali prefissati a differenti livelli di degrado

IR _a per scenario temporale				
corrosione	13.5 anni	25 anni	50 anni	75 anni
Bassa	0.356	0.356	0.353 (-0.84%)	0.351 (-1.40%)
Media	0.356	0.345 (-3.13%)	0.318 (-10.02%)	0.291 (-17.01%)
Alta	0.356	0.295 (-17.10%)	0.216 (-38.91%)	0.196 (-44.10%)

Capitolo 8

Il viadotto R13

Si riporta di seguito l'analisi di vulnerabilità del terzo viadotto in esame. Dopo una breve descrizione dell'opera, vengono riportati le caratteristiche ed i dati maggiormente rilevanti per le analisi effettuate, infine verranno riportati i risultati.

Si procederà alla trattazione dei risultati ottenuti attraverso il solo secondo approccio, scelta giustificata ed analizzata nel paragrafo conclusivo del Capitolo 6 nel quale vengono confrontati i due metodi differenti. Di seguito si riporta brevemente la descrizione del metodo utilizzato: i risultati vengono ottenuti per cinque differenti configurazioni della sezione che variano in base al diametro commerciale delle armature longitudinali considerato. Successivamente viene determinato l'istante in cui la sezione raggiunge la configurazione in oggetto in base allo scenario di degrado così da ottenere la variazione dell'indice di rischio nel tempo. Attraverso questo approccio si ottengono dei risultati più precisi non dovendo ricorrere all'approssimazione del diametro delle barre di armatura longitudinali.

8.1. Descrizione della struttura

Il viadotto R13 è situato in Piemonte provincia di Cuneo, sorge in una zona collinare ad una quota di circa 343 m s.l.m. Fa parte dell'Autostrada A6.

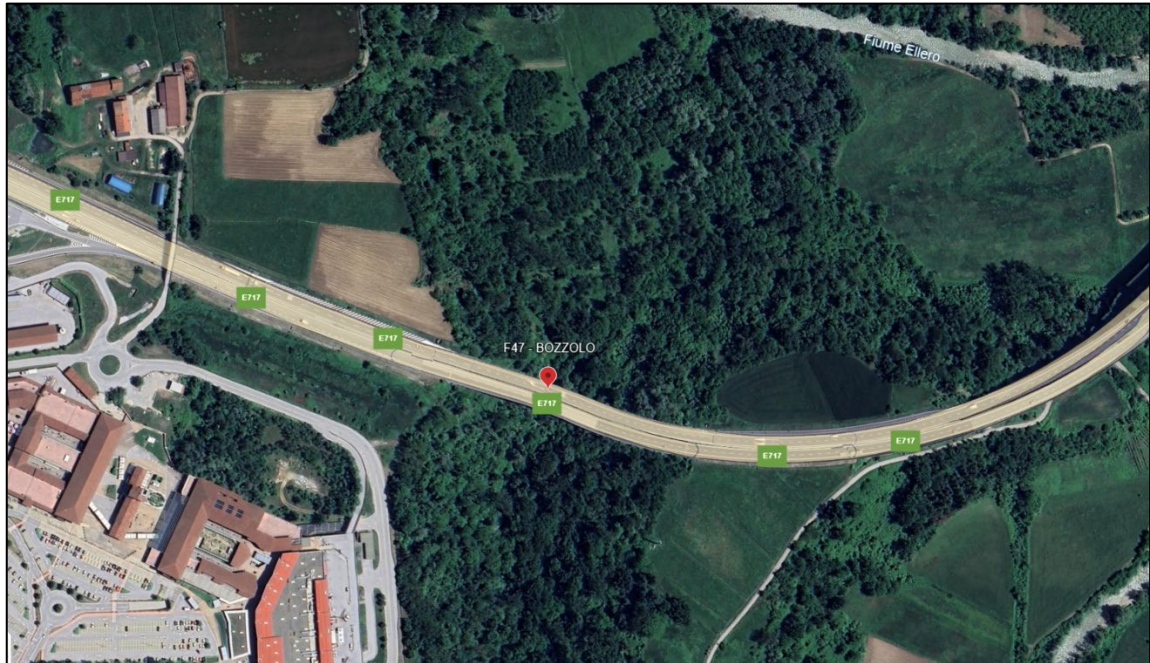


Figura 8.1 – Immagine satellitare del viadotto

L'infrastruttura è caratterizzata da sette pile e otto campate. Presenta un andamento planimetrico rettilineo e si estende per una lunghezza di 194 metri. Il viadotto è costituito da due carreggiate uguali ed indipendenti, una per ciascuna direzione, e presenta lo schema statico di ponte a travata. Gli otto impalcati che caratterizzano la struttura possono essere considerati come semplicemente appoggiati.

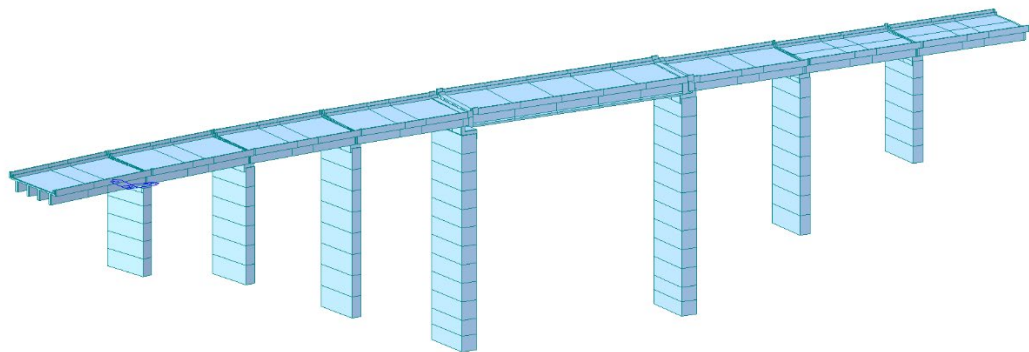


Figura 8.2 – Modello di calcolo MidasCivil di una carreggiata del viadotto

La lunghezza degli impalcati è variabile: i primi quattro impalcati hanno una lunghezza di 21 m, il quinto di 44m, i restanti tre di 21m. Gli impalcati sono caratterizzati da quattro travi in calcestruzzo armato con sezione rettangolare con anima di 25 cm e altezza pari a 1.87 m.

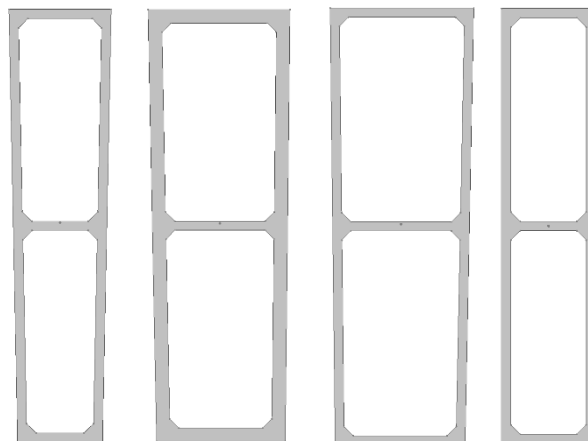


Figura 8.3 – Geometria delle sezioni caratteristiche delle pile con armature longitudinali

Le pile sono caratterizzate da sezioni a cassone di diverse dimensioni che rimangono costanti lungo l'altezza di ciascun fusto per le pile 1-2-3-6-7, mentre per le pile 4 e 5 presentano una sezione maggiorata alla base rispetto a quella di sommità. Le sezioni delle pile 1-2-3 presentano la sezione riportata nella prima sezione in Figura 8.3. Risulta essere una sezione cava avente un perimetro assimilabile ad un rettangolo 3x10m con spessore delle pareti di 20cm e setto di irrigidimento centrale. Le armature longitudinali hanno un diametro di 16 cm, mentre agli angoli della sezione vengono poste delle armature di 24 cm.

Le sezioni delle pile 4 e 5 presentano rispettivamente alla base e all'altezza di 5m rispetto alla base le sezioni riportate nella seconda e terza configurazione in Figura 8.3.. Alla base risulta essere una sezione cava avente un perimetro assimilabile ad un rettangolo 3x10 m con spessore delle pareti di 30 cm e setto di irrigidimento centrale da 20 cm, mentre quella a 5 m è caratterizzata da un perimetro assimilabile ad un rettangolo 3x10 m con spessore delle pareti di 20 cm e setto di irrigidimento centrale da 20 cm. Le armature longitudinali hanno un diametro di 16 cm, mentre agli angoli della sezione vengono poste delle armature di 30 cm.

Le sezioni delle pile 6 e 7 risultano avere un perimetro perfettamente rettangolare (quarta configurazione in Figura 8.3) con le medesime dimensioni ed armature delle pile 1-2-3. Gli assi locali delle sezioni Y e Z corrispondono rispettivamente agli assi globali del viadotto Y e X. In Tabella 8.1 vengono riportate le caratteristiche dei materiali che caratterizzano le pile, mentre in Figura 8.2 si riporta il modello FEM realizzato utilizzando il software MidasCivil.

Tabella 8.1 – Caratteristiche dei materiali delle pile

Calcestruzzo	C28/35
Armatura longitudinale	AQ50
Armatura trasversale	AQ50
Deformazione ultima acciaio	$\varepsilon_{su} = 2\%$

Le pile presentano altezze differenti tra loro:

Pila 1	Pila 2	Pila 3	Pila 4	Pila 5	Pila 6	Pila 7
14.56 m	19.56 m	28.71 m	36.61 m	36.97 m	26.46 m	16.94 m

8.2. Definizione delle configurazioni

Di seguito vengono riportati i diametri e la deformazione a rottura caratteristiche delle cinque configurazioni di sezione analizzate (Tabella 8.2). La formulazione utilizzata per il calcolo del decadimento della deformazione ultima delle barre d'armatura, riportata al Paragrafo 4.4, ammette valori negativi e minori del valore di 0.01, ovvero la deformazione di snervamento, anche se irrealistici. Per questo motivo i valori minori di 0.01 vengono arrotondati a 0.011.

Tabella 8.2 – Diametri e deformazione ultima a rottura delle armature per configurazione di sezione

PILA 1 - PILA 2 - PILA 3 - PILA 6 - PILA 7						
Armatura Longitudinale						
N° Configurazione	$\varnothing_{l,1}$	$\varnothing_{l,2}$	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
1	24	16	0.13	0.000	0.13	0.02
2	22	14	0.13	23.4375	0.070586	0.02
3	20	12	0.13	43.75	0.019094	0.019094
4	18	10	0.13	60.9375	-0.02448	0.011
5	16	8	0.13	75	-0.06013	0.011
Armatura Trasversale						
N° Configurazione	$\varnothing_{t, staffe}$	$\varnothing_{t, spilli}$	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
1	8	8	0.13	0.00	0.13	0.02
2	6	6	0.13	43.75	0.019094	0.019094
3	4	4	0.13	75.00	-0.06013	0.011
4	2	2	0.13	93.75	-0.10766	0.011
5	0	0	0.13	100.00	-0.1235	0.011

PILA 4 - PILA 5						
Armatura Longitudinale						
N° Configurazione	$\varnothing_{l,1}$	$\varnothing_{l,2}$	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
1	30	16	0.13	0.000	0.13	0.02
2	28	14	0.13	23.4375	0.070586	0.02
3	26	12	0.13	43.75	0.019094	0.019094
4	24	10	0.13	60.9375	-0.02448	0.011
5	22	8	0.13	75	-0.06013	0.011
Armatura Trasversale						
N° Configurazione	$\varnothing_t$, staffe	$\varnothing_t$, spilli	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
1	8	8	0.13	0.00	0.13	0.02
2	6	6	0.13	43.75	0.019094	0.019094
3	4	4	0.13	75.00	-0.06013	0.011
4	2	2	0.13	93.75	-0.10766	0.011
5	0	0	0.13	100.00	-0.1235	0.011

Diagrammi Momento-Curvatura

Il primo passo è stato quello di modificare il diametro delle barre longitudinali per ogni configurazione e di ricavare i nuovi diagrammi Momento – Curvatura (Figura 8.4). In questo caso è possibile notare che la corrosione provoca una visibile perdita di resistenza meccanica.

Momenti di inerzia

Si procede quindi determinando i momenti di inerzia delle sezioni. Il confronto tra le diverse configurazioni viene mostrato in Tabella 8.3. È evidente come si abbia una diminuzione delle inerzie delle pile al diminuire del diametro delle armature. In questo caso i valori ottenuti sono analoghi per i due assi della sezione in quanto è circolare, quindi simmetrica sui due assi

Tabella 8.3 – Momenti di inerzia efficace per configurazione di sezione

Momento di Inerzia efficace [m ⁴]						
Pila	Asse	1	2	3	4	5
PILA 1	Z	11.4033	10.7671 (-5.58%)	9.8024 (-14.04%)	8.9752 (-21.29%)	8.2439 (-27.71%)
	Y	0.7616	0.7035 (-7.63%)	0.6383 (-16.19%)	0.5830 (-23.45%)	0.5349 (-29.76%)
PILA 2	Z	11.5902	11.0118 (-4.99%)	10.0536 (-13.26%)	9.2391 (-20.29%)	8.5215 (-26.48%)
	Y	0.7746	0.7179 (-7.32%)	0.6535 (-15.63%)	0.5988 (-22.70%)	0.5509 (-28.88%)
PILA 3	Z	11.9181	11.3986 (-4.36%)	10.4864 (-12.01%)	9.6903 (-18.69%)	8.9893 (-24.57%)
	Y	0.7966	0.7427 (-6.77%)	0.6790 (-14.76%)	0.6253 (-21.50%)	0.5787 (-27.36%)
PILA 4	Z	24.1719	22.8389 (-5.51%)	20.6893 (-14.41%)	12.3248 (-49.01%)	10.1890 (-57.85%)

Momento di Inerzia efficace [m ⁴]						
Pila	Asse	1	2	3	4	5
	Y	3.1668	2.9196 (-7.81%)	2.6254 (-17.10%)	1.6442 (-48.08%)	1.3968 (-55.89%)
PILA 5	Z	20.8327	19.8715 (-4.61%)	17.8980 (-14.09%)	16.2179 (-22.15%)	14.6963 (-29.46%)
	Y	2.9107	2.6875 (-7.67%)	2.3954 (-17.70%)	2.1430 (-26.38%)	1.9218 (-33.97%)
PILA 6	Z	21.9979	20.8114 (-5.39%)	18.8777 (-14.18%)	11.2432 (-48.89%)	9.3203 (-57.63%)
	Y	3.0459	2.8039 (-7.95%)	2.5172 (-17.36%)	1.5853 (-47.96%)	1.3463 (-55.80%)
PILA 7	Z	19.0756	18.2139 (-4.52%)	16.4084 (-13.98%)	14.9995 (-21.37%)	13.6315 (-28.54%)
	Y	2.8066	2.5852 (-7.89%)	2.3011 (-18.01%)	2.0776 (-25.98%)	1.8623 (-33.65%)
PILA 8	Z	11.6457	11.1523 (-4.24%)	10.2779 (-11.74%)	9.5180 (-18.27%)	8.8429 (-24.07%)
	Y	0.7655	0.7116 (-7.04%)	0.6502 (-15.06%)	0.5980 (-21.87%)	0.5527 (-27.79%)
PILA 9	Z	11.2845	10.7249 (-4.96%)	9.8096 (-13.07%)	9.0244 (-20.03%)	8.3315 (-26.17%)
	Y	0.7434	0.6864 (-7.67%)	0.6241 (-16.05%)	0.5706 (-23.24%)	0.5247 (-29.41%)

Nei grafici seguenti si sono indicate le diverse configurazioni in base al diametro delle armature longitudinali di valore inferiore per facilitare la comprensione dei risultati:

- Configurazione 1: D16/D8
- Configurazione 2: D14/D6
- Configurazione 3: D12/D4
- Configurazione 4: D10/D2
- Configurazione 5: D8/D0

Vengono riportati i diagrammi momento – curvatura della Pila 1 e della Pila 4 nelle due direzioni principali, rimanendo coerenti con la distinzione effettuata nella Tabella 8.2.

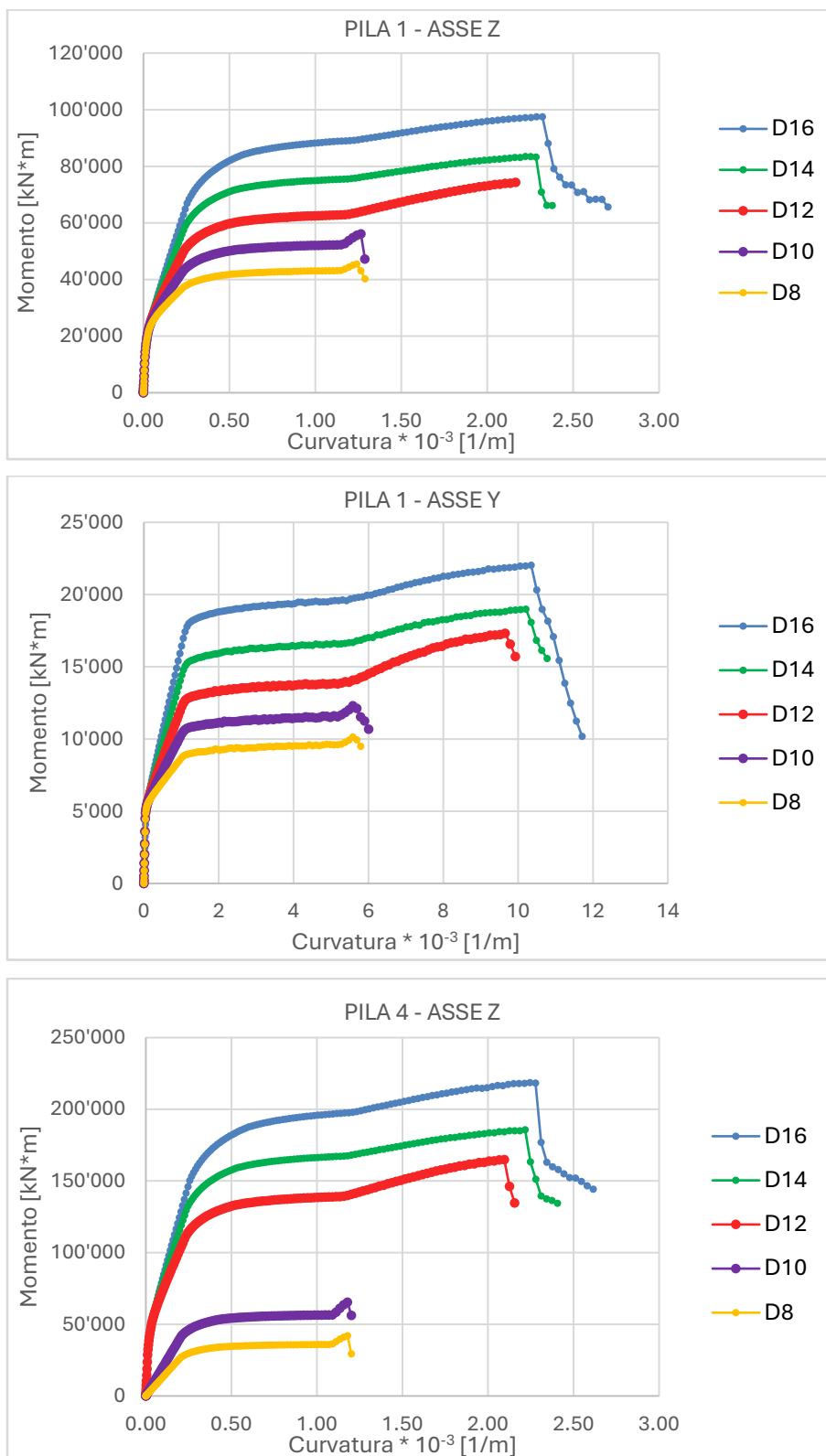


Figura 8.4 – Diagramma Momento – Curvatura per configurazione di sezione.

8.3. Analisi modale

In questo paragrafo si riportano i periodi e le masse partecipanti che derivano dall'analisi modale delle cinque configurazioni. La diminuzione dei momenti di inerzia provoca una diminuzione della rigidezza della struttura, che si manifesta tramite un aumento del suo periodo come evidenziato in Figura 8.5. In azzurro sono stati evidenziati i modi che risultano contribuenti per l'analisi *Pushover*, ovvero quelli che movimentano almeno l'1% di massa in una delle due direzioni.

Tabella 8.4 – Analisi modale per configurazione 1

Configurazione 1 – D16/D8						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	3.19861	1.964349	46.56	46.56	0.00	0.00
2	4.1639	1.5089	17.60	64.16	0.17	0.17
3	6.2763	1.0011	0.02	64.18	43.66	43.84
4	6.6853	0.9398	3.99	68.17	0.08	43.92
5	7.0167	0.8955	2.67	70.84	0.00	43.93
6	7.5928	0.8275	0.04	70.88	0.20	44.13
7	8.4589	0.7428	3.41	74.28	0.34	44.47
8	8.8602	0.7091	0.14	74.43	9.27	53.74
9	9.1372	0.6877	0.01	74.44	0.00	53.74
10	9.7435	0.6449	0.01	74.44	2.15	55.89
11	9.7964	0.6414	2.96	77.40	0.00	55.89
12	11.5729	0.5429	0.01	77.41	2.71	58.59
13	12.3172	0.5101	0.30	77.72	2.74	61.33
14	12.4520	0.5046	1.07	78.78	1.18	62.51
15	12.7854	0.4914	0.05	78.84	1.17	63.68
16	13.3751	0.4698	0.01	78.84	0.42	64.11
17	13.5256	0.4645	0.00	78.84	0.01	64.12
18	13.5366	0.4642	0.03	78.88	1.02	65.14
19	13.6427	0.4606	0.00	78.88	0.02	65.17
20	13.7510	0.4569	0.00	78.88	0.15	65.32
21	13.827745	0.45439	0	78.88	0.03	65.35
22	14.062314	0.44681	0	78.88	0.07	65.43
23	14.549432	0.431851	0.05	78.93	2.13	67.56
24	15.030433	0.418031	0	78.93	3.85	71.41
25	17.37575	0.361607	0	78.94	1.5	72.91
26	18.397299	0.341528	0	78.94	1.7	74.61
27	18.729615	0.335468	0	78.94	0	74.61
28	19.065387	0.32956	0	78.94	0	74.61
29	24.158645	0.26008	1.34	80.28	0.01	74.62
30	24.799037	0.253364	0.02	80.3	1.71	76.33
31	26.715721	0.235187	2.3	82.6	0	76.33
32	27.251448	0.230563	2.1	84.7	0	76.33

Configurazione 1 – D16/D8						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
33	28.474586	0.220659	0.64	85.34	0	76.33
34	28.90711	0.217358	0	85.34	1.95	78.28
35	30.59961	0.205335	0	85.34	0.06	78.34
36	32.764194	0.19177	4.47	89.81	0	78.34
37	33.448412	0.187847	0.04	89.85	1.75	80.08
38	35.442341	0.177279	0	89.85	0	80.09
39	35.883032	0.175102	0	89.85	0.01	80.1
40	35.926937	0.174888	0	89.85	0.04	80.14
41	35.994761	0.174558	0	89.85	0.01	80.15
42	36.269665	0.173235	0	89.85	0.01	80.16
43	36.899443	0.170279	0.01	89.86	0.47	80.62
44	36.972739	0.169941	0	89.86	0.06	80.68
45	39.145644	0.160508	0.08	89.94	0	80.68
46	40.587444	0.154806	0.24	90.18	0	80.68
47	41.148428	0.152696	0.22	90.4	0	80.68
48	42.152392	0.149059	0.04	90.44	0	80.68
49	42.953281	0.14628	0	90.44	0	80.68
50	43.299996	0.145108	0	90.44	0	80.68
51	44.530976	0.141097	0	90.44	0	80.68
52	46.387988	0.135449	0.4	90.84	0	80.68
53	46.771694	0.134337	0.54	91.38	0.01	80.69
54	49.278747	0.127503	0	91.38	2.02	82.71
55	53.183691	0.118141	0.7	92.08	0	82.71
56	58.006598	0.108318	0.05	92.13	1.31	84.02
57	58.498455	0.107408	0.48	92.61	0.11	84.13
58	61.591185	0.102014	0.1	92.71	0	84.13
59	61.906876	0.101494	0.45	93.16	0.01	84.14
60	62.409208	0.100677	0.34	93.49	0	84.14
61	63.317339	0.099233	0	93.49	0.01	84.15
62	66.544656	0.094421	0	93.49	0.9	85.05

Tabella 8.5 – Analisi modale per configurazione 2

Configurazione 2 – D14/D6						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	3.116219	2.016285	47.54	47.54	0.01	0.01
2	4.0532	1.5502	16.98	64.52	0.18	0.18
3	6.0213	1.0435	0.02	64.54	43.78	43.97
4	6.5680	0.9566	3.96	68.50	0.10	44.07
5	6.9633	0.9023	2.83	71.33	0.00	44.07
6	7.3638	0.8533	0.04	71.37	0.20	44.27
7	8.3577	0.7518	3.08	74.45	0.42	44.69
8	8.6780	0.7240	0.18	74.64	9.21	53.90

Configurazione 2 – D14/D6						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
9	9.1175	0.6891	0.00	74.64	0.20	54.10
10	9.6166	0.6534	0.00	74.65	2.33	56.43
11	9.7244	0.6461	2.87	77.51	0.00	56.43
12	11.4942	0.5466	0.02	77.53	3.24	59.67
13	12.1550	0.5169	0.12	77.64	2.93	62.60
14	12.2984	0.5109	1.17	78.82	0.47	63.08
15	12.6604	0.4963	0.07	78.89	1.46	64.54
16	13.3655	0.4701	0.01	78.89	0.43	64.97
17	13.5198	0.4647	0.00	78.89	0.01	64.98
18	13.5286	0.4644	0.03	78.92	0.88	65.86
19	13.6350	0.4608	0.00	78.92	0.02	65.88
20	13.7444	0.4571	0.00	78.92	0.16	66.04
21	13.820704	0.454621	0	78.92	0.02	66.06
22	14.056286	0.447002	0	78.92	0.09	66.15
23	14.506997	0.433114	0.05	78.98	2.12	68.26
24	14.988316	0.419206	0	78.98	3.77	72.03
25	17.02139	0.369135	0	78.98	1.33	73.36
26	18.140314	0.346366	0	78.98	1.64	75.01
27	18.585487	0.338069	0	78.98	0	75.01
28	19.057772	0.329691	0	78.98	0	75.01
29	22.945672	0.273829	1.36	80.34	0.01	75.01
30	23.98597	0.261953	0.01	80.36	1.57	76.58
31	25.537603	0.246037	2.64	82.99	0	76.58
32	26.371534	0.238256	1.72	84.71	0	76.58
33	27.539889	0.228149	0.68	85.39	0	76.58
34	28.374791	0.221435	0	85.39	1.87	78.45
35	30.587344	0.205418	0	85.39	0.06	78.51
36	32.583222	0.192835	0.04	85.43	1.85	80.37
37	32.763461	0.191774	4.47	89.9	0	80.37
38	35.413772	0.177422	0	89.9	0	80.37
39	35.838459	0.17532	0	89.9	0.02	80.39
40	35.899358	0.175022	0	89.9	0.01	80.4
41	35.973703	0.174661	0	89.9	0.01	80.41
42	36.259263	0.173285	0	89.9	0.01	80.42
43	36.735182	0.17104	0.01	89.91	0.27	80.69
44	36.96423	0.16998	0	89.91	0.05	80.74
45	39.098317	0.160702	0.08	90	0	80.74
46	39.865895	0.157608	0.47	90.46	0.01	80.75
47	41.040291	0.153098	0.12	90.58	0	80.75
48	42.078341	0.149321	0.03	90.62	0	80.75
49	42.932079	0.146352	0	90.62	0	80.75
50	43.108324	0.145753	0	90.62	0	80.75
51	44.404115	0.1415	0	90.62	0	80.75
52	45.840739	0.137066	0.43	91.05	0.01	80.76
53	46.349171	0.135562	0.37	91.42	0	80.76
54	48.397756	0.129824	0	91.42	2.21	82.97

Configurazione 2 – D14/D6						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
55	52.169451	0.120438	0.73	92.15	0	82.97
56	56.563277	0.111082	0.01	92.16	1.28	84.25
57	57.532443	0.109211	0.55	92.71	0.01	84.25
58	60.595168	0.103691	0.44	93.14	0	84.26
59	60.635631	0.103622	0.1	93.25	0.01	84.26
60	60.898524	0.103175	0.39	93.64	0	84.26
61	62.431407	0.100641	0	93.64	0.04	84.31
62	64.900923	0.096812	0	93.64	0.94	85.24

Tabella 8.6 – Analisi modale per configurazione 3

Configurazione 3 – D12/D4						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	3.037295	2.068678	48.41	48.41	0.01	0.01
2	3.9579	1.5875	16.39	64.80	0.18	0.19
3	5.7734	1.0883	0.02	64.82	43.85	44.04
4	6.4706	0.9710	4.01	68.84	0.12	44.16
5	6.9066	0.9097	2.89	71.73	0.00	44.16
6	7.1375	0.8803	0.04	71.77	0.21	44.37
7	8.2799	0.7588	2.80	74.57	0.61	44.98
8	8.5084	0.7385	0.25	74.83	9.16	54.14
9	9.1038	0.6902	0.00	74.83	0.45	54.59
10	9.4712	0.6634	0.00	74.83	2.35	56.93
11	9.6468	0.6513	2.77	77.61	0.00	56.93
12	11.4131	0.5505	0.02	77.63	3.84	60.77
13	12.0087	0.5232	0.02	77.65	2.72	63.49
14	12.1838	0.5157	1.20	78.85	0.10	63.59
15	12.5517	0.5006	0.09	78.94	1.69	65.28
16	13.3573	0.4704	0.01	78.94	0.44	65.73
17	13.5126	0.4650	0.00	78.94	0.00	65.73
18	13.5228	0.4646	0.02	78.97	0.79	66.51
19	13.6281	0.4610	0.00	78.97	0.02	66.54
20	13.7365	0.4574	0.00	78.97	0.18	66.71
21	13.813914	0.454845	0	78.97	0.01	66.72
22	14.048249	0.447258	0	78.97	0.1	66.82
23	14.468682	0.434261	0.05	79.02	2.1	68.92
24	14.93514	0.420698	0	79.02	3.67	72.59
25	16.761856	0.37485	0	79.02	1.21	73.8
26	17.852449	0.351951	0	79.03	1.57	75.38
27	18.416053	0.34118	0	79.03	0	75.38
28	19.049921	0.329827	0	79.03	0	75.38
29	21.993303	0.285686	1.37	80.39	0.01	75.38
30	23.364346	0.268922	0.01	80.41	1.45	76.83

Configurazione 3 – D12/D4						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
31	24.404346	0.257462	2.75	83.16	0	76.83
32	25.38217	0.247543	1.58	84.74	0	76.83
33	26.63595	0.235891	0.69	85.43	0	76.83
34	27.754272	0.226386	0	85.43	1.77	78.6
35	30.572647	0.205517	0	85.43	0.07	78.67
36	31.850161	0.197273	0.04	85.47	1.86	80.52
37	32.762478	0.19178	4.48	89.95	0	80.52
38	35.38787	0.177552	0	89.95	0	80.52
39	35.800524	0.175505	0	89.95	0.02	80.55
40	35.885123	0.175092	0	89.95	0.01	80.55
41	35.947796	0.174786	0	89.95	0.01	80.56
42	36.246847	0.173344	0	89.95	0	80.56
43	36.655178	0.171413	0.01	89.96	0.19	80.75
44	36.955102	0.170022	0	89.96	0.05	80.8
45	39.032544	0.160973	0.1	90.06	0	80.8
46	39.041719	0.160935	0.59	90.64	0.01	80.81
47	40.97972	0.153324	0.09	90.74	0	80.81
48	41.993189	0.149624	0.03	90.77	0	80.81
49	42.902151	0.146454	0	90.77	0	80.81
50	42.926626	0.14637	0	90.77	0	80.81
51	44.272583	0.14192	0.01	90.78	0	80.81
52	45.292103	0.138726	0.34	91.11	0.01	80.82
53	46.283409	0.135755	0.32	91.43	0	80.82
54	47.398636	0.13256	0	91.43	2.4	83.22
55	50.990221	0.123223	0.78	92.21	0	83.22
56	54.899676	0.114448	0	92.22	1.14	84.35
57	56.547256	0.111114	0.59	92.81	0	84.35
58	59.174999	0.10618	0.26	93.07	0	84.35
59	59.498617	0.105602	0.4	93.47	0.01	84.37
60	59.886207	0.104919	0.32	93.78	0	84.37
61	61.709432	0.101819	0	93.78	0.08	84.45
62	63.489781	0.098964	0	93.78	0.97	85.42

Tabella 8.7 – Analisi modale per configurazione 4

Configurazione 4 – D10/D2						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	2.931741	2.143158	50.49	50.49	0.01	0.01
2	3.7967	1.6549	14.08	64.58	0.20	0.21
3	5.2332	1.2006	0.03	64.61	42.69	42.90
4	6.3342	0.9919	4.27	68.88	0.13	43.04
5	6.7258	0.9342	0.09	68.96	0.26	43.30
6	6.9396	0.9054	3.28	72.25	0.00	43.30
7	8.1945	0.7668	2.28	74.53	1.52	44.82

Configurazione 4 – D10/D2						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
8	8.3207	0.7551	0.57	75.10	8.15	52.97
9	9.0938	0.6909	0.00	75.10	0.58	53.55
10	9.5107	0.6606	0.00	75.11	3.95	57.50
11	9.7241	0.6461	2.87	77.98	0.00	57.50
12	11.3335	0.5544	0.03	78.01	4.25	61.75
13	11.8643	0.5296	0.00	78.01	1.98	63.73
14	12.0852	0.5199	1.14	79.14	0.00	63.74
15	12.4080	0.5064	0.13	79.27	2.00	65.73
16	13.3489	0.4707	0.01	79.28	0.44	66.18
17	13.5176	0.4648	0.02	79.30	0.69	66.87
18	13.5211	0.4647	0.00	79.30	0.02	66.89
19	13.6197	0.4613	0.00	79.30	0.02	66.91
20	13.7411	0.4573	0.00	79.30	0.14	67.05
21	13.805956	0.455107	0	79.3	0	67.05
22	14.057316	0.446969	0	79.3	0.09	67.14
23	14.428933	0.435457	0.05	79.35	2.1	69.24
24	15.002929	0.418797	0	79.35	3.82	73.07
25	16.534501	0.380005	0	79.36	1.03	74.09
26	18.052124	0.348058	0	79.36	0	74.09
27	18.223377	0.344787	0	79.36	1.7	75.79
28	19.034108	0.330101	0	79.36	0	75.8
29	21.134359	0.297297	1.39	80.74	0.01	75.8
30	22.436467	0.280043	3	83.74	0	75.8
31	22.812279	0.27543	0.01	83.75	1.34	77.15
32	24.917637	0.252158	0.62	84.37	0	77.15
33	26.375866	0.238217	1.3	85.67	0	77.15
34	28.572094	0.219906	0	85.67	1.9	79.05
35	30.542116	0.205722	0	85.67	0.08	79.13
36	31.160689	0.201638	0.04	85.71	1.82	80.95
37	32.763472	0.191774	4.47	90.19	0	80.95
38	35.359591	0.177694	0	90.19	0	80.95
39	35.767233	0.175669	0	90.19	0.02	80.97
40	35.864667	0.175192	0	90.19	0	80.97
41	35.964388	0.174706	0	90.19	0.01	80.98
42	36.237967	0.173387	0	90.19	0	80.98
43	36.603774	0.171654	0	90.19	0.14	81.13
44	36.967297	0.169966	0	90.19	0.05	81.18
45	38.121116	0.164822	0.69	90.88	0.01	81.19
46	39.094316	0.160719	0.08	90.96	0	81.19
47	40.905413	0.153603	0.08	91.04	0	81.19
48	42.009753	0.149565	0.03	91.07	0	81.19
49	42.644603	0.147338	0	91.08	0	81.19
50	42.812131	0.146762	0	91.08	0.02	81.21
51	44.124939	0.142395	0.01	91.09	0	81.21
52	44.924994	0.139859	0.26	91.35	0.04	81.25
53	45.000454	0.139625	0	91.35	2.66	83.91

Configurazione 4 – D10/D2						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
54	46.349773	0.13556	0.37	91.72	0	83.91
55	51.260305	0.122574	0	91.72	0.83	84.74
56	52.182768	0.120407	0.73	92.46	0	84.74
57	54.852231	0.114547	0.61	93.07	0	84.74
58	57.701314	0.108892	0.11	93.17	0	84.74
59	58.049933	0.108238	0.51	93.69	0	84.74
60	58.399814	0.107589	0.39	94.08	0.01	84.75
61	60.668064	0.103567	0	94.08	0.13	84.88
62	62.107798	0.101166	0	94.08	0.99	85.87

Tabella 8.8 – Analisi modale per configurazione 5

Configurazione 5 – D8/D0						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
1	2.860602	2.196456	51.54	51.54	0.01	0.01
2	3.7093	1.6939	13.22	64.76	0.22	0.23
3	4.9532	1.2685	0.03	64.79	42.62	42.85
4	6.2471	1.0058	4.31	69.10	0.12	42.97
5	6.4677	0.9715	0.17	69.27	0.31	43.27
6	6.8980	0.9109	3.33	72.60	0.00	43.28
7	8.1041	0.7753	0.78	73.38	6.34	49.62
8	8.1780	0.7683	1.91	75.30	3.44	53.06
9	9.0845	0.6916	0.00	75.30	0.80	53.86
10	9.4034	0.6682	0.00	75.30	4.10	57.97
11	9.6700	0.6498	2.80	78.10	0.00	57.97
12	11.2340	0.5593	0.04	78.14	5.08	63.04
13	11.7417	0.5351	0.00	78.14	1.30	64.34
14	12.0059	0.5233	1.09	79.23	0.03	64.37
15	12.3210	0.5100	0.14	79.37	2.01	66.37
16	13.3409	0.4710	0.01	79.38	0.46	66.83
17	13.5131	0.4650	0.02	79.39	0.63	67.46
18	13.5166	0.4648	0.00	79.39	0.01	67.47
19	13.6119	0.4616	0.00	79.40	0.03	67.50
20	13.7355	0.4574	0.00	79.40	0.15	67.65
21	13.797328	0.455391	0	79.4	0	67.65
22	14.052273	0.447129	0	79.4	0.1	67.75
23	14.387841	0.436701	0.05	79.45	2.09	69.84
24	14.96951	0.419732	0	79.45	3.76	73.6
25	16.338149	0.384571	0	79.45	0.92	74.52
26	17.750056	0.353981	0.02	79.47	0	74.52
27	18.030018	0.348485	0	79.47	1.66	76.18
28	19.02338	0.330288	0	79.47	0	76.18
29	20.345507	0.308824	1.41	80.87	0.01	76.19

Configurazione 5 – D8/D0						
Modo	Frequenza	Periodo	TRAN X		TRAN Y	
			MASS	SUM	MASS	SUM
-	Hz	s	%	%	%	%
30	21.363011	0.294115	3.01	83.89	0	76.19
31	22.309345	0.281639	0.01	83.9	1.25	77.43
32	24.06318	0.261112	0.54	84.44	0	77.43
33	25.697532	0.244505	1.3	85.74	0	77.43
34	28.16868	0.223056	0	85.74	1.84	79.27
35	30.507055	0.205958	0.04	85.78	1.76	81.03
36	30.515215	0.205903	0	85.78	0.1	81.13
37	32.762817	0.191778	4.48	90.26	0	81.13
38	35.329359	0.177846	0	90.26	0	81.13
39	35.738092	0.175812	0	90.26	0.01	81.14
40	35.846267	0.175281	0	90.26	0	81.14
41	35.939116	0.174829	0	90.26	0.02	81.16
42	36.219418	0.173476	0	90.26	0	81.16
43	36.567383	0.171825	0	90.26	0.11	81.27
44	36.961119	0.169994	0	90.26	0.05	81.32
45	37.149064	0.169134	0.75	91.01	0.01	81.33
46	39.049946	0.160901	0.09	91.1	0	81.33
47	40.847877	0.153819	0.08	91.18	0	81.33
48	41.931285	0.149845	0.03	91.2	0	81.33
49	42.446091	0.148027	0	91.21	0	81.34
50	42.649603	0.147321	0	91.21	0.26	81.6
51	43.608823	0.144081	0	91.21	2.62	84.23
52	43.974719	0.142882	0.02	91.22	0	84.23
53	44.667414	0.140666	0.21	91.44	0	84.23
54	46.308197	0.135682	0.34	91.78	0	84.23
55	49.115407	0.127927	0	91.78	0.69	84.92
56	51.374386	0.122302	0.77	92.55	0	84.92
57	53.711153	0.116981	0.68	93.22	0	84.92
58	56.257273	0.111687	0.04	93.26	0	84.92
59	56.570545	0.111068	0.55	93.81	0	84.92
60	57.31643	0.109623	0.42	94.23	0.01	84.93
61	60.212651	0.10435	0	94.23	0.12	85.05
62	60.730518	0.10346	0	94.23	1.02	86.07

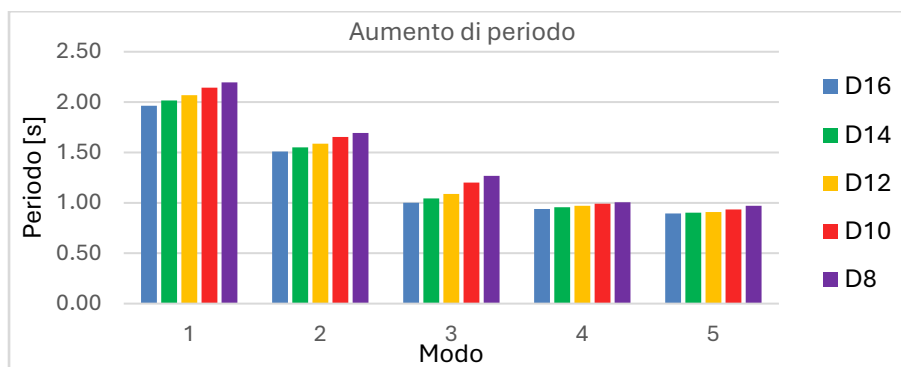


Figura 8.5 – Aumento del periodo per configurazione di sezione

8.4. Meccanismo duttile

Una volta definito il legame costitutivo delle cerniere plastiche a rotazione, è stato possibile eseguire l'analisi per le cinque configurazioni. Le cerniere vengono poste alla base delle pile (Figura 8.6). La scelta è giustificata dal fatto che le pile del viadotto presentano un comportamento a mensola. Si considera inizialmente il meccanismo di rottura a rotazione.

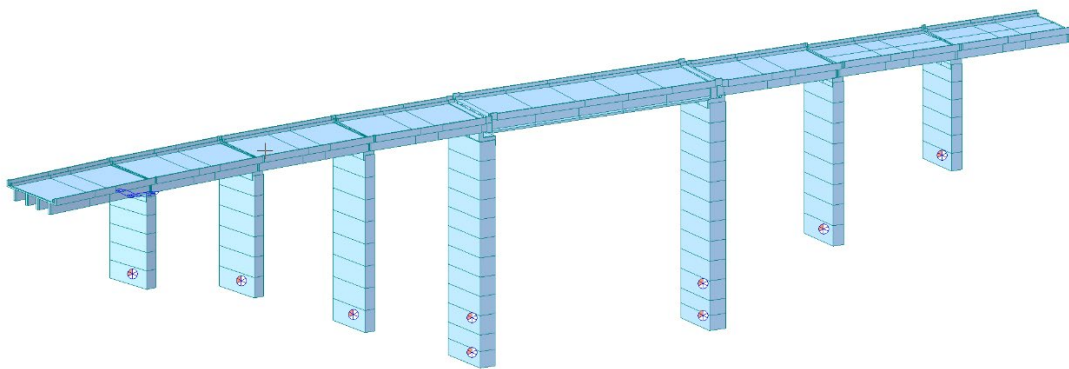
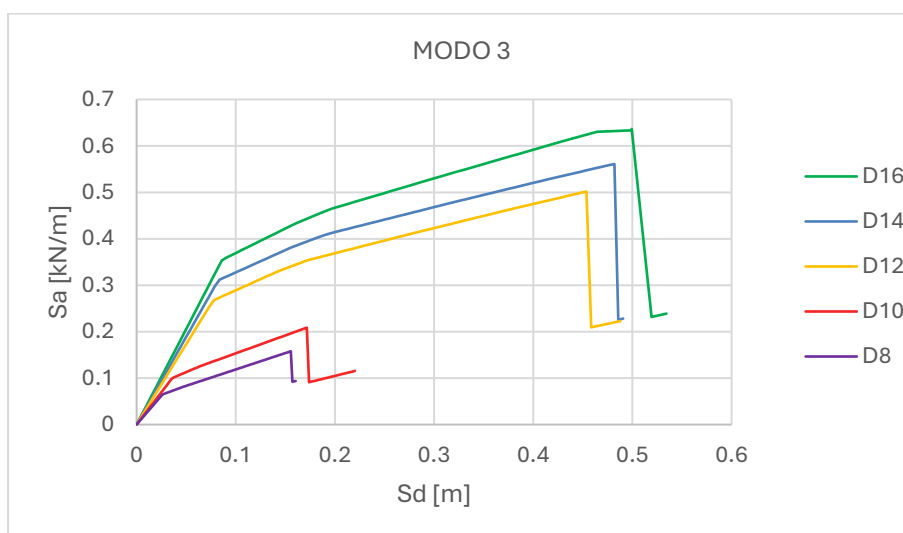
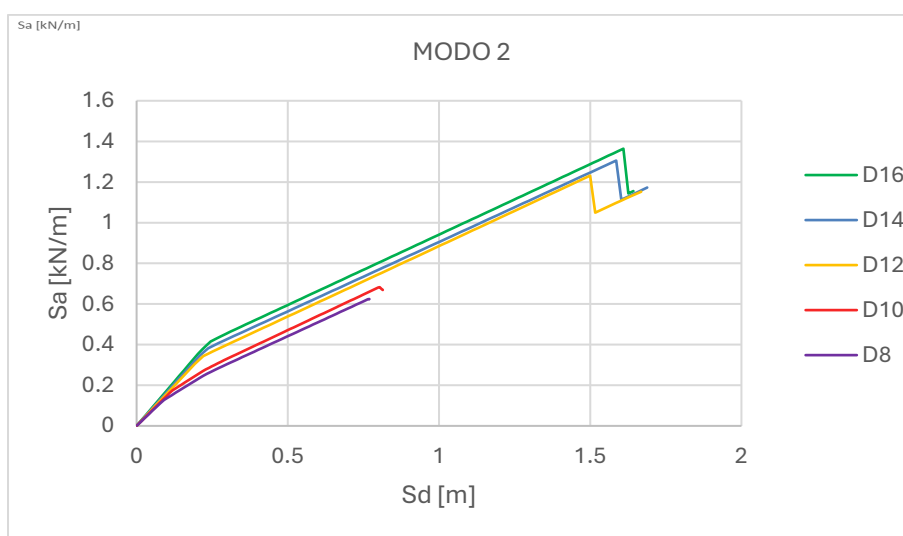
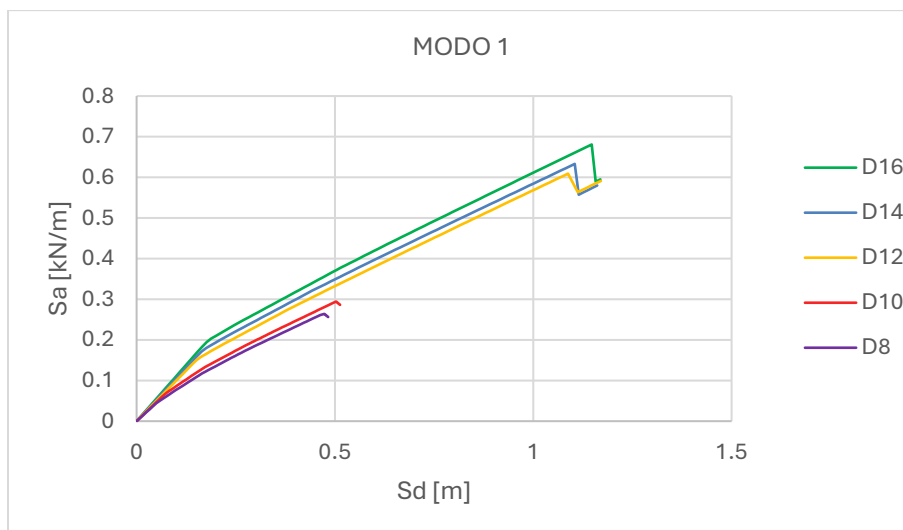


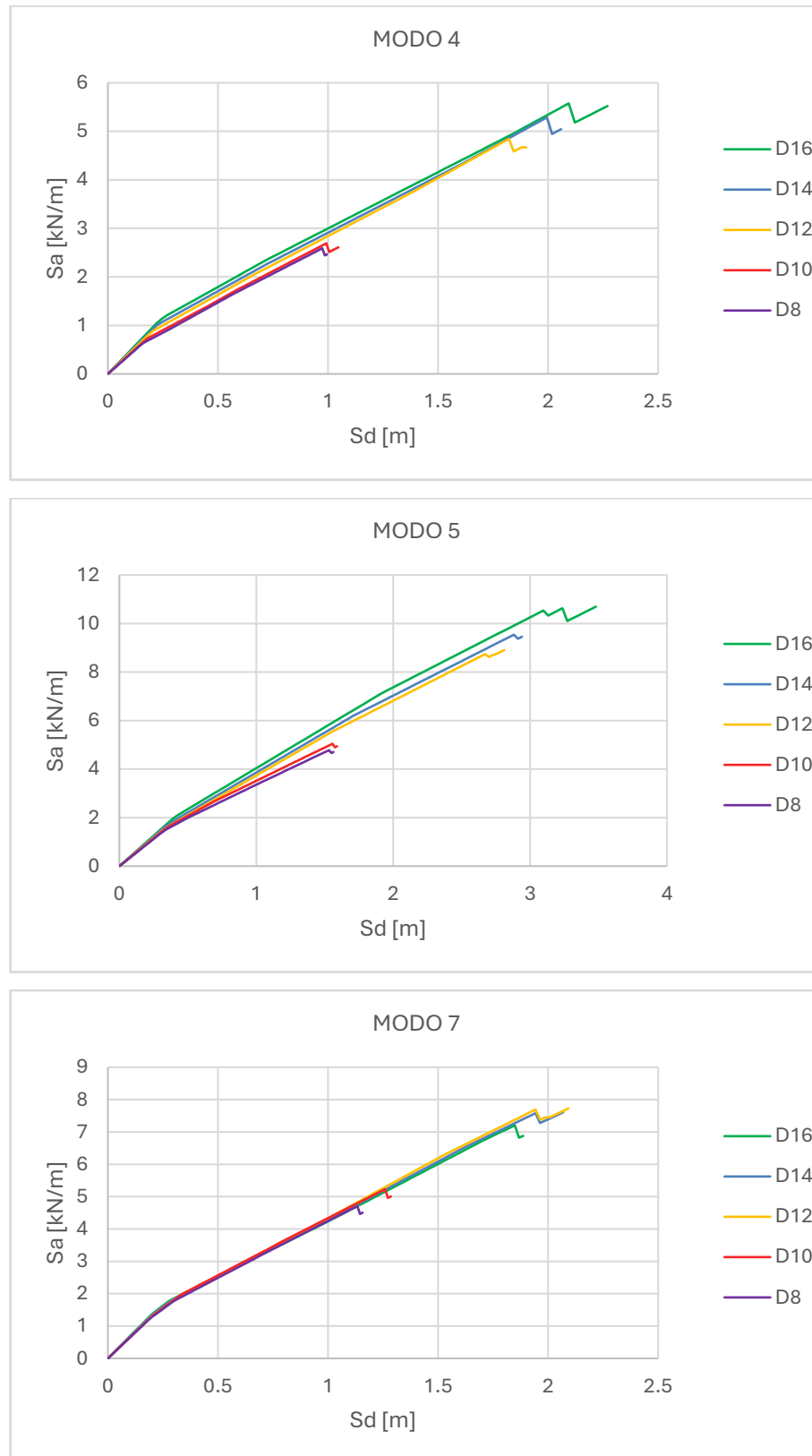
Figura 8.6 – Posizionamento delle cerniere plastiche

8.4.1. Analisi Pushover

Una volta definiti i legami costitutivi delle cerniere plastiche (Paragrafo 5.3.4.1), è stata effettuata un'analisi dinamica lineare, detta *Pushover*, che permette di studiare l'evoluzione dei meccanismi plastici all'interno del sistema strutturale. Tale analisi è stata eseguita per i soli modi aventi massa partecipante superiore all'1%. Le curve di capacità sono state trasformate dal piano Taglio - Spostamento al piano *ADRS*, come spiegato al Paragrafo 5.3.2, per poi essere messe a confronto tra loro per le diverse configurazioni (Figura 8.7). Esse presentano un tratto iniziale lineare, cui segue un secondo tratto con limite di rottura di coordinate decrescenti all'aumentare del fenomeno corrosivo. Si è scelto di riportare unicamente le curve che rappresentano graficamente al meglio la differenza di comportamento tra le varie configurazioni e relative ai modi con maggiore percentuale di massa partecipante.

Analizzando le curve, è evidente l'ulteriore riduzione in termini di resistenza, a causa del decadimento delle proprietà meccaniche (deformazione ultima a rottura) delle barre, in aggiunta alla riduzione della sezione, tra la configurazione D12 e D10.





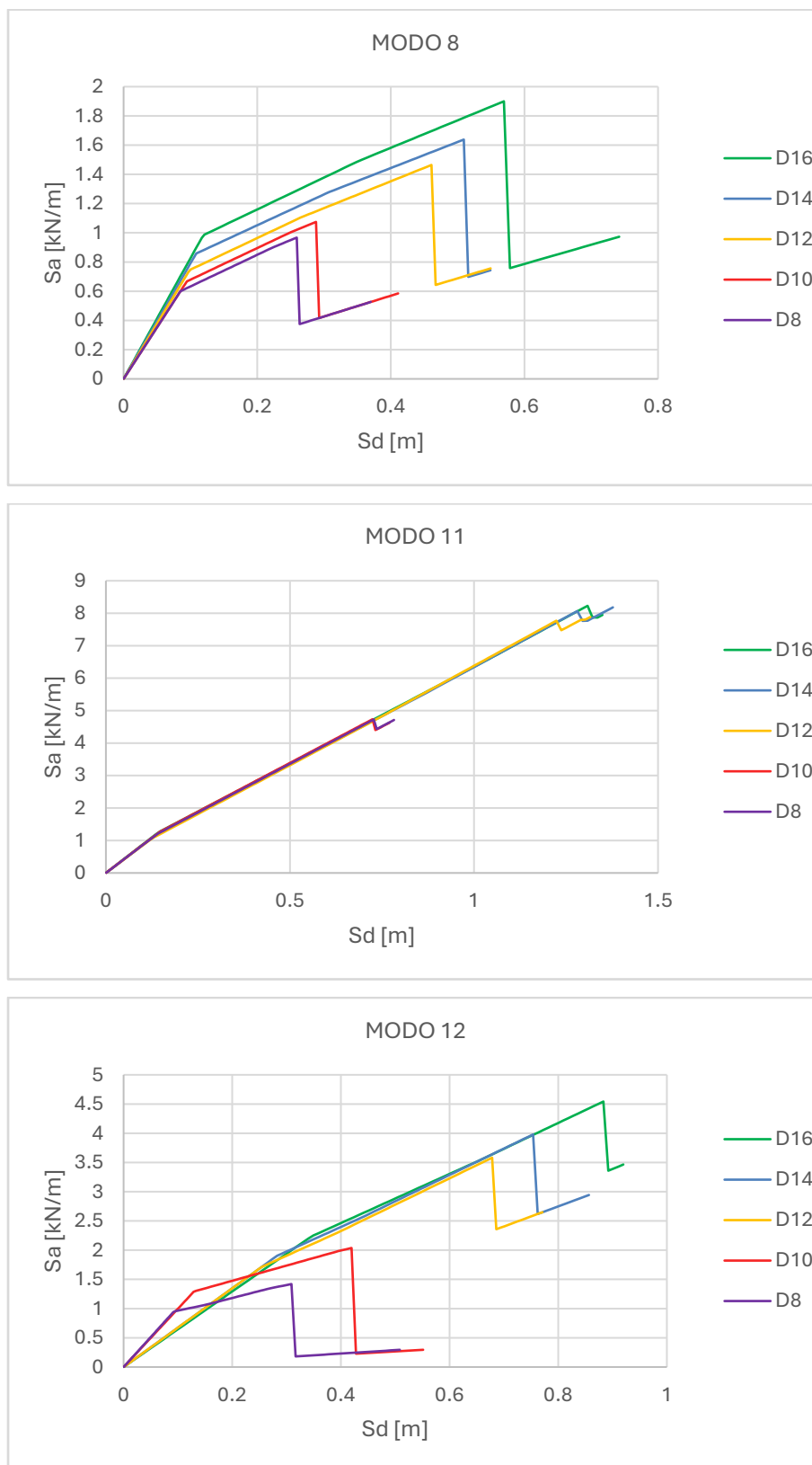


Figura 8.7 – Grafici ADRS dei modi contribuenti per meccanismo duttile a diverse configurazioni di sezione

8.4.2. Analisi Pushover modale MPA

Per completare la verifica di vulnerabilità, è stata effettuata l'analisi MPA, seguendo quanto presentato nel Paragrafo 5.3.4. I risultati, riportati in Tabella 8.9, mostrano un evidente decremento degli indici di rischio soprattutto nel passaggio dalla terza alla quarta configurazione. Questo avviene poiché vi è un decadimento della duttilità dovuto al decremento della deformazione a rottura da 2% a 1.1% oltre che alla riduzione del diametro.

Tabella 8.9 – Indici di rischio per meccanismo di rottura duttile a diverse configurazioni di sezione

Meccanismo duttile			
Indice di rischio	Configurazione	Direzione X	Direzione Y
IR _a	1 - D16/D8	7.132	5.903
	2 - D14/D6	6.794 (-4.74%)	5.672 (-3.91%)
	3 - D12/D4	6.099 (-14.48%)	5.291 (-10.37%)
	4 - D10/D2	4.078 (-42.82%)	1.99 (-66.29%)
	5 - D8/D0	3.645 (-48.89%)	1.708 (-71.07%)
IR _t	1 - D16/D8	27.803	20.185
	2 - D14/D6	25.612 (-7.88%)	18.863 (-6.55%)
	3 - D12/D4	21.332 (-23.27%)	16.772 (-16.91%)
	4 - D10/D2	10.789 (-61.19%)	3.201 (-84.14%)
	5 - D8/D0	8.923 (-67.91%)	2.471 (-87.76%)

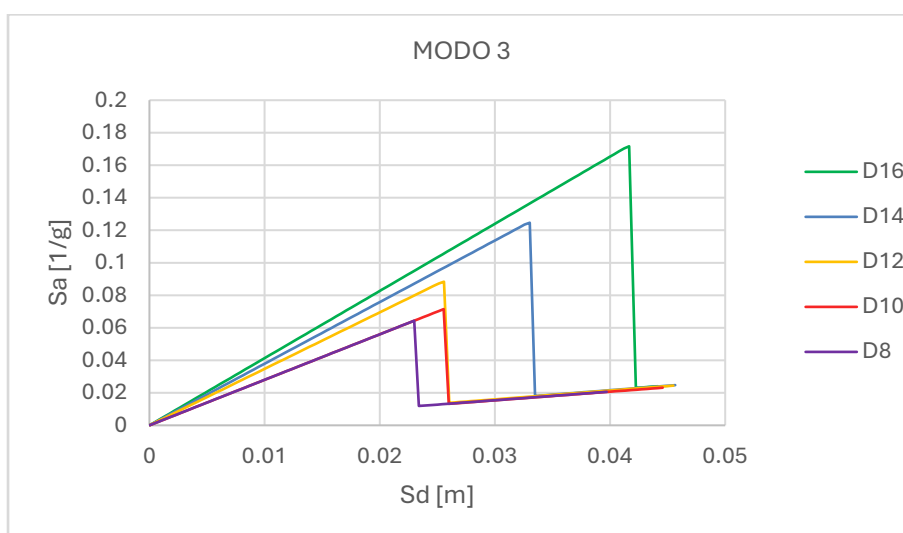
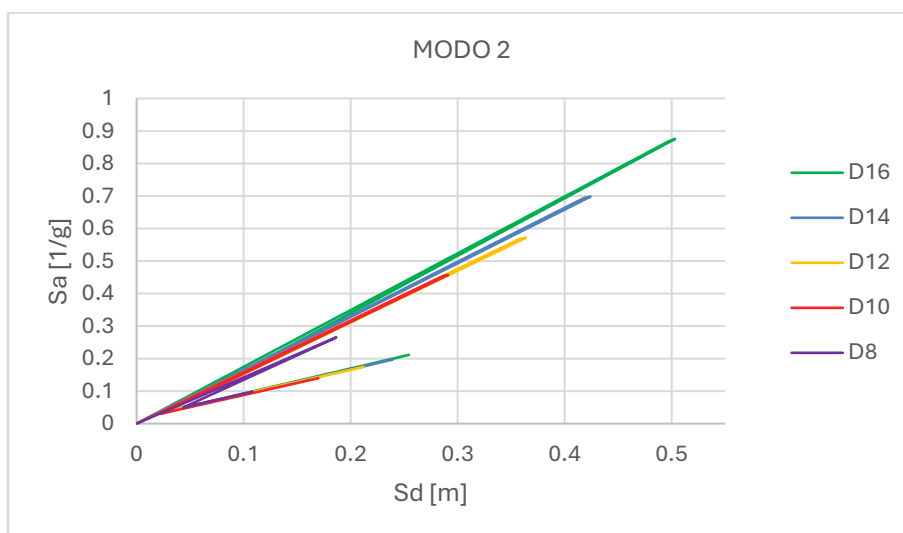
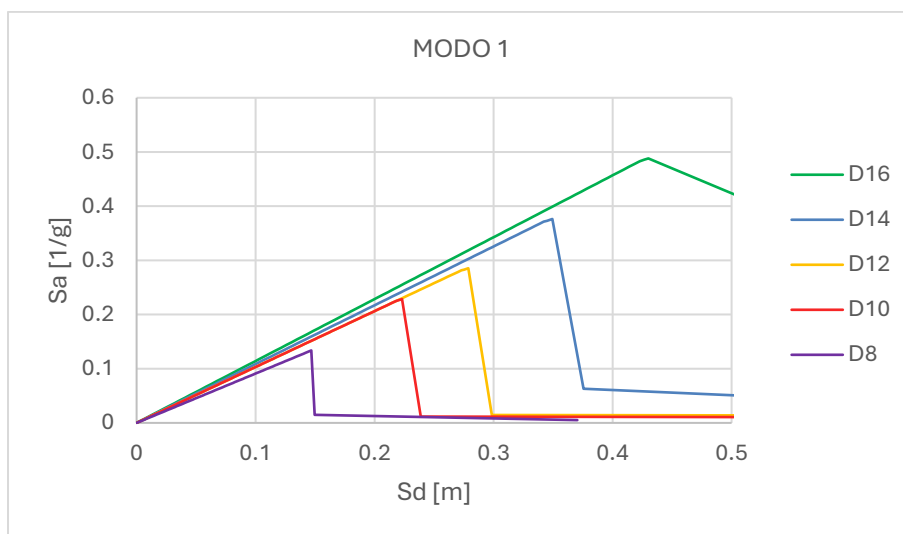
8.5. Meccanismo fragile

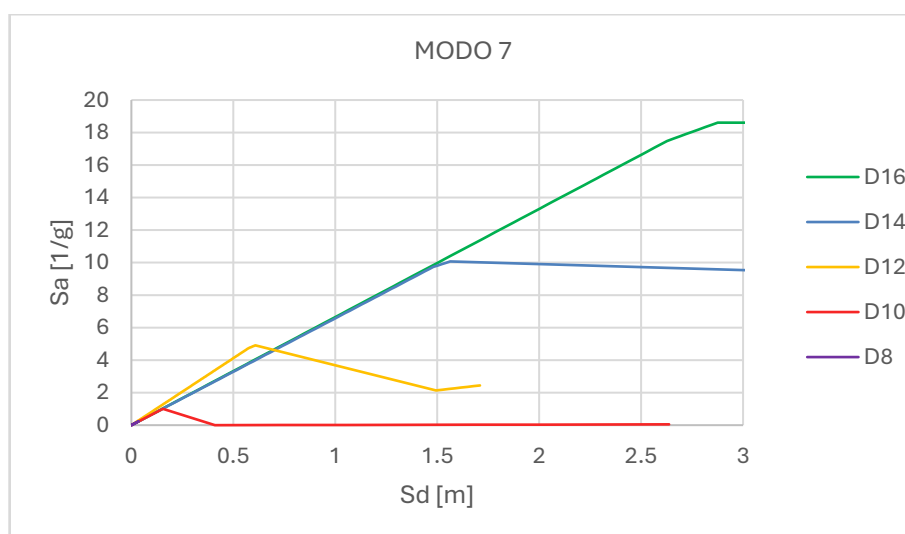
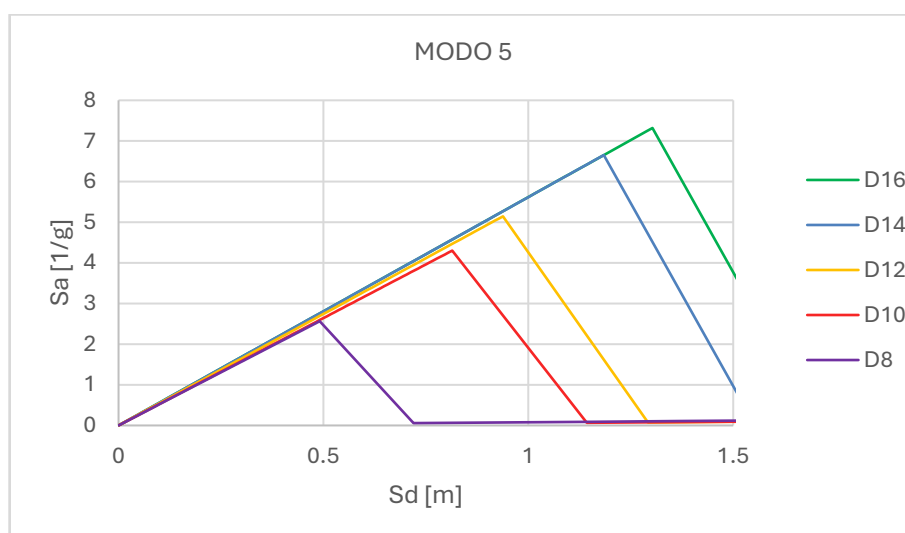
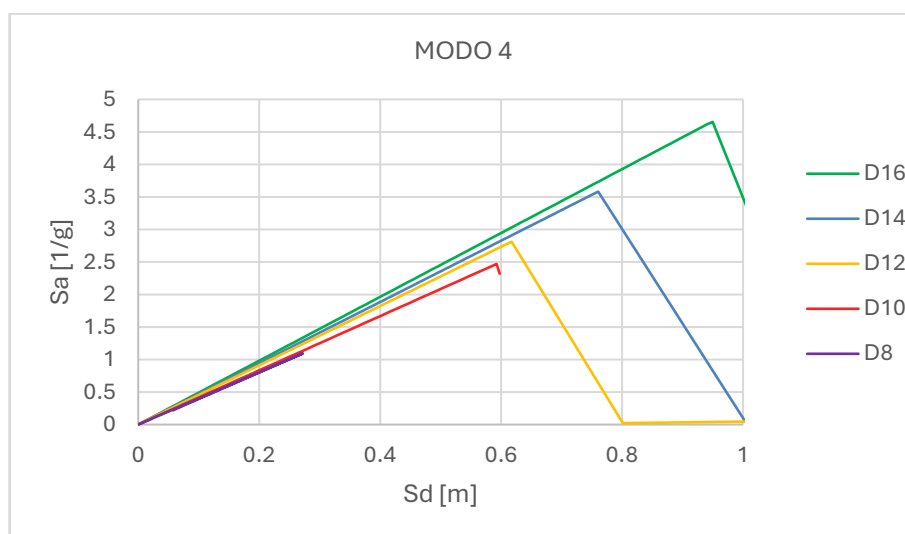
Si procede per il meccanismo fragile in modo analogo a quanto svolto per il meccanismo a rotazione. In particolare, si utilizza un secondo modello FEM in cui vengono modificate le caratteristiche delle cerniere plastiche, in accordo con quanto visto nel Paragrafo 5.3.4.1.

8.5.1. Analisi Pushover

Le cerniere vengono nuovamente poste alla base delle pile. Si ripete l'analisi dinamica lineare (Pushover) con le stesse modalità seguite per il meccanismo duttile. Nella Figura 8.8 vengono confrontate le curve di capacità nel piano ADRS delle cinque configurazioni. Tali curve rappresentano la capacità sismica della struttura in termini di accelerazioni e spostamenti spettrali. Il confronto viene effettuato per tutti i modi che presentano una massa partecipante superiore all'1%.

Analizzando le curve, è evidente l'ulteriore riduzione in termini di resistenza, a causa della corrosione delle barre.





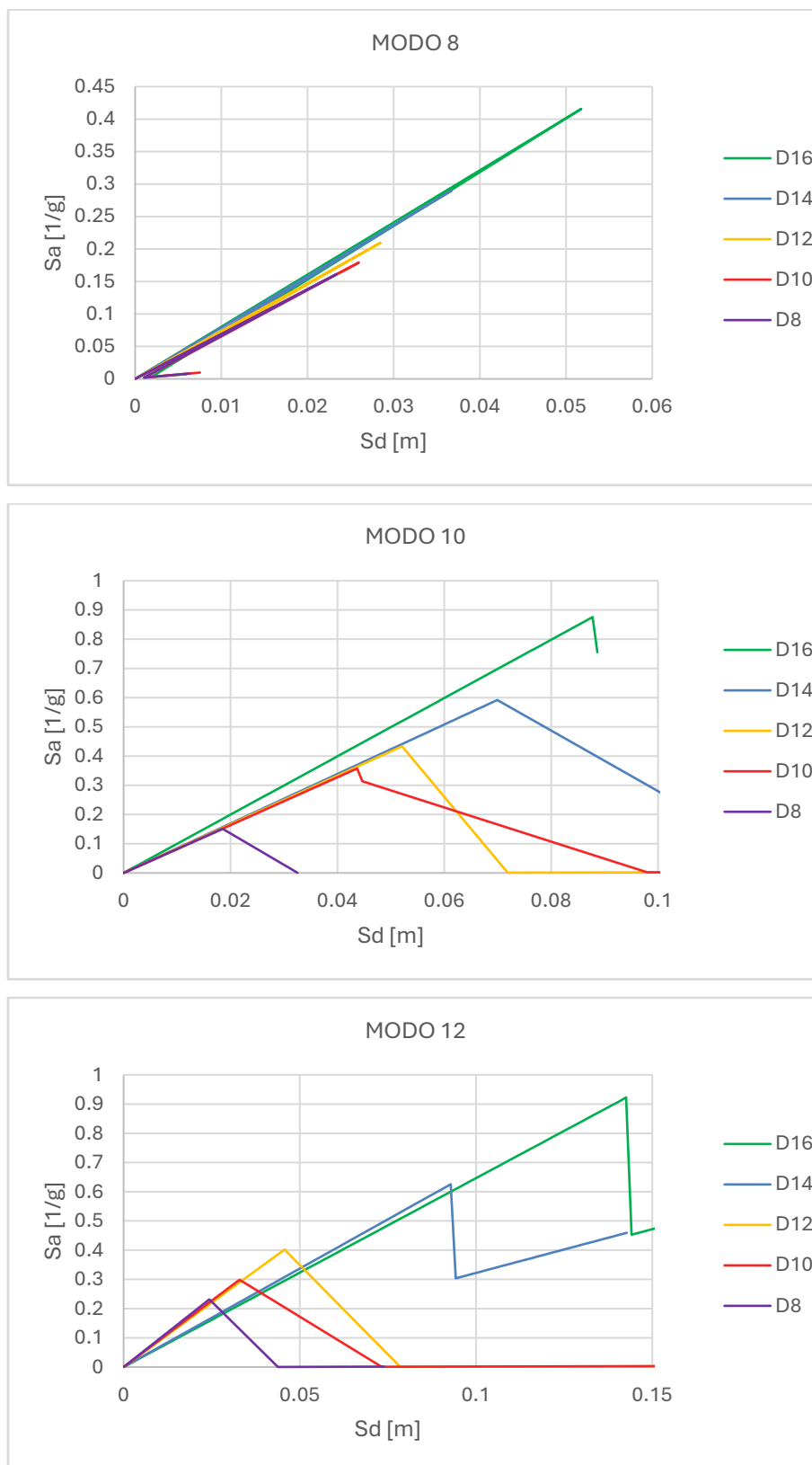


Figura 8.8 - Grafici ADRS dei modi contribuenti per meccanismo fragile a diverse configurazioni di sezione

8.5.2. Analisi Pushover modale MPA

Si procede quindi con l'analisi Pushover modale del viadotto. I risultati, riportati in Tabella 8.10, mostrano un decremento degli indici di rischio costante e meno evidente rispetto al meccanismo di rottura duttile. Questo risultato è anche dovuto ad i valori critici anche nella configurazione iniziale che limitano un decadimento degli indici di rischio eccessivo.

Tabella 8.10 - Indici di rischio per meccanismo di rottura fragile a diverse configurazioni di sezione

Meccanismo fragile			
Indice di rischio	Configurazione	Direzione X	Direzione Y
IR _a	1 - D16/D8	1.405	0.953
	2 - D14/D6	1.09 (-22.42%)	0.75 (-21.30%)
	3 - D12/D4	0.772 (-45.05%)	0.602 (-36.83%)
	4 - D10/D2	0.759 (-45.98%)	0.581 (-39.03%)
	5 - D8/D0	0.675 (-51.96%)	0.328 (-65.58%)
IR _t	1 - D16/D8	1.776	0.931
	2 - D14/D6	1.155 (-34.97%)	0.664 (-28.68%)
	3 - D12/D4	0.69 (-61.15%)	0.5 (-46.29%)
	4 - D10/D2	0.674 (-62.05%)	0.479 (-48.55%)
	5 - D8/D0	0.577 (-67.51%)	0.262 (-71.86%)

8.6. Analisi dei risultati

Una volta ottenuti gli indici di rischio delle configurazioni si determinano gli scenari temporali associati al raggiungimento di ogni configurazione per ciascun livello di corrosione (Tabella 8.11). Di seguito viene riportata la formulazione utilizzata ed i risultati ottenuti.

$$t = \frac{\phi_0 - \phi_t}{2i_{corr} * k} + t_{in} \quad (8.1)$$

Dove i termini hanno il seguente significato e valore:

- $\phi_0 = 20 \text{ mm}$ è il diametro iniziale della barra;
- $t_{in} = 13.5 \text{ anni}$ è il tempo di innesco della corrosione;
- $k = 0.0116$ rappresenta un fattore di conversione dell'intensità di corrosione [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$] in velocità di corrosione [mm/anno];
- i_{corr} è l'intensità di corrosione ed assume valori differenti in base al livello di corrosione:

- Corrosione bassa - $i_{corr} = 0.1 \mu A/cm^2$;
- Corrosione media - $i_{corr} = 1 \mu A/cm^2$;
- Corrosione alta - $i_{corr} = 5 \mu A/cm^2$;

Tabella 8.11 – Scenari temporali per diverse configurazioni di sezione e livello di corrosione

Scenari temporali			
N° Configurazione	t _{corr. bassa}	t _{corr. media}	t _{corr. alta}
-	[anni]	[anni]	[anni]
1 – D16/D8	13.5	13.5	13.5
2 – D14/D6	875.6	99.7	30.7
3 – D12/D4	1737.6	185.9	48
4 – D10/D2	2599.7	272.1	65.2
5 – D8/D0	3461.8	358.3	82.5

Dopo aver determinato gli scenari temporali si può definire l'andamento nel tempo degli indici di rischio per ogni livello di corrosione. Si riporta l'andamento dei soli indici di rischio in accelerazione, nonostante il confronto sia stato effettuato anche per gli indici relativi al tempo di ritorno, poiché normalizzando i valori si ottengono risultati simili. I grafici in Figura 8.10 e Figura 8.12 mostrano la progressiva riduzione degli indici di rischio per i due meccanismi di rottura analizzati e sono stati costruiti sui valori numerici riportati in Tabella 8.9 e Tabella 8.10. I grafici sono validi per entrambe le direzioni in quanto caratterizzate dagli stessi risultati. Il decadimento dell'indice di rischio risulta particolarmente critico nel caso di meccanismo duttile e condizione di degrado elevato.

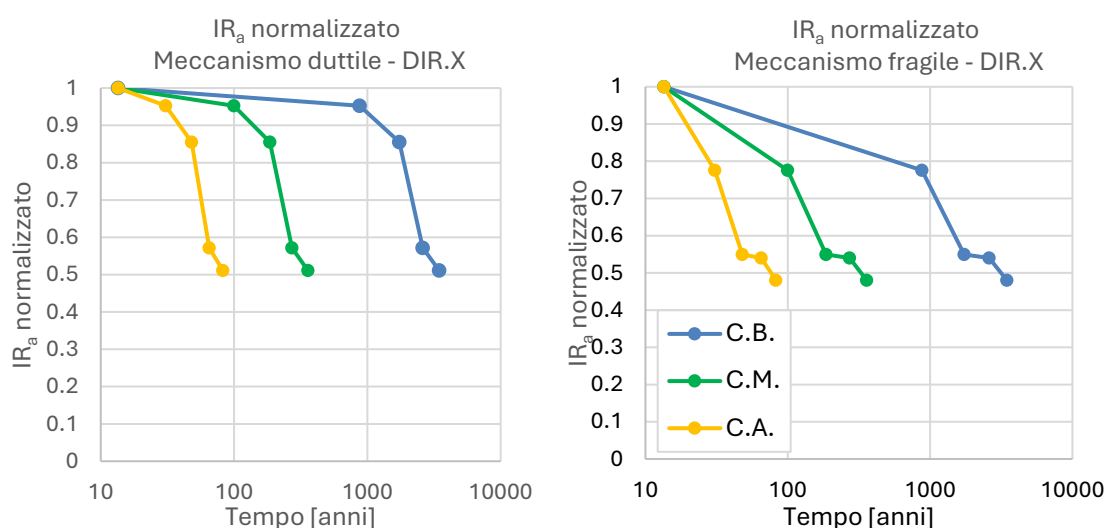


Figura 8.9 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo (scala logaritmica) per livello di corrosione, dir.x

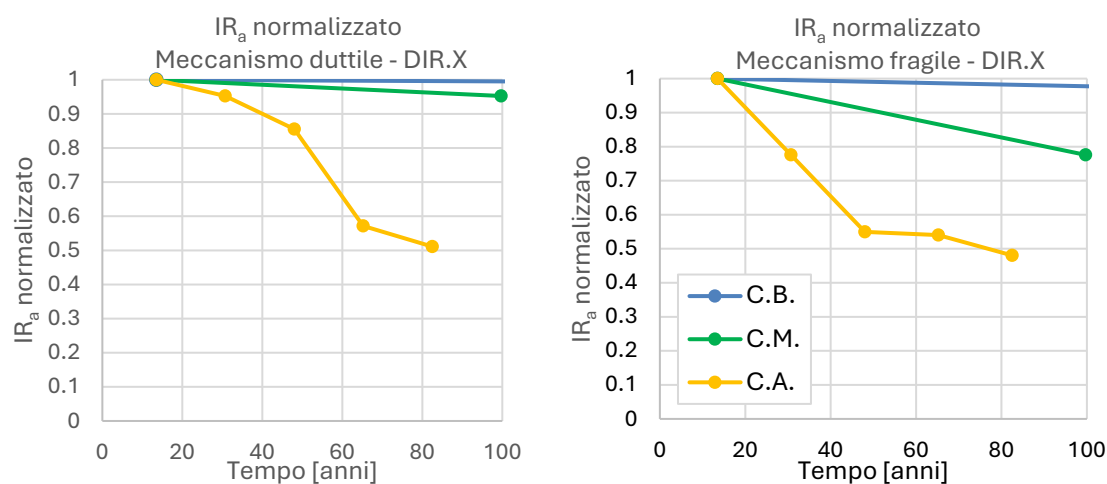


Figura 8.10 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo per livello di corrosione, dir.x

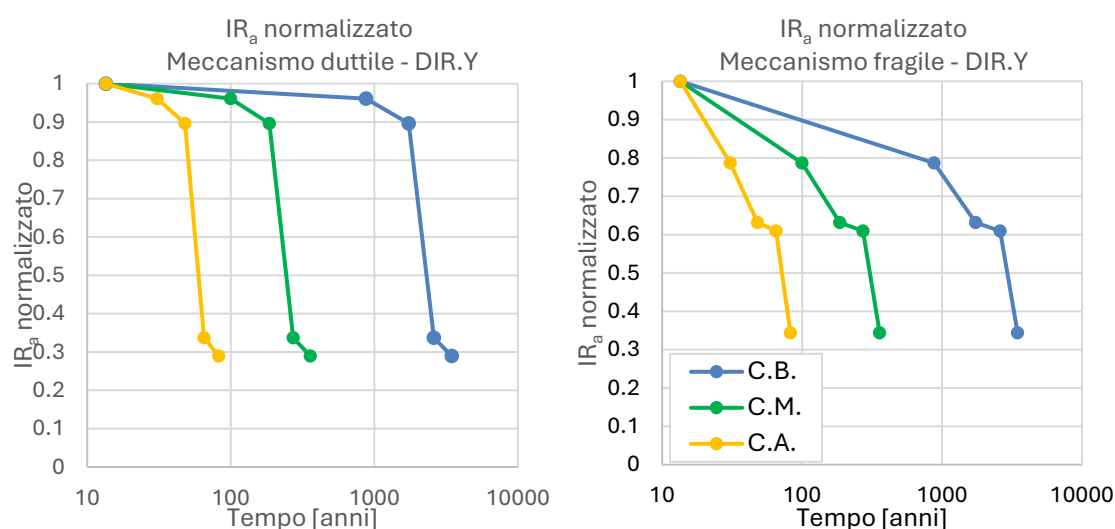


Figura 8.11 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo (scala logaritmica) per livello di corrosione, dir.y

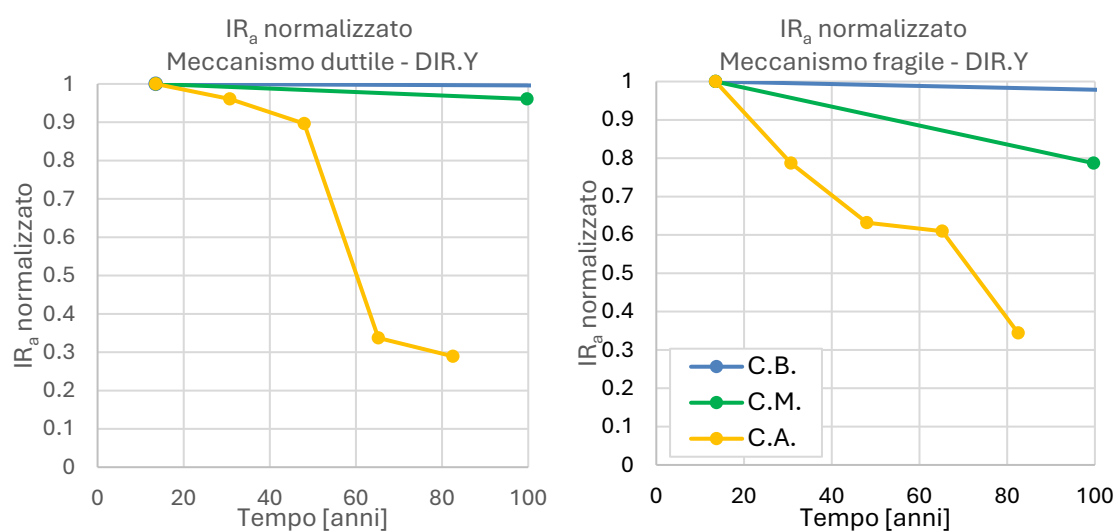


Figura 8.12 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo per livello di corrosione, dir.y

Di seguito vengono riportati i valori di indici di rischio per tre scenari temporali (25, 50, 75 anni) per i diversi scenari di corrosione in modo da evidenziare la differenza tra i diversi livelli di degrado. I valori sono stati ottenuti tramite interpolazione tra due punti dai grafici presentati in precedenza per l'anno corrispondente. I valori iniziali di indice di rischio a 13.5 anni sono i seguenti:

- IR_a per meccanismo di rottura duttile, dir.x: 7.127
- IR_a per meccanismo di rottura duttile, dir.y: 5.900
- IR_a per meccanismo di rottura fragile, dir.x: 1.401
- IR_a per meccanismo di rottura fragile, dir.y: 0.950

Tabella 8.12 – Indici di rischio di accelerazione per meccanismo di rottura e direzione

R13				
Meccanismo di rottura: rotazione				
Indice di rischio	corrosione	25 anni	50 anni	75 anni
IR _a - DIR.X	Bassa	7.127	7.118 (-0.13%)	7.108 (-0.27%)
	Media	7.087 (-0.57%)	6.989 (-1.81%)	6.891 (-3.05%)
	Alta	6.906 (-3.11%)	5.864 (-17.61%)	3.833 (-46.08%)
IR _a - DIR.Y	Bassa	5.900	5.893 (-0.12%)	5.887 (-0.22%)
	Media	5.872 (-0.47%)	5.805 (-1.49%)	5.738 (-2.52%)
	Alta	5.749 (-2.57%)	4.907 (-16.73%)	1.830 (-68.91%)
Meccanismo di rottura: taglio				
Indice di rischio	corrosione	25 anni	50 anni	75 anni
IR _a - DIR.X	Bassa	1.401	1.392 (-0.64%)	1.383 (-1.28%)
	Media	1.363 (-2.70%)	1.272 (-8.63%)	1.180 (-14.63%)
	Alta	1.194 (-14.74%)	0.770 (-44.64%)	0.711 (-48.54%)
IR _a - DIR.Y	Bassa	0.950	0.944 (-0.63%)	0.939 (-1.16%)
	Media	0.926 (-2.56%)	0.867 (-8.19%)	0.808 (-13.89%)
	Alta	0.817 (-14.00%)	0.600 (-36.51%)	0.438 (-53.36%)

8.7. Analisi Time History

In questo paragrafo verranno mostrati i risultati ottenuti dall'analisi dinamica non lineare (Time History) ripercorrendo i passaggi descritti precedentemente al Paragrafo 5.4.

L'analisi viene effettuata per ogni configurazione di sezione precedentemente analizzata nella MPA.

8.7.1. Accelerogrammi spettro-compatibili

Di seguito viene riportata la combinazione degli accelerogrammi spettro-compatibili in relazione allo spettro di risposta di progetto del viadotto. I criteri di selezione adottati sono illustrati al Paragrafo 5.4.3.

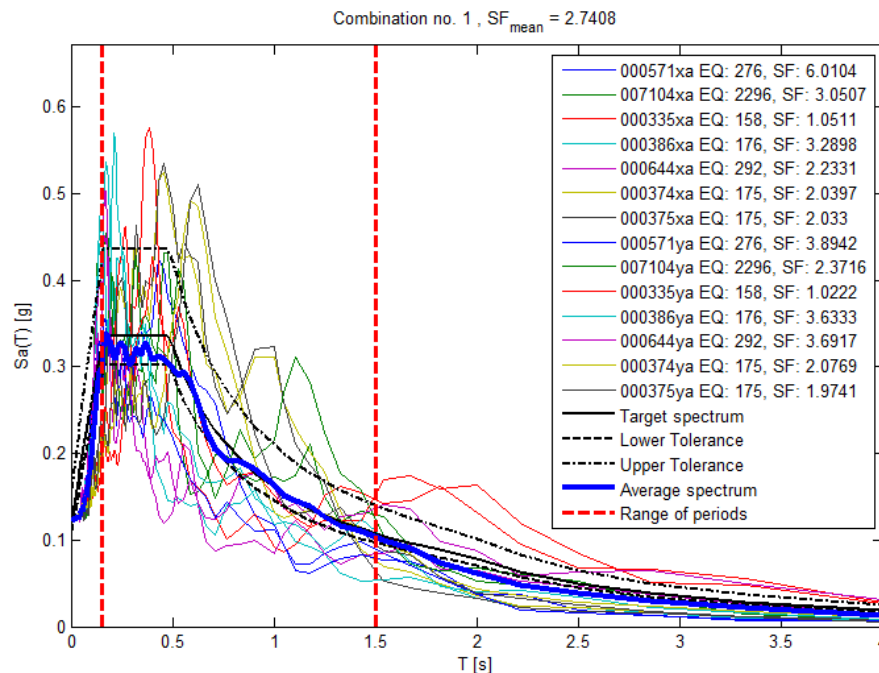


Figura 8.13 – Combinazione degli spettri per analisi TH del viadotto R13

8.7.2. Analisi delle configurazioni di sezione

Di seguito verrà riportato il procedimento di calcolo dell'indice di rischio e l'analisi della crisi del viadotto per ogni configurazione di sezione seguendo il procedimento descritto nel Paragrafo 6.5.2

8.7.2.1. Calcolo dell'indice di rischio

L'ottenimento dell'indice di rischio per ogni configurazione di sezione consiste in una procedura iterativa descritta al Paragrafo 5.4.7.

Partendo dall'applicazione di un fattore di scala ad ogni accelerogramma che non comporta la crisi della struttura, si incrementa tale fattore fino a raggiungere il cedimento di una delle cerniere plastiche. Il valore del fattore di scala associato allo scenario di crisi rappresenta l'indice di rischio della struttura per quel dato evento sismico. Sviluppando questo procedimento per ogni registrazione si otterranno sette valori di fattore di scala la cui media rappresenta l'indice di rischio

della struttura, essendo la combinazione degli eventi spettro-compatibili con lo spettro di risposta di progetto.

Di seguito verranno riportati i fattori di scala associati ad ogni evento sismico corrispondenti all'iterazione che porta alla crisi della struttura.

Tabella 8.13 – Fattori di scala degli accelerogrammi corrispondenti allo scenario di crisi del viadotto

Fattori di scala e Indice di Rischio					
ID HEARTHQUAKE	D16/D8	D14/D6	D12/D4	D10/D2	D8/D0
000335	1.4	1	0.8	0.6	0.25
000374	0.8	0.6	0.5	0.4	0.4
000375	0.8	0.7	0.5	0.4	0.4
000386	1.5	1.1	0.8	0.7	0.5
000571	1.2	0.9	0.7	0.6	0.3
000644	2	1.6	1.6	1	0.45
007104	1.1	0.8	0.8	0.5	0.4
IR	1.26	0.96	0.81	0.60	0.39

8.7.2.2. Analisi dello scenario di crisi

In questo paragrafo si vuole studiare la crisi del viadotto. In particolare, si vuole indagare il grado di plasticizzazione della cerniera arrivata a cedimento e delle altre cerniere plastiche in modo da cogliere la combinazione del meccanismo fragile e duttile.

Di seguito vengono riportati i valori delle sollecitazioni a momento e taglio ottenuti dallo studio di un singolo evento sismico (000335), poiché la ridondanza dei risultati ottenuti è stata dimostrata nel Paragrafo 6.5.2.2.

Nelle tabelle viene evidenziato lo scenario di crisi: per ogni configurazione il viadotto collassa per meccanismo di rottura fragile sull'asse z della sezione della cerniera plastica. Per le prime tre configurazioni la cerniera cedevole è situata alla base della pila 1, mentre per le ultime due è situata in corrispondenza del cambio di sezione della pila 4. Inoltre, si vuole evidenziare come per le prime tre configurazioni e per l'ultima configurazione la cerniera collassata e quelle non arrivate a rottura non risultino plasticizzate per meccanismo duttile, in quanto non raggiungono il valore di momento e rotazione di plasticizzazione, invece la quarta configurazione presenta la plasticizzazione della cerniera plastica posta alla base della pila 5 (Figura 8.15). Questo significa che prima della rottura fragile della pila 4 si verifica un danneggiamento alla base della pila 5 che può essere utilizzato come monito per la successiva crisi della struttura. Tra parentesi viene riportata la frazione in percentuale tra i valori ottenuti ed i valori di rottura, in caso di taglio, e snervamento, in caso di momento.

Tabella 8.14 - Valori di snervamento e rottura delle cerniere plastiche per meccanismo di rottura duttile e fragile

Config.	C.P.	Asse	V _u [kN]	D _u [m]	M _y [kN*m]	R _y [rad]	R _u [rad]
D16/D8	PILA 1	Y	6443.16	1.30E-03	66951.38	5.56E-04	5.00E-03
		Z	1132.43	4.52E-05	16925.34	3.60E-03	3.23E-02
	PILA 2	Y	3658.75	8.43E-04	69084.94	6.89E-04	6.19E-03
		Z	1092.65	5.35E-05	17468.81	4.14E-03	3.73E-02
	PILA 3	Y	3281.47	9.32E-04	72885.85	9.37E-04	8.43E-03
		Z	1044.47	6.86E-05	18404.18	5.16E-03	4.64E-02
	PILA 4 INGROSSO	Y	3858.31	6.84E-04	149295.19	1.16E-03	1.04E-02
		Z	1910.37	1.03E-04	53950.72	4.18E-03	3.76E-02
	PILA 4	Y	4249.77	8.63E-04	146784.38	1.11E-03	9.97E-03
		Z	1925.88	1.37E-04	56147.06	3.99E-03	3.59E-02
	PILA 5 INGROSSO	Y	3818.25	6.80E-04	140589.87	1.22E-03	1.09E-02
		Z	1894.63	1.06E-04	52974.89	4.31E-03	3.88E-02
	PILA 5	Y	4190.26	8.56E-04	139188.34	1.16E-03	1.04E-02
		Z	1927.28	1.43E-04	55390.03	4.12E-03	3.71E-02
	PILA 6	Y	3374.65	9.14E-04	70755.70	8.81E-04	7.92E-03
		Z	1060.56	6.53E-05	18232.52	5.16E-03	4.64E-02
	PILA 7	Y	5725.27	1.23E-03	66591.30	6.22E-04	5.60E-03
		Z	1116.40	4.94E-05	17243.28	4.06E-03	3.65E-02
D14/D6	PILA 1	Y	6075.11	1.84E-03	58741.03	5.22E-04	4.79E-03
		Z	810.96	3.70E-05	14454.68	3.45E-03	3.16E-02
	PILA 2	Y	2707.26	9.43E-04	61173.00	6.49E-04	5.95E-03
		Z	780.01	4.38E-05	15003.26	3.98E-03	3.65E-02
	PILA 3	Y	2353.45	1.01E-03	65122.77	8.84E-04	8.11E-03
		Z	748.14	5.65E-05	15959.88	4.95E-03	4.54E-02
	PILA 4 INGROSSO	Y	2887.56	6.79E-04	130882.21	1.09E-03	1.00E-02
		Z	1390.83	8.69E-05	45989.16	3.99E-03	3.66E-02
	PILA 4	Y	3208.74	8.69E-04	129693.47	1.03E-03	9.47E-03
		Z	1400.86	1.14E-04	47760.74	3.75E-03	3.44E-02
	PILA 5 INGROSSO	Y	2854.64	6.70E-04	123376.02	1.14E-03	1.05E-02
		Z	1388.38	9.01E-05	44994.02	4.11E-03	3.77E-02
	PILA 5	Y	3167.18	8.56E-04	123088.03	1.08E-03	9.91E-03
		Z	1399.10	1.19E-04	46882.85	3.87E-03	3.55E-02
	PILA 6	Y	2441.16	1.00E-03	63296.00	8.31E-04	7.62E-03
		Z	765.05	5.41E-05	15697.44	4.95E-03	4.54E-02
	PILA 7	Y	5401.01	1.76E-03	58944.32	5.85E-04	5.37E-03
		Z	804.79	4.07E-05	14676.12	3.89E-03	3.57E-02
D12/D4	PILA 1	Y	5754.33	1.73E-03	50364.28	5.08E-04	4.61E-03
		Z	612.15	2.76E-05	12177.67	3.39E-03	3.07E-02
	PILA 2	Y	2065.30	7.14E-04	52762.39	6.32E-04	5.74E-03
		Z	576.88	3.20E-05	12740.63	3.91E-03	3.55E-02
	PILA 3	Y	1724.02	7.36E-04	56981.71	8.65E-04	7.85E-03
		Z	545.58	4.08E-05	13696.89	4.88E-03	4.42E-02
	PILA 4 INGROSSO	Y	2231.39	5.22E-04	112128.29	1.07E-03	9.68E-03
		Z	983.67	6.10E-05	38685.17	3.92E-03	3.55E-02
	PILA 4	Y	2518.06	6.78E-04	111039.83	1.01E-03	9.13E-03
		Z	1002.54	8.13E-05	40091.43	3.67E-03	3.33E-02
	PILA 5	Y	2111.95	4.93E-04	105829.43	1.12E-03	1.01E-02
		Z					

Config.	C.P.	Asse	V _u [kN]	D _u [m]	M _y [kN*m]	R _y [rad]	R _u [rad]
	INGROSSO	Z	981.91	6.33E-05	37704.23	4.03E-03	3.66E-02
	PILA 5	Y	2426.47	6.52E-04	105354.27	1.05E-03	9.55E-03
		Z	1012.69	8.53E-05	39235.66	3.78E-03	3.43E-02
	PILA 6	Y	1816.84	7.42E-04	55460.41	8.12E-04	7.37E-03
		Z	565.18	3.96E-05	13409.21	4.87E-03	4.42E-02
	PILA 7	Y	5118.38	1.66E-03	50894.88	5.70E-04	5.17E-03
		Z	608.75	3.04E-05	12382.50	3.82E-03	3.47E-02
D10/D2	PILA 1	Y	5480.82	1.64E-03	43340.13	4.94E-04	2.65E-03
		Z	527.72	2.34E-05	10276.46	3.33E-03	1.79E-02
	PILA 2	Y	1869.71	6.41E-04	45775.26	6.17E-04	3.32E-03
		Z	481.43	2.64E-05	10846.24	3.85E-03	2.07E-02
	PILA 3	Y	1443.22	6.13E-04	50027.22	8.47E-04	4.55E-03
		Z	456.09	3.39E-05	11817.95	4.81E-03	2.58E-02
	PILA 4	Y	2023.76	4.71E-04	41619.79	9.26E-04	4.98E-03
		Z	820.66	5.06E-05	14920.86	3.58E-03	1.92E-02
	PILA 4	Y	2004.40	5.37E-04	95599.83	9.81E-04	5.27E-03
		Z	786.66	6.33E-05	33645.80	3.60E-03	1.93E-02
	PILA 5	Y	1970.32	4.57E-04	38966.37	9.68E-04	5.20E-03
		Z	814.27	5.22E-05	14625.49	3.69E-03	1.99E-02
	PILA 5	Y	1926.42	5.15E-04	92124.01	1.03E-03	5.53E-03
		Z	788.01	6.59E-05	33436.31	3.72E-03	2.00E-02
D8/D0	PILA 6	Y	1520.71	6.17E-04	48788.98	7.95E-04	4.27E-03
		Z	471.60	3.28E-05	11495.93	4.80E-03	2.58E-02
	PILA 7	Y	4877.37	1.56E-03	44142.31	5.55E-04	2.98E-03
		Z	514.80	2.54E-05	10448.00	3.76E-03	2.02E-02
	PILA 1	Y	5254.59	1.55E-03	37264.42	4.81E-04	2.57E-03
		Z	492.26	2.15E-05	8648.94	3.27E-03	1.75E-02
	PILA 2	Y	1705.34	5.80E-04	39741.68	6.03E-04	3.22E-03
		Z	463.49	2.52E-05	9213.42	3.79E-03	2.02E-02
	PILA 3	Y	1334.74	5.63E-04	44016.44	8.31E-04	4.44E-03
		Z	426.38	3.14E-05	10207.64	4.74E-03	2.53E-02
	PILA 4	Y	1938.97	4.49E-04	26566.57	8.98E-04	4.80E-03
		Z	777.18	4.76E-05	9558.28	3.51E-03	1.87E-02
	PILA 4	Y	724.36	1.93E-04	81983.18	9.57E-04	5.11E-03
		Z	323.40	2.58E-05	28137.88	3.53E-03	1.88E-02
	PILA 5	Y	1885.05	4.35E-04	24905.76	9.38E-04	5.01E-03
		Z	769.85	4.90E-05	9319.49	3.62E-03	1.93E-02
	PILA 5	Y	919.47	2.44E-04	79353.94	1.01E-03	5.37E-03
		Z	348.04	2.89E-05	27927.21	3.64E-03	1.95E-02
	PILA 6	Y	1430.46	5.77E-04	42975.09	7.79E-04	4.16E-03
		Z	445.62	3.07E-05	9858.58	4.74E-03	2.53E-02
	PILA 7	Y	4678.00	1.49E-03	38305.29	5.42E-04	2.89E-03
		Z	495.05	2.41E-05	8812.84	3.70E-03	1.97E-02

In Figura 8.14 viene riportato lo stato delle cerniere plastiche al momento del cedimento per meccanismo fragile per la configurazione D10: in rosso viene raffigurata la cerniera arrivata a rottura, mentre in giallo lo stato elastico. Invece, in

Figura 8.15 viene riportato lo stato delle cerniere plastiche a comportamento duttile: in giallo viene raffigurata la cerniera arrivata a plasticizzazione, mentre in verde e blu lo stato elastico.

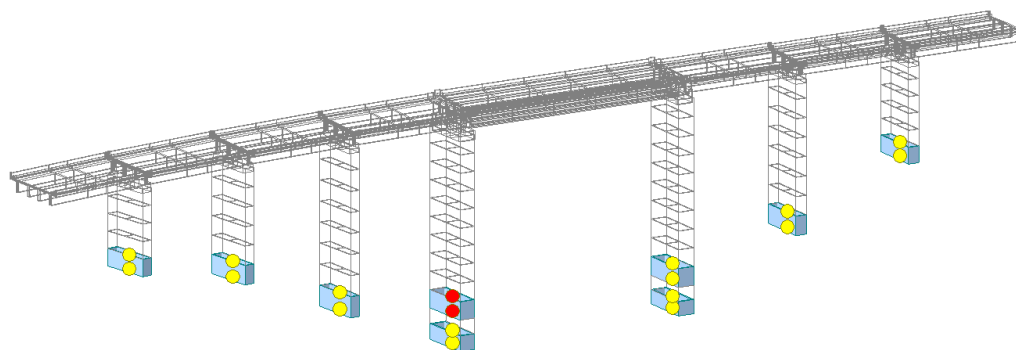


Figura 8.14 - Stato delle cerniere plastiche al momento del cedimento per meccanismo fragile – dir.z

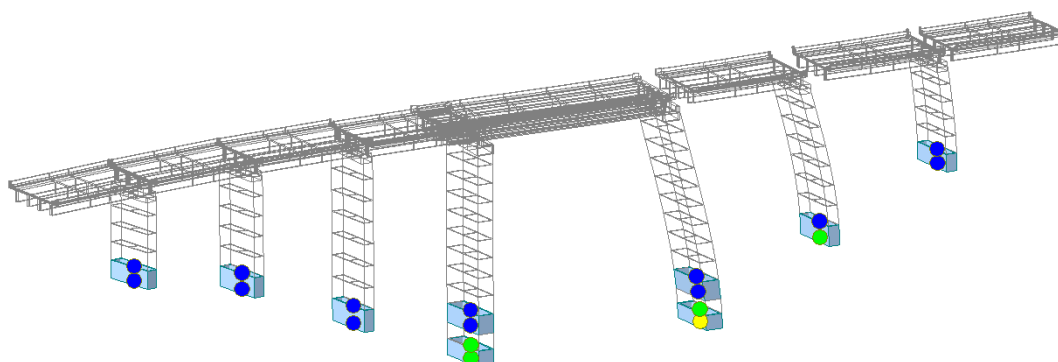


Figura 8.15 - Stato delle cerniere plastiche a comportamento duttile – dir.z

Tabella 8.15 – Sollecitazioni a taglio allo scenario di crisi

Config.	Cerniere Plastiche	Taglio - Asse z		Taglio - Asse y	
		Time [s]	T [kN]	Time [s]	T [kN]
D16	PILA 1	9.17	1112.86 (98%)	8.895	411.06 (6%)
	PILA 2	8.25	618.70 (90%)	9.075	425.86 (12%)
	PILA 3	8.03	853.79 (82%)	8.7	606.31 (18%)
	PILA 4 - INGROSSO	8.60	1510.88 (79%)	9.15	1209.24 (31%)
	PILA 4	8.60	1323.40 (69%)	9.15	1113.34 (26%)
	PILA 5 - INGROSSO	8.60	1183.14 (62%)	8.505	1163.16 (30%)
	PILA 5	8.50	1116.19 (58%)	8.51	1022.04 (24%)
	PILA 6	8.27	789.40 (74%)	9.165	519.01 (15%)
	PILA 7	8.28	852.80 (76%)	8.965	341.05 (6%)
D14	PILA 1	9.19	810.58 (100%)	7.98	267.26 (4%)

Config.	Cerniere Plastiche	Taglio - Asse z		Taglio - Asse y	
		Time [s]	T [kN]	Time [s]	T [kN]
	PILA 2	9.19	481.29 (91%)	9.135	284.55 (11%)
	PILA 3	8.04	586.59 (78%)	8.71	427.47 (18%)
	PILA 4 - INGROSSO	8.61	1153.55 (83%)	9.16	919.16 (32%)
	PILA 4	8.61	1021.56 (73%)	9.165	851.65 (27%)
	PILA 5 - INGROSSO	8.60	921.81 (66%)	8.515	830.42 (29%)
	PILA 5	8.60	800.17 (57%)	8.52	737.12 (23%)
	PILA 6	8.02	546.55 (71%)	9.185	365.42 (15%)
	PILA 7	8.28	599.41 (74%)	8.97	217.97 (4%)
D12	PILA 1	8.73	611.60 (100%)	7.98	202.78 (4%)
	PILA 2	8.25	355.23 (87%)	8.235	209.59 (10%)
	PILA 3	8.04	453.03 (83%)	8.715	328.50 (19%)
	PILA 4 - INGROSSO	8.61	959.01 (97%)	8.705	497.90 (22%)
	PILA 4	8.61	856.06 (85%)	7.57	391.39 (16%)
	PILA 5 - INGROSSO	8.60	785.33 (80%)	8.52	656.30 (31%)
	PILA 5	8.61	688.66 (68%)	8.53	588.62 (24%)
	PILA 6	8.02	437.15 (77%)	8.515	216.49 (12%)
D10	PILA 7	8.29	470.40 (77%)	8.36	156.53 (3%)
	PILA 1	9.20	458.10 (87%)	10.03	196.54 (4%)
	PILA 2	9.26	414.50 (86%)	10.02	238.43 (13%)
	PILA 3	11.50	347.54 (76%)	9.91	225.70 (16%)
	PILA 4 - INGROSSO	11.50	808.03 (98%)	11.005	609.00 (30%)
	PILA 4	11.50	785.11 (100%)	11.005	592.74 (30%)
	PILA 5 - INGROSSO	11.50	642.70 (79%)	10.375	512.60 (26%)
	PILA 5	11.50	622.03 (79%)	10.39	514.34 (27%)
D8	PILA 6	8.03	334.58 (71%)	11.245	282.51 (19%)
	PILA 7	8.29	346.13 (67%)	11.4	256.29 (5%)
	PILA 1	8.74	184.31 (37%)	10.04	91.08 (2%)
	PILA 2	9.26	169.92 (38%)	10.03	111.24 (7%)
	PILA 3	12.22	142.92 (34%)	9.93	100.09 (7%)
	PILA 4 - INGROSSO	12.24	325.90 (42%)	11.035	333.50 (17%)
	PILA 4	12.24	322.04 (100%)	11.03	325.38 (45%)
	PILA 5 - INGROSSO	12.24	261.58 (34%)	10.37	248.80 (13%)
	PILA 5	12.24	258.21 (74%)	10.4	250.21 (27%)
	PILA 6	8.03	139.94 (31%)	11.27	110.96 (8%)
	PILA 7	8.29	140.97 (28%)	11.405	108.79 (2%)

Tabella 8.16 – Sollecitazioni a rotazione allo scenario di crisi

Config.	C.P.	Momento - Asse z		Momento - Asse y	
		M [kN*m]	R [rad]	M [kN*m]	R [rad]
D16	PILA 1	6347.08 (38%)	1.35E-4 (38%)	19589.80 (29%)	1.63E-4 (29%)
	PILA 2	7689.44 (44%)	1.82E-4 (44%)	12998.80 (19%)	1.30E-4 (19%)
	PILA 3	7505.60 (41%)	2.10E-4 (41%)	23932.80 (33%)	3.08E-4 (33%)
	PILA 4 - INGROSSO	24096.80 (45%)	1.87E-4 (45%)	53031.20 (36%)	4.12E-4 (36%)
	PILA 4	17982.60 (32%)	1.28E-4 (32%)	46366.20 (32%)	3.50E-4 (32%)

Config.	C.P.	Momento - Asse z		Momento - Asse y	
		M [kN*m]	R [rad]	M [kN*m]	R [rad]
	PILA 5 - INGROSSO	23494.80 (44%)	1.91E-4 (44%)	45505.40 (32%)	3.93E-4 (32%)
	PILA 5	19329.60 (35%)	1.44E-4 (35%)	40608.80 (29%)	3.39E-4 (29%)
	PILA 6	9591.57 (53%)	2.72E-4 (53%)	20300.70 (29%)	2.53E-4 (29%)
	PILA 7	5701.61 (33%)	1.34E-4 (33%)	16233.20 (24%)	1.52E-4 (24%)
D14	PILA 1	3990.74 (28%)	9.52E-4 (28%)	13853.10 (24%)	1.23E-4 (24%)
	PILA 2	5169.98 (34%)	1.37E-4 (34%)	9148.27 (15%)	9.70E-4 (15%)
	PILA 3	5070.18 (32%)	1.57E-4 (32%)	15848.10 (24%)	2.15E-4 (24%)
	PILA 4 - INGROSSO	16121.70 (35%)	1.40E-4 (35%)	36480.90 (28%)	3.04E-4 (28%)
	PILA 4	11682.50 (24%)	9.18E-4 (24%)	31410.30 (24%)	2.50E-4 (24%)
	PILA 5 - INGROSSO	15039.30 (33%)	1.37E-4 (33%)	29646.80 (24%)	2.75E-4 (24%)
	PILA 5	12396.30 (26%)	1.02E-4 (26%)	26431.30 (21%)	2.32E-4 (21%)
	PILA 6	6603.66 (42%)	2.08E-4 (42%)	13922.90 (22%)	1.83E-4 (22%)
	PILA 7	3634.99 (25%)	9.63E-4 (25%)	11416.30 (19%)	1.13E-4 (19%)
D12	PILA 1	2835.48 (23%)	7.89E-4 (23%)	10731.00 (21%)	1.08E-4 (21%)
	PILA 2	3913.35 (31%)	1.20E-4 (31%)	7154.22 (14%)	8.57E-4 (14%)
	PILA 3	3791.20 (28%)	1.35E-4 (28%)	11834.20 (21%)	1.80E-4 (21%)
	PILA 4 - INGROSSO	8939.63 (23%)	9.05E-4 (23%)	26729.00 (24%)	2.54E-4 (24%)
	PILA 4	7812.13 (19%)	7.15E-4 (19%)	21654.40 (20%)	1.96E-4 (20%)
	PILA 5 - INGROSSO	9383.69 (25%)	1.00E-4 (25%)	22220.30 (21%)	2.34E-4 (21%)
	PILA 5	6181.14 (16%)	5.96E-4 (16%)	19338.90 (18%)	1.93E-4 (18%)
	PILA 6	2123.00 (16%)	7.71E-4 (16%)	10706.60 (19%)	1.57E-4 (19%)
	PILA 7	2022.41 (16%)	6.24E-4 (16%)	8961.09 (18%)	1.00E-4 (18%)
D10	PILA 1	2881.93 (28%)	9.33E-4 (28%)	8094.48 (19%)	9.22E-4 (19%)
	PILA 2	4458.24 (41%)	1.58E-4 (41%)	8533.02 (19%)	1.15E-4 (19%)
	PILA 3	4779.07 (40%)	1.94E-4 (40%)	9624.29 (19%)	1.63E-4 (19%)
	PILA 4 - INGROSSO	10218.60 (68%)	2.45E-4 (68%)	28825.70 (69%)	6.42E-4 (69%)
	PILA 4	8446.92 (25%)	9.03E-4 (25%)	24410.10 (26%)	2.50E-4 (26%)
	PILA 5 - INGROSSO	14652.60 (100%)	3.80E-4 (103%)	22257.30 (57%)	5.53E-4 (57%)
	PILA 5	12552.40 (38%)	1.39E-4 (38%)	19066.10 (21%)	2.13E-4 (21%)
	PILA 6	6393.17 (56%)	2.67E-4 (56%)	8004.46 (16%)	1.30E-4 (16%)
	PILA 7	4289.10 (41%)	1.54E-4 (41%)	6586.25 (15%)	8.29E-4 (15%)
D8	PILA 1	1356.70 (16%)	5.14E-4 (16%)	3294.84 (9%)	4.25E-4 (9%)
	PILA 2	2034.93 (22%)	8.37E-4 (22%)	3506.75 (9%)	5.32E-4 (9%)
	PILA 3	2213.67 (22%)	1.03E-4 (22%)	4142.43 (9%)	7.82E-4 (9%)
	PILA 4 - INGROSSO	4075.99 (43%)	1.49E-4 (43%)	11800.80 (44%)	3.99E-4 (44%)
	PILA 4	3456.96 (12%)	4.34E-4 (12%)	10012.60 (12%)	1.17E-4 (12%)
	PILA 5 - INGROSSO	5262.32 (56%)	2.04E-4 (56%)	9461.48 (38%)	3.56E-4 (38%)
	PILA 5	4738.26 (17%)	6.18E-4 (17%)	8156.78 (10%)	1.03E-4 (10%)
	PILA 6	2658.02 (27%)	1.28E-4 (27%)	3357.00 (8%)	6.09E-4 (8%)
	PILA 7	1859.94 (21%)	7.80E-4 (21%)	2676.57 (7%)	3.79E-4 (7%)

8.7.3. Andamento dell'indice di rischio

Una volta ottenuti gli indici di rischio delle configurazioni si determinano gli scenari temporali associati al raggiungimento di ogni configurazione per ciascun livello di corrosione seguendo la procedura illustrata al Paragrafo 6.3.5.

Dopo aver determinato gli scenari temporali si può definire l'andamento nel tempo degli indici di rischio (Paragrafo 6.5.3.1) per ogni livello di corrosione.

Tabella 8.17 – Scenari temporali per diverse configurazioni di sezione e livello di corrosione

Scenari temporali			
N° Configurazione	t _{corr. bassa}	t _{corr. media}	t _{corr. alta}
-	[anni]	[anni]	[anni]
1 – D16/D8	13.5	13.5	13.5
2 – D14/D6	875.6	99.7	30.7
3 – D12/D4	1737.6	185.9	48
4 – D10/D2	2599.7	272.1	65.2
5 – D8/D0	3461.8	358.3	82.5

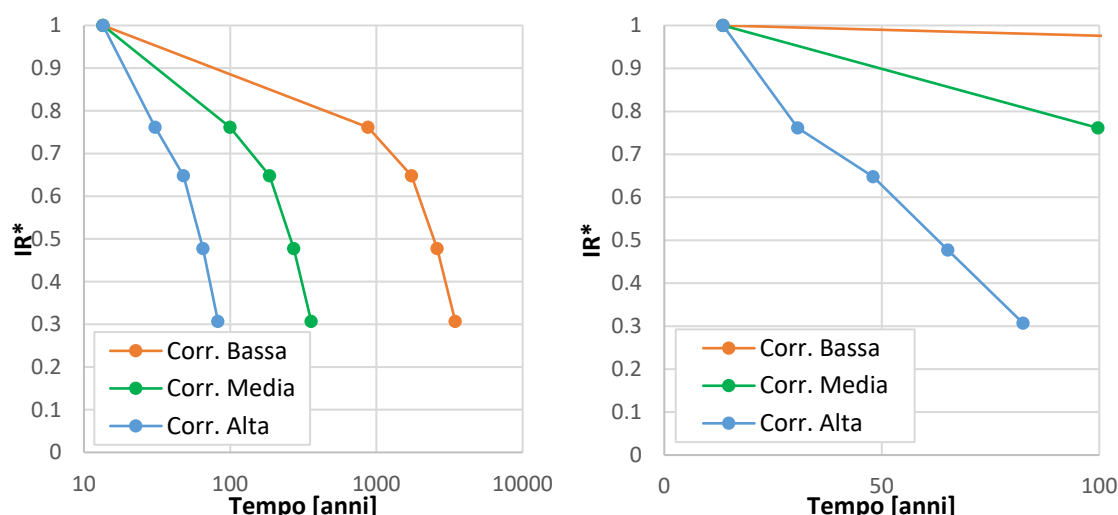


Figura 8.16 - Andamento dell'indice di rischio nel tempo

Di seguito vengono riportati i valori di indici di rischio per tre scenari temporali (25, 50, 75 anni) per i diversi scenari di corrosione in modo da evidenziare la differenza tra i diversi livelli di degrado. I valori sono stati ottenuti tramite interpolazione tra due punti dalla Figura 8.16 per l'anno corrispondente.

Tabella 8.18 – Variazione dell'indice di rischio per scenari temporali prefissati a differenti livelli di degrado

IR _a per scenario temporale				
corrosione	13.5 anni	25 anni	50 anni	75 anni
Bassa	1.253	1.253	1.244 (-0.71%)	1.236 (-1.36%)
Media	1.253	1.217 (-2.87%)	1.130 (-9.19%)	1.043 (-15.59%)
Alta	1.253	1.057 (-15.69%)	0.789 (-36.57%)	0.479 (-61.27%)

Capitolo 9

Riepilogo dei risultati

In questo capitolo vengono riassunti i risultati ottenuti dalle analisi dei tre viadotti trattati in base alle loro caratteristiche strutturali: pile rette a sezione piena, pile a telaio, pile rette a sezione cava. Questi risultati verranno poi confrontati ed elaborati aggiungendo dei dati derivanti da altri casi studio che fanno riferimento ad attività di ricerca antecedenti a questo lavoro con le medesime caratteristiche. In particolare, verrà indagato l'andamento dell'indice di rischio in funzione della diminuzione del diametro delle armature per studiare l'influenza che ha la corrosione sulla vulnerabilità della struttura. Verranno elaborati dei grafici con lo scopo di fornire uno strumento di prevenzione che mostrano l'andamento dell'indice di rischio nel tempo. Infine, verrà analizzata la crisi della struttura attraverso l'analisi dello stato delle cerniere plastiche.

Si vuole specificare che i lavori di ricerca precedenti utilizzavano l'approccio a scenario temporale, descritto ed utilizzato al Capitolo 6.2. All'interno della trattazione è stato dimostrato come questo approccio sia soggetto ad imprecisione dovuta all'approssimazione dei diametri di armatura corrosa rispetto all'approccio per configurazioni di sezione, utilizzato per l'analisi dei tre viadotti studiati. Il confronto tra i due metodi di analisi è consultabile al capitolo 6.4.

Dunque, si è scelto di elaborare i risultati ottenuti dalle attività di ricerca pregresse ed elaborarli con il seguente metodo:

- Si sono individuati i valori di indice di rischio corrispondenti ad una data configurazione di sezione, quindi ad un determinato valore di diametro di armatura.
- Sono stati calcolati gli scenari temporali reali per il raggiungimento di quella configurazione di sezione in base al livello di deterioramento.
- Sono stati ottenuti i valori di indice di rischio a 25, 50 e 75 anni in base al livello di deterioramento attraverso l'interpolazione dei valori ottenuti precedentemente.

9.1. Viadotti con pile rette a sezione piena

In questo paragrafo verrà analizzato unicamente il viadotto B83 in quanto è il solo caso studio che presenta una struttura caratterizzata da pile rette a sezione piena.

9.1.1. Risultati B83

Il viadotto presenta uno schema strutturale a travata composto da pile rette a sezione piena. Di seguito vengono riportate le configurazioni di sezione analizzate.

Tabella 9.1 – Diametri e deformazione ultima a rottura delle armature per configurazione di sezione

Armatura Longitudinale					
N° Configurazione	$\varnothing_t$	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
1 – D18/D10	18	0.13	0.000	0.13	0.02
2 – D16/D8	16	0.13	20.98	0.07679	0.02
3 – D14/D6	14	0.13	39.50	0.02985	0.02
4 – D12/D4	12	0.13	55.55	-0.0108	0.011
5 – D10/D2	10	0.13	69.13	-0.0452	0.011
Armatura Trasversale					
N° Configurazione	$\varnothing_t$	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
1 – D18/D10	10	0.13	0.00	0.13	0.02
2 – D16/D8	8	0.13	36.00	0.03874	0.02
3 – D14/D6	6	0.13	64.00	-0.03224	0.011
4 – D12/D4	4	0.13	84.00	-0.08294	0.011
5 – D10/D2	2	0.13	96.00	-0.11336	0.011

9.1.1.1. Analisi MPA

Di seguito si riporta il diagramma di accelerazione e spostamento spettrale per il meccanismo di rottura a rotazione sul piano ADSR per le varie configurazioni del primo modo. Si può notare la diminuzione delle proprietà meccaniche della struttura al diminuire del diametro delle armature.

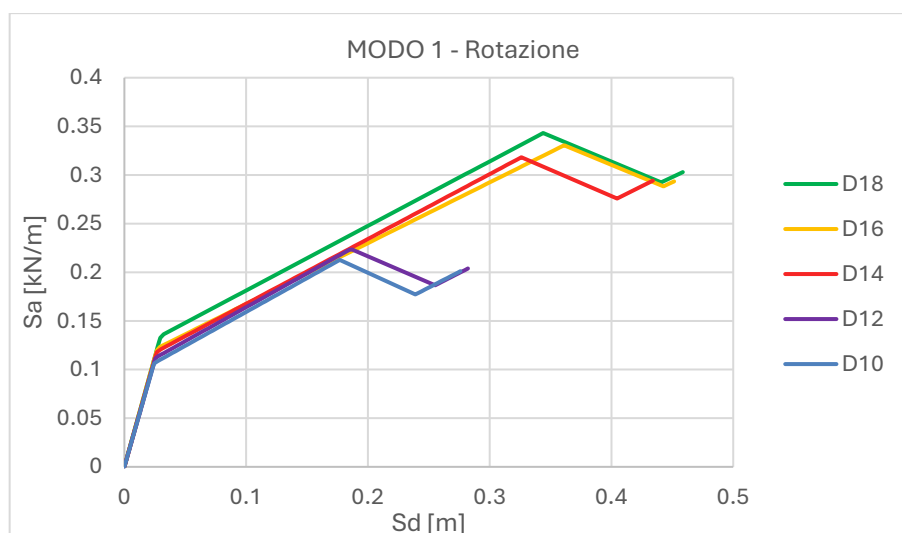


Figura 9.1 – Grafico ADRS del primo modo contribuyente per meccanismo duttile a diverse configurazioni di sezione

Conseguentemente alla perdita di resistenza l'indice di rischio subisce un decremento all'aumentare del degrado.

Tabella 9.2 – Indici di rischio per meccanismo di rottura duttile a diverse configurazioni di sezione

Meccanismo duttile			
Indice di rischio	Configurazione	Direzione X	Direzione Y
IR _a	1 - D18/D10	3.367	3.367
	2 - D16/D8	3.275 (-2.73%)	3.275 (-2.73%)
	3 - D14/D6	2.981 (-11.46%)	2.981 (-11.46%)
	4 - D12/D4	1.717 (-49.01%)	1.717 (-49.01%)
	5 - D10/D2	1.606 (-52.30%)	1.606 (-52.30%)
IR _t	1 - D18/D10	4.894	4.894
	2 - D16/D8	4.72 (-3.56%)	4.72 (-3.56%)
	3 - D14/D6	4.174 (-14.71%)	4.174 (-14.71%)
	4 - D12/D4	2.027 (-58.58%)	2.027 (-58.58%)
	5 - D10/D2	1.856 (-62.08%)	1.856 (-62.08%)

Di seguito si riporta il diagramma di accelerazione e spostamento spettrale per il meccanismo di rottura a taglio sul piano ADSR per le varie configurazioni del primo modo. Si può notare la diminuzione delle proprietà meccaniche della struttura al diminuire del diametro delle armature.

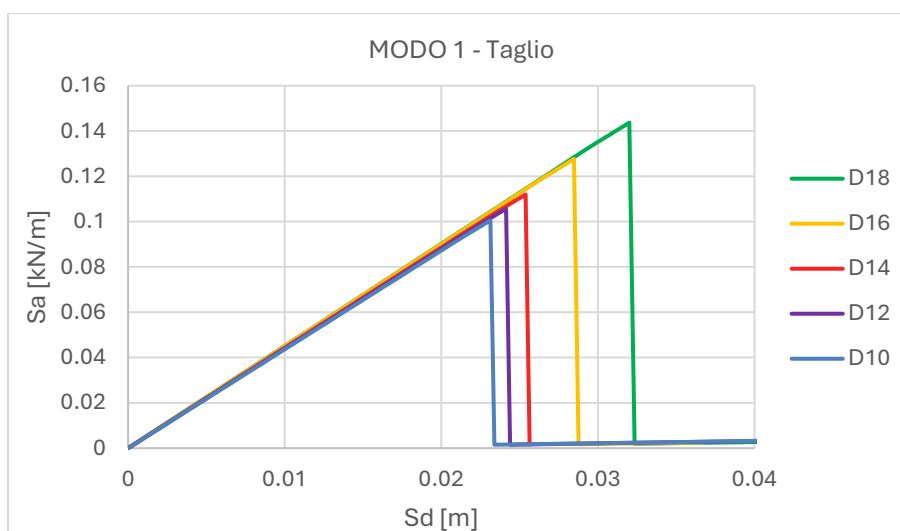


Figura 9.2 – Grafico ADRS del primo modo contribuente per meccanismo fragile a diverse configurazioni di sezione

Conseguentemente alla perdita di resistenza l'indice di rischio subisce un decremento all'aumentare del degrado.

Tabella 9.3 – Indici di rischio per meccanismo di rottura fragile a diverse configurazioni di sezione

Meccanismo fragile			
Indice di rischio	Configurazione	Direzione X	Direzione Y
IR _a	1 - D18/D10	0.394	0.394
	2 - D16/D8	0.364 (-7.61%)	0.364 (-7.61%)
	3 - D14/D6	0.336 (-14.72%)	0.336 (-14.72%)
	4 - D12/D4	0.323 (-18.02%)	0.323 (-18.02%)
	5 - D10/D2	0.31 (-21.32%)	0.31 (-21.32%)
IR _t	1 - D18/D10	0.392	0.392
	2 - D16/D8	0.359 (-8.42%)	0.359 (-8.42%)
	3 - D14/D6	0.328 (-16.33%)	0.328 (-16.33%)
	4 - D12/D4	0.316 (-19.39%)	0.316 (-19.39%)
	5 - D10/D2	0.302 (-22.96%)	0.302 (-22.96%)

Vengono individuati gli scenari temporali corrispondenti ad ogni configurazione analizzata in base al grado di corrosione.

Tabella 9.4 – Scenari temporali per diverse configurazioni di sezione e livello di corrosione

Scenari temporali			
N° Configurazione	t _{corr. bassa}	t _{corr. media}	t _{corr. alta}
-	[anni]	[anni]	[anni]
1 - D18/D10	13.5	13.5	13.5
2 - D16/D8	875.6	99.7	30.7
3 - D14/D6	1737.6	185.9	48
4 - D12/D4	2599.7	272.1	65.2
5 - D10/D2	3461.8	358.3	82.5

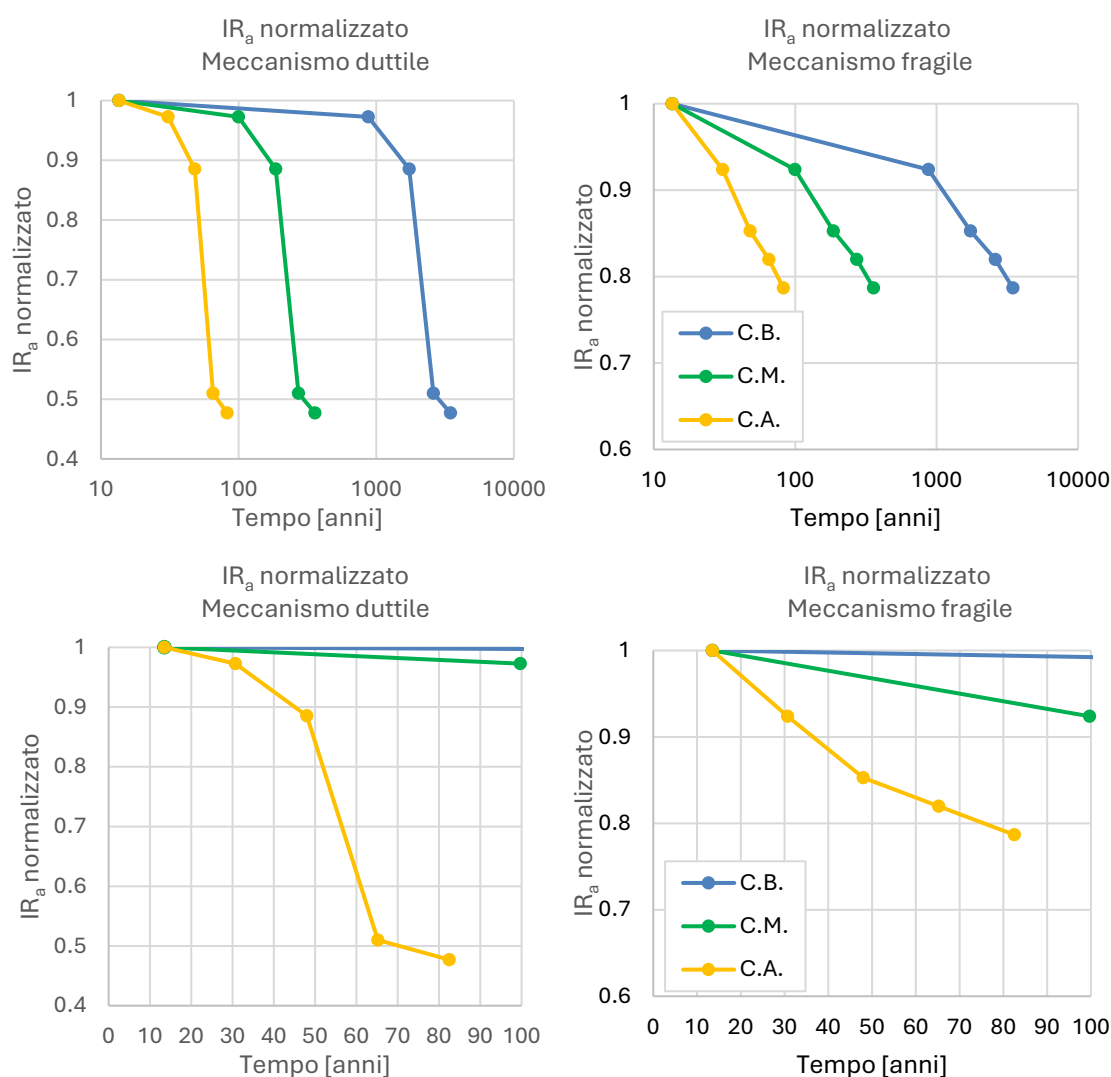


Figura 9.3 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo per livello di corrosione

Attraverso l'interpolazione dei valori ottenuti per le varie configurazioni sugli scenari temporali corrispondenti vengono individuati gli indici di rischio a 25, 50 e 75 anni per intensità di corrosione bassa, media e alta.

Tabella 9.5 – Indici di rischio di accelerazione per meccanismo di rottura e direzione

B83				
Meccanismo di rottura: rotazione				
Indice di rischio	corrosione	25 anni	50 anni	75 anni
IR_a - DIR.X	Bassa	3.366	3.363	3.360
	Media	3.355 (-0.33%)	3.328 (-1.04%)	3.301 (-1.76%)
	Alta	3.305 (-1.79%)	2.834 (-15.73%)	1.654 (-50.78%)
IR_a - DIR.Y	Bassa	3.366	3.363	3.360
	Media	3.355 (-0.33%)	3.328 (-1.04%)	3.301 (-1.76%)
	Alta	3.305 (-1.79%)	2.834 (-15.73%)	1.654 (-50.78%)

Meccanismo di rottura: taglio				
Indice di rischio	corrosione	25 anni	50 anni	75 anni
IR _a - DIR.X	Bassa	0.394	0.393	0.392
	Media	0.390 (-0.92%)	0.381 (-2.91%)	0.373 (-4.92%)
	Alta	0.374 (-4.99%)	0.334 (-14.83%)	0.316 (-19.45%)
IR _a - DIR.Y	Bassa	0.394	0.393	0.392
	Media	0.390 (-0.92%)	0.381 (-2.91%)	0.373 (-4.92%)
	Alta	0.374 (-4.99%)	0.334 (-14.83%)	0.316 (-19.45%)

Infine, si riportano i diametri e la diminuzione in percentuale dell'area delle barre di armatura per gli scenari presenti nella tabella precedente.

Tabella 9.6 – Diametri Armatura longitudinale e diminuzione dell'area in percentuale

Diametri Barre Armatura Longitudinali				
corrosione	i _{corr}	25	50	75
Iniziale		18	18	18
Bassa	0.1	17.97	17.92	17.86
Media	1	17.73	17.15	16.57
Alta	5	16.67	13.77	10.87
Diminuzione Area armatura [ΔA_s]				
Bassa	0.1	0.30%	0.94%	1.58%
Media	1	2.94%	9.19%	15.23%
Alta	5	14.27%	41.51%	63.56%

Diametri Barre Armatura Trasversali				
corrosione	i _{corr}	25	50	75
Iniziale		10	10	10
Bassa	0.1	9.97	9.92	9.86
Media	1	9.73	9.15	8.57
Alta	5	8.67	5.77	2.87
Diminuzione Area armatura [ΔA_s]				
Bassa	0.1	0.53%	1.69%	2.83%
Media	1	5.26%	16.22%	26.50%
Alta	5	24.90%	66.75%	91.79%

9.1.1.2. Analisi Time History

Di seguito si vuole riportare l'andamento dell'indice di rischio ottenuto dall'analisi dinamica non lineare (Time History) e confrontare i valori con quelli ricavati dall'analisi dinamica lineare.

Dal confronto si può evincere come le due differenti analisi portino alla descrizione di un andamento dell'indice di rischio con minime differenze in quanto la crisi strutturale avviene per attivazione della rottura a taglio della pila, senza la plasticizzazione a pressoflessione di alcuna cerniera.

Tabella 9.7 – Calcolo dell'indice di rischio attraverso i fattori di scala degli eventi sismici

Fattori di scala e Indice di Rischio					
ID HEARTHQUAKE	D18	D16	D14	D12	D10
000772	0.5	0.45	0.4	0.4	0.35
007010	0.4	0.35	0.35	0.3	0.3
000600	0.5	0.45	0.4	0.4	0.35
000378	0.55	0.5	0.45	0.4	0.4
001708	0.65	0.55	0.5	0.5	0.45
000334	0.35	0.3	0.3	0.25	0.25
007104	0.4	0.35	0.35	0.35	0.3
IR	0.48	0.42	0.39	0.37	0.34

Il grafico seguente è stato costruito con i valori di indice di rischio normalizzato calcolati per ogni configurazione di sezione ed elaborati per grado di corrosione alto.

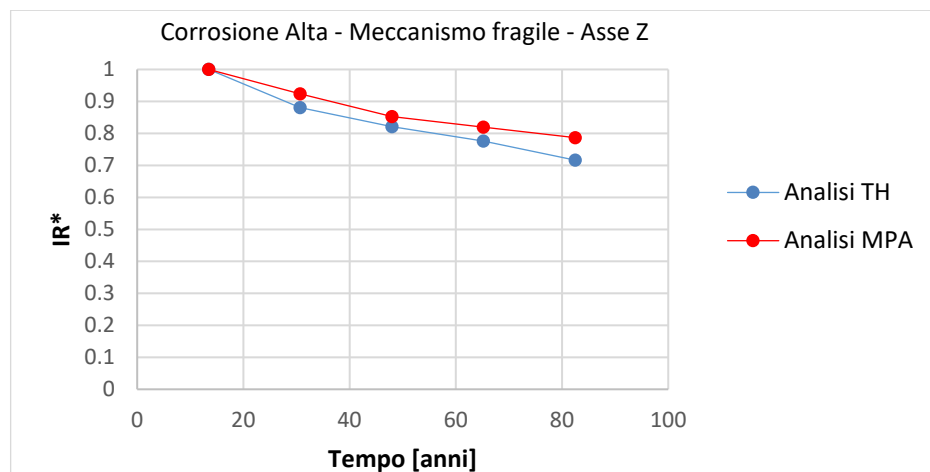


Figura 9.4 – Confronto dell'IR* tra analisi dinamica lineare (MPA) e non lineare (TH)

Tabella 9.8 – Variazione dell'indice di rischio per scenari temporali prefissati a differenti livelli di degrado

IR _a per scenario temporale – Analisi TH			
corrosione	25 anni	50 anni	75 anni
Bassa	0.478	0.476	0.474
Media	0.471 (-1.44%)	0.454 (-4.57%)	0.438 (-7.73%)
Alta	0.440 (-7.84%)	0.390 (-18.02%)	0.355 (-25.13%)

9.1.2. Influenza della corrosione sull'indice di rischio

Di seguito vengono proposti i diagrammi che esplicitano la relazione tra la riduzione dell'area di armatura della sezione e il decadimento dell'indice di rischio

per il caso di pila retta a sezione piena, parametri che vengono calcolati con le rispettive formulazioni:

$$\Delta A_s = \left(1 - \frac{A_{s,t}}{A_{s,13.5}}\right) * 100 \text{ [%]} \quad (9.1)$$

$$\Delta IR = \left(1 - \frac{IR_t}{IR_{13.5}}\right) * 100 \text{ [%]} \quad (9.2)$$

Dove:

- $A_{s,t}$ è l'area di armatura longitudinale al momento t
- $A_{s,13.5}$ è l'area di armatura longitudinale iniziale
- $IR_{a,t}$ è l'indice di rischio al momento t
- $IR_{13.5}$ è l'indice di rischio iniziale.

Vengono analizzati i casi corrispondenti ai differenti meccanismi di rottura, a rotazione e taglio, in modo da comprendere la variazione dell'andamento dell'indice di rischio anche in base a questo parametro. I grafici sono stati costruiti sui risultati ottenuti dal viadotto B83, unico caso studio afferente alla categoria in esame.

Per quanto riguarda il meccanismo a rotazione possiamo notare come la curva definita attraverso i risultati ottenuti abbia un andamento esponenziale che raggiunge un valore di decadimento dell'indice di rischio massimo di circa il 50%, nell'intervallo di diametri considerato. Questo comportamento può essere causato dal progressivo decadimento delle proprietà meccaniche dell'acciaio, tra cui la deformazione ultima, che in pile aventi sezioni piene ha un impatto rilevante sulla capacità portante complessiva dell'elemento.

Passando al meccanismo di rottura a taglio, l'andamento della curva risulta più lineare rispetto al degrado delle armature e si registra un valore massimo di decadimento dell'indice di rischio del 20%. Questo risultato risulta minore rispetto a quelli che verranno ottenuti nelle casistiche successive e trova una spiegazione nella conformazione della sezione: la sezione è particolarmente resistente a taglio essendo a sezione piena, quindi il contributo della resistenza del calcestruzzo a taglio diventa rilevante.

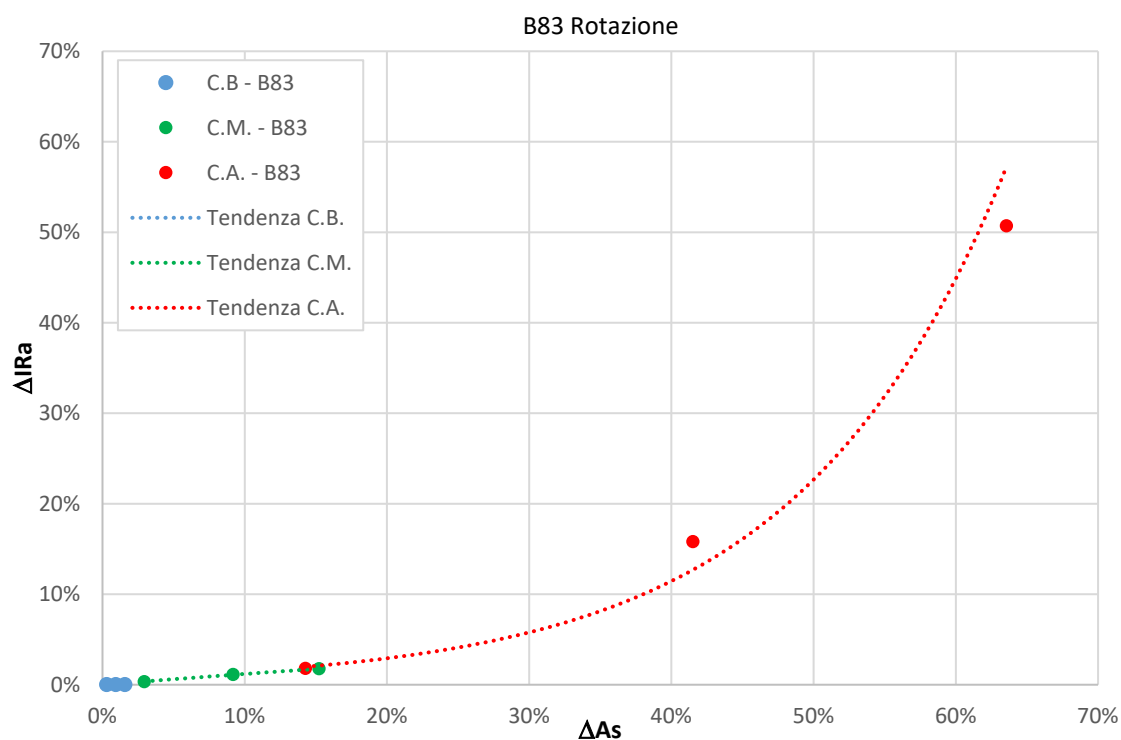


Figura 9.5 – Grafico decadimento IR – Riduzione A_s per meccanismo di rottura a rotazione, viadotto B83

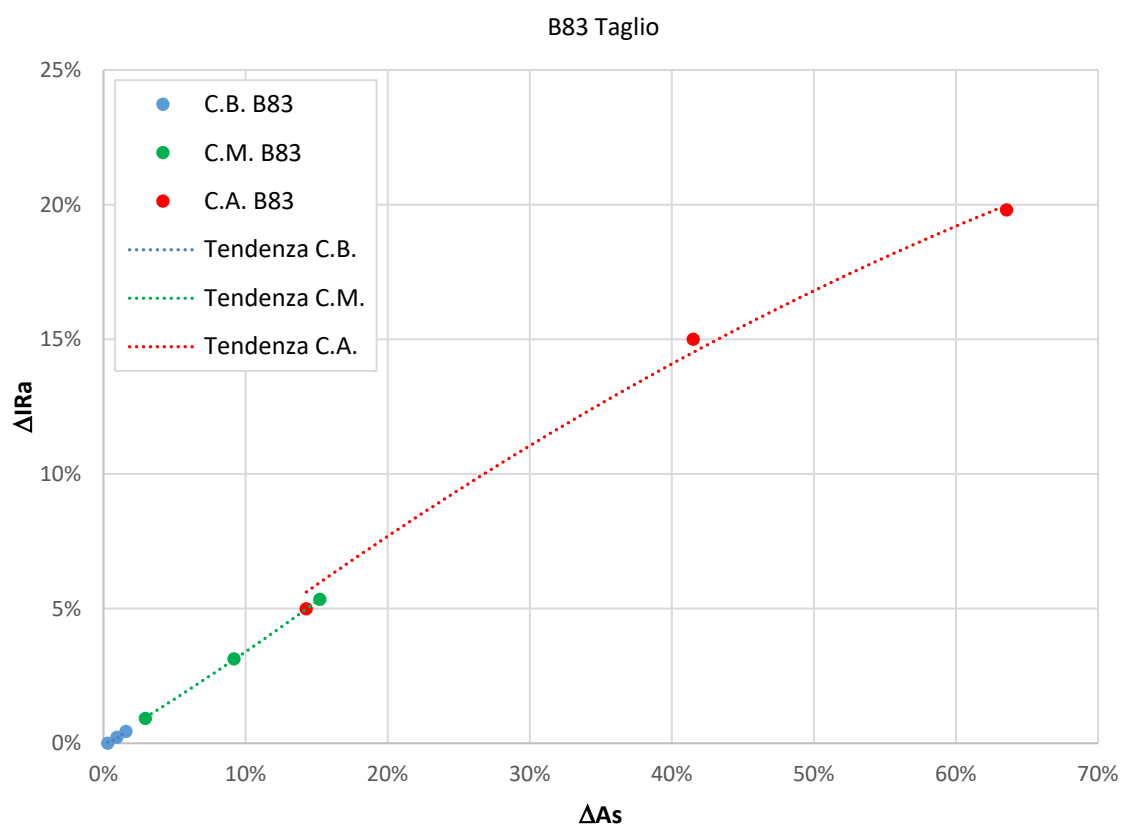


Figura 9.6 – Grafico decadimento IR – Riduzione A_s per meccanismo di rottura a taglio, viadotto B83

9.1.3. Risultati funzionali alla prevenzione

I grafici presentati nel paragrafo precedente esprimono la correlazione tra la diminuzione di armatura e il decadimento della resistenza della struttura. Tuttavia, la misurazione dell'area di armatura su strutture esistenti mediante indagini in sito risulta complessa e laboriosa. Ai fini della prevenzione risulta di più immediata interpretazione l'analisi dello sviluppo nel tempo del valore di indice di rischio normalizzato.

I risultati verranno differenziati per meccanismo di rottura, duttile o fragile, e direzione principale dell'evento sismico sollecitante.

Le linee di tendenza ottenute sono correlate a quelle ottenute nel paragrafo precedente. In particolare, ad un andamento esponenziale del decadimento dell'indice di rischio in funzione dell'area dell'armatura corrisponderà un andamento parabolico in funzione del tempo. Analogamente, a un andamento lineare del decadimento dell'IR in funzione dell'area di acciaio corrisponderà un andamento parabolico meno accentuato in funzione del tempo.

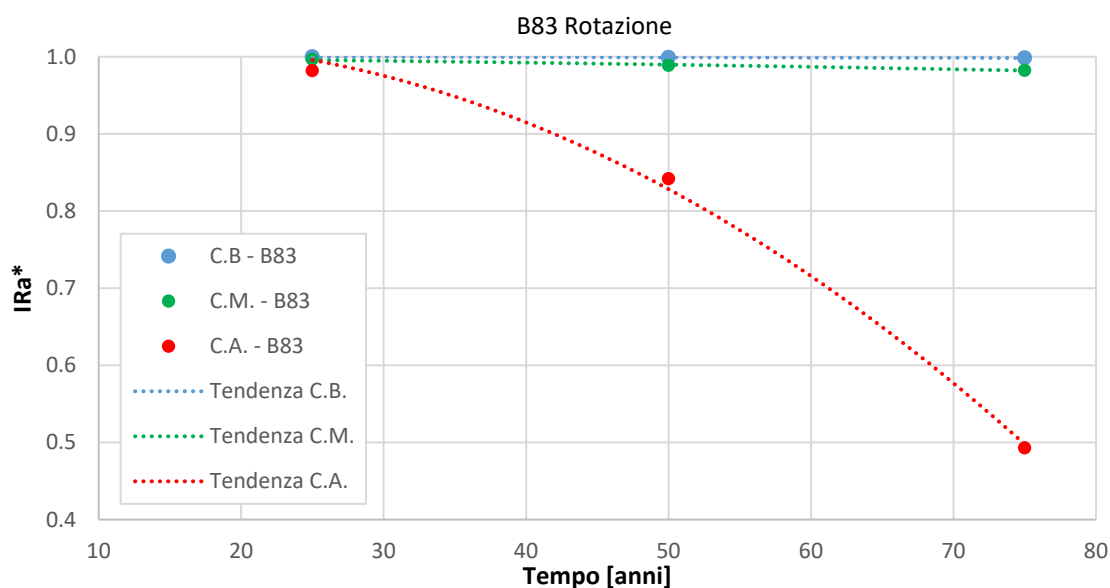


Figura 9.7 – Andamento nel tempo dell'indice di rischio per meccanismo di rottura a rotazione – sezione piena

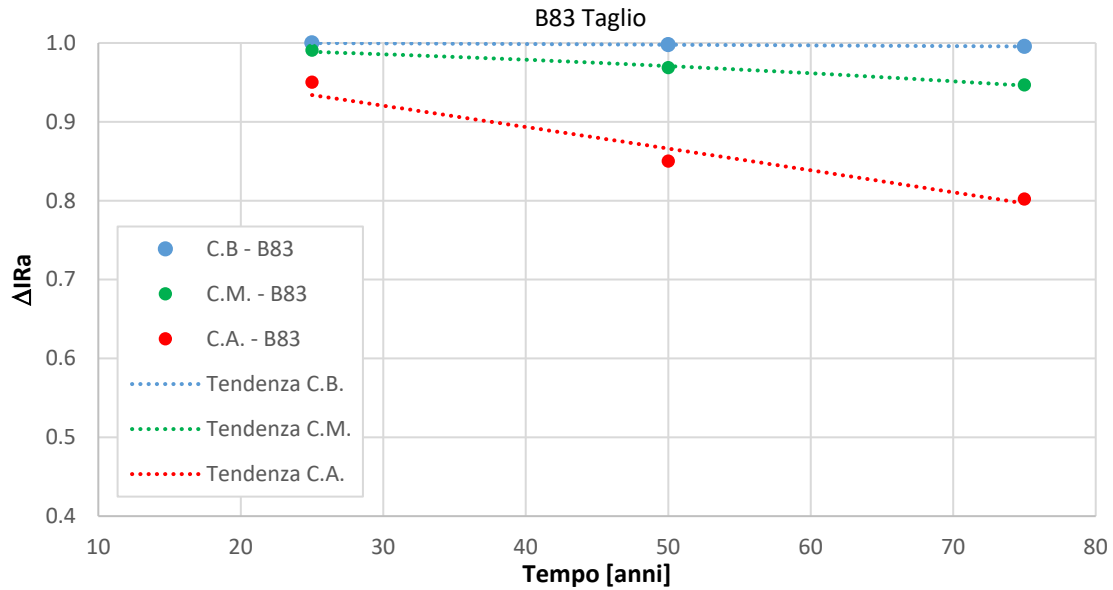


Figura 9.8 – Andamento nel tempo dell'indice di rischio per meccanismo di rottura a taglio – sezione piena

9.1.4. Comportamento allo scenario di crisi

In questo paragrafo verrà analizzato il comportamento a rottura, ovvero lo stato delle cerniere plastiche attraverso i risultati ottenuti dall'analisi dinamica non lineare. In particolare, si cercherà di valutare la rilevanza della combinazione del comportamento duttile e fragile in base allo stato delle cerniere plastiche al momento della crisi.

Il viadotto B83 – San Rossore presenta un meccanismo di rottura fragile senza l'attivazione di nessuna cerniera a rotazione, per ogni configurazione di sezione analizzata. Tuttavia, il momento agente è prossimo al momento di primo snervamento. Quindi, in concomitanza della crisi a taglio della pila, potrebbero instaurarsi dei fenomeni di danneggiamento a pressoflessione.

Tabella 9.9 – Sollecitazioni allo scenario di crisi lungo la direzione maggiormente sollecitata

Cerniere Plastiche	Config.	Taglio - Asse z		Momento - Asse y	
		Time [s]	T [kN]	M [kN*m]	R [rad]
PILA 1	D18	12.45	712.47 (99%)	3076.21 (96%)	2.86E-4 (96%)
	D16	12.44	623.68 (98%)	2690.97 (92%)	2.45E-4 (92%)
	D14	12.45	556.47 (100%)	2398.29 (85%)	2.36E-4 (85%)
	D12	12.44	520.29 (98%)	2238.59 (84%)	2.25E-4 (84%)
	D10	12.47	497.00 (99%)	2143.92 (85%)	2.19E-4 (85%)
PILA 2	D18	12.45	530.24 (81%)	3000.39 (93%)	3.21E-4 (93%)
	D16	12.44	464.85 (81%)	2626.42 (90%)	2.77E-4 (90%)
	D14	12.45	410.00 (81%)	2313.47 (82%)	2.65E-4 (82%)
	D12	12.44	382.06 (86%)	2149.14 (81%)	2.53E-4 (81%)
	D10	12.47	361.40 (86%)	2044.05 (81%)	2.45E-4 (81%)

9.2. Viadotti con pile a telaio

In questo paragrafo verranno analizzati i viadotti che presentano una struttura caratterizzata da pile a telaio. Dunque, sono stati studiati i risultati ottenuti dal viadotto B88 ed integrati con quelli di due viadotti analizzati in lavori di ricerca precedenti: viadotto V01 e V02.

9.2.1. Risultati B88

Il viadotto presenta uno schema strutturale a travata composto da pile a telaio a sezione circolare piena. Di seguito vengono riportate le configurazioni di sezione analizzate.

Tabella 9.10 – Diametri e deformazione ultima a rottura delle armature per configurazione di sezione

Armatura Longitudinale					
N° Configurazione	$\varnothing_t$	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
1 - D20/D8	20	0.13	0.000	0.13	0.02
2 - D18/D6	18	0.13	19	0.081835	0.02
3 - D16/D4	16	0.13	36	0.03874	0.02
4 - D14/D2	14	0.13	51	0.000715	0.011
5 - D12/D0	12	0.13	64	-0.03224	0.011
Armatura Trasversale					
N° Configurazione	$\varnothing_t$	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
1 - D20/D8	8	0.13	0.00	0.13	0.02
2 - D18/D6	6	0.13	43.75	0.019094	0.019094
3 - D16/D4	4	0.13	75.00	-0.06013	0.011
4 - D14/D2	2	0.13	93.75	-0.10766	0.011
5 - D12/D0	0	0.13	100.00	-0.1235	0.011

9.2.1.1. Analisi MPA

Di seguito si riporta il diagramma di accelerazione e spostamento spettrale per il meccanismo di rottura a rotazione sul piano ADSR per le varie configurazioni del primo modo. Si può notare la diminuzione delle proprietà meccaniche della struttura al diminuire del diametro delle armature.

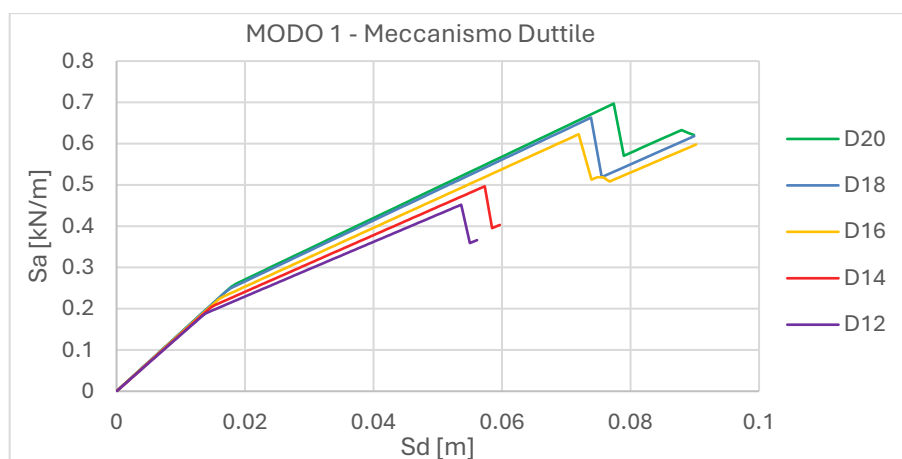


Figura 9.9 – Grafico ADRS del primo modo contribuyente per meccanismo duttile a diverse configurazioni di sezione

Conseguentemente alla perdita di resistenza, l'indice di rischio subisce un decremento all'aumentare del degrado.

Tabella 9.11 – Indici di rischio per meccanismo di rottura duttile a diverse configurazioni di sezione

Meccanismo duttile			
Indice di rischio	Configurazione	Direzione X	Direzione Y
IR _a	1 - D18/D8	1.786	1.476
	2 - D16/D6	1.693 (-5.21%)	1.382 (-6.37%)
	3 - D14/D4	1.593 (-10.81%)	1.346 (-8.81%)
	4 - D12/D2	1.241 (-30.52%)	0.992 (-32.79%)
	5 - D10/D0	1.14 (-36.17%)	0.911 (-38.28%)
IR _t	1 - D18/D8	2.042	1.615
	2 - D16/D6	1.912 (-6.37%)	1.489 (-7.80%)
	3 - D14/D4	1.773 (-13.17%)	1.442 (-10.71%)
	4 - D12/D2	1.304 (-36.14%)	0.99 (-38.70%)
	5 - D10/D0	1.174 (-42.51%)	0.894 (-44.64%)

Di seguito si riporta il diagramma di accelerazione e spostamento spettrale per il meccanismo di rottura a taglio sul piano ADSR per le varie configurazioni del primo modo. Si può notare la diminuzione delle proprietà meccaniche della struttura al diminuire del diametro delle armature.

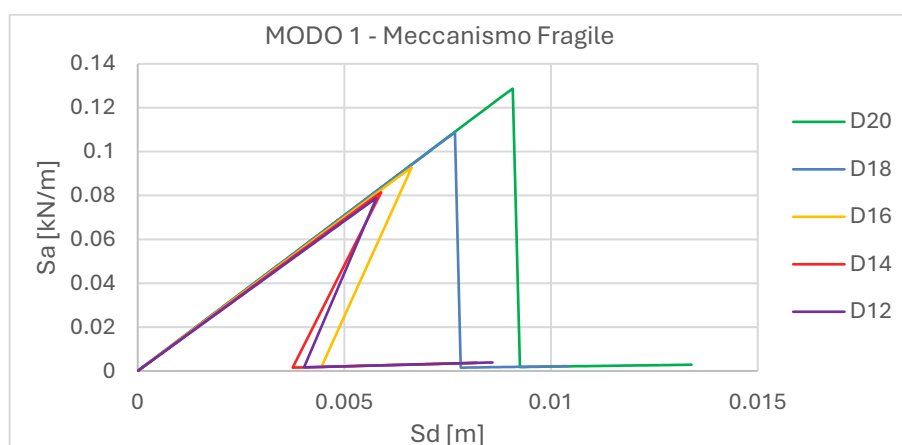


Figura 9.10 – Grafico ADRS del primo modo contribuyente per meccanismo fragile a diverse configurazioni di sezione

Conseguentemente alla perdita di resistenza, l'indice di rischio subisce un decremento all'aumentare del degrado.

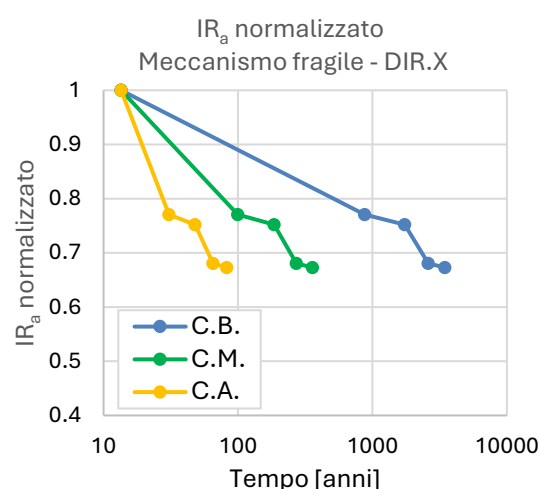
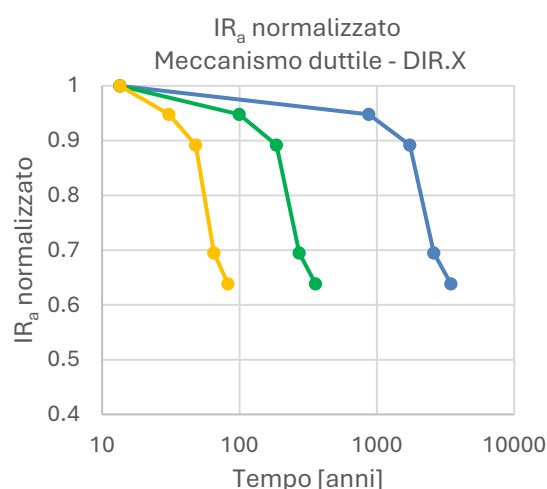
Tabella 9.12 – Indici di rischio per meccanismo di rottura fragile a diverse configurazioni di sezione

Meccanismo fragile			
Indice di rischio	Configurazione	Direzione X	Direzione Y
IR _a	1 - D18/D8	0.266	0.200
	2 - D16/D6	0.205 (-22.93%)	0.167 (-16.50%)
	3 - D14/D4	0.2 (-24.81%)	0.154 (-23.00%)
	4 - D12/D2	0.181 (-31.95%)	0.142 (-29.00%)
	5 - D10/D0	0.179 (-32.71%)	0.138 (-31.00%)
IR _t	1 - D18/D8	0.261	0.202
	2 - D16/D6	0.206 (-21.07%)	0.172 (-14.85%)
	3 - D14/D4	0.21 (-19.54%)	0.16 (-20.79%)
	4 - D12/D2	0.184 (-29.50%)	0.149 (-26.24%)
	5 - D10/D0	0.183 (-29.89%)	0.145 (-28.22%)

Vengono individuati gli scenari temporali corrispondenti ad ogni configurazione analizzata in base al grado di corrosione.

Tabella 9.13 – Scenari temporali per diverse configurazioni di sezione e livello di corrosione

Scenari temporali			
N° Configurazione	t _{corr. bassa}	t _{corr. media}	t _{corr. alta}
-	[anni]	[anni]	[anni]
1 - D18/D8	13.5	13.5	13.5
2 - D16/D6	875.6	99.7	30.7
3 - D14/D4	1737.6	185.9	48
4 - D12/D2	2599.7	272.1	65.2
5 - D10/D0	3461.8	358.3	82.5



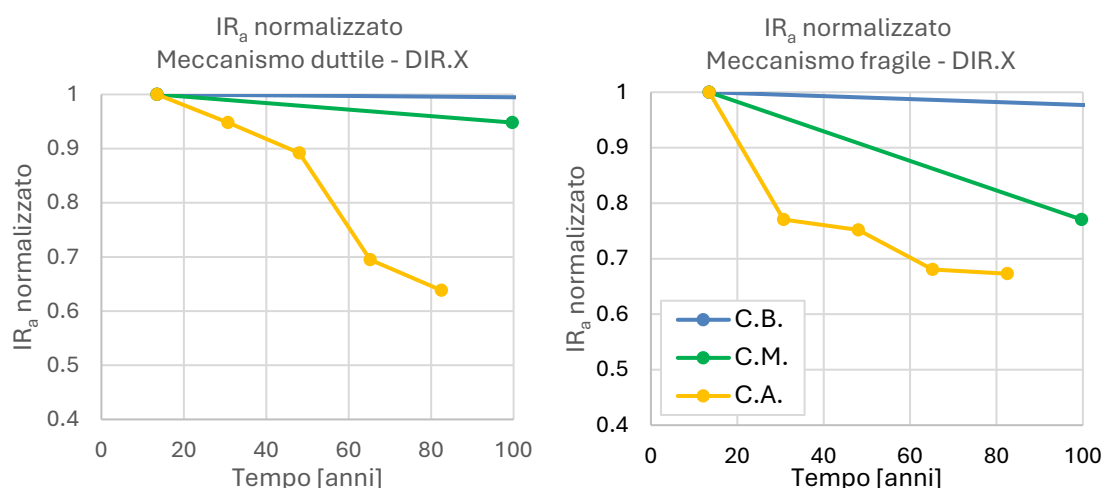


Figura 9.11 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo per livello di corrosione, dir.x

Attraverso l'interpolazione dei valori ottenuti per le varie configurazioni sugli scenari temporali corrispondenti vengono individuati gli indici di rischio a 25, 50 e 75 anni per intensità di corrosione bassa, media e alta. I valori sono stati ottenuti tramite interpolazione tra due punti dai grafici presentati in precedenza per l'anno corrispondente. I valori iniziali di indice di rischio a 13.5 anni sono i seguenti:

- IR_a per meccanismo di rottura duttile, dir.x: 1.785
- IR_a per meccanismo di rottura duttile, dir.y: 1.475
- IR_a per meccanismo di rottura fragile, dir.x: 0.265
- IR_a per meccanismo di rottura fragile, dir.y: 0.200

Tabella 9.14 – Indici di rischio di accelerazione per meccanismo di rottura e direzione

Meccanismo di rottura: rotazione				
Indice di rischio	corrosione	25 anni	50 anni	75 anni
IR_a - DIR.X	Bassa	1.785	1.782 (-0.17%)	1.779 (-0.34%)
	Media	1.774 (-0.63%)	1.747 (-1.99%)	1.720 (-3.36%)
	Alta	1.724 (-3.41%)	1.552 (-12.91%)	1.184 (-33.47%)
IR_a - DIR.Y	Bassa	1.475	1.472 (-0.20%)	1.469 (-0.41%)
	Media	1.463 (-0.77%)	1.436 (-2.43%)	1.409 (-4.11%)
	Alta	1.413 (-4.18%)	1.305 (-11.36%)	0.946 (-35.61%)
Meccanismo di rottura: taglio				
Indice di rischio	corrosione	25 anni	50 anni	75 anni
IR_a - DIR.X	Bassa	0.265	0.263 (-0.75%)	0.262 (-1.13%)
	Media	0.258 (-2.76%)	0.240 (-8.83%)	0.222 (-14.97%)
	Alta	0.225 (-15.07%)	0.198 (-24.91%)	0.180 (-31.26%)
IR_a - DIR.Y	Bassa	0.200	0.199 (-0.50%)	0.198 (-1.00%)
	Media	0.196 (-1.99%)	0.186 (-6.33%)	0.176 (-10.72%)
	Alta	0.178 (-10.84%)	0.153 (-23.16%)	0.140 (-29.30%)

Infine, si riportano i diametri e la diminuzione in percentuale dell'area di armatura per gli scenari presenti nella tabella precedente.

Tabella 9.15 – Diametri Armatura longitudinale e diminuzione dell'area in percentuale

B88				
Diametri Barre Armatura Longitudinali				
corrosione	i_{corr}	25	50	75
Iniziale		20	20	20
Bassa	0.1	19.97	19.92	19.86
Media	1	19.73	19.15	18.57
Alta	5	18.67	15.77	12.87
Diminuzione Area armatura [ΔA_s]				
Bassa	0.1	0.27%	0.85%	1.42%
Media	1	2.65%	8.29%	13.76%
Alta	5	12.90%	37.86%	58.62%

Diametri Barre Armatura Trasversali				
corrosione	i_{corr}	25	50	75
Iniziale		8	8	8
Bassa	0.1	7.97	7.92	7.86
Media	1	7.73	7.15	6.57
Alta	5	6.67	3.77	0.87
Diminuzione Area armatura [ΔA_s]				
Bassa	0.1	0.67%	2.11%	3.54%
Media	1	6.56%	20.05%	32.49%
Alta	5	30.57%	77.84%	98.83%

9.2.1.2. Analisi Time History

Di seguito si vuole riportare l'andamento dell'indice di rischio ottenuto dall'analisi dinamica non lineare (Time History) e confrontare i valori con quelli ricavati dall'analisi dinamica lineare.

Dal confronto si può evincere come le due differenti analisi portino alla descrizione di un andamento dell'indice di rischio con differenze significative. Questo è dovuto alla presenza di un numero elevato di cerniere plastiche (16) che mette in evidenza la maggior precisione del metodo TH caratterizzato da un minor numero di semplificazioni e combinando il meccanismo fragile e duttile delle cerniere.

Tabella 9.16 – Calcolo dell'indice di rischio attraverso i fattori di scala degli eventi sismici

Fattori di scala e Indice di Rischio					
ID HEARTHQUAKE	D20/D8	D18/D6	D16/D4	D14/D2	D12/D0
000042	0.2	0.175	0.15	0.125	0.125
000170	0.25	0.225	0.175	0.175	0.15
000335	0.35	0.3	0.25	0.225	0.225
000599	0.55	0.45	0.375	0.35	0.325
000600	0.25	0.2	0.175	0.175	0.175
001911	0.4	0.2	0.175	0.15	0.15
007104	0.5	0.3	0.225	0.2	0.2
IR	0.36	0.26	0.22	0.20	0.19

Il grafico seguente è stato costruito con i valori di indice di rischio normalizzato calcolati per ogni configurazione di sezione ed elaborati per grado di corrosione alto.

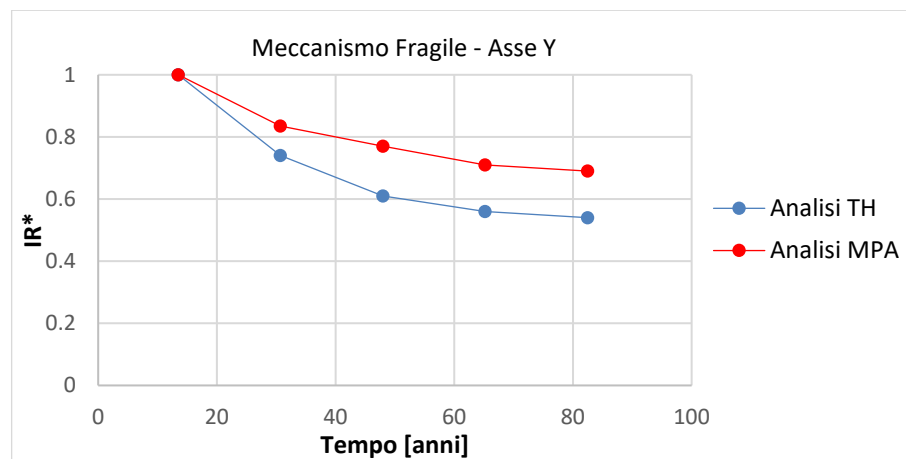


Figura 9.12 – Confronto dell'IR* tra analisi dinamica lineare (MPA) e non lineare (TH)

Tabella 9.17 – Variazione dell'indice di rischio per scenari temporali prefissati a differenti livelli di degrado

IR _a per scenario temporale			
corrosione	25 anni	50 anni	75 anni
Bassa	0.356	0.353	0.351
Media	0.345 (-3.13%)	0.318 (-10.02%)	0.291 (-17.01%)
Alta	0.295 (-17.10%)	0.216 (-38.91%)	0.196 (-44.10%)

9.2.2. Viadotto V01

Il viadotto presenta uno schema strutturale a travata composto da pile a telaio. Di seguito vengono riportati i dati necessari per lo sviluppo del grafico di correlazione tra decadimento dell'indice di rischio e diminuzione dell'area di armatura. I dati sono stati ottenuti elaborando quelli relativi alle attività di ricerca

pregresse con la modalità illustrata in introduzione al capitolo. I valori iniziali di indice di rischio a 13.5 anni sono i seguenti:

- IR_a per meccanismo di rottura duttile, dir.x: 3.214
- IR_a per meccanismo di rottura duttile, dir.y: 2.411
- IR_a per meccanismo di rottura fragile, dir.x: 2.099
- IR_a per meccanismo di rottura fragile, dir.y: 1.890

Tabella 9.18 – Indici di rischio di accelerazione per meccanismo di rottura e direzione

Meccanismo di rottura: rotazione				
Indice di rischio	corrosione	25 anni	50 anni	75 anni
IR _a - DIR.X	Bassa	3.214	3.206 (-0.25%)	3.199 (-0.47%)
	Media	3.184 (-0.93%)	3.111 (-2.97%)	3.039 (-5.02%)
	Alta	3.050 (-5.10%)	2.888 (-9.95%)	2.744 (-14.23%)
IR _a - DIR.Y	Bassa	2.411	2.410 (-0.05%)	2.410 (-0.05%)
	Media	2.409 (-0.06%)	2.406 (-0.19%)	2.402 (-0.32%)
	Alta	2.403 (-0.33%)	2.310 (-4.17%)	2.161 (-10.35%)
Meccanismo di rottura: taglio				
IR _a - DIR.X	Bassa	2.099	2.067 (-1.52%)	2.034 (-3.10%)
	Media	1.965 (-6.38%)	1.642 (-20.56%)	1.318 (-35.19%)
	Alta	1.369 (-34.81%)	0.669 (-67.65%)	0.615 (-69.77%)
IR _a - DIR.Y	Bassa	1.890	1.852 (-2.01%)	1.815 (-4.00%)
	Media	1.735 (-8.20%)	1.361 (-26.54%)	0.987 (-45.64%)
	Alta	1.045 (-44.73%)	0.394 (-78.71%)	0.337 (-81.42%)

9.2.3. Viadotto V02

Il viadotto presenta uno schema strutturale a travata composto da pile a telaio. Di seguito vengono riportati i dati necessari per lo sviluppo del grafico di correlazione tra decadimento dell'indice di rischio e diminuzione dell'area di armatura. I dati sono stati ottenuti elaborando quelli relativi alle attività di ricerca pregresse con la modalità illustrata nel paragrafo in introduzione al capitolo. I valori iniziali di indice di rischio a 13.5 anni sono i seguenti:

- IR_a per meccanismo di rottura duttile, dir.x: 1.293
- IR_a per meccanismo di rottura duttile, dir.y: 1.364
- IR_a per meccanismo di rottura fragile, dir.x: 0.906
- IR_a per meccanismo di rottura fragile, dir.y: 0.571

Tabella 9.19 – Indici di rischio di accelerazione per meccanismo di rottura e direzione

Meccanismo di rottura: rotazione				
Indice di rischio	corrosione	25 anni	50 anni	75 anni
IR _a - DIR.X	Bassa	1.293	1.292 (-0.08%)	1.291 (-0.16%)
	Media	1.289 (-0.36%)	1.277 (-1.15%)	1.266 (-1.94%)
	Alta	1.268 (-1.98%)	1.168 (-9.64%)	1.090 (-15.56%)
IR _a - DIR.Y	Bassa	1.364	1.363 (-0.07%)	1.362 (-0.15%)
	Media	1.360 (-0.35%)	1.348 (-1.12%)	1.336 (-1.89%)
	Alta	1.338 (-1.92%)	1.301 (-4.60%)	1.146 (-15.85%)
Meccanismo di rottura: taglio				
IR _a - DIR.X	Bassa	0.906	0.903 (-0.33%)	0.900 (-0.66%)
	Media	0.892 (-1.56%)	0.858 (-4.98%)	0.824 (-8.42%)
	Alta	0.829 (-8.53%)	0.264 (-70.78%)	0.237 (-73.65%)
IR _a - DIR.Y	Bassa	0.571	0.568 (-0.53%)	0.565 (-1.05%)
	Media	0.559 (-2.06%)	0.531 (-6.58%)	0.502 (-11.14%)
	Alta	0.506 (-11.25%)	0.402 (-29.14%)	0.257 (-54.43%)

9.2.4. Influenza della corrosione sull'indice di rischio

Di seguito vengono proposti i diagrammi che esplicitano la relazione tra la riduzione dell'area di armatura della sezione e il decadimento dell'indice di rischio per il caso di pile a telaio, parametri che vengono calcolati con le rispettive formulazioni:

$$\Delta A_s = \left(1 - \frac{A_{s,t}}{A_{s,13.5}}\right) * 100 [\%] \quad (9.3)$$

$$\Delta IR = \left(1 - \frac{IR_t}{IR_{13.5}}\right) * 100 [\%] \quad (9.4)$$

Dove:

- $A_{s,t}$ è l'area di armatura longitudinale al momento t
- $A_{s,13.5}$ è l'area di armatura longitudinale iniziale
- $IR_{a,t}$ è l'indice di rischio al momento t
- $IR_{13.5}$ è l'indice di rischio iniziale.

Vengono analizzati i casi corrispondenti ai differenti meccanismi di rottura, a rotazione e taglio, in modo da comprendere la variazione dell'andamento dell'indice di rischio anche in base a questo parametro, inoltre vengono ulteriormente distinti per direzione dell'azione sismica considerata. I grafici sono stati costruiti sui risultati ottenuti dai viadotti B88, V01, V02.

Per quanto riguarda il meccanismo a rotazione possiamo notare come la curva di tendenza definita dai tre viadotti abbia un andamento lineare che raggiunge un valore di decadimento dell'indice di rischio massimo di circa il 20%, nell'intervallo di diametri considerato. Questo comportamento può essere spiegato dalla struttura a telaio che caratterizza le pile che contribuisce in modo rilevante sulla resistenza a flessione delle pile, diminuendo di conseguenza l'effetto della riduzione di armatura.

Il meccanismo di rottura a taglio invece genera una curva di tendenza lievemente logaritmica, registrando dei valori massimi di decadimento dell'indice di rischio del 60%. L'andamento della curva è dovuto al fatto che la resistenza a taglio della struttura in corrispondenza di circa il 40% della riduzione di area di armatura dipende dal contributo del calcestruzzo e dello schema a telaio; dunque, successivamente a questo degrado l'indice di rischio diminuirà in maniera inferiore rispetto all'andamento iniziale della curva.

Si può anche dedurre dai valori ottenuti che i viadotti caratterizzati da pile a telaio sono soggetti ad un maggior decadimento della resistenza a taglio rispetto a quella a rotazione.

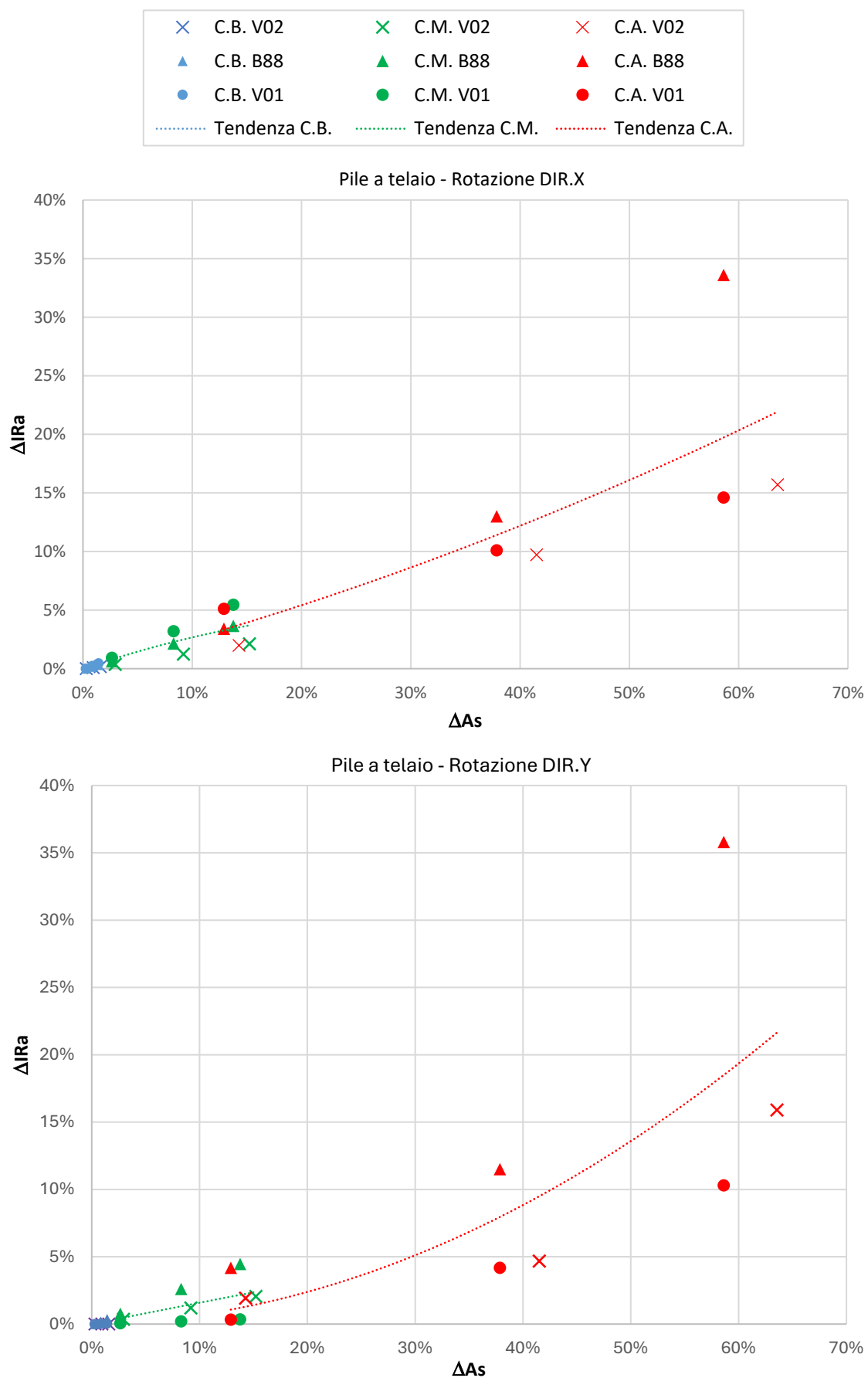


Figura 9.13 - Grafico decadimento IR – Riduzione As per meccanismo di rottura a rotazione, pile a telaio

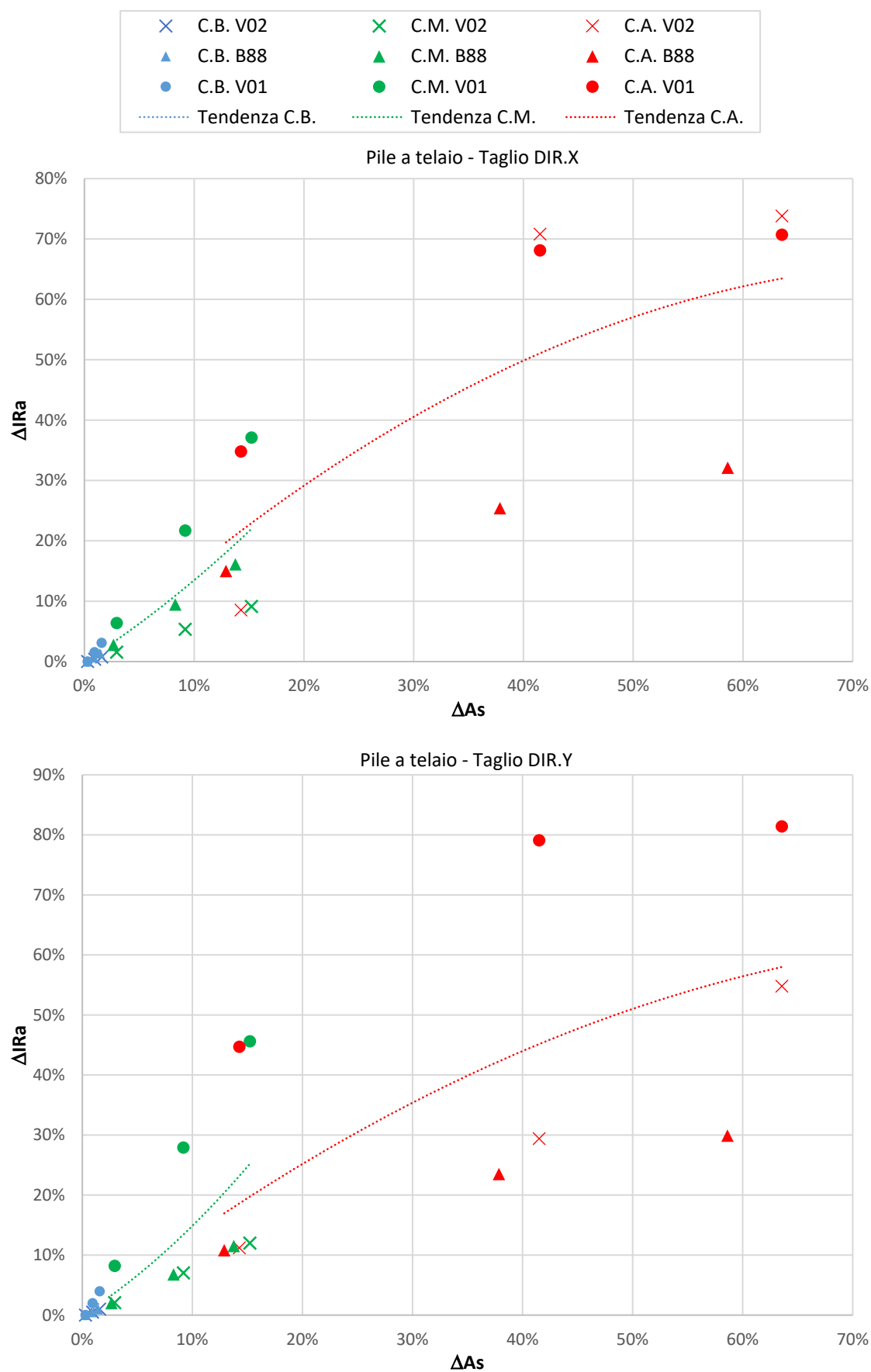


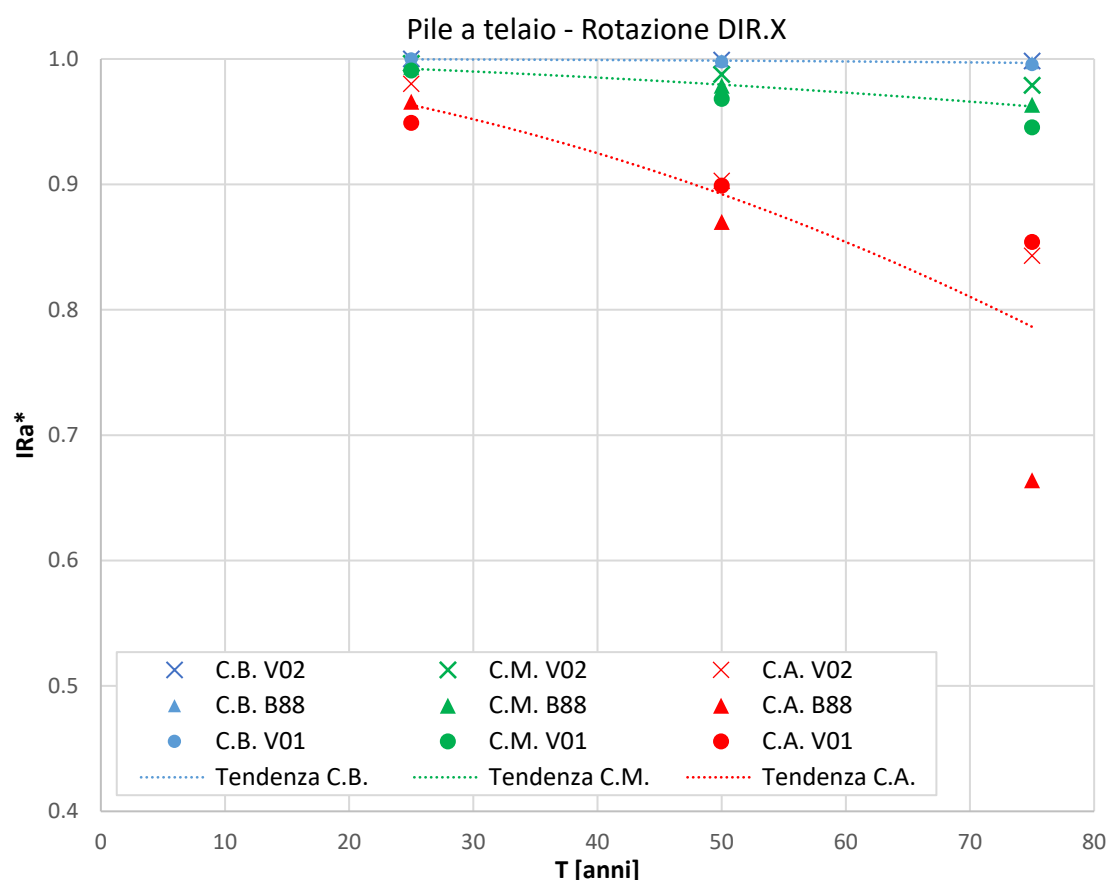
Figura 9.14 - Grafico decadimento IR – Riduzione A_s per meccanismo di rottura a taglio, pile a telaio

9.2.5. Risultati funzionali alla prevenzione

I grafici presentati nel paragrafo precedente esprimono la correlazione tra la diminuzione di armatura e il decadimento della resistenza della struttura. Tuttavia, la misurazione dell'area di armatura su strutture esistenti mediante analisi in sito risultata complessa e laboriosa. Ai fini della prevenzione risulta di più immediata interpretazione l'analisi dello sviluppo nel tempo del valore di indice di rischio normalizzato.

I risultati verranno differenziati per meccanismo di rottura, duttile o fragile, e direzione principale dell'evento sismico sollecitante.

Le linee di tendenza ottenute sono correlate a quelle ottenute nel paragrafo precedente. In particolare, ad un andamento esponenziale del decadimento dell'indice di rischio in funzione dell'area dell'armatura corrisponderà un andamento parabolico in funzione del tempo. Analogamente, a un andamento lineare del decadimento dell'IR in funzione dell'area di acciaio corrisponderà un andamento parabolico meno accentuato in funzione del tempo.



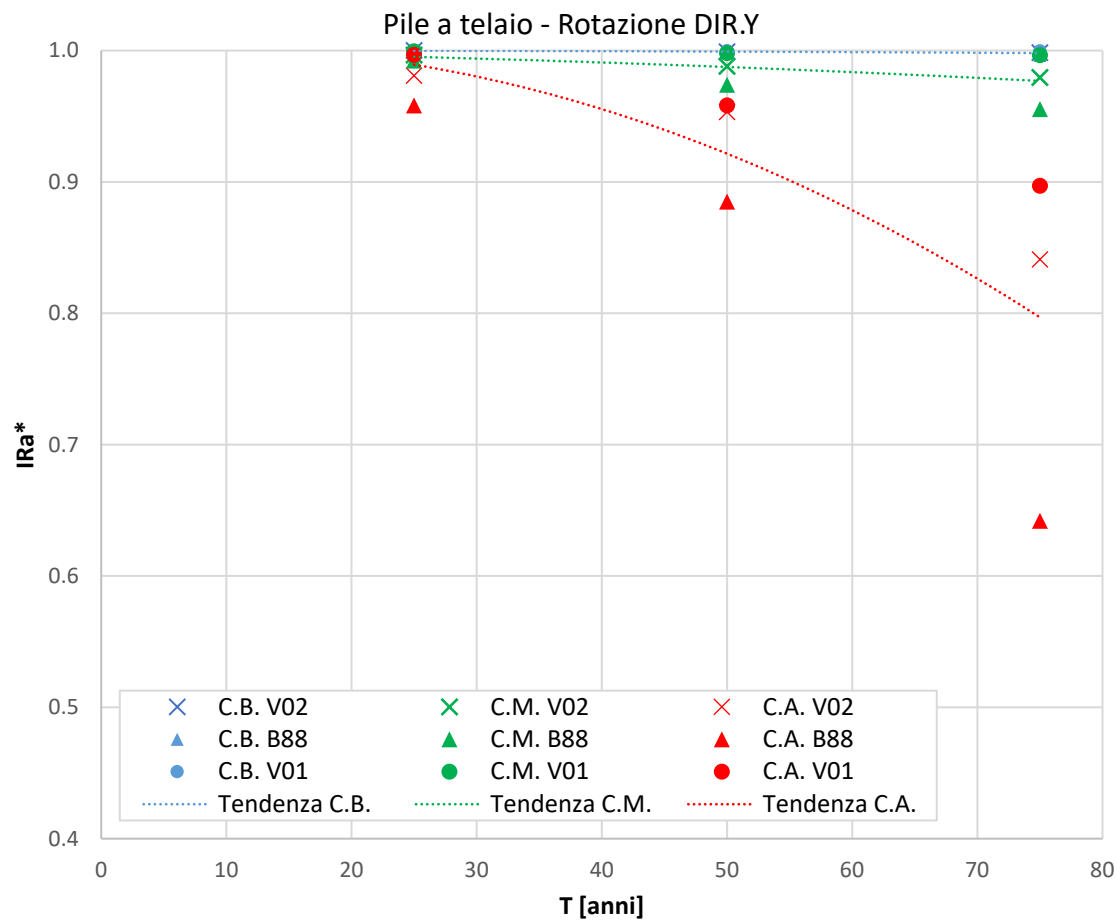
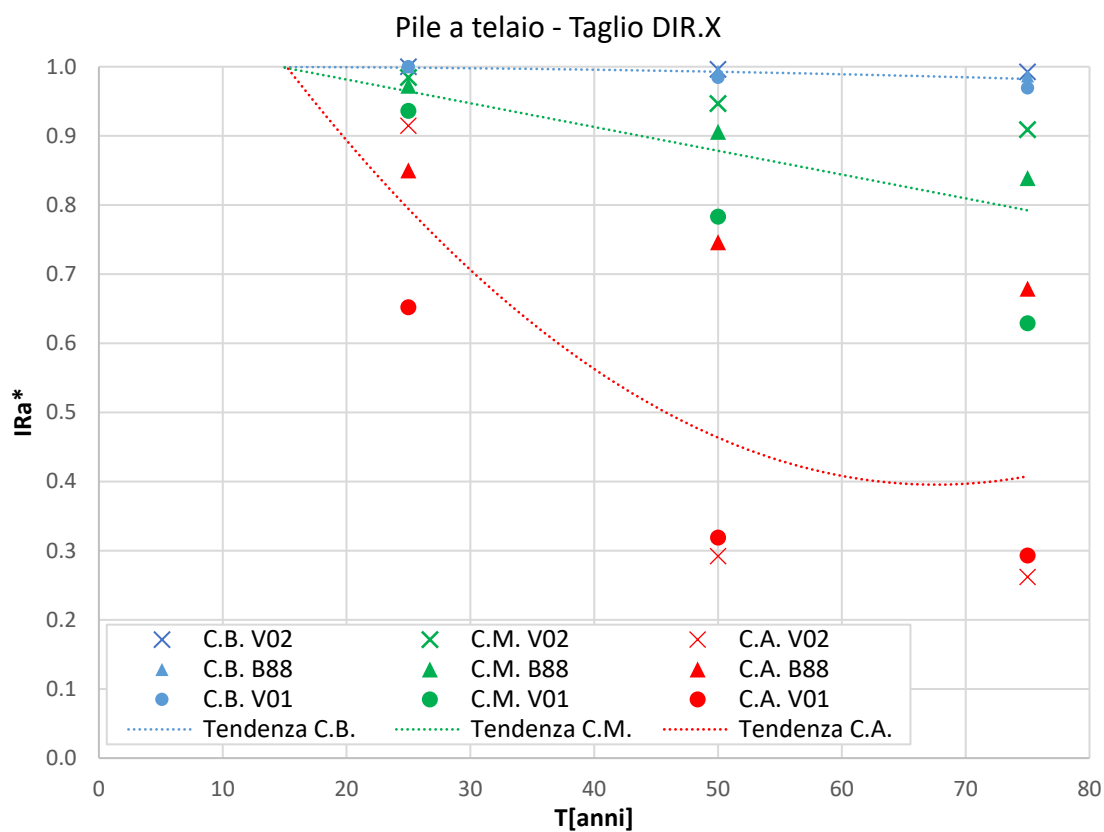


Figura 9.15 – Andamento nel tempo dell'indice di rischio per meccanismo di rottura a rotazione – pile a telaio



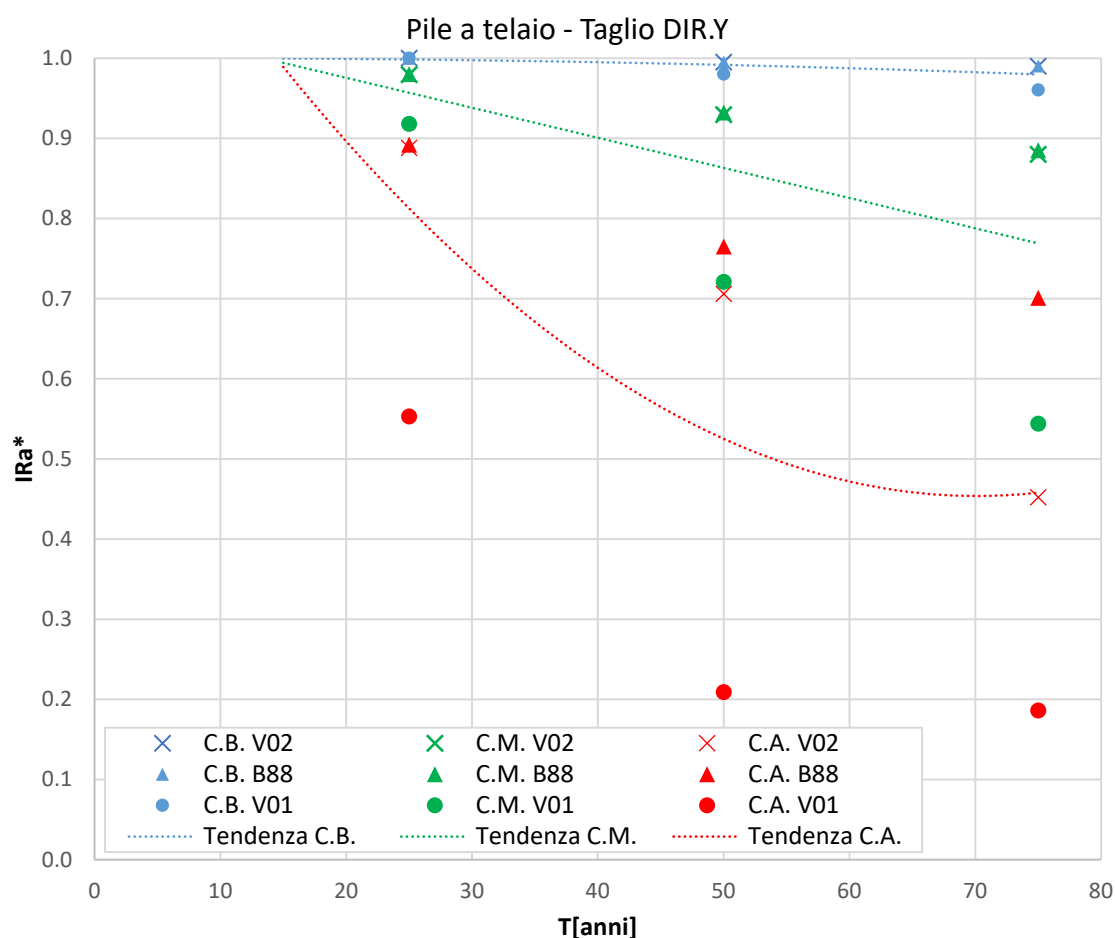


Figura 9.16 – Andamento nel tempo dell'indice di rischio per meccanismo di rottura a taglio – pile a telaio

9.2.6. Comportamento allo scenario di crisi

In questo paragrafo verrà analizzata la crisi dei viadotti, ovvero lo stato delle cerniere plastiche attraverso i risultati ottenuti dall'analisi dinamica non lineare. In particolare, si cercherà di valutare la rilevanza della combinazione del comportamento duttile e fragile in base allo stato delle cerniere plastiche al momento della crisi.

Il viadotto B88 presenta un meccanismo di rottura fragile senza l'attivazione di nessuna cerniera a rotazione per ogni configurazione di sezione analizzata. A differenza del viadotto B83, il momento agente nella direzione maggiormente sollecitata risulta essere al massimo il 50% del momento di primo snervamento. Quindi, in concomitanza della crisi a taglio della pila, difficilmente si potrebbero instaurare dei fenomeni di danneggiamento a pressoflessione.

Tabella 9.20 – Sollecitazioni allo scenario di crisi lungo la direzione maggiormente sollecitata

Config.	Cerniere Plastiche	Taglio - Asse y		Momento - Asse z	
		Time [s]	T [kN]	M [kN*m]	R [rad]
D20	PILA 1	8.93	184.19 (98%)	468.83 (49%)	1.43E-4 (49%)
	PILA 2	8.93	179.26 (95%)	456.32 (48%)	1.39E-4 (48%)
	PILA 3	8.93	178.42 (95%)	454.20 (48%)	1.38E-4 (48%)
	PILA 4	8.93	188.52 (100%)	479.81 (50%)	1.46E-4 (50%)
D18	PILA 1	8.925	157.66 (98%)	400.65 (43%)	1.33E-4 (43%)
	PILA 2	8.925	149.86 (93%)	382.12 (41%)	1.27E-4 (41%)
	PILA 3	8.635	149.38 (93%)	381.30 (41%)	1.27E-4 (41%)
	PILA 4	8.925	160.46 (100%)	407.77 (44%)	1.36E-4 (44%)
D16	PILA 1	8.925	134.17 (98%)	340.57 (40%)	1.19E-4 (40%)
	PILA 2	8.64	128.41 (94%)	327.62 (39%)	1.15E-4 (39%)
	PILA 3	8.64	128.09 (93%)	326.81 (39%)	1.14E-4 (39%)
	PILA 4	8.925	136.31 (99%)	346.02 (41%)	1.21E-4 (41%)
D14	PILA 1	8.945	117.53 (96%)	297.97 (38%)	1.10E-4 (38%)
	PILA 2	8.945	113.65 (93%)	288.15 (37%)	1.06E-4 (37%)
	PILA 3	8.945	112.84 (93%)	286.13 (37%)	1.05E-4 (37%)
	PILA 4	8.945	120.96 (99%)	306.65 (40%)	1.13E-4 (40%)
D12	PILA 1	8.935	113.98 (97%)	288.78 (40%)	1.11E-4 (40%)
	PILA 2	8.645	106.95 (91%)	272.52 (38%)	1.05E-4 (38%)
	PILA 3	8.645	106.60 (91%)	271.65 (38%)	1.04E-4 (38%)
	PILA 4	8.935	116.23 (99%)	294.48 (41%)	1.13E-4 (41%)

9.3. Viadotti con pile rette a sezione cava

In questo paragrafo verranno analizzati i viadotti che presentano una struttura caratterizzata da pile rette a sezione cava. Dunque, sono stati studiati i risultati ottenuti dal viadotto R13 ed integrati con quelli di tre viadotti analizzati in lavori di ricerca precedenti: viadotto F47, BAF e BAG.

9.3.1. Risultati R13

Il viadotto presenta uno schema strutturale a travata composto da pile rette a sezione cava.

Di seguito vengono riportate le configurazioni di sezione analizzate.

Tabella 9.21 – Diametri e deformazione ultima a rottura delle armature per configurazione di sezione

PILA 1 - PILA 2 - PILA 3 - PILA 6 - PILA 7						
Armatura Longitudinale						
N° Configurazione	$\varnothing_{t,1}$	$\varnothing_{t,2}$	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
1	24	16	0.13	0.000	0.13	0.02
2	22	14	0.13	23.4375	0.070586	0.02
3	20	12	0.13	43.75	0.019094	0.0191
4	18	10	0.13	60.9375	-0.02448	0.011
5	16	8	0.13	75	-0.06013	0.011
Armatura Trasversale						
N° Configurazione	$\varnothing_{t, staffe}$	$\varnothing_{t, spilli}$	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
1	8	8	0.13	0.00	0.13	0.02
2	6	6	0.13	43.75	0.019094	0.0191
3	4	4	0.13	75.00	-0.06013	0.011
4	2	2	0.13	93.75	-0.10766	0.011
5	0	0	0.13	100.00	-0.1235	0.011
PILA 4 - PILA 5						
Armatura Longitudinale						
N° Configurazione	$\varnothing_{t,1}$	$\varnothing_{t,2}$	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
1	30	16	0.13	0.000	0.13	0.02
2	28	14	0.13	23.4375	0.070586	0.02
3	26	12	0.13	43.75	0.019094	0.0191
4	24	10	0.13	60.9375	-0.02448	0.011
5	22	8	0.13	75	-0.06013	0.011
Armatura Trasversale						
N° Configurazione	$\varnothing_{t, staffe}$	$\varnothing_{t, spilli}$	ε_{su}	Ψ	$\varepsilon_{su, corr}$	$\varepsilon_{su, rid}$
1	8	8	0.13	0.00	0.13	0.02
2	6	6	0.13	43.75	0.019094	0.019094
3	4	4	0.13	75.00	-0.06013	0.011
4	2	2	0.13	93.75	-0.10766	0.011
5	0	0	0.13	100.00	-0.1235	0.011

9.3.1.1. Analisi MPA

Di seguito si riporta il diagramma di accelerazione e spostamento spettrale per il meccanismo di rottura a rotazione sul piano ADSR per le varie configurazioni del primo modo. Si può notare la diminuzione delle proprietà meccaniche della struttura al diminuire del diametro delle armature.

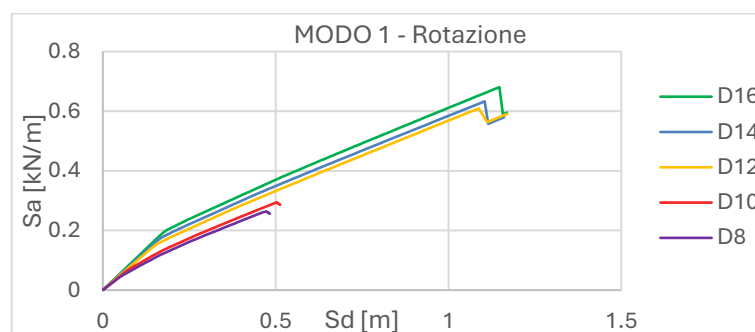


Figura 9.17 – Grafico ADSR del primo modo contribuyente per meccanismo duttile a diverse configurazioni di sezione

Conseguentemente alla perdita di resistenza, l'indice di rischio subisce un decremento all'aumentare del degrado.

Tabella 9.22 – Indici di rischio per meccanismo di rottura duttile a diverse configurazioni di sezione

Meccanismo duttile			
Indice di rischio	Configurazione	Direzione X	Direzione Y
IR _a	1 - D16/D8	7.132	5.903
	2 - D14/D6	6.794 (-4.74%)	5.672 (-3.91%)
	3 - D12/D4	6.099 (-14.48%)	5.291 (-10.37%)
	4 - D10/D2	4.078 (-42.82%)	1.99 (-66.29%)
	5 - D8/D0	3.645 (-48.89%)	1.708 (-71.07%)
IR _t	1 - D16/D8	27.803	20.185
	2 - D14/D6	25.612 (-7.88%)	18.863 (-6.55%)
	3 - D12/D4	21.332 (-23.27%)	16.772 (-16.91%)
	4 - D10/D2	10.789 (-61.19%)	3.201 (-84.14%)
	5 - D8/D0	8.923 (-67.91%)	2.471 (-87.76%)

Di seguito si riporta il diagramma di accelerazione e spostamento spettrale per il meccanismo di rottura a taglio sul piano ADSR per le varie configurazioni del primo modo. Si può notare la diminuzione delle proprietà meccaniche della struttura al diminuire del diametro delle armature.

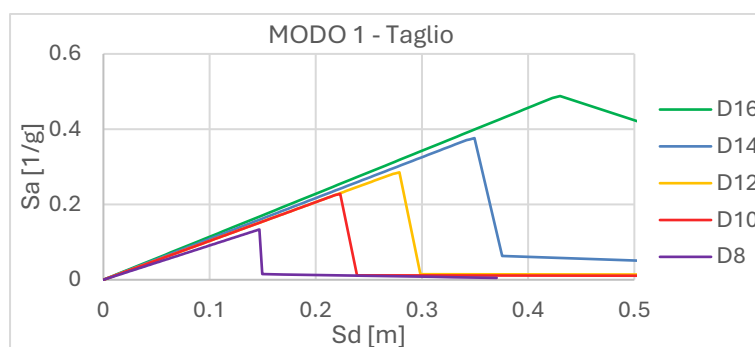


Figura 9.18 – Grafico ADSR del primo modo contribuente per meccanismo fragile a diverse configurazioni di sezione

Conseguentemente alla perdita di resistenza, l'indice di rischio subisce un decremento all'aumentare del degrado.

Tabella 9.23 – Indici di rischio per meccanismo di rottura fragile a diverse configurazioni di sezione

Meccanismo fragile			
Indice di rischio	Configurazione	Direzione X	Direzione Y
IR _a	1 - D16/D8	1.405	0.953
	2 - D14/D6	1.09 (-22.42%)	0.75 (-21.30%)
	3 - D12/D4	0.772 (-45.05%)	0.602 (-36.83%)
	4 - D10/D2	0.759 (-45.98%)	0.581 (-39.03%)
	5 - D8/D0	0.675 (-51.96%)	0.328 (-65.58%)
IR _t	1 - D16/D8	1.776	0.931
	2 - D14/D6	1.155 (-34.97%)	0.664 (-28.68%)
	3 - D12/D4	0.69 (-61.15%)	0.5 (-46.29%)
	4 - D10/D2	0.674 (-62.05%)	0.479 (-48.55%)
	5 - D8/D0	0.577 (-67.51%)	0.262 (-71.86%)

Vengono individuati gli scenari temporali corrispondenti ad ogni configurazione analizzata in base al grado di corrosione.

Tabella 9.24 – Scenari temporali per diverse configurazioni di sezione e livello di corrosione

Scenari temporali			
N° Configurazione	$t_{\text{corr. bassa}}$	$t_{\text{corr. media}}$	$t_{\text{corr. alta}}$
-	[anni]	[anni]	[anni]
1 – D16/D8	13.5	13.5	13.5
2 – D14/D6	875.6	99.7	30.7
3 – D12/D4	1737.6	185.9	48
4 – D10/D2	2599.7	272.1	65.2
5 – D8/D0	3461.8	358.3	82.5

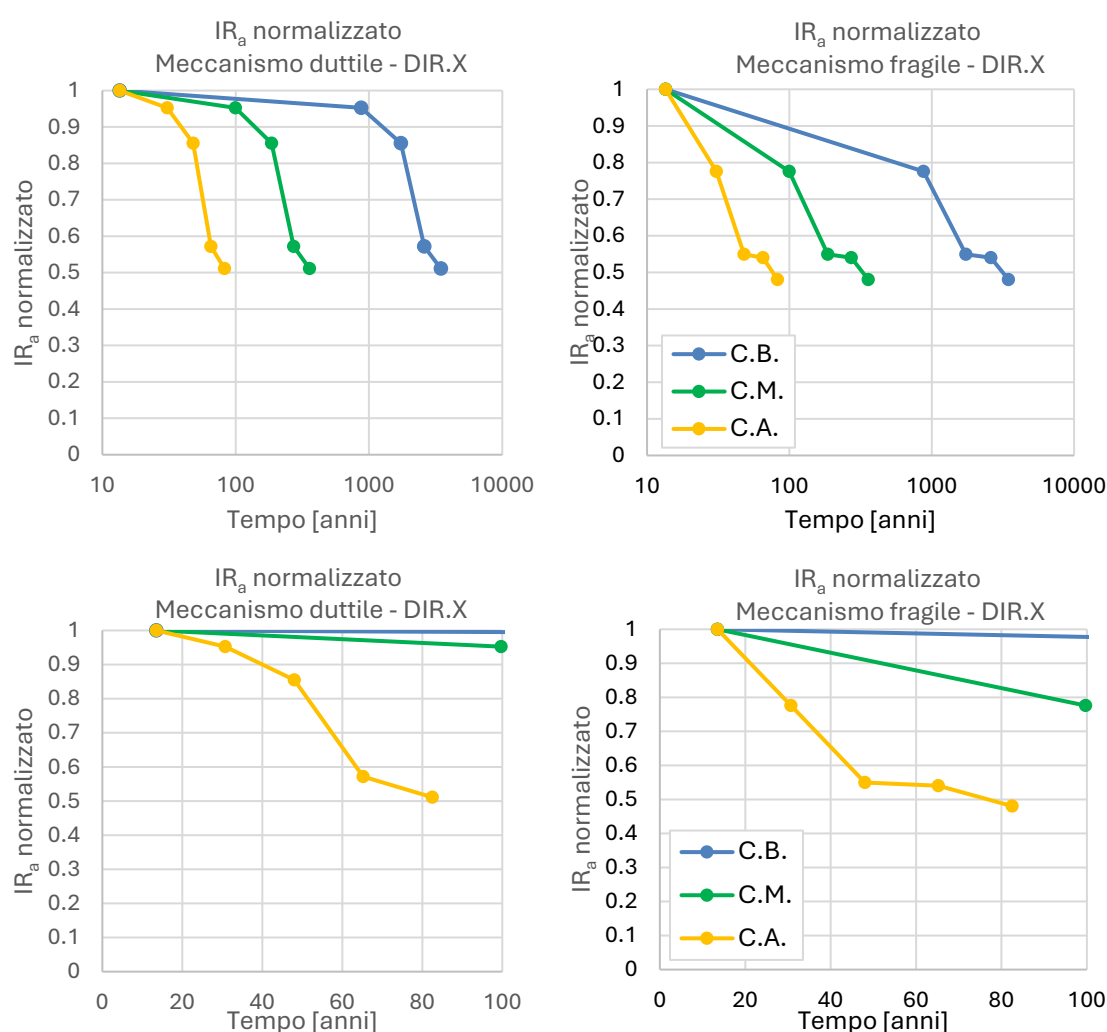


Figura 9.19 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo per livello di corrosione, dir.x

Attraverso l'interpolazione dei valori ottenuti per le varie configurazioni sugli scenari temporali corrispondenti vengono individuati gli indici di rischio a 25, 50 e 75 anni per intensità di corrosione bassa, media e alta. I valori iniziali di indice di rischio a 13.5 anni sono i seguenti:

- IR_a per meccanismo di rottura duttile, dir.x: 7.127
- IR_a per meccanismo di rottura duttile, dir.y: 5.900
- IR_a per meccanismo di rottura fragile, dir.x: 1.401
- IR_a per meccanismo di rottura fragile, dir.y: 0.950

Tabella 9.25 – Indici di rischio di accelerazione per meccanismo di rottura e direzione

Meccanismo di rottura: rotazione				
Indice di rischio	corrosione	25 anni	50 anni	75 anni
IR _a - DIR.X	Bassa	7.127	7.118 (-0.13%)	7.108 (-0.27%)
	Media	7.087 (-0.57%)	6.989 (-1.81%)	6.891 (-3.05%)
	Alta	6.906 (-3.11%)	5.864 (-17.61%)	3.833 (-46.08%)
IR _a - DIR.Y	Bassa	5.900	5.893 (-0.12%)	5.887 (-0.22%)
	Media	5.872 (-0.47%)	5.805 (-1.49%)	5.738 (-2.52%)
	Alta	5.749 (-2.57%)	4.907 (-16.73%)	1.830 (-68.91%)
Meccanismo di rottura: taglio				
Indice di rischio	corrosione	25 anni	50 anni	75 anni
IR _a - DIR.X	Bassa	1.401	1.392 (-0.64%)	1.383 (-1.28%)
	Media	1.363 (-2.70%)	1.272 (-8.63%)	1.180 (-14.63%)
	Alta	1.194 (-14.74%)	0.770 (-44.64%)	0.711 (-48.54%)
IR _a - DIR.Y	Bassa	0.950	0.944 (-0.63%)	0.939 (-1.16%)
	Media	0.926 (-2.56%)	0.867 (-8.19%)	0.808 (-13.89%)
	Alta	0.817 (-14.00%)	0.600 (-36.51%)	0.438 (-53.36%)

Infine, si riportano i diametri e la diminuzione in percentuale dell'area di armatura per gli scenari presenti nella tabella precedente.

Tabella 9.26 – Diametri Armatura longitudinale e diminuzione dell'area in percentuale

R13				
Diametri Armatura Longitudinale				
corrosione	i _{corr}	25	50	75
Iniziale	-	16	16	16
Bassa	0.1	15.97	15.92	15.86
Media	1	15.73	15.15	14.57
Alta	5	14.67	11.77	8.87
Diminuzione Area armatura [ΔAs]				
Bassa	0.1	0.33%	1.06%	1.78%
Media	1	3.31%	10.30%	17.04%
Alta	5	15.98%	45.92%	69.29%

Diametri Barre Armatura Trasversali				
corrosione	i _{corr}	25	50	75
Iniziale	-	8	8	8
Bassa	0.1	7.97	7.92	7.86
Media	1	7.73	7.15	6.57
Alta	5	6.67	3.77	0.87
Diminuzione Area armatura [ΔAs]				
Bassa	0.1	0.67%	2.11%	3.54%
Media	1	6.56%	20.05%	32.49%
Alta	5	30.57%	77.84%	98.83%

9.3.1.2. Analisi Time History

Di seguito si vuole riportare l'andamento dell'indice di rischio ottenuto dall'analisi dinamica non lineare (Time History) e confrontare i valori con quelli ricavati dall'analisi dinamica lineare.

Dal confronto si può evincere come le due differenti analisi portino alla descrizione di un andamento dell'indice di rischio con minime differenze nel primo tratto, mentre nel secondo tratto si evidenzia una differenza significativa dovuta alla maggior precisione dell'analisi TH che presenta un andamento più lineare. Il grafico seguente è stato costruito con i valori di indice di rischio normalizzato calcolati per ogni configurazione di sezione ed elaborati per grado di corrosione alto.

Tabella 9.27 – Calcolo dell'indice di rischio attraverso i fattori di scala degli eventi sismici

Fattori di scala e Indice di Rischio					
ID HEARTHQUAKE	D16/D8	D14/D6	D12/D4	D10/D2	D8/D0
000335	1.4	1	0.8	0.6	0.25
000374	0.8	0.6	0.5	0.4	0.4
000375	0.8	0.7	0.5	0.4	0.4
000386	1.5	1.1	0.8	0.7	0.5
000571	1.2	0.9	0.7	0.6	0.3
000644	2	1.6	1.6	1	0.45
007104	1.1	0.8	0.8	0.5	0.4
IR	1.26	0.96	0.81	0.60	0.39

Il grafico seguente è stato costruito con i valori di indice di rischio normalizzato calcolati per ogni configurazione di sezione ed elaborati per grado di corrosione alto.

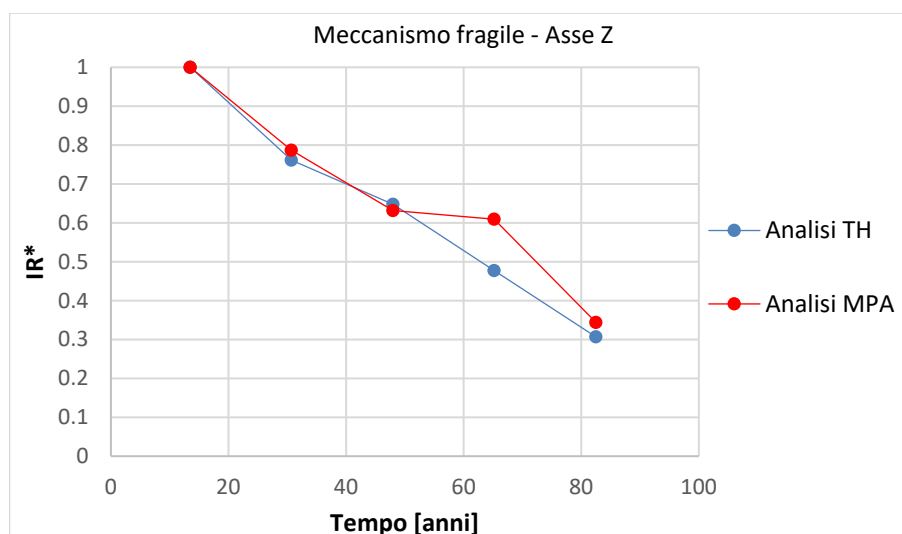


Figura 9.20 – Confronto dell'IR* tra analisi dinamica lineare (MPA) e non lineare (TH)

Tabella 9.28 – Variazione dell'indice di rischio per scenari temporali prefissati a differenti livelli di degrado

IR _a per scenario temporale – Analisi TH			
corrosione	25 anni	50 anni	75 anni
Bassa	0.478	0.476	0.474
Media	0.471 (-1.44%)	0.454 (-4.57%)	0.438 (-7.73%)
Alta	0.440 (-7.84%)	0.390 (-18.02%)	0.355 (-25.13%)

9.3.2. Viadotto F47

Il viadotto presenta uno schema strutturale a travata composto da pile rette a sezione cava.

Di seguito vengono riportati i dati necessari per lo sviluppo del grafico di correlazione tra decadimento dell'indice di rischio e diminuzione dell'area di armatura. I dati sono stati ottenuti elaborando quelli relativi alle attività di ricerca pregresse con la modalità illustrata in introduzione al capitolo. I valori iniziali di indice di rischio a 13.5 anni sono i seguenti:

- IR_a per meccanismo di rottura duttile, dir.x: 4.872
- IR_a per meccanismo di rottura duttile, dir.y: 5.520
- IR_a per meccanismo di rottura fragile, dir.x: 1.638
- IR_a per meccanismo di rottura fragile, dir.y: 1.296

Tabella 9.29 – Indici di rischio di accelerazione per meccanismo di rottura e direzione

Meccanismo di rottura: rotazione				
Indice di rischio	corrosione	25 anni	50 anni	75 anni
IR _a - DIR.X	Bassa	4.872	4.870 (-0.04%)	4.869 (-0.06%)
	Media	4.865 (-0.15%)	4.848 (-0.47%)	4.830 (-0.79%)
	Alta	4.833 (-0.81%)	4.535 (-6.88%)	3.564 (-26.79%)
IR _a - DIR.Y	Bassa	5.520	5.495 (-0.45%)	5.471 (-0.89%)
	Media	5.418 (-1.84%)	5.172 (-5.88%)	4.926 (-9.95%)
	Alta	4.964 (-10.07%)	4.632 (-15.71%)	3.990 (-27.07%)
Meccanismo di rottura: taglio				
Indice di rischio	corrosione	25 anni	50 anni	75 anni
IR _a - DIR.X	Bassa	1.638	1.631 (-0.43%)	1.623 (-0.91%)
	Media	1.607 (-1.94%)	1.530 (-6.19%)	1.453 (-10.48%)
	Alta	1.465 (-10.60%)	0.986 (-39.53%)	0.637 (-60.77%)
IR _a - DIR.Y	Bassa	1.296	1.291 (-0.38%)	1.287 (-0.69%)
	Media	1.277 (-1.45%)	1.232 (-4.60%)	1.187 (-7.78%)
	Alta	1.194 (-7.89%)	1.036 (-19.81%)	0.917 (-28.71%)

9.3.3. Viadotto BAF

Il viadotto presenta uno schema strutturale a travata composto da pile rette a sezione cava.

Di seguito vengono riportati i dati necessari per lo sviluppo del grafico di correlazione tra decadimento dell'indice di rischio e diminuzione dell'area di armatura. I dati sono stati ottenuti elaborando quelli relativi alle attività di ricerca pregresse con la modalità illustrata nel paragrafo in introduzione al capitolo. I valori iniziali di indice di rischio a 13.5 anni sono i seguenti:

- IR_a per meccanismo di rottura duttile, dir.x: 5.340
- IR_a per meccanismo di rottura duttile, dir.y: 3.935
- IR_a per meccanismo di rottura fragile, dir.x: 1.376
- IR_a per meccanismo di rottura fragile, dir.y: 0.950

Tabella 9.30 – Indici di rischio di accelerazione per meccanismo di rottura e direzione

Meccanismo di rottura: rotazione				
Indice di rischio	corrosione	25 anni	50 anni	75 anni
IR_a - DIR.X	Bassa	5.340	5.336 (-0.07%)	5.333 (-0.13%)
	Media	5.325 (-0.29%)	5.287 (-0.93%)	5.249 (-1.57%)
	Alta	5.255 (-1.60%)	4.865 (-8.83%)	3.580 (-32.87%)
IR_a - DIR.Y	Bassa	3.935	3.934 (-0.02%)	3.933 (-0.04%)
	Media	3.931 (-0.12%)	3.920 (-0.37%)	3.909 (-0.62%)
	Alta	3.911 (-0.63%)	3.699 (-5.99%)	2.660 (-32.38%)
Meccanismo di rottura: taglio				
IR_a - DIR.X	Bassa	1.376	1.369 (-0.51%)	1.362 (-1.02%)
	Media	1.348 (-2.05%)	1.279 (-6.54%)	1.211 (-11.08%)
	Alta	1.222 (-11.19%)	1.073 (-21.61%)	0.588 (-56.86%)
IR_a - DIR.Y	Bassa	0.950	0.931 (-2.00%)	0.912 (-4.00%)
	Media	0.871 (-8.34%)	0.680 (-27.01%)	0.488 (-46.47%)
	Alta	0.518 (-45.51%)	0.296 (-68.25%)	0.254 (-72.19%)

9.3.4. Viadotto BAG

Il viadotto presenta uno schema strutturale a travata composto da pile rette a sezione cava.

Di seguito vengono riportati i dati necessari per lo sviluppo del grafico di correlazione tra decadimento dell'indice di rischio e diminuzione dell'area di armatura. I dati sono stati ottenuti elaborando quelli relativi alle attività di ricerca

pregresse con la modalità illustrata in introduzione al capitolo. I valori iniziali di indice di rischio a 13.5 anni sono i seguenti:

- IR_a per meccanismo di rottura duttile, dir.x: 5.340
- IR_a per meccanismo di rottura duttile, dir.y: 3.935
- IR_a per meccanismo di rottura fragile, dir.x: 1.376
- IR_a per meccanismo di rottura fragile, dir.y: 0.950

Tabella 9.31 – Indici di rischio di accelerazione per meccanismo di rottura e direzione

Meccanismo di rottura: rotazione				
Indice di rischio	corrosione	25	50	75
IR _a - DIR.X	Bassa	2.091	2.091 (-0.01%)	2.091 (-0.01%)
	Media	2.090 (-0.02%)	2.089 (-0.08%)	2.088 (-0.13%)
	Alta	2.088 (-0.13%)	1.852 (-11.42%)	0.591 (-71.72%)
IR _a - DIR.Y	Bassa	2.166	2.161 (-0.26%)	2.155 (-0.52%)
	Media	2.143 (-1.08%)	2.087 (-3.67%)	2.031 (-6.27%)
	Alta	2.039 (-5.87%)	1.832 (-15.42%)	1.624 (-25.06%)
Meccanismo di rottura: taglio				
Indice di rischio	corrosione	25	50	75
IR _a - DIR.X	Bassa	1.045	1.039 (-0.61%)	1.032 (-1.23%)
	Media	1.019 (-2.54%)	0.954 (-8.67%)	0.890 (-14.81%)
	Alta	0.900 (-13.86%)	0.716 (-31.53%)	0.547 (-47.62%)
IR _a - DIR.Y	Bassa	0.874	0.873 (-0.07%)	0.873 (-0.13%)
	Media	0.871 (-0.27%)	0.866 (-0.94%)	0.860 (-1.60%)
	Alta	0.861 (-1.50%)	0.641 (-26.66%)	0.326 (-62.74%)

9.3.5. Influenza della corrosione sull'indice di rischio

Di seguito vengono proposti i diagrammi che esplicitano la relazione tra la riduzione dell'area di armatura della sezione e il decadimento dell'indice di rischio per il caso di pile a telaio, parametri che vengono calcolati con le rispettive formulazioni:

$$\Delta A_s = \left(1 - \frac{A_{s,t}}{A_{s,13.5}} \right) * 100 \text{ [%]} \quad (9.5)$$

$$\Delta IR = \left(1 - \frac{IR_t}{IR_{13.5}} \right) * 100 \text{ [%]} \quad (9.6)$$

Dove:

- $A_{s,t}$ è l'area di armatura longitudinale al momento t
- $A_{s,13.5}$ è l'area di armatura longitudinale iniziale
- $IR_{a,t}$ è l'indice di rischio al momento t
- $IR_{13.5}$ è l'indice di rischio iniziale.

Vengono analizzati i casi corrispondenti ai differenti meccanismi di rottura, a rotazione e taglio, in modo da comprendere la variazione dell'andamento dell'indice di rischio anche in base a questo parametro, inoltre vengono ulteriormente distinti per direzione dell'azione sismica considerata. I grafici sono stati costruiti sui risultati ottenuti dai viadotti R13, F47, BAF, BAG.

Per quanto riguarda il meccanismo a rotazione possiamo notare come la curva di tendenza definita dai quattro viadotti abbia un andamento esponenziale che raggiunge un valore di decadimento dell'indice di rischio massimo di quasi il 60%, nell'intervallo di diametri considerato. Questo comportamento può essere spiegato dalla sezione cava caratterizzata da un maggior rapporto A_s/A_c che comporta un maggior contributo dell'acciaio sulla capacità resistente della pila.

Il meccanismo di rottura a taglio invece genera una curva di tendenza lineare in direzione x e logaritmica in direzione y registrando dei valori massimi di decadimento dell'indice di rischio del 60%, nell'intervallo di diametri considerato. La differenza tra le due direzioni principali può essere dovuta alla rigidità che caratterizza le pile nelle due direzioni: lungo la direzione y le pile sono caratterizzate da una rigidità sensibilmente maggiore rispetto all'altra direzione che comporta anche una maggiore sollecitazione.

Si può anche dedurre dai valori ottenuti che i viadotti a sezione cava risultano maggiormente soggetti al fenomeno corrosivo che genera un decremento dell'indice di rischio significativo per entrambi i meccanismi di rottura.

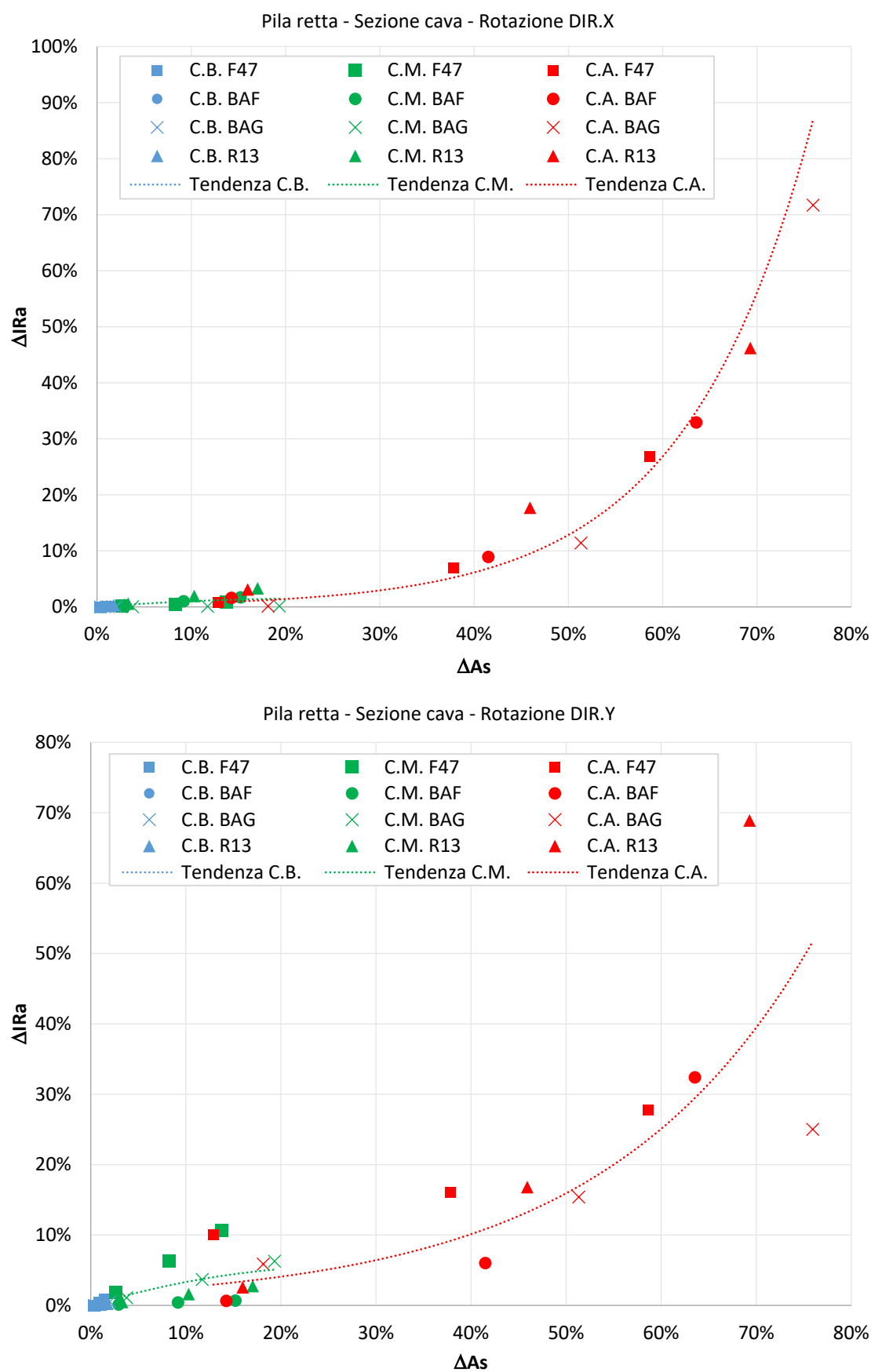


Figura 9.21 - Grafico decadimento IR – Riduzione As per meccanismo di rottura a rotazione, sezione cava, dir.y

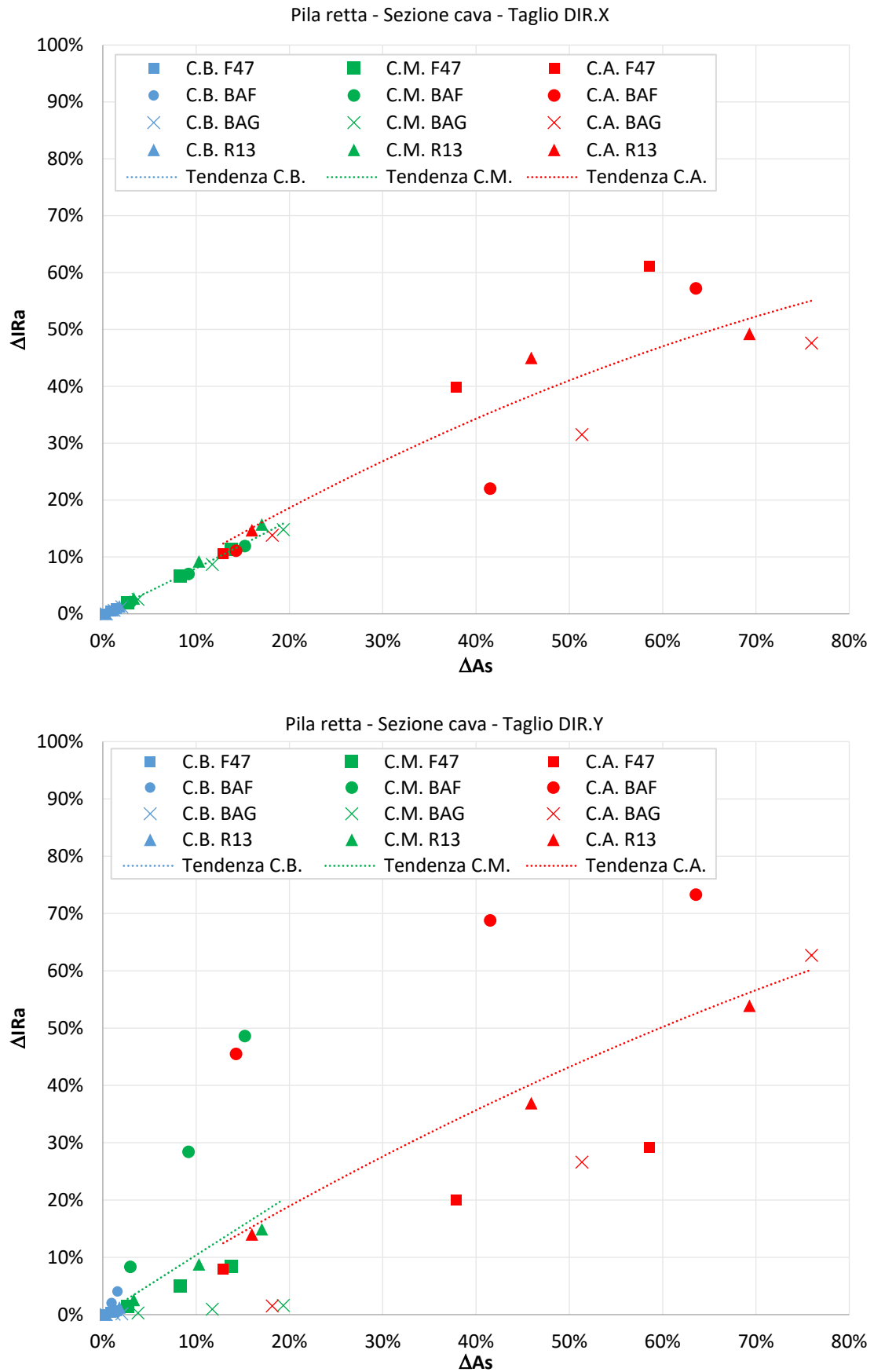


Figura 9.22 - Grafico decadimento IR – Riduzione A_s per meccanismo di rottura a taglio, sezione cava

9.3.6. Risultati funzionali alla prevenzione

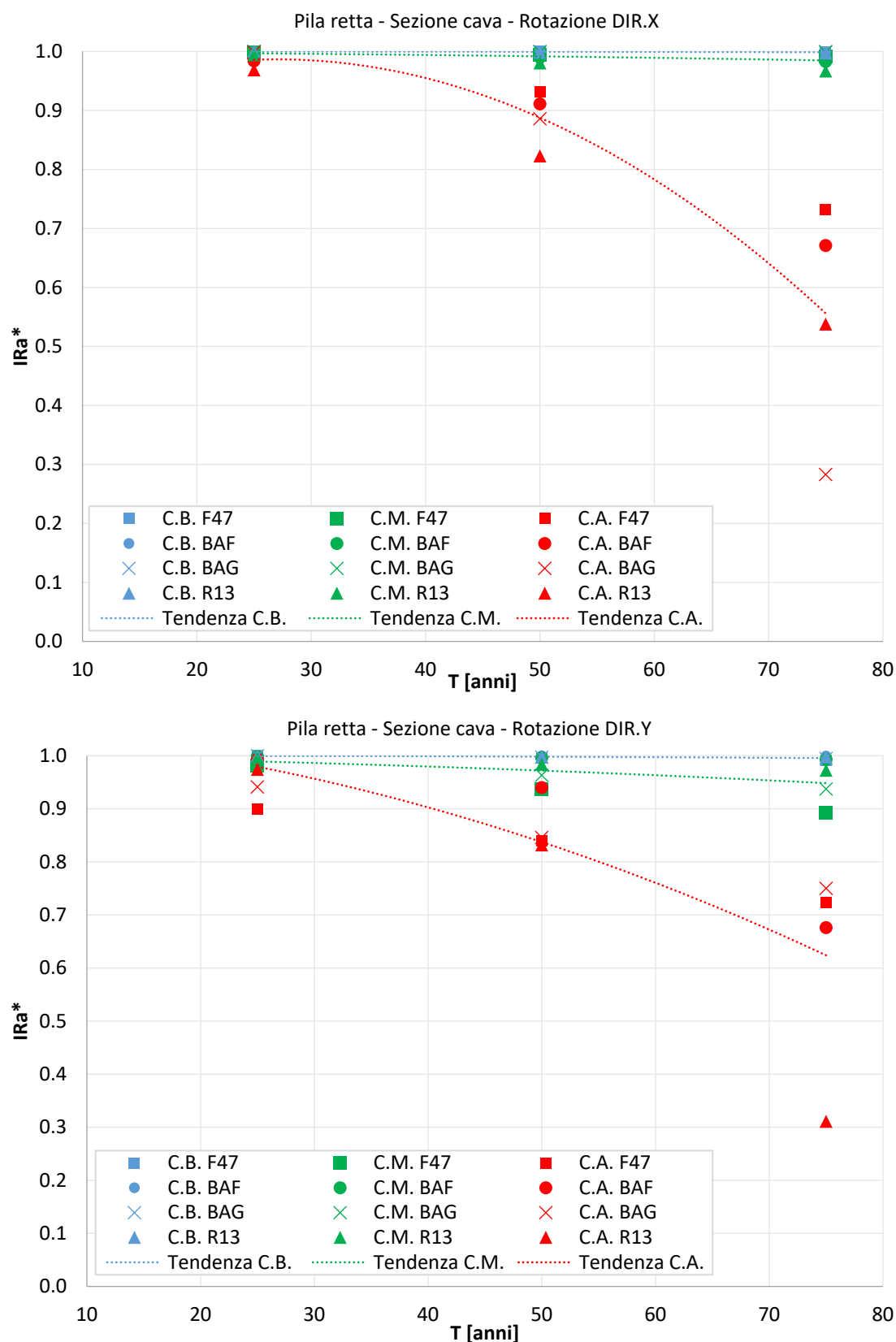


Figura 9.23 – Andamento nel tempo dell'indice di rischio per meccanismo di rottura a rotazione – dir.y, sezione cava

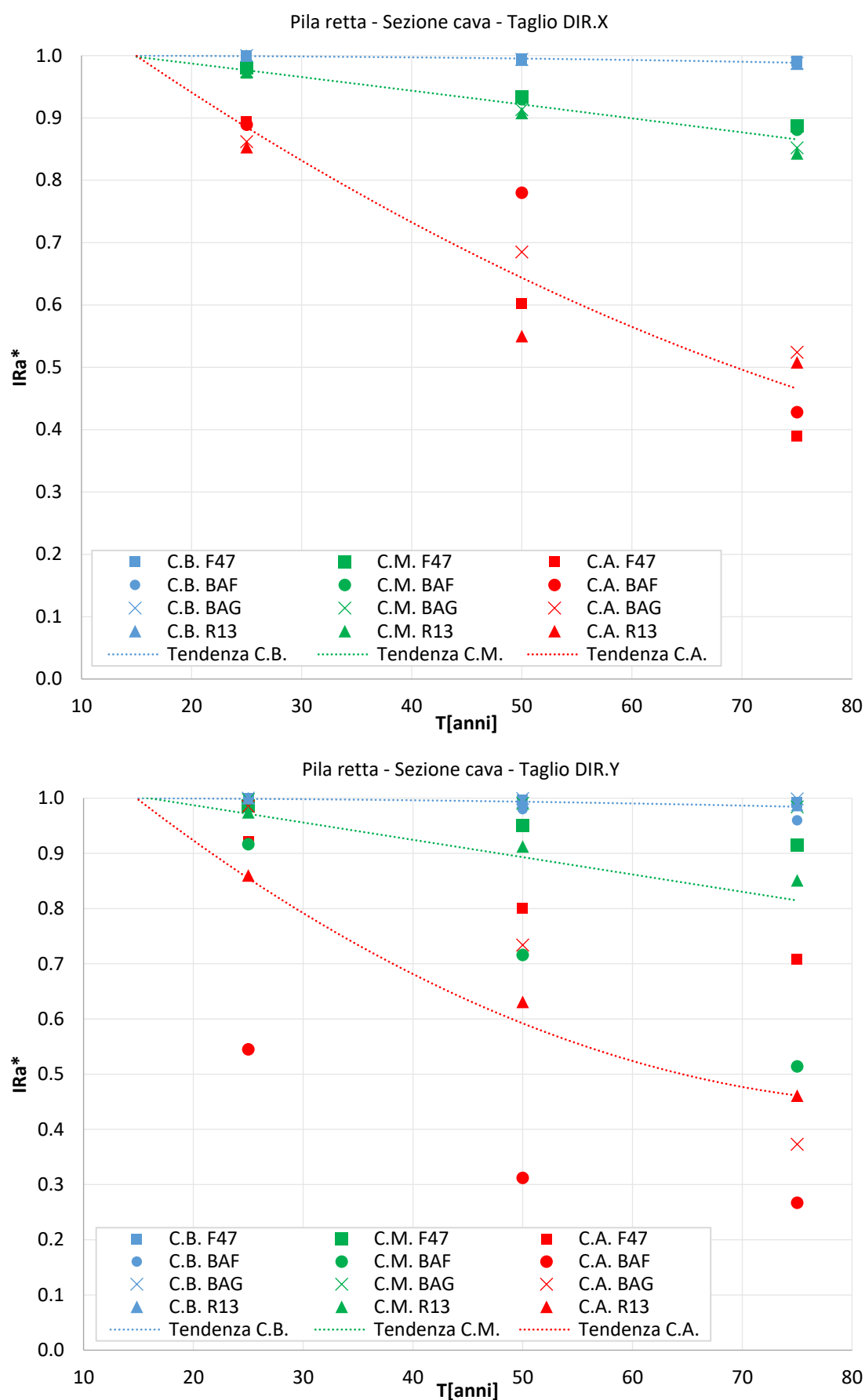


Figura 9.24 – Andamento nel tempo dell'indice di rischio per meccanismo di rottura a taglio – dir.y, sezione cava

9.3.7. Comportamento allo scenario di crisi

In questo paragrafo verrà analizzato il comportamento a rottura dei viadotti, ovvero lo stato delle cerniere plastiche attraverso i risultati ottenuti dall'analisi dinamica non lineare. In particolare, si cercherà di valutare la rilevanza della combinazione del comportamento duttile e fragile in base allo stato delle cerniere plastiche al momento della crisi.

Il viadotto R13 presenta un meccanismo di rottura fragile senza l'attivazione di nessuna cerniera a rotazione per ogni configurazione di sezione analizzata. Si può notare come al variare dello scenario analizzato varia la cerniera che porta al cedimento la struttura: il passaggio dalla configurazione D12 alla configurazione D10 vede la pila 4 come punto di rottura in corrispondenza del cambio di sezione. Questo cambiamento può generare una differenza anche nello stato delle cerniere plastiche, infatti lo scenario D10 presenta l'attivazione della cerniera in corrispondenza della base della pila 5 a rotazione in quanto ha raggiunto il momento di primo snervamento. Il meccanismo duttile non risulta essere evoluto come si può notare dalla rotazione generata che supera solamente del 3% quella di primo snervamento. Quindi, se le caratteristiche sezionali dovessero corrispondere a quelle della configurazione D10, in concomitanza della crisi a taglio della pila, potrebbero instaurarsi dei fenomeni di danneggiamento a pressoflessione che possono anche essere utilizzati come indice di previsione della rottura fragile.

Tabella 9.32 – Sollecitazioni allo scenario di crisi lungo la direzione maggiormente sollecitata

Config.	Cerniere Plastiche	Taglio - Asse z		Momento - Asse y	
		Time [s]	T [kN]	M [kN*m]	R [rad]
D16	PILA 1	9.17	1112.86 (98%)	6347.08 (38%)	1.35E-4 (38%)
	PILA 2	8.25	618.70 (90%)	7689.44 (44%)	1.82E-4 (44%)
	PILA 3	8.03	853.79 (82%)	7505.60 (41%)	2.10E-4 (41%)
	PILA 4 - INGROSSO	8.60	1510.88 (79%)	24096.80 (45%)	1.87E-4 (45%)
	PILA 4	8.60	1323.40 (69%)	17982.60 (32%)	1.28E-4 (32%)
	PILA 5 - INGROSSO	8.60	1183.14 (62%)	23494.80 (44%)	1.91E-4 (44%)
	PILA 5	8.50	1116.19 (58%)	19329.60 (35%)	1.44E-4 (35%)
	PILA 6	8.27	789.40 (74%)	9591.57 (53%)	2.72E-4 (53%)
	PILA 7	8.28	852.80 (76%)	5701.61 (33%)	1.34E-4 (33%)
D14	PILA 1	9.19	810.58 (100%)	3990.74 (28%)	9.52E-4 (28%)
	PILA 2	9.19	481.29 (91%)	5169.98 (34%)	1.37E-4 (34%)
	PILA 3	8.04	586.59 (78%)	5070.18 (32%)	1.57E-4 (32%)
	PILA 4 - INGROSSO	8.61	1153.55 (83%)	16121.70 (35%)	1.40E-4 (35%)
	PILA 4	8.61	1021.56 (73%)	11682.50 (24%)	9.18E-4 (24%)
	PILA 5 - INGROSSO	8.60	921.81 (66%)	15039.30 (33%)	1.37E-4 (33%)
	PILA 5	8.60	800.17 (57%)	12396.30 (26%)	1.02E-4 (26%)

Config.	Cerniere Plastiche	Taglio - Asse z		Momento - Asse y	
		Time [s]	T [kN]	M [kN*m]	R [rad]
	PILA 6	8.02	546.55 (71%)	6603.66 (42%)	2.08E-4 (42%)
	PILA 7	8.28	599.41 (74%)	3634.99 (25%)	9.63E-4 (25%)
D12	PILA 1	8.73	611.60 (100%)	2835.48 (23%)	7.89E-4 (23%)
	PILA 2	8.25	355.23 (87%)	3913.35 (31%)	1.20E-4 (31%)
	PILA 3	8.04	453.03 (83%)	3791.20 (28%)	1.35E-4 (28%)
	PILA 4 - INGROSSO	8.61	959.01 (97%)	8939.63 (23%)	9.05E-4 (23%)
	PILA 4	8.61	856.06 (85%)	7812.13 (19%)	7.15E-4 (19%)
	PILA 5 - INGROSSO	8.60	785.33 (80%)	9383.69 (25%)	1.00E-4 (25%)
	PILA 5	8.61	688.66 (68%)	6181.14 (16%)	5.96E-4 (16%)
	PILA 6	8.02	437.15 (77%)	2123.00 (16%)	7.71E-4 (16%)
	PILA 7	8.29	470.40 (77%)	2022.41 (16%)	6.24E-4 (16%)
D10	PILA 1	9.20	458.10 (87%)	2881.93 (28%)	9.33E-4 (28%)
	PILA 2	9.26	414.50 (86%)	4458.24 (41%)	1.58E-4 (41%)
	PILA 3	11.50	347.54 (76%)	4779.07 (40%)	1.94E-4 (40%)
	PILA 4 - INGROSSO	11.50	808.03 (98%)	10218.60 (68%)	2.45E-4 (68%)
	PILA 4	11.50	785.11 (100%)	8446.92 (25%)	9.03E-4 (25%)
	PILA 5 - INGROSSO	11.50	642.70 (79%)	14652.60 (100%)	3.80E-4 (103%)
	PILA 5	11.50	622.03 (79%)	12552.40 (38%)	1.39E-4 (38%)
	PILA 6	8.03	334.58 (71%)	6393.17 (56%)	2.67E-4 (56%)
	PILA 7	8.29	346.13 (67%)	4289.10 (41%)	1.54E-4 (41%)
D8	PILA 1	8.74	184.31 (37%)	1356.70 (16%)	5.14E-4 (16%)
	PILA 2	9.26	169.92 (38%)	2034.93 (22%)	8.37E-4 (22%)
	PILA 3	12.22	142.92 (34%)	2213.67 (22%)	1.03E-4 (22%)
	PILA 4 - INGROSSO	12.24	325.90 (42%)	4075.99 (43%)	1.49E-4 (43%)
	PILA 4	12.24	322.04 (100%)	3456.96 (12%)	4.34E-4 (12%)
	PILA 5 - INGROSSO	12.24	261.58 (34%)	5262.32 (56%)	2.04E-4 (56%)
	PILA 5	12.24	258.21 (74%)	4738.26 (17%)	6.18E-4 (17%)
	PILA 6	8.03	139.94 (31%)	2658.02 (27%)	1.28E-4 (27%)
	PILA 7	8.29	140.97 (28%)	1859.94 (21%)	7.80E-4 (21%)

Conclusioni

L'elaborato ha evidenziato l'importanza di una conoscenza preventiva dello stato di degrado di una struttura in calcestruzzo armato, fornendo degli strumenti di previsione dell'evoluzione della vulnerabilità sismica del manufatto, focalizzandosi sulla tipologia costruttiva dei viadotti autostradali. Tale obiettivo è stato perseguito attraverso due differenti metodi di analisi avanzati: l'analisi statica non lineare MPA, metodo applicabile su larga scala ed affidabile per i viadotti trattati; e l'analisi dinamica non lineare TH, caratterizzata da risultati più dettagliati e precisi a scapito di un maggiore onere computazionale dovuto alla selezione degli accelerogrammi ed al maggior tempo di analisi. Il vantaggio principale dell'impiego dell'analisi passo-passo non lineare sta nella possibilità di considerare simultaneamente i meccanismi di crisi fragile e duttile, così da poter indagare la modalità di rottura della struttura tenendo conto delle possibili interazioni tra le due modalità di crisi.

Per dimostrare che la valutazione della vulnerabilità del viadotto non può in alcun modo prescindere dalla stima degli effetti della corrosione, è stato studiato il decadimento delle prestazioni strutturali nel tempo sottoponendo la struttura a differenti gradi di intensità del fenomeno corrosivo, con particolare riferimento al fenomeno della carbonatazione. Gli effetti del degrado sono stati considerati mediante la modifica dei legami costitutivi dei materiali e la riduzione del diametro delle barre di armatura. La non linearità della struttura è stata tenuta in conto tramite l'utilizzo delle cerniere plastiche localizzate, in base allo schema di funzionamento delle pile, per le diverse tipologie di viadotto.

Nelle analisi si sono considerate tre diverse tipologie di viadotti, classificate sulla base delle caratteristiche delle pile: pile rette a sezione piena, pile a telaio, pile rette a sezione cava. In particolare, per ogni tipologia e meccanismo di rottura, è stato ottenuto l'andamento dell'indice di rischio ottenuto dall'analisi MPA in funzione della riduzione dell'area di armatura in modo da esplicitare la correlazione tra corrosione da carbonatazione e riduzione della capacità portante.

Traguardando una finestra temporale di 75 anni dall'epoca della costruzione, per i viadotti caratterizzati da pile rette a sezione piena il meccanismo a rotazione genera un valore di decadimento dell'indice di rischio massimo di circa il 50%, mentre il meccanismo di rottura a taglio registra un valore massimo del 20%. Per

i viadotti caratterizzati da pile a telaio il meccanismo a rotazione raggiunge un valore di decadimento dell'indice di rischio massimo di circa il 20%, mentre il meccanismo di rottura a taglio del 60%. Infine, per i viadotti caratterizzati da pile rette a sezione cava, sia il meccanismo a rotazione che quello a taglio raggiungono valori di decadimento dell'indice di rischio massimi di quasi il 60%.

Successivamente sono stati elaborati dei grafici utili alla gestione e alla programmazione delle attività di manutenzione straordinaria delle strutture che mostrano l'andamento dell'indice di rischio nel tempo in funzione dell'intensità del fenomeno corrosivo. Anche in questo caso i valori ottenuti sono in linea con quelli precedenti, tuttavia si evidenzia che i gradi di corrosione media e bassa evidenziano un decadimento dell'indice di rischio poco marcato.

Infine, si è voluto indagare il comportamento a rottura dei viadotti attraverso l'analisi dell'evoluzione dello stato delle cerniere plastiche nelle analisi passo-passo. Quest'ultimo studio ha evidenziato come il meccanismo di rottura fragile della pila rappresenti la condizione critica. Inoltre, si evidenzia che al momento dell'attivazione della crisi per taglio, raramente le cerniere plastiche flessionali risultino plasticizzate. Ciò nonostante, si evidenzia come il verificarsi di un danneggiamento dovuto all'eccessiva rotazione, ad esempio la fessurazione della sezione alla base della pila, costituisca un evento premonitore del collasso del viadotto. Come conclusione, si può rimarcare una differenziazione di comportamento tra le tre tipologie strutturali: i viadotti caratterizzati da pile rette a sezione piena sono quelli che hanno una maggior probabilità di manifestare danneggiamenti duttili, mentre per le altre tipologie si evidenzia una maggior propensione a sviluppare delle crisi fragili per eccesso di azione tagliente nelle pile.

Bibliografia

- [1] P. B. BAMFORTH, W. F. Price, M. EMERSON, e T. R. L., «AN INTERNATIONAL REVIEW OF CHLORIDE INGRESS INTO STRUCTURAL CONCRETE», *CONTRACTOR REPORT* 359, pag. 162 p., 1997, [Online]. Disponibile su: <https://trid.trb.org/view/576494>
- [2] C. Andrade e N. Rebolledo, «Generic Modelling of Propagation of Reinforced Concrete Damage», 2018, pagg. 2194–2202. doi: 10.1007/978-3-319-59471-2_251.
- [3] A. Bossio, T. Monetta, F. Bellucci, G. P. Lignola, e A. Prota, «Modeling of concrete cracking due to corrosion process of reinforcement bars», *Cem. Concr. Res.*, vol. 71, pagg. 78–92, mag. 2015, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2015.01.010.
- [4] A. A. Almusallam, «Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars», 2001.
- [5] M. Zucca, P. Crespi, F. Stochino, M. L. Puppino, e M. Coni, «Maintenance interventions period of existing RC motorway viaducts located in moderate/high seismicity zones», *Structures*, vol. 47, pagg. 976–990, gen. 2023, doi: 10.1016/j.istruc.2022.11.135.
- [6] P. Crespi, M. Zucca, M. Valente, e N. Longarini, «Influence of corrosion effects on the seismic capacity of existing RC bridges», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 140, ott. 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106546.
- [7] M. Zucca, E. Reccia, N. Longarini, V. Eremeyev, e P. Crespi, «On the structural behaviour of existing RC bridges subjected to corrosion effects: Numerical insight», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 152, pag. 107500, ott. 2023, doi: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2023.107500.
- [8] P. Crespi, M. Zucca, e M. Valente, «On the collapse evaluation of existing RC bridges exposed to corrosion under horizontal loads», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 116, ott. 2020, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104727.
- [9] J. Simon, J. M. Bracci, e P. Gardoni, «Seismic response and fragility of deteriorated reinforced concrete bridges», *Journal of Structural Engineering*, vol. 136, n. 10, pagg. 1273–1281, 2010, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000220.
- [10] F. Stochino, M. L. Fadda, e F. Mistretta, «Assessment of RC bridges integrity by means of low-cost investigations», *Frattura ed Integrità Strutturale*, vol. 12, n. 46, pagg. 216–225, 2018, doi: 10.3221/IGF-ESIS.46.20.
- [11] P. Crespi, M. Zucca, N. Longarini, e N. Giordano, «Seismic assessment of six typologies of existing RC bridges», *Infrastructures (Basel)*, vol. 5, n. 6, 2020, doi: 10.3390/INFRASTRUCTURES5060052.
- [12] M. Dekoster, F. Buyle-Bodin, O. Maurel, e Y. Delmas, «Modelling of the flexural behaviour of RC beams subjected to localised and uniform corrosion», *Eng. Struct.*, vol. 25, n. 10, pagg. 1333–1341, 2003, doi: 10.1016/S0141-0296(03)00108-1.
- [13] D. E. Choe, P. Gardoni, D. Rosowsky, e T. Haukaas, «Seismic fragility estimates for reinforced concrete bridges subject to corrosion», *Structural Safety*, vol. 31, n. 4, pagg. 275–283, lug. 2009, doi: 10.1016/j.strusafe.2008.10.001.
- [14] Luca Bertolini, *Materiali da costruzione. Volume primo*. CittàStudiEdizioni, 2014.
- [15] N. Makul, A. c. di, «Bolomey Formula», in *Dictionary of Concrete Technology*, Singapore: Springer Nature Singapore, 2025, pagg. 222–224. doi: 10.1007/978-981-97-2998-2_132.
- [16] T. K. K. Chamindu Deepagoda e S. Hamamoto, «Diffusion», *Encyclopedia of Soils in the Environment, Second Edition*, pagg. V5-247-V5-255, gen. 2023, doi: 10.1016/B978-0-12-822974-3.00168-3.

- [17] M. K. Hubbert, «Darcy's law and the field equations of the flow of underground fluids», *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, vol. 2, n. 1, pagg. 23–59, 1957, doi: 10.1080/02626665709493062.
- [18] Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, «Norme tecniche per le costruzioni», *Gazzetta ufficiale della repubblica italiana*, feb. 2018.
- [19] F. Tariq, M. Gaikwad, e P. Bhargava, «Analysis of behaviour of corroded RC beams exposed to elevated temperatures», *Journal of Building Engineering*, vol. 42, ott. 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102508.
- [20] S. K. Roy, K. B. Poh, e D. O. Northwood, «Durability of concrete - Accelerated carbonation and weathering studies», *Build. Environ.*, vol. 34, n. 5, pagg. 597–606, set. 1999, doi: 10.1016/S0360-1323(98)00042-0.
- [21] Fabio Pasqualone, «Influenza della corrosione sulla vulnerabilità sismica dei viadotti», Politecnico di Milano, 2021.
- [22] N. Perez, A. c. di, «Mixed Potential Theory», in *Electrochemistry and Corrosion Science*, Boston, MA: Springer US, 2004, pagg. 155–166. doi: 10.1007/1-4020-7860-9_5.
- [23] U. Angst *et al.*, «Corrosion of steel in carbonated concrete: Mechanisms, practical experience, and research priorities – A critical review by RILEM TC 281-CCC», 2020, *RILEM Publications SARL*. doi: 10.21809/rilemtechlett.2020.127.
- [24] R. Park e T. Paulay, *Reinforced Concrete Structures*. Wiley, 2009. doi: 10.1002/9780470172834.
- [25] C. Andrade e D. Izquierdo, «Propagation period modeling and limit state of degradation», *Structural Concrete*, vol. 21, n. 5, pagg. 1720–1731, ott. 2020, doi: 10.1002/suco.201900427.
- [26] Ho, D.W.S., Lewis, e R.K., «Carbonation of concrete and its prediction», *Cem. Concr. Res.*, vol. 17, n. 3, pagg. 489–504, 1987.
- [27] A. V. Saelta, B. A. Schrefler, e R. V. Vitaliani, «The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials», *Cem. Concr. Res.*, vol. 23, n. 4, pagg. 761–772, 1993, doi: 10.1016/0008-8846(93)90030-D.
- [28] M. Stefanoni, U. Angst, e B. Elsener, «Corrosion rate of carbon steel in carbonated concrete – A critical review», *Cem. Concr. Res.*, vol. 103, pagg. 35–48, gen. 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.10.007.
- [29] A. V. Saelta e R. V. Vitaliani, «Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures Part I: Theoretical formulation», *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, n. 4, pagg. 571–579, apr. 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2003.09.009.
- [30] A. V. Saelta, B. A. Schrefler, e R. V. Vitaliani, «2 - D model for carbonation and moisture/heat flow in porous materials», *Cem. Concr. Res.*, vol. 25, n. 8, pagg. 1703–1712, 1995, doi: 10.1016/0008-8846(95)00166-2.
- [31] S. Rostasy e D. Bunte, «Evaluation of on-site conditions and durability of concrete panels exposed to weather», *IABSE Symposium*, pagg. 145–149, 1989.
- [32] Anna Saelta, «Reliability of reinforced concrete structures under chemical-physical attack», *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 23, pagg. 41–56, 1998.
- [33] J. El Hassan, P. Bressolette, A. Chateauneuf, e K. El Tawil, «Reliability-based assessment of the effect of climatic conditions on the corrosion of RC structures subject to chloride ingress», *Eng. Struct.*, vol. 32, n. 10, pagg. 3279–3287, ott. 2010, doi: 10.1016/j.engstruct.2010.07.001.
- [34] T. Rabczuk, J. Akkermann, e J. Eibl, «A numerical model for reinforced concrete structures», *Int. J. Solids Struct.*, vol. 42, n. 5–6, pagg. 1327–1354, mar. 2005, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2004.07.019.
- [35] A. A. Almusallam, «Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars», *Constr. Build. Mater.*, vol. 15, n. 8, pagg. 361–368, dic. 2001, doi: 10.1016/S0950-0618(01)00009-5.

- [36] R. Capozucca, «Damage to reinforced concrete due to reinforcement corrosion», 1995.
- [37] R. Capozucca e M. N. Cerri, «Influence of reinforcement corrosion-in the compressive zone-on the behaviour of RC beams», *Eng. Struct.*, vol. 25, n. 13, pagg. 1575–1583, 2003, doi: 10.1016/S0141-0296(03)00119-6.
- [38] R. Capozucca, «Identification of damage in reinforced concrete beams subjected to corrosion», *ACI Struct. J.*, vol. 97, n. 6, pagg. 902–909, 2000.
- [39] *Model code for concrete structures*. 1978.
- [40] T. Thomas, *Unified Theory of Reinforced Concrete*. CRC Press Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press, 2017. doi: 10.1201/9780203734650.
- [41] R. Capozucca e M. N. Cerri, «Identification of damage in reinforced concrete beams subjected to corrosion», *ACI Struct. J.*, vol. 97, n. 6, pagg. 902–909, 2000, [Online]. Disponibile su: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0034334965&partnerID=40&md5=ced040ed92caed3e085099f5c3cebc9d>
- [42] D. Coronelli e P. Gambarova, «Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: Modeling guidelines», *Journal of Structural Engineering*, vol. 130, n. 8, pagg. 1214–1224, 2004, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:8(1214).
- [43] D. Coronelli, K. Z. Hanjari, e K. Lundgren, «Severely corroded RC with cover cracking», *Journal of Structural Engineering (United States)*, vol. 139, n. 2, pagg. 221–232, 2013, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000633.
- [44] K. Ouzaa e C. Oucif, «Numerical model for prediction of corrosion of steel reinforcements in reinforced concrete structures», *Underground Space*, vol. 4, n. 1, pagg. 72–77, mar. 2019, doi: 10.1016/J.UNDSP.2018.06.002.
- [45] E. Proverbio, «Corrosion in PT Tendons: Review of Estimation & Forecasting Models», *5th fibCACRCS*, pagg. 24–37, 2025.
- [46] L. Bertolini, B. Elsener, E. Redaelli, e R. Polder, *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair: Second Edition*. 2013. doi: 10.1002/9783527651696.
- [47] J. A. González, C. Andrade, C. Alonso, e S. Feliu, «Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement», *Cem. Concr. Res.*, vol. 25, n. 2, pagg. 257–264, feb. 1995, doi: 10.1016/0008-8846(95)00006-2.
- [48] C. C. Andrade IETcc, S. Galvache, e G. Somerville BCA, «EC Innovation Programme IN30902I CONTECVET A validated Users Manual for assessing the residual service life of concrete structures IN30902I CONTECVET A validated Users Manual for assessing the residual service life of concrete structures Information regarding the project in general», SW.
- [49] C. Andrade, C. Alonso, J. A. Gonzalez, J. Rodriguez, e I. A. for B. and S. Engineering, «REMAINING SERVICE LIFE OF CORRODING STRUCTURES», *DURABILITY OF STRUCTURES. IABSE SYMPOSIUM, SEPTEMBER 6-8 1989, LISBON (IABSE REPORT VOLUME 57/1)*, pagg. 359–64, 1989, [Online]. Disponibile su: <https://trid.trb.org/view/379485>
- [50] M. Zucca, P. Crespi, F. Stochino, M. L. Puppino, e M. Coni, «Maintenance interventions period of existing RC motorway viaducts located in moderate/high seismicity zones», *Structures*, vol. 47, pagg. 976–990, gen. 2023, doi: 10.1016/j.istruc.2022.11.135.
- [51] P. Crespi, M. Zucca, M. Valente, e N. Longarini, «Influence of corrosion effects on the seismic capacity of existing RC bridges», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 140, ott. 2022, doi: 10.1016/j.eng-failanal.2022.106546.
- [52] Y. G. Du, L. A. Clark, e A. H. C. Chan, «Effect of corrosion on ductility of reinforcing bars».
- [53] H. S. Lee e Y. S. Cho, «Evaluation of the mechanical properties of steel reinforcement embedded in concrete specimen as a function of the degree of reinforcement corrosion», *Int. J. Fract.*, vol. 157, n. 1–2, pagg. 81–88, 2009, doi: 10.1007/s10704-009-9334-7.

- [54] X. Pan, Z. Shi, C. Shi, T. C. Ling, e N. Li, «A review on surface treatment for concrete – Part 2: Performance», *Constr. Build. Mater.*, vol. 133, pagg. 81–90, feb. 2017, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.11.128.
- [55] H. Beushausen e N. Burmeister, «The use of surface coatings to increase the service life of reinforced concrete structures for durability class XC», *Mater. Struct.*, vol. 48, apr. 2013, doi: 10.1617/s11527-013-0229-8.
- [56] J. B. Aguiar e C. Júnior, «Carbonation of surface protected concrete», *Constr. Build. Mater.*, vol. 49, pagg. 478–483, dic. 2013, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.08.058.
- [57] L. Schueremans, D. Van Gemert, e S. Giessler, «Chloride penetration in RC-structures in marine environment – Long term assessment of a preventive hydrophobic treatment», *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, n. 6, pagg. 1238–1249, giu. 2007, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2006.05.006.
- [58] P. Zhang, P. Li, H. Fan, H. Shang, S. Guo, e T. Zhao, «Carbonation of Water Repellent-Treated Concrete», *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/1343947.
- [59] C. Luc e L. Vincent, «Influence of hydrophobic treatments applications on the concrete carbonation delay», 2017.
- [60] Q. Xu, S. Zhan, B. Xu, H. Yang, X. Qian, e X. Ding, «Effect of isobutyl-triethoxy-silane penetrative protective agent on the carbonation resistance of concrete», *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, vol. 31, n. 1, pagg. 139–145, feb. 2016, doi: 10.1007/s11595-016-1343-6.
- [61] D. C. Kent e R. Park, «Flexural members with confined concrete», *J. Struct. Div. ASCE*, vol. 97, n. 7, pagg. 1969–1990, 1971, [Online]. Disponibile su: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0000871625&partne-riID=40&md5=32e5be5349128c2c24c3566e432799be>
- [62] «Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance», *Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance*, 2003, [Online]. Disponibile su: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-4944230332&partne-riID=40&md5=366d1daeb663397365b1c6f6eeb30f7b>
- [63] T. Albanesi e C. Nuti, «ANALISI STATICA NON LINEARE (PUSHOVER) Dispensa», 2007.
- [64] «ATC-40:1996.Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings», *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, 1996, [Online]. Disponibile su: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0004266560&partne-riID=40&md5=4c96ba263996988703dcc9f76855be2c>
- [65] A. K. Chopra e R. K. Goel, «A Modal Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Demands for Buildings», 2001.
- [66] T. S. Paraskeva e A. J. Kappos, «FURTHER DEVELOPMENT OF A MULTIMODAL PUSH-OVER ANALYSIS PROCEDURE FOR SEISMIC ASSESSMENT OF BRIDGES». [Online]. Disponibile su: <http://openaccess.city.ac.uk/publications@city.ac.uk>
- [67] «FEMA 356.Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings», *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, 2000, [Online]. Disponibile su: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0003783665&partne-riID=40&md5=46e4d9283126b3322727991a911b6aa5>
- [68] I. Iervolino, C. Galasso, e E. Cosenza, «REXEL: Computer aided record selection for code-based seismic structural analysis», *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 8, n. 2, pagg. 339–362, apr. 2010, doi: 10.1007/s10518-009-9146-1.

- [69] H. M. Hilber, T. J. R. Hughes, e R. L. Taylor, «Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics», *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 5, n. 3, pagg. 283–292, lug. 1977, doi: 10.1002/eqe.4290050306.
- [70] F. Tornabene, *Dinamica delle strutture*. COncnecting REpositories, 2012.
- [71] I. Iervolino, E. Chioccarelli, e V. Convertito, «Engineering design earthquakes from multimodal hazard disaggregation», *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 31, n. 9, pagg. 1212–1231, set. 2011, doi: 10.1016/j.soildyn.2011.05.001.

Indice delle figure

Figura 3.1 – Innesco e propagazione della corrosione	11
Figura 3.2 – velocità di corrosione	12
Figura 3.3 - Confronto tra umidità relativa e velocità di carbonatazione.....	13
Figura 3.4 - Profondità di carbonatazione a diverse temperature.....	14
Figura 3.5 - Confronto tra umidità relativa e velocità di corrosione.....	15
Figura 3.6 - Schema di corrosione per pitting	16
Figura 4.1 – influenza dei parametri C_s , C_{th} , D_c sul tempo di innesco.....	24
Figura 4.2 – influenza dell’umidità relativa sul tempo d’innesco	24
Figura 4.3 – influenza della temperatura sul tempo d’innesco.....	24
Figura 4.4 -Diverse modalità di fessurazione.....	25
Figura 4.5 – Propagazione delle fessure a 45°	25
Figura 4.6 – Delaminazione del calcestruzzo	26
Figura 4.7 – Effetti d’angolo legati alla fessurazione	26
Figura 4.8 – Tempo di innesco in funzione del rapporto C/D	26
Figura 4.9 – Legge costitutiva del calcestruzzo danneggiato e non danneggiato	27
Figura 4.10 – Sviluppo nel tempo della penetrazione dovuta alla corrosione	31
Figura 4.11 – Sviluppo reale nel tempo del grado di deterioramento	32
Figura 4.12 – Schematizzazione dell’effetto della corrosione omogenea e localizzata	32
Figura 4.13 – Divisione dei livelli di corrosione in base all’intensità.....	33
Figura 4.14 – Diagrammi sforzo – deformazione a confronto in base al grado corrosivo	34
Figura 4.15 – Variazione della deformazione ultima delle barre di armatura in base allo stato di degrado	35
Figura 4.16 – Schematizzazione della legge costitutiva di una barra d’armatura corrosa	36
Figura 4.17 – Schematizzazione del modello di corrosione uniforme	36
Figura 5.1 – Legge costitutiva del calcestruzzo, modello Kent Park.....	42
Figura 5.2 – Legge costitutiva dell’acciaio, modello Park strain Hardening	43
Figura 5.3 - Schema del sistema ad un grado di libertà.....	46
Figura 5.4 - Schematizzazione di un modello generico MDOF	47
Figura 5.5 – Andamento della curva di capacità.....	48
Figura 5.6 – semplificazione bilineare e trilineare della curva di capacità.....	48
Figura 5.7 – Schematizzazione dei passaggi del metodo CSM.....	51
Figura 5.8 - semplificazione bilineare (a), riduzione dello spettro di domanda e identificazione del PP (b).....	51
Figura 5.9 – diagramma momento-curvatura per meccanismo duttile (a) e diagramma taglio- spostamento per meccanismo di rottura fragile (b).....	54
Figura 5.10 – Distribuzione dei record dell’ESD contenuti in REXEL	62
Figura 5.11 – Disaggregazione dei dati.....	63
Figura 5.12 – Rappresentazione delle tolleranze e dell’intervallo dei periodi per la costruzione della combinazione	64

Figura 5.13 – Combinazione degli spettri per analisi TH del viadotto B83.....	65
Figura 5.14 – Parametri di input per ogni caso di carico corrispondente ad un evento sismico ..	66
Figura 5.15 – Parametri per il caso di carico dinamico Dead Load	66
Figura 5.16 – Esempio accelerogramma inserito in MidasCivil.....	67
Figura 5.17 – Funzione Ramp	68
Figura 5.18 – Schema del modello Modified Takeda Tetralinear.....	69
Figura 5.19 – Meccanismo duttile	Figura 5.20 – Meccanismo Fragile
Figura 5.21 – Accelerogramma Fittizio.....	71
Figura 5.22 – Geometria della sezione caratteristica delle pile con armature longitudinali	71
Figura 5.23 - Ciclo di carico per meccanismo di rottura duttile.....	72
Figura 5.24 - Ciclo di carico per meccanismo di rottura fragile	72
Figura 6.1 – Immagine satellitare del viadotto.....	76
Figura 6.2 – Modello di calcolo MidasCivil di una carreggiata del viadotto	76
Figura 6.3 – Geometria della sezione caratteristica delle pile con armature longitudinali	77
Figura 6.4 – Grafici Momento-Curvatura delle sezioni per gli assi principali.....	79
Figura 6.5 – Posizionamento delle cerniere plastiche all’interno del modello di calcolo MidasCivil	82
Figura 6.6 – Grafici ADRS dei modi contribuenti all’analisi Pushover a diversi scenari di corrosione	83
Figura 6.7 - Grafici ADRS dei modi contribuenti all’analisi Pushover a diversi scenari di corrosione	84
Figura 6.8 – Grafici Momento-Curvatura delle sezioni per gli assi principali.....	86
Figura 6.9 – Grafici ADRS dei modi contribuenti all’analisi Pushover a diversi scenari di corrosione	89
Figura 6.10 - Grafici ADRS dei modi contribuenti all’analisi Pushover a diversi scenari di corrosione	90
Figura 6.11 – Grafici Momento-Curvatura delle sezioni per gli assi principali.....	92
Figura 6.12 – Grafici ADRS dei modi contribuenti all’analisi Pushover a diversi scenari di corrosione	95
Figura 6.13 - Grafici ADRS dei modi contribuenti all’analisi Pushover a diversi scenari di corrosione	97
Figura 6.14 – Decadimento dell’indice di rischio Tabella 6.21 – Resoconto dei valori di indice di rischio per meccanismo di rottura duttile	98
Figura 6.15 - Diagramma Momento – Curvatura per configurazione di sezione, asse y	101
Figura 6.16 – Aumento del periodo per configurazione di sezione.....	104
Figura 6.17 – Grafici ADRS dei modi contribuenti per meccanismo duttile a diverse configurazioni di sezione.....	106
Figura 6.18 - Grafici ADRS dei modi contribuenti per meccanismo fragile a diverse configurazioni di sezione.....	107
Figura 6.19 - andamento dell’indice di rischio di accelerazione nel tempo (scala logaritmica) per livello di corrosione	109
Figura 6.20 - andamento dell’indice di rischio di accelerazione nel tempo per livello di corrosione	110
Figura 6.21 – Confronto tra le curve di andamento degli indici di rischio per meccanismo di rottura duttile nel tempo dei due approcci	111

Figura 6.22 - Confronto tra le curve di andamento degli indici di rischio per meccanismo di rottura fragile nel tempo dei due approcci	113
Figura 6.23 – Combinazione degli spettri per analisi TH del viadotto B83.....	114
Figura 6.24 – Stato delle cerniere plastiche a meccanismo fragile – Direzione Z.....	119
Figura 6.25 - Andamento dell'indice di rischio nel tempo	121
Figura 7.1 – Immagine satellitare del viadotto.....	123
Figura 7.2 – Modello di calcolo MidasCivil del viadotto.....	123
Figura 7.3 – Geometria della sezione caratteristica delle pile con armature longitudinali.....	124
Figura 7.4 – Diagramma Momento – Curvatura per configurazione di sezione.....	126
Figura 7.5 – Aumento del periodo per configurazione di sezione	130
Figura 7.6 – Posizionamento delle cerniere plastiche	130
Figura 7.7 – Grafici ADRS dei modi contribuenti per meccanismo duttile a diverse configurazioni di sezione	131
Figura 7.8 - Grafici ADRS dei modi contribuenti per meccanismo fragile a diverse configurazioni di sezione	135
Figura 7.9 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo (scala logaritmica) per livello di corrosione, dir.x.....	137
Figura 7.10 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo per livello di corrosione, dir.x	137
Figura 7.11 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo per livello di corrosione, dir.y	137
Figura 7.12 – Combinazione degli spettri per analisi TH del viadotto B88.....	139
Figura 7.13 – Stato delle cerniere plastiche al momento del cedimento per meccanismo fragile – dir.y	141
Figura 7.14 – Andamento dell'indice di rischio normalizzato nel tempo	143
Figura 8.1 – Immagine satellitare del viadotto.....	145
Figura 8.2 – Modello di calcolo MidasCivil di una carreggiata del viadotto.....	145
Figura 8.3 – Geometria delle sezioni caratteristiche delle pile con armature longitudinali	146
Figura 8.4 – Diagramma Momento – Curvatura per configurazione di sezione.....	150
Figura 8.5 – Aumento del periodo per configurazione di sezione	158
Figura 8.6 – Posizionamento delle cerniere plastiche	159
Figura 8.7 – Grafici ADRS dei modi contribuenti per meccanismo duttile a diverse configurazioni di sezione	162
Figura 8.8 - Grafici ADRS dei modi contribuenti per meccanismo fragile a diverse configurazioni di sezione	166
Figura 8.9 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo (scala logaritmica) per livello di corrosione, dir.x.....	168
Figura 8.10 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo per livello di corrosione, dir.x	169
Figura 8.11 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo (scala logaritmica) per livello di corrosione, dir.y	169
Figura 8.12 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo per livello di corrosione, dir.y	169
Figura 8.13 – Combinazione degli spettri per analisi TH del viadotto R13	171

Figura 8.14 - Stato delle cerniere plastiche al momento del cedimento per meccanismo fragile – dir.z.....	175
Figura 8.15 - Stato delle cerniere plastiche a comportamento duttile – dir.z	175
Figura 8.16 - Andamento dell'indice di rischio nel tempo	178
Figura 9.1 – Grafico ADRS del primo modo contribuente per meccanismo duttile a diverse configurazioni di sezione.....	181
Figura 9.2 – Grafico ADRS del primo modo contribuente per meccanismo fragile a diverse configurazioni di sezione.....	182
Figura 9.3 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo per livello di corrosione	183
Figura 9.4 – Confronto dell'IR* tra analisi dinamica lineare (MPA) e non lineare (TH).....	185
Figura 9.5 – Grafico decadimento IR – Riduzione As per meccanismo di rottura a rotazione, viadotto B83.....	187
Figura 9.6 – Grafico decadimento IR – Riduzione As per meccanismo di rottura a taglio, viadotto B83	187
Figura 9.7 – Andamento nel tempo dell'indice di rischio per meccanismo di rottura a rotazione – sezione piena	188
Figura 9.8 – Andamento nel tempo dell'indice di rischio per meccanismo di rottura a taglio – sezione piena	189
Figura 9.9 – Grafico ADRS del primo modo contribuente per meccanismo duttile a diverse configurazioni di sezione.....	191
Figura 9.10 – Grafico ADRS del primo modo contribuente per meccanismo fragile a diverse configurazioni di sezione.....	191
Figura 9.11 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo per livello di corrosione, dir.x	193
Figura 9.12 – Confronto dell'IR* tra analisi dinamica lineare (MPA) e non lineare (TH).....	195
Figura 9.13 - Grafico decadimento IR – Riduzione As per meccanismo di rottura a rotazione, pile a telaio	199
Figura 9.14 - Grafico decadimento IR – Riduzione As per meccanismo di rottura a taglio, pile a telaio	200
Figura 9.15 – Andamento nel tempo dell'indice di rischio per meccanismo di rottura a rotazione – pile a telaio.....	202
Figura 9.16 – Andamento nel tempo dell'indice di rischio per meccanismo di rottura a taglio – pile a telaio.....	203
Figura 9.17 – Grafico ADRS del primo modo contribuente per meccanismo duttile a diverse configurazioni di sezione.....	205
Figura 9.18 – Grafico ADRS del primo modo contribuente per meccanismo fragile a diverse configurazioni di sezione.....	206
Figura 9.19 - andamento dell'indice di rischio di accelerazione nel tempo per livello di corrosione, dir.x	207
Figura 9.20 – Confronto dell'IR* tra analisi dinamica lineare (MPA) e non lineare (TH).....	209
Figura 9.21 - Grafico decadimento IR – Riduzione As per meccanismo di rottura a rotazione, sezione cava, dir.y.....	214
Figura 9.22 - Grafico decadimento IR – Riduzione As per meccanismo di rottura a taglio, sezione cava	215

Figura 9.23 – Andamento nel tempo dell'indice di rischio per meccanismo di rottura a rotazione – dir.y, sezione cava	216
Figura 9.24 – Andamento nel tempo dell'indice di rischio per meccanismo di rottura a taglio – dir.y, sezione cava	217

Indice delle tabelle

Tabella 3.1 – Valori sperimentali di K per porosità diverse.....	14
Tabella 4.1 – Coefficienti di riduzione in funzione del coefficiente di danno	28
Tabella 4.2 – Intensità di corrosione in base alla classe di esposizione.....	30
Tabella 4.3 – valori di intensità di corrosione in base al livello di degrado.....	33
Tabella 4.4 – Formulazioni della legge costitutiva dell’armatura corrosa in caso di corrosione uniforme o localizzata.....	37
Tabella 5.1 – Caratteristiche meccaniche calcestruzzo	43
Tabella 5.2 – Caratteristiche meccaniche acciaio	44
Tabella 5.3 – Parametri di controllo meccanismo duttile	72
Tabella 5.4 – Parametri di controllo meccanismo fragile	72
Tabella 6.1 – Caratteristiche dei materiali delle pile	77
Tabella 6.2 – Effetti della corrosione su diametro e deformazione ultima a rottura delle armature	79
Tabella 6.3 – Momento di inerzia efficace per scenario di corrosione.....	80
Tabella 6.4 – Analisi modale per scenario di corrosione bassa e media.....	80
Tabella 6.5 - Analisi modale per scenario di corrosione alta	81
Tabella 6.6 – Indici di rischio a diversi scenari di corrosione	83
Tabella 6.7 - Indici di rischio a diversi scenari di corrosione.....	85
Tabella 6.8 – Effetti della corrosione su diametro e deformazione ultima a rottura delle armature	85
Tabella 6.9 – Momento di inerzia efficace per scenario di corrosione.....	86
Tabella 6.10 – Analisi modale per scenario di corrosione bassa e media.....	87
Tabella 6.11 - Analisi modale per scenario di corrosione alta	87
Tabella 6.12 – Indici di rischio a diversi scenari di corrosione.....	89
Tabella 6.13 - Indici di rischio a diversi scenari di corrosione.....	91
Tabella 6.14 – Effetti della corrosione su diametro e deformazione ultima a rottura delle armature.....	91
Tabella 6.15 – Momento di inerzia efficace per scenario di corrosione.....	92
Tabella 6.16 – Analisi modale per scenario di corrosione bassa.....	93
Tabella 6.17 - Analisi modale per scenario di corrosione media.....	93
Tabella 6.18 - Analisi modale per scenario di corrosione alta	94
Tabella 6.19 – Indici di rischio a diversi scenari di corrosione	96
Tabella 6.20 - Indici di rischio a diversi scenari di corrosione.....	97
Figura 6.14 – Decadimento dell’indice di rischio Tabella 6.21 – Resoconto dei valori di indice di rischio per meccanismo di rottura duttile	98
Tabella 6.22 - Resoconto dei valori di indice di rischio per meccanismo di rottura fragile.....	99
Tabella 6.23 – Diametri e deformazione ultima a rottura delle armature per configurazione di sezione.....	100
Tabella 6.24 – Momenti di inerzia efficace per configurazione di sezione.....	100

Tabella 6.25 – Analisi modale per configurazione 1	101
Tabella 6.26 – Analisi modale per configurazione 2	102
Tabella 6.27 – Analisi modale per configurazione 3	102
Tabella 6.28 – Analisi modale per configurazione 4	103
Tabella 6.29 – Analisi modale per configurazione 5	103
Tabella 6.30 – Indici di rischio per meccanismo di rottura duttile a diverse configurazioni di sezione.....	106
Tabella 6.31 - Indici di rischio per meccanismo di rottura fragile a diverse configurazioni di sezione.....	108
Tabella 6.32 – Scenari temporali per diverse configurazioni di sezione e livello di corrosione .	109
Tabella 6.33 – Variazione degli indici di rischio tra i due metodi per meccanismo di rottura duttile a 25 anni	111
Tabella 6.34 – Variazione degli indici di rischio tra i due metodi per meccanismo di rottura duttile a 50 anni	111
Tabella 6.35 – Variazione degli indici di rischio tra i due metodi per meccanismo di rottura duttile a 75 anni	111
Tabella 6.36 – Variazione degli indici di rischio tra i due metodi per meccanismo di rottura fragile a 25 anni.....	112
Tabella 6.37 – Variazione degli indici di rischio tra i due metodi per meccanismo di rottura fragile a 50 anni.....	112
Tabella 6.38 – Variazione degli indici di rischio tra i due metodi per meccanismo di rottura fragile a 75 anni.....	112
Tabella 6.39 – Fattori di scala degli accelerogrammi per analisi della configurazione D18.....	115
Tabella 6.40 – Forze sollecitanti la cerniera plastica per ogni iterazione	115
Tabella 6.41 – Valori di snervamento e rottura delle cerniere plastiche per meccanismo di rottura duttile e fragile	116
Tabella 6.42 – Sollecitazioni a taglio per ogni evento sismico	116
Tabella 6.43 – Sollecitazioni a rotazione per ogni evento sismico	117
Tabella 6.44 – Fattori di scala degli accelerogrammi corrispondenti alla crisi del viadotto.....	118
Tabella 6.45 – Valori di snervamento e rottura delle cerniere plastiche per meccanismo di rottura duttile e fragile	119
Tabella 6.46 – Sollecitazioni a taglio allo scenario di crisi.....	120
Tabella 6.47 – Sollecitazioni a rotazione allo scenario di crisi	120
Tabella 6.48 – Scenari temporali per diverse configurazioni di sezione e livello di corrosione .	121
Tabella 6.49 – Variazione dell’indice di rischio per scenari temporali prefissati a differenti livelli di degrado	121
Tabella 7.1 – Caratteristiche dei materiali delle pile	124
Tabella 7.2 – Diametri e deformazione ultima a rottura delle armature per configurazione di sezione.....	125
Tabella 7.3 – Momenti di inerzia efficace per configurazione di sezione	125
Tabella 7.4 – Analisi modale per configurazione 1	126
Tabella 7.5 – Analisi modale per configurazione 2	127
Tabella 7.6 – Analisi modale per configurazione 3	128
Tabella 7.7 – Analisi modale per configurazione 4	128
Tabella 7.8 – Analisi modale per configurazione 5	129

Tabella 7.9 – Indici di rischio per meccanismo di rottura duttile a diverse configurazioni di sezione.....	132
Tabella 7.10 - Indici di rischio per meccanismo di rottura fragile a diverse configurazioni di sezione.....	135
Tabella 7.11 – Scenari temporali per diverse configurazioni di sezione e livello di corrosione..	136
Tabella 7.12 – Indici di rischio di accelerazione per meccanismo di rottura e direzione.....	138
Tabella 7.13 – Fattori di scala degli accelerogrammi corrispondenti allo scenario di crisi del viadotto	140
Tabella 7.14 - Valori di snervamento e rottura delle cerniere plastiche per meccanismo di rottura duttile e fragile.	141
Tabella 7.15 – Sollecitazioni a taglio allo scenario di crisi.....	141
Tabella 7.16 – Sollecitazioni a rotazione allo scenario di crisi	142
Tabella 7.17 – Scenari temporali per diverse configurazioni di sezione e livello di corrosione..	143
Tabella 7.18 – Variazione dell’indice di rischio per scenari temporali prefissati a differenti livelli di degrado.....	143
Tabella 8.1 – Caratteristiche dei materiali delle pile	147
Tabella 8.2 – Diametri e deformazione ultima a rottura delle armature per configurazione di sezione.....	147
Tabella 8.3 – Momenti di inerzia efficace per configurazione di sezione.....	148
Tabella 8.4 – Analisi modale per configurazione 1	151
Tabella 8.5 – Analisi modale per configurazione 2	152
Tabella 8.6 – Analisi modale per configurazione 3	154
Tabella 8.7 – Analisi modale per configurazione 4	155
Tabella 8.8 – Analisi modale per configurazione 5	157
Tabella 8.9 – Indici di rischio per meccanismo di rottura duttile a diverse configurazioni di sezione.....	163
Tabella 8.10 - Indici di rischio per meccanismo di rottura fragile a diverse configurazioni di sezione.....	167
Tabella 8.11 – Scenari temporali per diverse configurazioni di sezione e livello di corrosione..	168
Tabella 8.12 – Indici di rischio di accelerazione per meccanismo di rottura e direzione.....	170
Tabella 8.13 – Fattori di scala degli accelerogrammi corrispondenti allo scenario di crisi del viadotto	172
Tabella 8.14 - Valori di snervamento e rottura delle cerniere plastiche per meccanismo di rottura duttile e fragile	173
Tabella 8.15 – Sollecitazioni a taglio allo scenario di crisi.....	175
Tabella 8.16 – Sollecitazioni a rotazione allo scenario di crisi	176
Tabella 8.17 – Scenari temporali per diverse configurazioni di sezione e livello di corrosione..	178
Tabella 8.18 – Variazione dell’indice di rischio per scenari temporali prefissati a differenti livelli di degrado.....	178
Tabella 9.1 – Diametri e deformazione ultima a rottura delle armature per configurazione di sezione.....	180
Tabella 9.2 – Indici di rischio per meccanismo di rottura duttile a diverse configurazioni di sezione.....	181
Tabella 9.3 – Indici di rischio per meccanismo di rottura fragile a diverse configurazioni di sezione.....	182

Tabella 9.4 – Scenari temporali per diverse configurazioni di sezione e livello di corrosione ...	182
Tabella 9.5 – Indici di rischio di accelerazione per meccanismo di rottura e direzione	183
Tabella 9.6 – Diametri Armatura longitudinale e diminuzione dell'area in percentuale	184
Tabella 9.7 – Calcolo dell'indice di rischio attraverso i fattori di scala degli eventi sismici.....	185
Tabella 9.8 – Variazione dell'indice di rischio per scenari temporali prefissati a differenti livelli di degrado	185
Tabella 9.9 – Sollecitazioni allo scenario di crisi lungo la direzione maggiormente sollecitata .	189
Tabella 9.10 – Diametri e deformazione ultima a rottura delle armature per configurazione di sezione.....	190
Tabella 9.11 – Indici di rischio per meccanismo di rottura duttile a diverse configurazioni di sezione.....	191
Tabella 9.12 – Indici di rischio per meccanismo di rottura fragile a diverse configurazioni di sezione.....	192
Tabella 9.13 – Scenari temporali per diverse configurazioni di sezione e livello di corrosione .	192
Tabella 9.14 – Indici di rischio di accelerazione per meccanismo di rottura e direzione	193
Tabella 9.15 – Diametri Armatura longitudinale e diminuzione dell'area in percentuale	194
Tabella 9.16 – Calcolo dell'indice di rischio attraverso i fattori di scala degli eventi sismici.....	195
Tabella 9.17 – Variazione dell'indice di rischio per scenari temporali prefissati a differenti livelli di degrado	195
Tabella 9.18 – Indici di rischio di accelerazione per meccanismo di rottura e direzione	196
Tabella 9.19 – Indici di rischio di accelerazione per meccanismo di rottura e direzione	197
Tabella 9.20 – Sollecitazioni allo scenario di crisi lungo la direzione maggiormente sollecitata	204
Tabella 9.21 – Diametri e deformazione ultima a rottura delle armature per configurazione di sezione.....	205
Tabella 9.22 – Indici di rischio per meccanismo di rottura duttile a diverse configurazioni di sezione.....	206
Tabella 9.23 – Indici di rischio per meccanismo di rottura fragile a diverse configurazioni di sezione.....	206
Tabella 9.24 – Scenari temporali per diverse configurazioni di sezione e livello di corrosione .	207
Tabella 9.25 – Indici di rischio di accelerazione per meccanismo di rottura e direzione	208
Tabella 9.26 – Diametri Armatura longitudinale e diminuzione dell'area in percentuale	208
Tabella 9.27 – Calcolo dell'indice di rischio attraverso i fattori di scala degli eventi sismici.....	209
Tabella 9.28 – Variazione dell'indice di rischio per scenari temporali prefissati a differenti livelli di degrado	210
Tabella 9.29 – Indici di rischio di accelerazione per meccanismo di rottura e direzione	210
Tabella 9.30 – Indici di rischio di accelerazione per meccanismo di rottura e direzione	211
Tabella 9.31 – Indici di rischio di accelerazione per meccanismo di rottura e direzione	212
Tabella 9.32 – Sollecitazioni allo scenario di crisi lungo la direzione maggiormente sollecitata	218