



*UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI*  
*Scuola di Dottorato di Ingegneria Civile e Architettura*

-----

*Dottorato in Ingegneria Strutturale*

-----

*XXIII CICLO*

*Progetto di Indagine sulla  
Sicurezza Strutturale*

*Dottorando*

*Maria Valeria Piras*

*Gennaio 2011*



***UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI***

***Scuola di Dottorato di Ingegneria Civile e  
Architettura***

*Direttore: Prof. Ing. Gaetano Ranieri*

***Dottorato in Ingegneria Civile Strutture***

*Coordinatore: Prof. Ing. Barbara De Nicolo*

***XXIII CICLO***

***Progetto di Indagine sulla  
Sicurezza Strutturale***

***Dottorando: Maria Valeria Piras***

***Tutor: Prof. Ing. Fausto Mistretta***

*SSD: ICAR 09: Tecnica delle Costruzioni*

*Gennaio 2011*

## Ringraziamenti

E' difficile in poche righe ricordare tutte le persone che, a vario titolo, hanno contribuito a rendere positiva l'esperienza del Dottorato di Ricerca. Devo ringraziare per la pazienza e la disponibilità, in particolar modo, la Professoressa Barbara De Nicolo e il Professor Fausto Mistretta. Desidero ringraziare l'Ing. Luisa Deias del Dipartimento di Elettronica dell'Università degli Studi di Cagliari, per l'amichevole e determinante collaborazione. Sarebbe troppo lungo, anche se doveroso, ringraziare tutti quelli che hanno contribuito a vario titolo durante questi anni di ricerca, voglio solo ricordare la Prof.ssa Luisa Pani, l'Ing. Giorgio Carta che hanno dato un apporto significativo al raggiungimento dei risultati presentati in questa Tesi. Infine sono debitrice con il personale del Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università degli Studi di Cagliari, per aver dimostrato sempre disponibilità e simpatia nei miei confronti. Voglio ringraziare anche i miei amici ed i colleghi dottorandi, in particolar modo l'Ing. Nicoletta Trulli, la cui compagnia ha reso più gradevoli questi anni.

# Indice

Introduzione	1
Stato degli studi	2
<b>Capitolo 1:</b> Logica fuzzy: principi e procedimenti base	6
<b>Capitolo 2:</b> La misura della sicurezza	9
<b>Capitolo 3:</b> Descrizione del metodo proposto	11
<b>Capitolo 4:</b> Struttura isostatica	22
<b>Capitolo 5:</b> Struttura iperstatica	32
<b>Capitolo 6:</b> Esempio applicativo: ponte sito sulla SS.195, Cagliari (Italia)	58
<b>Conclusioni</b>	96
<b>Appendice</b>	
[A1] Costruzione delle funzioni fuzzy	
[A2] Risultato della procedura di intersezione $D = G \cap W$ attribuendo a $G_{ij} = \text{Small}$ e $W_{ijk} = \text{Medium}$	
[A3] Risultato prodotto cartesiano $W \times N$	
[A4] Risultato $G \times N$ ponendo $G_{ij} = \text{Small}$ , $W_{ijk} = \text{Medium}$	
[A5] Risultato n fuzzyficato attribuendo $G_{ij} = \text{Small}$ , $W_{ijk} = \text{Medium}$	
[A6] Costruzione delle funzioni fuzzy relative al peso WE	
[A7] Software di defuzzyficazione	

*Il 1 agosto 2007, a Minneapolis, il ponte Interstate 35W Highwa, senza apparente preavviso, crollava nel fiume Mississippi, facendo precipitare nell'alveo le tre campate centrali, lunghe diverse decine di metri (Foto 1). La struttura venne progettata e realizzata tra il 1965 e il 1967, anno in cui, il Minnesota Highway Department concedeva l'apertura al traffico.*



Foto 1: *Il crollo*

*Il bilancio dell'evento si può riassumere in due cifre: 393 i milioni di dollari spesi per la rimozione della struttura crollata e per la realizzazione di un nuovo ponte che sostituisse il precedente e 9, il numero delle persone che persero la vita nella sciagura. Ulteriore aspetto economico, valutabile sul medio termine, è rappresentato dal danno arrecato al commercio e alle attività produttive per la prolungata interruzione del servizio. La struttura, di primaria importanza strategica per i trasporti locali, consentiva un rapido collegamento per il traffico veicolare. La sciagura può essere oggi "riletta" alla luce della documentazione prodotta durante un'ispezione visiva eseguita nel 2003, ben quattro anni prima del crollo. Dall'ispezione si evince con chiarezza come il nodo U10 West (Foto 2) presentasse un'evidente deformazione della piastra di collegamento (Foto 3).*

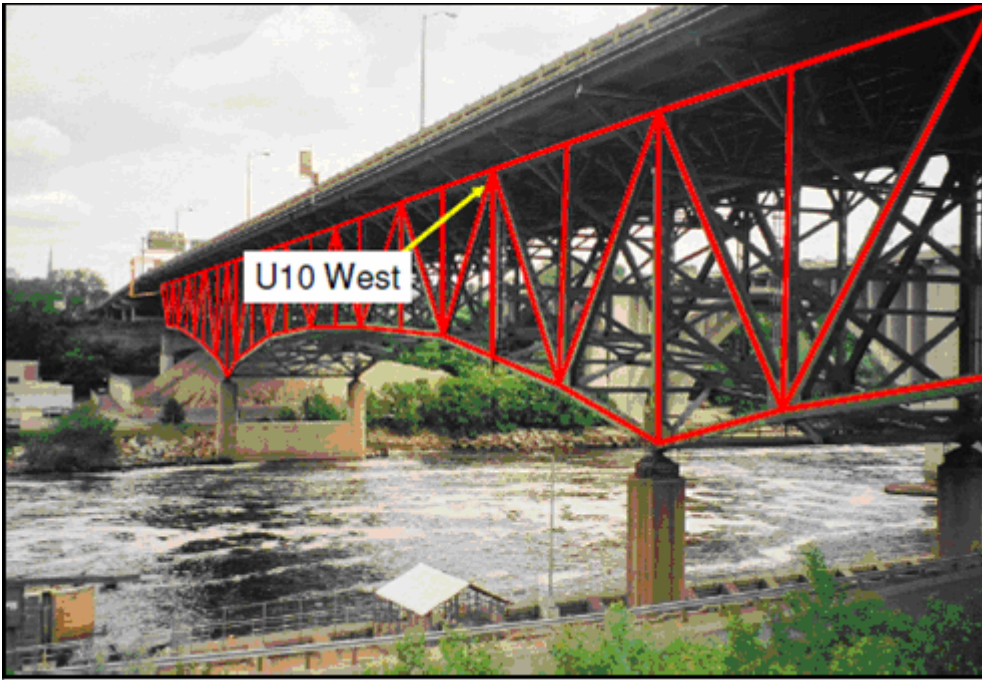


Foto 2: Il nodo che ha innescato il cinematismo di collasso

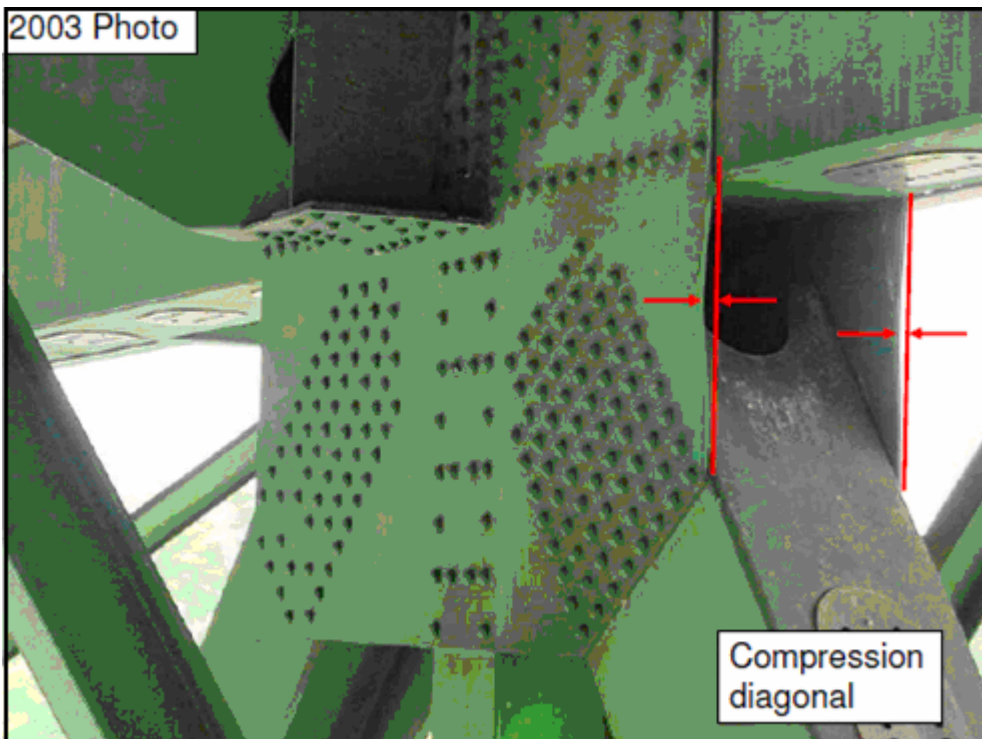


Foto 3: Piastra di collegamento deformata

Gli studi, condotti sui resti del ponte, evidenziarono successivamente, tramite le simulazioni virtuali di carico, come lo spessore della piastra fosse sottodimensionato. L'errore riguardò la progettazione del collegamento. I risultati dell'indagine condotta dal National Transportation Safety Board evidenziarono come, nel 2003, sarebbe stato possibile valutare correttamente

*l'imminente rischio tenendo conto anche dei margini di sicurezza legati al progressivo aumento del traffico veicolare. Tutto ciò avrebbe evitato il crollo e le sue conseguenze.*

*L'ispezione visiva non fu dunque determinante per individuare il pericolo in quanto non adeguatamente supportata da una metodologia d'insieme che consentisse la corretta valutazione dei rischi.*

*La messa a punto e l'applicazione di una corretta metodologia di indagine visiva rappresenta un traguardo da raggiungere tenendo conto del fatto che, le risorse impegnate a tale scopo, vengono largamente ammortizzate dai vantaggi derivanti dall'applicazione<sup>1</sup>.*

---

<sup>1</sup> Il caso è tratto dall'intervento del Prof. Franco Bontempi dal titolo: *Integrità strutturale e monitoraggio* al seminario Formazione Permanente 2009, Progetto a Ciclo di Vita Programmato di Ponti e Viadotti tenuto presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano, Milano, Italia in data 16-19 Giugno 2009.

# Introduzione

La richiesta di valutazione dei margini di sicurezza delle costruzioni esistenti è negli ultimi tempi sempre più articolata e pressante. Tale necessità è talvolta conseguenza di eventi traumatici di grande impatto emotivo e deriva da una maggiore attenzione, da parte delle Amministrazioni pubbliche e private, proprietarie e concessionarie di beni, verso il recupero del costruito e dalla volontà di mantenere efficienti le opere di importanza strategica e funzionale.

Per formulare un giudizio obiettivo sul livello di sicurezza [1], [2] delle strutture esistenti si possono prevedere quattro operazioni (non necessariamente tutte indispensabili):

- raccolta di dati storici;
- ispezione visiva;
- prove *in situ* (non distruttive);
- test di laboratorio (su campioni opportunamente scelti);
- prove *in situ* (distruttive).

Attraverso un esame critico comparativo di tutte le informazioni raccolte, si fornisce una diagnosi sul livello di degrado dell'opera oggetto d'indagine. Spesso però, a causa dell'urgenza degli interventi di ripristino, le ispezioni visive rappresentano l'unico strumento per valutare la vulnerabilità di un'opera e difficilmente vengono associate alla realizzazione di un programma sperimentale. Le ispezioni visive divengono la pratica corrente per la gestione della manutenzione, anche quando il numero e l'importanza delle costruzioni amministrare dallo stesso gestore, è significativo.

Il processo di valutazione del grado di sicurezza, sulla base dei risultati di un'ispezione visiva, è fortemente influenzato dalla soggettività. Infatti, il personale incaricato dell'ispezione, esprime generalmente un giudizio personale di tipo linguistico sul livello di degrado che deriva dalla sua esperienza e formazione.

Affidandosi solo ad un controllo visivo nasce dunque la necessità di trattare le informazioni soggettive in modo tale da trasformarle in valutazioni obiettive ed affidabili.



In questo lavoro, affinché l'ispezione visiva possa rappresentare uno strumento affidabile per la misura della sicurezza, si è scelto di sfruttare le potenzialità della logica fuzzy poiché questa elabora le informazioni, espresse mediante giudizi linguistici, in maniera tale da trasformarle in dati oggettivi.

Il metodo proposto consente di stimare con rapidità la misura della sicurezza delle singole opere basandosi sulla sola ispezione visiva, consentendo di creare modelli di valutazione che, in modo rapido ed economico, consentano di monitorare con continuità il procedere del degrado delle strutture nel corso della loro vita di servizio.

## **Stato degli studi**

Maurizio Acito [3], nel 2000, presenta al 13 Congresso CTE, lo studio dal titolo "Misura fuzzy della vulnerabilità di manufatti stradali e ferroviari in c.a. interessati da degrado". L'autore, nell'introduzione traccia preliminarmente quelle che sono le esigenze legate al problema della valutazione dei margini di sicurezza (vulnerabilità) di singoli manufatti, indicando tre punti nodali:

1. valutazione della sicurezza attuale dei manufatti;
2. monitoraggio dei manufatti, con la previsione dell'evoluzione del loro degrado;
3. monitoraggio, a seguito di eventi calamitosi, per la valutazione in tempo reale, dello stato dei manufatti ritenuti strategici.

L'interesse dell'autore si focalizza sul primo punto per il quale viene citato l'approccio del metodo classico affrontato in termini probabilistici. Di questo metodo si evidenziano le componenti e la insita complessità, dalla cui valutazione, deriva l'esigenza della messa a punto di una metodologia che, mantenendo lo stesso rigore, sia di pratica applicazione. A tale scopo, cita gli studi riguardanti le applicazioni della logica fuzzy così come riportati in letteratura fin dal 1975, quando Blockley [4] nell'articolo dal titolo "Predicting the likelihood of structural accidents", propone una procedura per la valutazione della probabilità di collasso strutturale che consideri anche elementi di giudizio la cui natura è fuzzy.

Acito, a partire da tale procedura e tenendo conto anche degli studi di altri autori, tra i quali spicca l'apporto di A. B. Tee [5], sviluppa un metodo per la valutazione della vulnerabilità dei manufatti interessati dal degrado. La metodologia si articola in due fasi: l'individuazione di un indicatore di vulnerabilità locale, relativo ad un singolo elemento, e l'individuazione di un indicatore di

vulnerabilità globale, esteso all'intero manufatto, determinato, quest'ultimo, dalla combinazione dei singoli indicatori di vulnerabilità locale. Lo studio si concentra, per ragioni metodologiche, sulla definizione dell'indicatore di vulnerabilità locale. L'applicazione pratica si fonda sulla possibilità d'identificazione, da parte di personale ispettivo, del tipo di danno e del suo livello di gravità. Partendo dall'applicazione del metodo ad una trave semplicemente appoggiata e indicando per essa manifestazioni di degrado tipiche, crea una libreria di funzioni fuzzy per i giudizi di gravità espressi durante l'ispezione visiva e una libreria di funzioni fuzzy per i pesi che tali giudizi hanno sulle manifestazioni stesse. Lo scopo è quello di ricavare l'esponente di sicurezza  $n$  relativo alla determinazione della probabilità di fallimento  $P_f$  riferita ad una singola manifestazione di degrado e, tramite il meccanismo a catena, a più manifestazioni di degrado presenti nella trave oggetto di studio.

Sull'applicazione della logica fuzzy all'ambito dell'ingegneria civile nel 2000 Zhiye Zhao e Chuanyu Chen [6] pubblicano nella rivista *Computers & Structures*, un articolo dal titolo "A fuzzy system for concrete bridge damage diagnosis". Gli autori, nella memoria, presentano un sistema per la diagnosi e la previsione del degrado sui ponti, basandosi su un metodo d'identificazione delle cause che provocano il degrado stesso. Lo studio si concentra sulla diagnosi del degrado isolando una serie di parametri correlati alle condizioni ambientali e strutturali. L'obiettivo è quello di ricavare le cause dei difetti osservati durante le ispezioni visive e di valutare l'impatto che gli stessi hanno sulla sicurezza strutturale dei ponti. Infatti, effettuare una diagnosi sulle cause delle diverse manifestazioni di degrado, risulta un compito complesso che richiede intuizione, conoscenza ed esperienza. Lo scopo del lavoro di Zhao et al. è quello di costruire, tramite l'utilizzo della logica fuzzy, un sistema esperto che aiuti i tecnici a prendere le opportune decisioni, eseguendo una diagnosi preliminare dello stato di degrado.

Concentrando l'attenzione sugli aspetti legati all'ispezione visiva, nel 2002, il CIAS (Centro Internazionale di Aggiornamento Sperimentale-Scientifico), pubblica un manuale per la valutazione dello stato dei ponti [7]. Il manuale applica un metodo di valutazione numerica (MVN) di tipo deterministico per la valutazione dello stato di degrado sia di singoli elementi (DR= difettosità relativa), sia di intere opere strutturali (DA= difettosità assoluta). Il numero DR indica il livello dello stato di degrado di un singolo elemento soggetto a più manifestazioni di degrado e, a seconda del suo valore, si sceglie la strategia di intervento. Nel manuale, a titolo di esempio, si suddividono le opere che necessitano di intervento attraverso valori di DR limite pari a 5 e a 25.

Per  $DR > 25$  si consiglia una campagna di indagine che accerti le reali caratteristiche dei materiali e della struttura nell'ottica di valutarne la capacità portante ritenuta a rischio; per  $DR > 5$  è necessario

un intervento straordinario per il recupero tecnologico dei materiali e occorre eliminare le fonti del degrado; per un valore di DR molto basso, diventa indispensabile una procedura di archiviazione dell'ispezione per un confronto negli anni avvenire.

Nel 2007, Yeong Min Kim, Chee Kyeong Kim e Geon Ho Hong [8], nell'articolo dal titolo "Fuzzy set based crack diagnosis system for reinforced concrete structures", pubblicato nella rivista *Computer & Structures*, presentano un sistema di diagnosi, basato sull'ispezione visiva, applicando la logica fuzzy, per la valutazione dello stato fessurativo nei manufatti in cemento armato. Gli autori progettano un sistema di analisi utilizzando il metodo di diagnosi per la valutazione dello stato fessurativo proposto dalla JCI (Japanese Concrete Institute)<sup>1</sup>. In questo lavoro, attuando il sistema proposto con un'interfaccia utente di tipo grafico, si è costruito un sistema di valutazione dello stato fessurativo basato sulla teoria degli insiemi fuzzy e sulle regole di inferenza fuzzy. La necessità dell'applicazione della logica fuzzy nasce dall'esigenza di rendere possibile ai non esperti la diagnosi precoce sullo stato fessurativo, durante le ispezioni. Gli autori dimostrano come la manipolazione dei dati raccolti durante l'ispezione visiva, tramite l'applicazione della logica fuzzy, renda possibile una diagnosi anche da parte di personale non esperto, anche se, gli stessi autori, mettono in evidenza dei limiti quando un quadro fessurativo è provocato da più cause.

\*

\*

\*

Valutate le proposte riportate in letteratura, si è scelto di focalizzare l'attenzione lungo il percorso tracciato negli anni da Blockley [4], Tee et al. [5], Acito [3]. Si è deciso di studiare il meccanismo di valutazione della vulnerabilità di un'opera basandosi sulla sola ispezione visiva. Il metodo si fonda su una specifica applicazione della logica fuzzy che consiste nell'adozione di funzioni fuzzy di tipo triangolare simmetriche e triangolari asimmetriche e nella procedura di defuzzyficazione dell'output fuzzy, ottenuto tramite la realizzazione di un software (Appendice A7) sia per la prima programmazione che la successiva fase di *customizzazione*. L'interesse particolare non si fonda sulla determinazione delle cause dei fenomeni di degrado ma, sulla manipolazione dei giudizi linguistici soggettivi espressi durante le ispezioni. Il fine ultimo è quello di determinare un

---

<sup>1</sup> Japanese Concrete Institute. Investigation of concrete cracks and guide to repair and rehabilitation. JCI; 1980.

coefficiente di sicurezza<sup>2</sup> oggettivo che non risenta della soggettività insita in ciascun giudizio, al punto che le ispezioni possano essere svolte anche da personale non esperto.

---

<sup>2</sup> Il coefficiente di sicurezza è l'esponente  $n$  della probabilità di fallimento  $P_f$

# Capitolo 1

## Logica fuzzy: principi e procedimenti base

La logica fuzzy nacque nel 1965 come teoria matematica per il trattamento delle incertezze espresse nel linguaggio naturale [9] ed è oggi universalmente riconosciuta come strumento matematico-informatico di grande efficacia per analizzare un vasto insieme di problemi d'incertezza non probabilistica. La logica fuzzy è innovativa per un duplice aspetto: rivoluziona la teoria classica degli insiemi ed il concetto semantico di verità.

Secondo la concezione tradizionale di insieme, un elemento può appartenere ad un insieme oppure no: concetto di appartenenza bivalente. Secondo la logica fuzzy, un elemento può appartenere ad un insieme ma con un certo grado di appartenenza, appartenervi in una certa misura. Un insieme fuzzy non è altro che un'estensione dei normali insiemi a cui siamo abituati a pensare.

Un insieme classico (insieme *crisp*) è formato da un gruppo di oggetti che hanno in comune qualcosa, come ad esempio, l'insieme formato da persone alte.

Una persona, nella teoria classica degli insiemi, può appartenere a questo insieme oppure no.

Si può considerare un insieme come una lista di appartenenze, si può ipotizzare che appartengano a tale insieme, ad esempio: Paolo, Luca, Matteo invece Alessandro, Fabio non appartenervi (Fig. 1.1).

Si può rappresentare questo con delle frecce che vanno verso l'insieme.

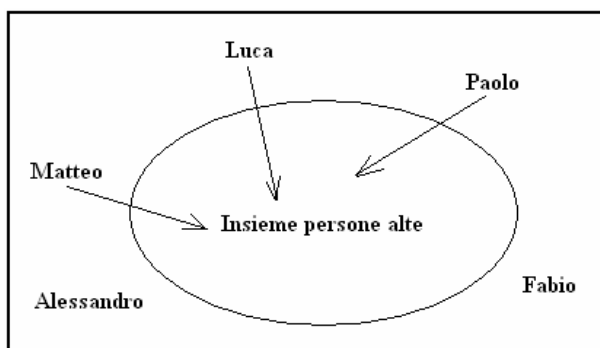


Figura 1.1: Appartenenza ad un insieme classico

In un insieme fuzzy ad ogni persona viene dato, al posto di una appartenenza completa o nulla, un cosiddetto grado di appartenenza, che è un valore compreso nell'intervallo [0-1].

Dunque, ad esempio, Paolo potrà appartenere all'insieme persone alte con grado di appartenenza 0,75 (Fig. 1.2).

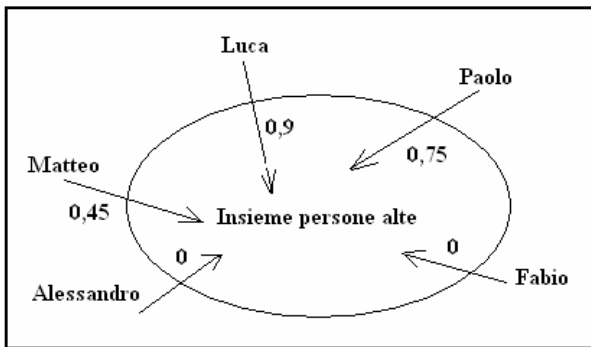


Figura 1.2: Appartenenza ad un insieme fuzzy

Nella logica classica un'affermazione viene valutata come “vera” o “falsa”, non è possibile che sia vera e falsa contemporaneamente (*tertium non datur* non ci sono altri possibili valori oltre al vero e il falso) mentre la logica fuzzy le attribuisce un valore di verità parziale.

Una proposizione può essere vera al 70% (non vera al 30%); quindi in un certo senso la logica fuzzy permette di violare il principio del terzo escluso e il principio di non contraddizione<sup>1</sup>.

Tutto ciò si addice a quelle situazioni in cui non si può avere la certezza assoluta su un fenomeno.

E' utile precisare che tale incertezza potrebbe essere imputabile, nel caso specifico dell'ispezione visiva, sia al giudizio dell'operatore nel valutare il fenomeno, sia al fenomeno in sé.

I passaggi fondamentali di un generico procedimento fuzzy sono tre: fuzzificazione, inferenza e defuzzificazione (Fig. 1.3) [10], [11].

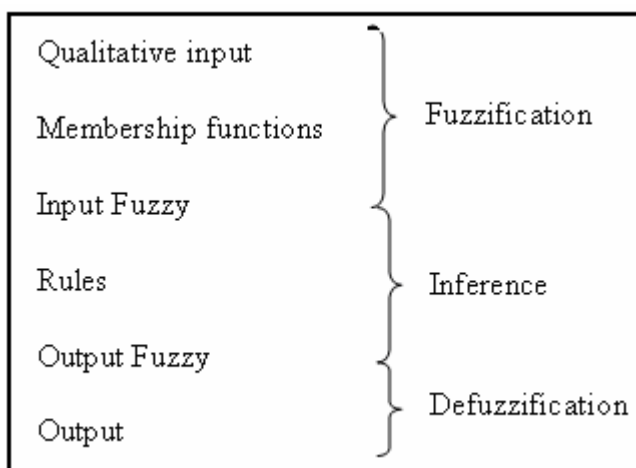


Figura 1.3: Architettura del procedimento fuzzy

<sup>1</sup> Questo testo è una parziale rielaborazione di contributi reperibili ai seguenti siti: [http://it.wikipedia.org/wiki/Logica\\_fuzzy](http://it.wikipedia.org/wiki/Logica_fuzzy) e [www.ildiozene.it/EncyPages/Ency=fuzzylogica.html](http://www.ildiozene.it/EncyPages/Ency=fuzzylogica.html) visitati in data 09/12/2010

La procedura di fuzzyficazione consiste nel passare dal valore numerico della variabile considerata, al suo corrispondente valore di appartenenza al dato insieme fuzzy, tramite un'opportuna funzione d'appartenenza (*membership function*). Sono così normalizzati tutti i dati dell'intervallo [0,1], ed è possibile confrontare quantità tra loro diverse e misurate in scale differenti.

Le *membership functions*, relative ad uno stesso parametro, hanno l'importante proprietà di essere reciprocamente sovrapponibili, pertanto alcuni valori della variabile possono appartenere parzialmente a più insiemi fuzzy. Tanto più estesa è la zona di sovrapposizione, tanto maggiore sarà l'incertezza compresa nel sistema.

La procedura di inferenza consiste nell'applicare le regole di combinazione tra gli insiemi fuzzy. Generalmente si tratta di semplici espressioni linguistiche, che vengono convertite in formalismo matematico con il linguaggio *if...then* della Logica.

Questo aspetto è importante perché le informazioni raccolte, attraverso l'esame di un dato problema, possono essere utilizzate senza alcuna traduzione in formule, che talvolta si presentano di complessa determinazione.

L'output fuzzy è anch'esso un valore di appartenenza che può essere usato sia "puro", come proprietà qualitativa, sia "defuzzyficato", come numero reale, compatibile con approcci non fuzzy.

# Capitolo 2

## La misura della sicurezza

L'obiettivo di questo studio è quello di determinare, tramite la sola ispezione visiva, la probabilità di fallimento  $P_f$  di una struttura esistente in relazione allo stato di degrado e allo stato limite di riferimento.

Il valore della misura della sicurezza è specificato nelle norme [12], [13] come  $P_f = 10^{-n}$ , dove  $P_f$  è la probabilità di insuccesso ed  $n$  è l'esponente di tale probabilità, che assume valori compresi tra 1 e 7.

Attualmente è comunemente accettato che la sicurezza delle strutture debba essere espressa in termini di affidabilità (indice di sicurezza  $\beta$ ). I valori di  $\beta$  sono indicati nell'Eurocodice 1 in dipendenza dal tipo di stato limite (stato limite di esercizio SLE e stato limite ultimo SLU) e dalle conseguenze del collasso (Fig. 2.1).

$P_f$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$
$\beta$	1,28	2,32	3,09	3,72	4,27	4,75	5,20

Figura 2.1: Relazione tra  $\beta$  e  $P_f$

Misurare la sicurezza strutturale, nei confronti dell'  $i$ -esimo stato limite, significa calcolare la probabilità  $P_{fi}$  di accadimento di questo stato limite (SL) e confrontarla con il valore di  $P_{fi}^*$  prefissato sulla base di considerazioni di varia natura (etiche, sociali, economiche, ecc.), ossia se risulta per l' $i$ -esimo SL che:

$$P_{fi} \leq P_{fi}^* \tag{2.1}$$

la misura della sicurezza risulta essere positiva per tale  $i$ -esimo SL [16], [17]. Il problema è quello di calcolare i valori della probabilità  $P_{fi}$  nei confronti di un determinato SL, in un determinato istante.

In questo studio si farà riferimento allo SLU, stato limite associato al collasso o ad altre forme simili di rottura strutturale [10].



Secondo le norme [9], [10] la probabilità che una struttura in 50 anni possa raggiungere lo stato limite ultimo risulta pari a  $P_f^* = 10^{-4}$  [16], [17].

$$P_f \leq 10^{-4} \qquad n \geq 4 \qquad (2.2)$$

In questo studio l'interesse si sposta al calcolo del coefficiente di sicurezza  $n$ , legato alla probabilità di fallimento  $P_f$ , e l'obiettivo è quello di confrontare il risultato ottenuto, con l'esponente di sicurezza  $n$  limite (2.2). Nel prosieguo, si mostra come procedere alla sua definizione per un singolo elemento strutturale (trave semplicemente appoggiata), in relazione allo stato locale di degrado. In conclusione, si giungerà alla definizione del coefficiente di sicurezza per l'insieme degli elementi (trave, pilastro) appartenenti ad una struttura iperstatica tipo.

## Capitolo 3

### Descrizione del metodo proposto

Lo scopo del presente lavoro è quello di manipolare, tramite la logica fuzzy, i giudizi linguistici soggettivi, espressi dal personale ispettivo (non qualificato), sui segni visibili delle manifestazioni di degrado al fine di valutare l'attuale livello di sicurezza della costruzione oggetto di indagine.

Il procedimento si articola in due fasi: la prima prevede l'inserimento dei dati derivanti dall'ispezione visiva in una scheda tipo (Scheda Ispettiva<sup>1</sup>), accompagnando quest'ultima con immagini fotografiche e video, la seconda fase, caratterizzata dall'operato di personale esperto, prevede l'implementazione in un software (Appendice A7) dei dati raccolti durante l'ispezione e il conseguente loro trattamento. I dati raccolti nella Scheda Ispettiva vengono inseriti nella Scheda di Valutazione illustrata nella Tab. 3.1.

La scheda si compone di quattro colonne. Nella prima è indicato l'elemento strutturale in esame. Nella seconda, per ogni elemento strutturale, sono riportate le manifestazioni di degrado più rilevanti per l'elemento strutturale stesso. Nella terza il personale esperto riporta il giudizio linguistico di gravità, derivato dalla Scheda Ispettiva, attribuito, durante l'ispezione visiva, ai singoli tipi di degrado. La quarta colonna indica il peso che ogni decisione avrà sulla valutazione del livello di sicurezza. E' importante sottolineare che la relazione tra il giudizio e il peso sulla sicurezza è valutata da personale esperto prima che avvenga il sopralluogo, mentre il giudizio sul livello di degrado (terza colonna), viene riportato sulla Scheda Ispettiva durante l'ispezione visiva.

Si propone di manipolare, tramite la logica fuzzy, i giudizi linguistici soggettivi espressi dal personale ispettivo sulle manifestazioni di degrado.

L'obbiettivo è quello di valutare la sicurezza attuale del manufatto.

---

<sup>1</sup> Scheda, compilabile anche da personale non esperto, durante l'ispezione visiva del manufatto. Rif. Cap. 6, Tabella 6.3, Tabella 6.4 pp. 71-72

Tabella 3.1: Scheda di Valutazione tipo.

Elemento strutturale	Manifestazione di degrado	Giudizio linguistico	Obiettivo: Sicurezza attuale
E	$E_i$	$G_{ij}$	$W_{ijk}$

Ad ogni manifestazione di degrado  $E_i$  viene associato, da parte dell'operatore, un giudizio linguistico. Viene così a formarsi l'insieme *crisp* dei giudizi linguistici:  $G_{ij}$ <sup>2</sup> [Small (S), Medium (M), Large (L)] fra i quali l'incaricato sceglie il più idoneo a rappresentare il livello di degrado per la manifestazione in esame. Scelta assolutamente soggettiva.

Ad ogni possibile giudizio linguistico  $G_{ij}$  viene attribuito il peso  $W_{ijk}$ <sup>3</sup> che esso ha sulla sicurezza attuale sempre tramite un insieme *crisp* di giudizi linguistici (3):  $W_{ijk}$  [Very Small (VS), Small (S), Slightly Small (SS), Medium (M), Slightly Large (SL), Large (L) e Very Large (VL)]. Si definisce il peso sulla base di opinioni espresse dal personale esperto<sup>4</sup>.

Le variabili linguistiche costituiscono il nostro input qualitativo (Fig.1.3).

Ad ogni variabile linguistica si associa una funzione di appartenenza  $\mu(x)$  (*membership function*) il cui dominio di appartenenza  $X$  è compreso tra 0 e 1. Essa associa ad ogni valore di  $x$  appartenente all'insieme  $X$  [0,1] un numero  $\mu(x)$  nell'intervallo [0,1] che rappresenta il grado di appartenenza di  $x$  in  $X$ , 1 rappresenta il grado massimo di appartenenza, 0 il grado minimo. Tale intervallo andrà discretizzato per poter ottenere i vettori rappresentativi delle singole funzioni fuzzy (Appendice A1), su cui poi applicare la procedura di fuzzyficazione, inferenza e defuzzyficazione.

Si sono scelte sia per i giudizi  $G_{ij}$ , sia per i pesi  $W_{ijk}$ , le funzioni di appartenenza di tipo triangolare mostrate nella Fig. 3.1 e Fig. 3.2. Da sottolineare come le funzioni S, M, L siano state opzionate identiche sia per il giudizio  $G_{ij}$  sia per il peso  $W_{ijk}$  ma non devono esserlo necessariamente. Tali funzioni di appartenenza (Fig. 3.1 e Fig. 3.2) sono caratterizzate dal fatto che, nel tratto con pendenza positiva, si ha un avvicinamento del grado di appartenenza dell'elemento al suo valore massimo, nel tratto con pendenza negativa, invece, il grado di appartenenza tende ad avvicinarsi al valore minimo. Se si considera ad esempio, la funzione di appartenenza della variabile linguistica Small (Fig. 3.1, Fig. 3.2), è possibile descrivere la situazione in questo modo: supponendo che il

<sup>2</sup> Per i giudizi linguistici  $G_{ij}$ , i indica il tipo di manifestazione di degrado, j il giudizio linguistico tra S, M, L.

<sup>3</sup> Per i pesi  $W_{ijk}$ : k individua il giudizio linguistico del peso che la singola manifestazione di degrado i ha sulla sicurezza attuale: VS, S, SLS, M, SLL, L, VL.

<sup>4</sup> A differenza di A. B. Tee [5], il quale basa la scelta del peso su base statistica.

dominio  $X$  rappresenti la manifestazione di degrado “apertura delle fessure”. Per valori piccoli di  $x$ , il grado di appartenenza della manifestazione di degrado tende a salire sino a quando raggiunge il punto avente funzione di appartenenza massimo. In corrispondenza di questo punto la manifestazione di degrado “apertura delle fessure” possiede il più alto grado di appartenenza alla classe Small. Man mano che la  $x$  aumenta, il grado di appartenenza alla classe Small diminuisce, in quanto per valori crescenti di  $x$ , l’uscita tende a transitare dalla classe Small alla classe Medium. All’aumentare di  $x$ , diminuisce il grado di appartenenza alla specifica classe fuzzy (più aumento la  $x$ , meno Small è l’apertura delle fessure). Aumentando il valore delle  $x$ , si transita da una classe all’altra. Considerando l’intersezione tra le funzioni fuzzy di appartenenza Small e Medium, aumentando la  $x$  diminuisce il grado di appartenenza alla classe Small, ma contemporaneamente, superata una certa soglia, aumenta l’appartenenza alla classe Medium. Un discorso perfettamente analogo si può fare al diminuire della  $x$ , quando l’uscita tende a transitare dalla classe Small alla classe Very Small.

Si noti come le funzioni fuzzy Slightly Small e Slightly Large, adottate nel peso  $W_{ijk}$  (Fig. 3.2), siano state scelte asimmetriche con la pendenza del tratto di salita diverso dal tratto di discesa. Nel caso della funzione di appartenenza Slightly Small il tratto in salita è più ripido del tratto in discesa, viceversa per la funzione Slightly Large il tratto in salita è meno ripido del tratto in discesa. Si rende meno ripido il tratto in salita in modo tale che l’aumento del grado di appartenenza di un dato insieme *crisp* alla determinata classe fuzzy risulti essere più “lento”, all’aumentare costante della variabile indipendente  $x$ . Allo stesso modo è reso più ripido il tratto in discesa, in modo che, superata una certa soglia, il grado di appartenenza a quella determinata classe fuzzy diminuisca vertiginosamente.

La scelta è dipesa, dopo vari tentativi di ottimizzazione, dal tipo di applicazione, non esiste infatti una precisa regola matematica o empirica che dica come strutturare geometricamente una funzione di appartenenza, anche se in letteratura, per questo tipo di applicazione si sono sempre utilizzate funzioni di appartenenza triangolari simmetriche [3], [5], [6]. Si possono utilizzare anche altre forme di funzioni di appartenenza come ad esempio la funzione gaussiana, trapezoidale, S-curve.

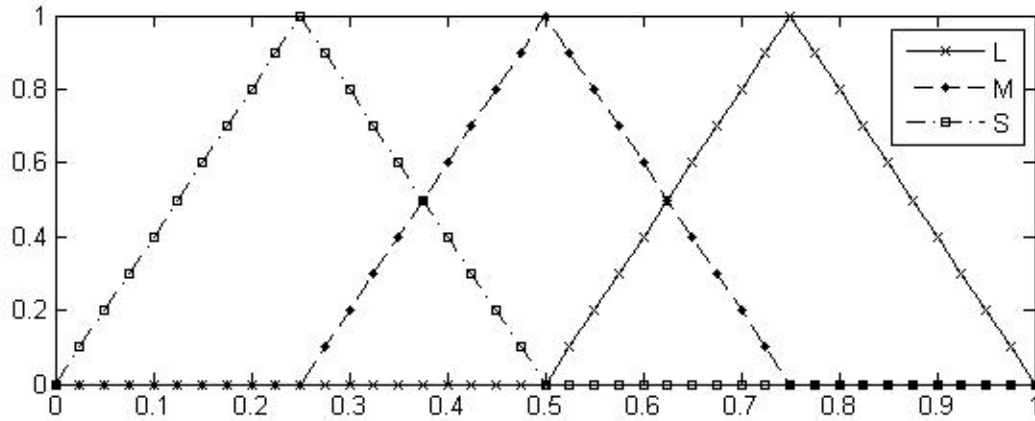


Figura 3.1: *Membership functions per i giudizi  $G_{ij}$*

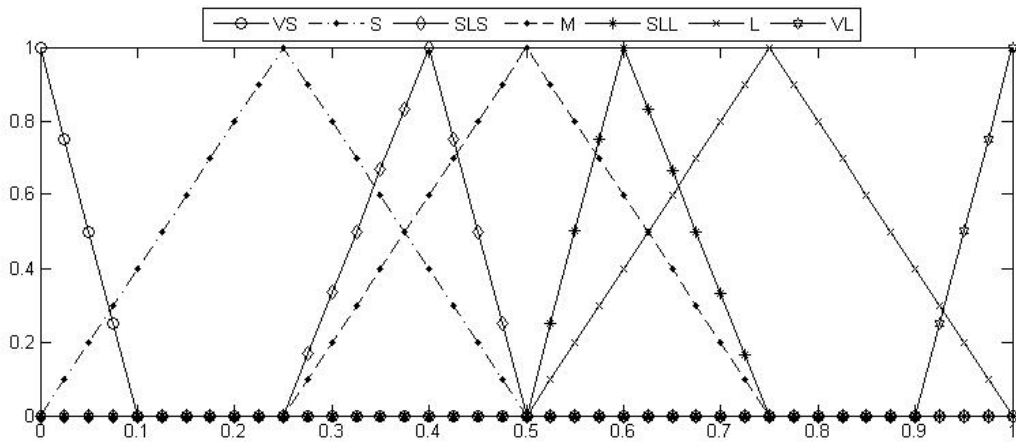


Figura 3.2: *Membership functions per i pesi  $W_{ijk}$*

Come detto<sup>5</sup>, rispetto alla teoria classica degli insiemi, un elemento può appartenere ad un insieme con un certo grado, si parla infatti di appartenenza parziale. Ad esempio, una variabile  $x$  può appartenere con un certo grado sia all'insieme Small sia all'insieme Medium, grado che viene determinato dal valore della funzione stessa. Ad esempio, in Fig. 3.3, il valore della variabile  $x$  pari a 0,3 ha grado di appartenenza 0,8 al fuzzy set Small e 0,2 al fuzzy set Medium. Tanto più è estesa la zona di sovrapposizione, tanto più l'incertezza viene compresa nel sistema.

<sup>5</sup> Cap.1, pp. 9-10.

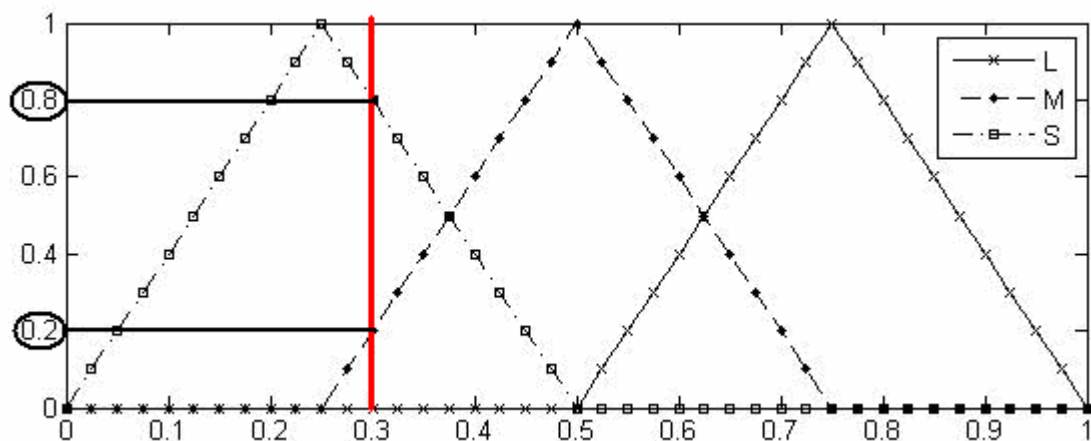


Figura 3.3: Grado di appartenenza della variabile  $x$

Le procedure suggerite in letteratura sono due. La prima, basata sulla *Fuzzy Sets Theory* [10], [11], segue l'approccio suggerito dal Blockey [4], utilizzando gli operatori di intersezione ( $\cap$ ), di unione ( $\cup$ ) e Fuzzy Relation. La seconda procedura, consigliata da A. B. Tee et al. [5], si basa sull'algebra dei numeri fuzzy [10], [11], con l'utilizzo della media pesata. In questo studio si è seguita la prima procedura in accordo con Acito [3].

Di seguito si propone un esempio di applicazione della procedura adottata.

Le funzioni fuzzy, descritte nelle figure precedenti, sono state discretizzate e pertanto rappresentate come vettori in modo tale che sia possibile manipolarle utilizzando le procedure della matematica vettoriale.

L'operatore di intersezione combina inizialmente il singolo giudizio  $G_{ij}$ , con il peso  $W_{ijk}$  che esso ha sulla sicurezza strutturale espressi vettorialmente.

$$\tilde{D}_i = \tilde{G}_{ij} \cap \tilde{W}_{ijk} \tag{3.1}$$

Dati due insiemi fuzzy, ad esempio  $G_{ij}=\text{Small}$  e  $W_{ijk}=\text{Medium}$  in  $X$ , si definisce intersezione di Small e Medium, l'insieme fuzzy  $D = S \cap M$  avente funzione caratteristica (Fig.3.4):

$$\mu_{D(x)} = \min\{\mu_S(x), \mu_M(x)\} \quad \forall x \in X$$

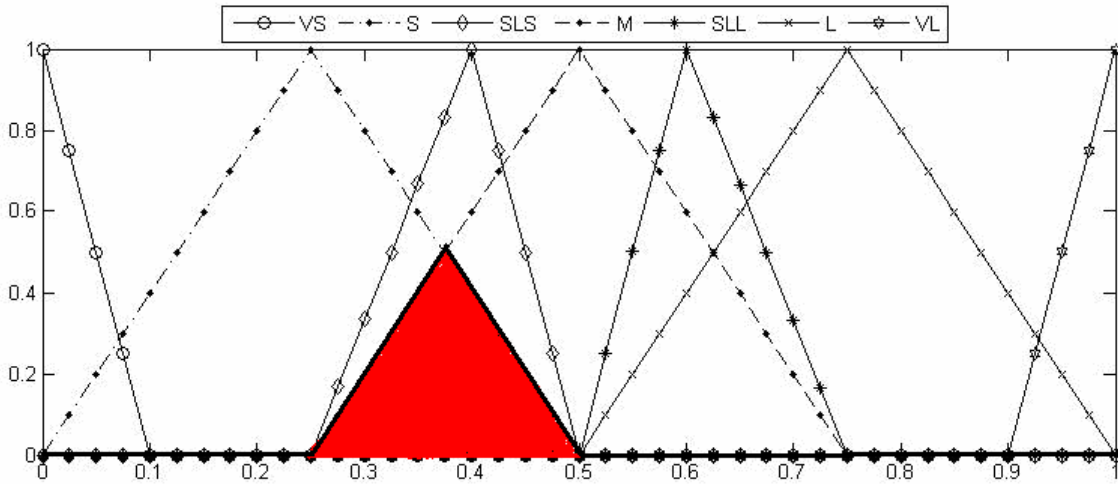


Figura 3.4: Grafico della funzione caratteristica intersezione di due insiemi fuzzy

Le funzioni fuzzy sono rappresentate da vettori di dimensione  $1 \times N_f$ , dove si è scelto una discretizzazione tale che  $N_f=41$ . Quindi, il risultato della procedura di intersezione è un vettore di dimensioni  $1 \times 41$  (Appendice A2).

Calcolato l'effetto combinato del giudizio e del peso relativi al singolo degrado (3.1), si valuta se questo ha alterato il livello di sicurezza assunto a priori per l'opera sottoposta a ispezione visiva. Livello di sicurezza che viene espresso tramite il valore iniziale dell'esponente di sicurezza  $n$ . Dalle norme [12], [13] si evince come  $n$  abbia valori che vanno dal valore 1 al valore 7 in funzione dello SL. Nel metodo proposto tale campo di variazione è assunto come dominio dell'esponente di sicurezza<sup>6</sup>. Essendo la misura della sicurezza positiva se  $n \geq 4$ , il valore 7 rappresenta il valore ottimale di partenza, qualora il manufatto in esame sia progettato ed eseguito nel rispetto delle norme.

Occorre stabilire una Fuzzy Relation tra il giudizio di gravità  $G_{ij}$  di una manifestazione di degrado e la stima dell'esponente di sicurezza  $N^7$ , adottando una composizione fuzzy del tipo:

$$\tilde{R}(\tilde{G} \times \tilde{N}) = \tilde{R}(\tilde{G} \cap \tilde{W}) \circ \tilde{R}(\tilde{W} \times \tilde{N}) \quad (3.2)$$

Ovvero mettendo in relazione, tramite inferenza, l'intersezione tra giudizio e peso  $\tilde{R}(\tilde{G} \cap \tilde{W})$  (3.1) e la relazione tra peso ed esponente di sicurezza  $\tilde{R}(\tilde{W} \times \tilde{N})$ .

<sup>6</sup> Di seguito sarà scelto un dominio che va da 2 a 7; la scelta del dominio dipende dallo SL.

<sup>7</sup>  $N$  indica l'esponente di sicurezza espresso in termini vettoriali,  $n$  indica l'esponente di sicurezza come scalare.

Il valore della fuzzy relation  $\tilde{R}(\tilde{G} \cap \tilde{W})$  è noto, dalla (3.1), mentre al fine di ricavare la fuzzy relation  $\tilde{R}(\tilde{W} \times \tilde{N})$  è necessario usare la procedura basata sul ragionamento logico. Si hanno così le seguenti regole di inferenza (Tab.3.2). La probabilità di fallimento  $P_f$  è legata sia al peso che il giudizio ha sulla sicurezza attuale del manufatto, sia al valore  $n$  dell'esponente di sicurezza, dal momento che può essere espressa come:  $P_f = 10^{-n}$  [3].

Tabella 3.2: Regole di inferenza.
<i>if <math>W_{ijk}</math> is Very Small then <math>P_f</math> is Very Small and <math>n</math> is Very Large</i>
<i>if <math>W_{ijk}</math> is Small then <math>P_f</math> is Small and <math>n</math> is Large</i>
<i>if <math>W_{ijk}</math> is Slightly Small then <math>P_f</math> is Slightly Small and <math>n</math> is Slightly Large</i>
<i>if <math>W_{ijk}</math> is Medium then <math>P_f</math> is Medium and <math>n</math> is Medium</i>
<i>if <math>W_{ijk}</math> is Slightly Large then <math>P_f</math> is Slightly Large and <math>n</math> is Slightly Small</i>
<i>if <math>W_{ijk}</math> is Large then <math>P_f</math> is Large and <math>n</math> is Small</i>
<i>if <math>W_{ijk}</math> is Very Large then <math>P_f</math> is Very Large and <math>n</math> is Very Small</i>

Ad ogni variabile linguistica attribuita all'esponente di sicurezza  $n$ , viene associata una funzione di appartenenza  $\mu(x)$ , che è stata scelta sempre di tipo triangolare in cui cambia solo il dominio di appartenenza, compreso tra  $n_{max} = 7$  e  $n_{min} = 2$ , come mostrato dalla Fig. 3.5. Le funzioni fuzzy corrispondenti all'esponente di sicurezza  $N$  sono rappresentate da vettori di dimensione  $1 \times N_e$ . In questo caso si è scelto  $N_e=21$  (Appendice A1).

$N =$  (Very Small (VSS), Small (SS), Slightly Small (SLSS), Medium (MS), Slightly Large (SLLS), Large (LS).e Very Large (VLS))



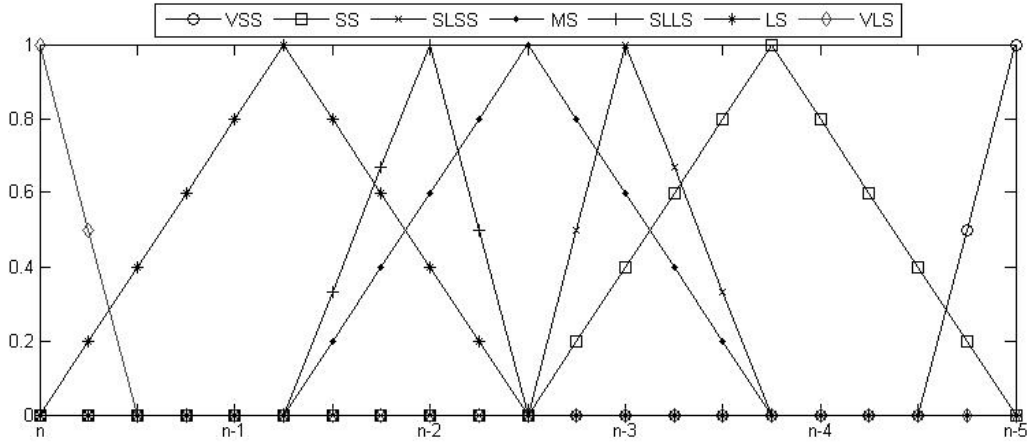


Figura 3.5: Membership functions per l'esponente di sicurezza  $n$

La relazione fuzzy  $\tilde{R}(\tilde{W} \times \tilde{N})$  può scriversi come segue:

$$\begin{aligned} \tilde{R}(\tilde{W} \times \tilde{N}) = & \tilde{R}_1(\tilde{W} \times \tilde{N}) \cup \tilde{R}_2(\tilde{W} \times \tilde{N}) \cup \tilde{R}_3(\tilde{W} \times \tilde{N}) \cup \tilde{R}_4(\tilde{W} \times \tilde{N}) \cup \tilde{R}_5(\tilde{W} \times \tilde{N}) \cup \dots \\ & \dots \cup \tilde{R}_6(\tilde{W} \times \tilde{N}) \cup \tilde{R}_7(\tilde{W} \times \tilde{N}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Ovvero l'unione dei prodotti cartesiani tra le singole funzioni fuzzy che descrivono peso ed esponente di sicurezza (3.4):

$$\begin{aligned} \tilde{R}_1(\tilde{W} \times \tilde{N}) &= WV L \times NVSS \\ \tilde{R}_2(\tilde{W} \times \tilde{N}) &= WL \times NSS \\ \tilde{R}_3(\tilde{W} \times \tilde{N}) &= WSLL \times NSLSS \\ \tilde{R}_4(\tilde{W} \times \tilde{N}) &= WM \times NMS \\ \tilde{R}_5(\tilde{W} \times \tilde{N}) &= WSLS \times NVSLLS \\ \tilde{R}_6(\tilde{W} \times \tilde{N}) &= WS \times NLS \\ \tilde{R}_7(\tilde{W} \times \tilde{N}) &= WVS \times NVLS \end{aligned} \quad (3.4)$$

Una Fuzzy Relation è un insieme fuzzy definito su più domini (insieme fuzzy multidimensionale).

Ad esempio dalla relazione fuzzy  $\tilde{R}_1(\tilde{W} \times \tilde{N}) = WV L \times NVSS$  si ottiene  $\mu_{R(x,y)} = \min\{\mu_{W(x)}, \mu_{N(y)}\}$  sul dominio  $X [0,1]$  e sul dominio  $Y [n_{min}, n_{max}] = Y [2,7]$ .

Una volta espresse le relazioni fuzzy  $R_i$  (con  $i=1, \dots, 7$ ), si procede con l'operazione di unione tra le relazioni fuzzy  $R_i$  in  $X \times Y$ . Si definisce unione di tali relazioni la relazione fuzzy espressa nel seguente modo:

$$R_1 \cup R_2 = \{((x, y), \mu_{R_1 \cup R_2}(x, y)) \mid \mu_{R_1 \cup R_2}(x, y) = \max\{\mu_{R_1}(x, y), \mu_{R_2}(x, y)\} \quad \text{Con } (x, y) \in X \times Y.$$

Nella Fig.3.6 e nella Fig. 3.7 si mostra graficamente il risultato della relazione  $\tilde{R}(\tilde{W} \times \tilde{N})$ . Si ottiene una matrice di dimensioni  $N_f \times N_e$ , ovvero 41x21 (Appendice A3).

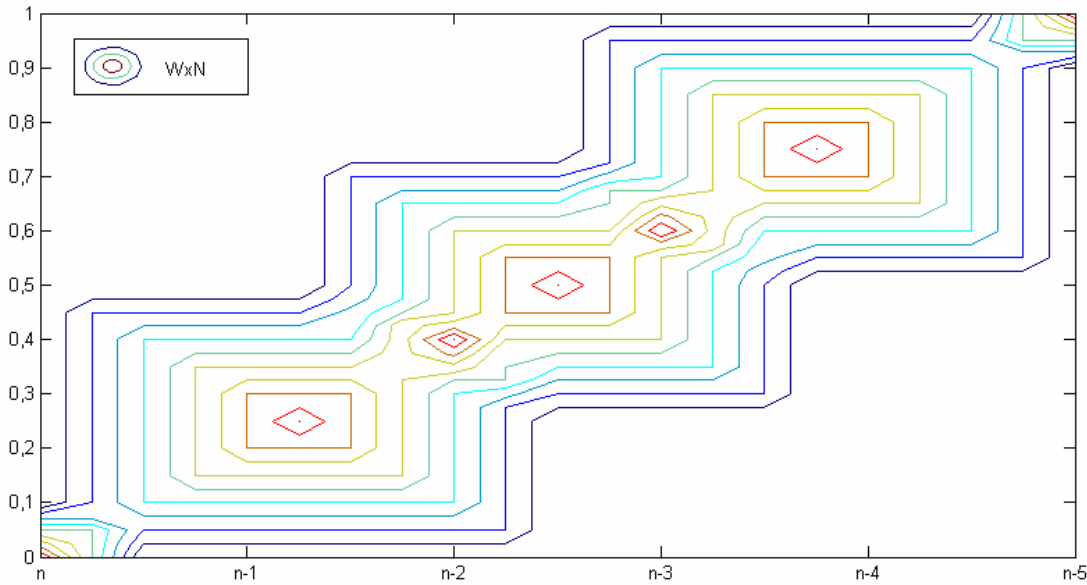


Figura 3.6: Risultato WxN visto nel piano X e Y

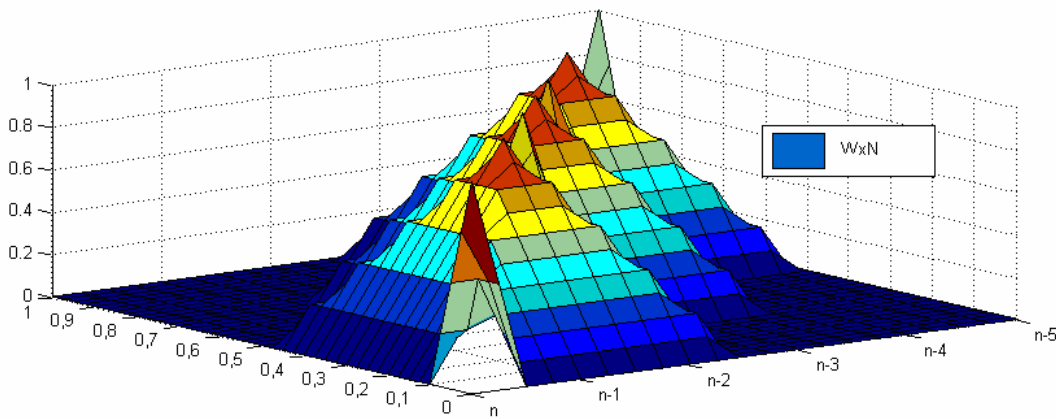


Figura 3.7: Risultato WxN visto nello spazio

La Fuzzy Relation (3.2) combina le relazioni fuzzy in differenti spazi prodotto. In questo studio si è fatto riferimento alla composizione di relazioni fuzzy proposta da Zadeh [8].

Il risultato di questa composizione (Fig. 3.8, Fig. 3.9, Appendice A4) è un insieme fuzzy la cui funzione di appartenenza risulta essere:

$$\mu_{\tilde{R}(\tilde{G} \times \tilde{N})} = \sup(\min\{\mu_{\tilde{R}(\tilde{G} \cap \tilde{W})}, \mu_{\tilde{R}(\tilde{W} \times \tilde{N})}\})$$

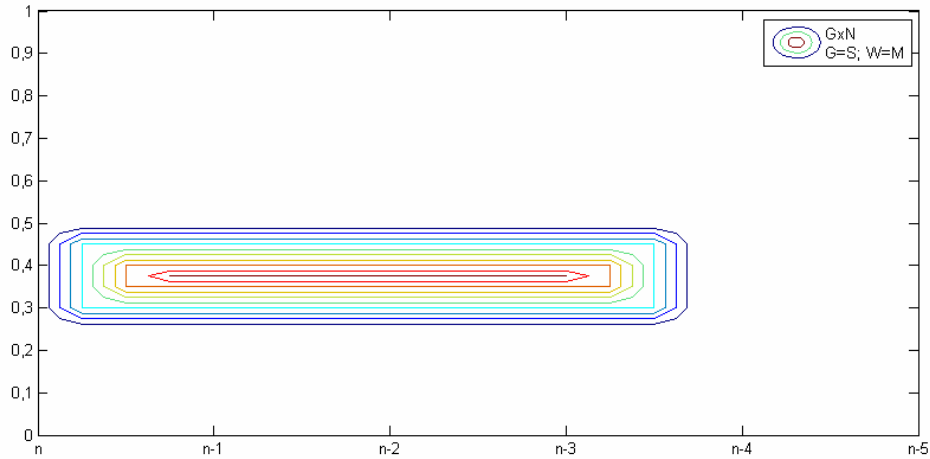


Figura 3.8: Risultato  $GxN$  visto nel piano  $X$  e  $Y$

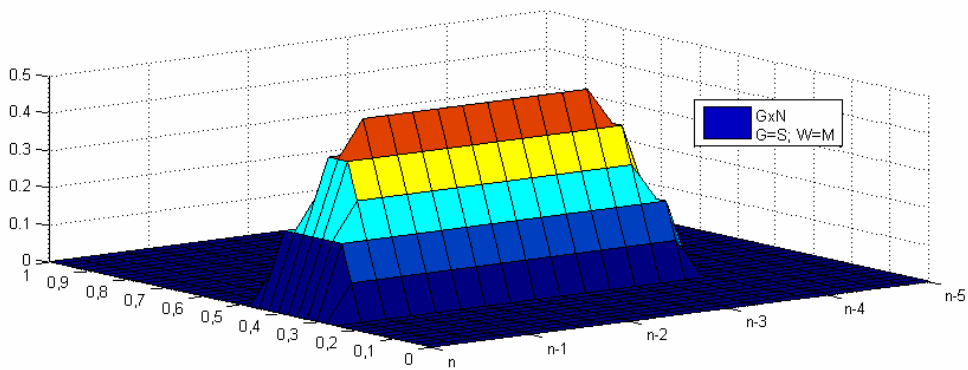


Figura 3.9: Risultato  $GxN$  visto nello spazio

Il risultato della procedura di inferenza fornisce la relazione tra il peso sulla sicurezza e l'esponente di sicurezza, tale risultato viene espresso da una matrice di dimensione  $N_e \times 1$  monodimensionale che si ottiene considerando il valore massimo di ogni colonna della matrice finale  $(\tilde{G} \times \tilde{N})$ .

$$n_j = \max(\mu_{\tilde{R}(\tilde{G} \times \tilde{N})})_{j,i \in [0,1]}$$

Nella Fig. 3.10 viene rappresentato il valore del coefficiente di sicurezza  $n$  fuzzyficato attribuendo al giudizio  $G_{ij}$ =Small e al peso  $W_{ijk}$ =Medium, tale risultato, viene espresso da una matrice monodimensionale di dimensione  $41 \times 1$  (Appendice A5).

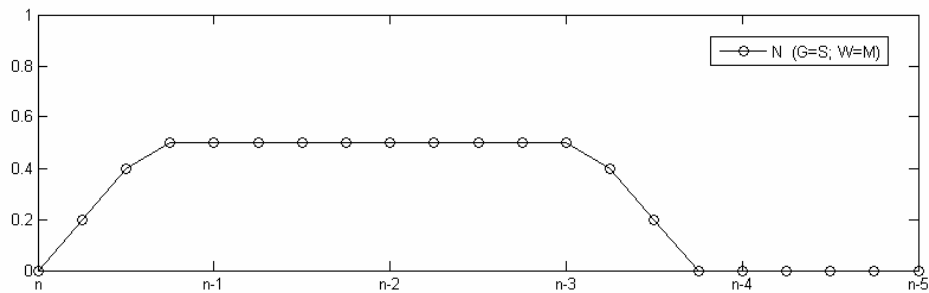


Figura 3.10: Coefficiente di sicurezza  $G_{ij}=\text{Small}$ ,  $W_{ijk}=\text{Medium}$

Per quantificare l'effetto che il peso ha sul valore dell'esponente di sicurezza occorre valutare il suo valore defuzzificando il risultato (Fig. 3.10, Appendice A5) ottenuto in termini di fuzzy set. E' necessario, infatti, ottenere il valore dell'esponente di sicurezza  $n$  come numero reale per poterlo poi confrontare con il valore dello stesso assunto a priori<sup>8</sup> a seconda dello stato limite di riferimento (2.1).

In letteratura [3] la defuzzyficazione si ottiene estraendo il valore minimo dell'esponente  $n$  cui corrisponde la membership massima. In questo caso però, i risultati ottenuti non sono soddisfacenti perché non si registra una variazione proporzionale al variare del giudizio e del peso. Nella letteratura specifica, riguardante in modo peculiare la logica fuzzy [10], [11], questo valore può essere ottenuto in vari modi come il metodo del centro dell'area e il metodo della media dei massimi. Nel caso specifico si è ritenuto conveniente assumere per  $n$  il valore medio tra il valore massimo e il valore minimo fra quelli con membership massima.

Attribuendo ad  $G_{ij}=\text{Small}$  e  $W_{ijk}=\text{Medium}$  si ottiene  $n= 5,12$ , con il valore massimo pari a 6,25 e il valore minimo pari a 4,00.

<sup>8</sup> Nel metodo proposto il valore di  $n$  assunto a priori è pari a 7.


# Capitolo 4

## Struttura isostatica

Per dimostrare le potenzialità del metodo proposto, si mostra in dettaglio una serie di simulazioni applicate ad una generica trave in cemento armato, semplicemente appoggiata, soggetta ad un forte degrado [14], [15].

Si ipotizza che la trave, sottoposta ad ispezione visiva, sia caratterizzata dalle manifestazioni di degrado indicate nella Tab. 4.1. Queste manifestazioni di degrado pregiudicano la capacità portante dell'elemento strutturale e per questo motivo sono definite come SLU [10].

Tabella 4.1: Scheda di Valutazione.

Elemento strutturale E	Manifestazioni di degrado $E_i$
Trave in cemento armato 	$E_1$ Fessure a taglio
	$E_2$ Fessure a momento
	$E_3$ Presenza di nidi di ghiaia

Nella Tab. 4.2 si mostra, per ogni manifestazione di degrado, il giudizio linguistico soggettivo che l'operatore può attribuire durante l'ispezione visiva.

Tabella 4.2: Scheda di Valutazione del degrado e conseguente valore dell'esponente di sicurezza.

Manifestazione di degrado $E_i$	Giudizio linguistico $G_{ij}$		Obiettivo: sicurezza attuale $W_{ijk}$		Esponente di sicurezza $n$
$E_1$ Fessure a taglio	Small	$G_{11}$	Medium	$W_{114}$	5,12
	Medium	$G_{12}$	Large	$W_{126}$	3,88
	Large	$G_{13}$	Very Large	$W_{137}$	3,00
$E_2$ Fessure a momento	Small	$G_{21}$	Slightly Small	$W_{213}$	5,62
	Medium	$G_{22}$	Medium	$W_{224}$	4,5
	Large	$G_{23}$	Large	$W_{236}$	3,25
$E_3$ Presenza dei nidi di ghiaia	Small	$G_{31}$	Very Small	$W_{311}$	6
	Medium	$G_{32}$	Small	$W_{322}$	5,12
	Large	$G_{33}$	Medium	$W_{334}$	3,88

Il personale esperto assegna, prima che l'ispezione venga effettuata, per ogni tipo di degrado  $E_i$ , il peso  $W_{ijk}$  che ogni giudizio  $G_{ij}$  ha sulla sicurezza attuale del manufatto (obiettivo). Per i giudizi linguistici  $G_{ij}$  e per i pesi  $W_{ijk}$  sono state utilizzate le funzioni di appartenenza mostrate nelle Fig.3.1 e Fig. 3.2.

Si ipotizza che la struttura in esame sia stata progettata e costruita in conformità con le norme vigenti nell'anno di costruzione. Con questa ipotesi si può assumere a priori un valore del coefficiente di sicurezza  $n$  pari a 7.

Per l'esponente di sicurezza si sono usate le funzioni di appartenenza, come mostrato nella Fig. 3.5.

Ad ogni manifestazione di degrado  $E_i$  si sono applicate le procedure di fuzzyficazione, inferenza e defuzzyficazione (Cap. 3). Per ogni tipo di degrado  $E_i$ , al variare del giudizio linguistico  $G_{ij}$  soggettivo attribuito durante l'ispezione, si è ottenuto l'esponente defuzzyficato di sicurezza  $n$  (Tab.4.2).

Con questa procedura si ha un'indicazione di come le manifestazioni di degrado, rilevate durante l'ispezione visiva, possano pregiudicare la sicurezza della struttura sotto esame. Il degrado, infatti, determina un abbassamento del coefficiente di sicurezza assunto pari a 7.

Dalla Tab. 4.2 si evince come, per ogni manifestazione di degrado, tramite l'esponente di sicurezza  $n$ , si ricavi la probabilità di fallimento  $P_f$ . Lo scopo è quello di stabilire come ogni manifestazione di

degrado possa alterare il valore di  $P_f$  assunto a priori ( $P_f = 10^{-7}$ ) e inoltre come ricavare la probabilità di fallimento  $P_f$  complessiva della trave dovuta alla contemporanea presenza delle manifestazioni di degrado  $E_i$ .

Si propone di operare in modo analogo a quanto si fa per valutare la probabilità di fallimento nel caso di un progetto strutturale per il quale si abbiano più cause di insuccesso.

Si assume un meccanismo a catena, in serie, nel quale la probabilità di insuccesso di ogni singola manifestazione di degrado, viene identificata con la probabilità di rovina di un singolo anello della catena e che, la probabilità di insuccesso dell'intera catena, nell'ipotesi di indipendenza dei risultati di ogni singolo anello, assuma la nota espressione [3], [17], [18]:

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_{f_i}) \quad (4.1)$$

$m$  è il numero delle manifestazioni di degrado.

### **Analisi dei risultati.**

Nella Tab. 4.3 sono presenti i risultati ottenuti dando differenti giudizi linguistici per ogni tipo di manifestazione di degrado.

Tabella 4.3: Risultati

Manifestazione di degrado $E_i$	Giudizio linguistico $G_{ij}$	Obiettivo: attuale $W_{ijk}$	sicurezza Esponente di sicurezza finale $n$
<b>Esempio 1</b>			
$E_1$ Fessure a taglio	$G_{13}$ (Large)	$W_{137}$ (Very Large)	2,77
$E_2$ Fessure a momento	$G_{23}$ (Large)	$W_{236}$ (Large)	
$E_3$ Nidi di ghiaia	$G_{33}$ (Large)	$W_{334}$ (Medium)	
<b>Esempio 2</b>			
$E_1$ Fessure a taglio	$G_{11}$ (Small)	$W_{114}$ (Medium)	4,96
$E_2$ Fessure a momento	$G_{21}$ (Small)	$W_{213}$ (Slightly Small)	
$E_3$ Nidi di ghiaia	$G_{31}$ (Small)	$W_{311}$ (Very Small)	
<b>Esempio 3</b>			
$E_1$ Fessure a taglio	$G_{13}$ (Large)	$W_{137}$ (Very Large)	2,99
$E_2$ Fessure a momento	$G_{21}$ (Small)	$W_{213}$ (Slightly Small)	
$E_3$ Nidi di ghiaia	$G_{31}$ (Small)	$W_{311}$ (Very Small)	

Esempio 4			
E <sub>1</sub> Fessure a taglio	G <sub>11</sub> (Small)	W <sub>114</sub> (Medium)	3,85
E <sub>2</sub> Fessure a momento	G <sub>21</sub> (Small)	W <sub>213</sub> (Slightly Small)	
E <sub>3</sub> Nidi di ghiaia	G <sub>33</sub> (Large)	W <sub>334</sub> (Medium)	
Esempio 5			
E <sub>1</sub> Fessure a taglio	G <sub>11</sub> (Small)	W <sub>114</sub> (Medium)	3,24
E <sub>2</sub> Fessure a momento	G <sub>23</sub> (Large)	W <sub>236</sub> (Large)	
E <sub>3</sub> Nidi di ghiaia	G <sub>31</sub> (Small)	W <sub>311</sub> (Very Small)	

Si considera il caso (Esempio 1, Tab. 4.3) in cui un operatore dia giudizio linguistico soggettivo  $G_{ij}$  Large per le manifestazioni di degrado  $E_i$  (con  $i=1,2,3$ ) presenti nell'opera oggetto di indagine visiva. Nonostante il giudizio di gravità sia lo stesso per le tre manifestazioni di degrado, il peso, che ogni singola manifestazione ha sulla sicurezza strutturale, è diverso. Secondo la scheda di valutazione redatta da personale esperto, si può osservare come il peso  $W_{ijk}$  vari a seconda dell'importanza che la manifestazione di degrado ha sulla sicurezza attuale: rispettivamente Very Large, Large, Medium.

Il giudizio  $G_{ij}$  e il peso  $W_{ijk}$  sono stati combinati con la procedura (3.1). Si è quindi valutato se l'effetto combinato del giudizio e del peso, relativi al singolo degrado, siano in grado di alterare il livello di sicurezza assunto a priori per l'opera sottoposta a ispezione visiva ( $n=7$ ).

Utilizzando la composizione fuzzy espressa da (3.2), si ottiene una matrice che mette in relazione il giudizio soggettivo, espresso dall'operatore, con l'esponente di sicurezza (Fig. 4.1, Fig. 4.2, Fig. 4.3).

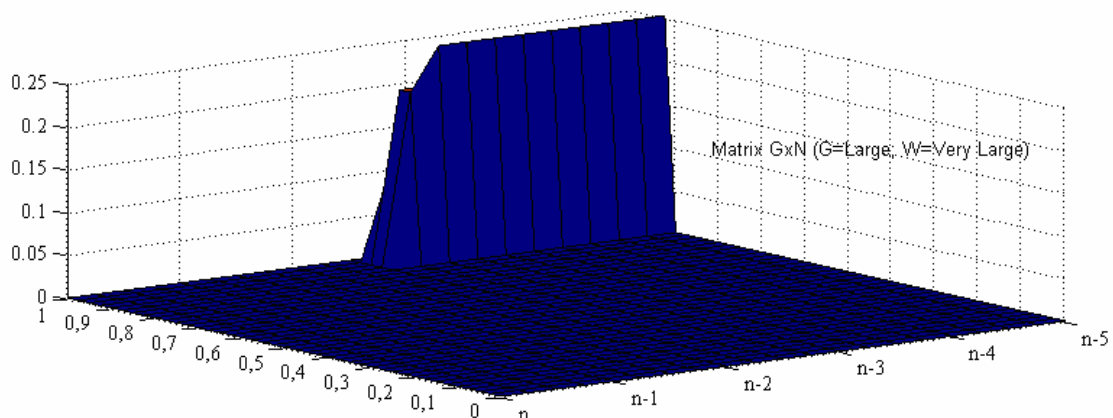


Figura 4.1: Matrice ( $G \times N$ ), esempio 1,  $E_1$



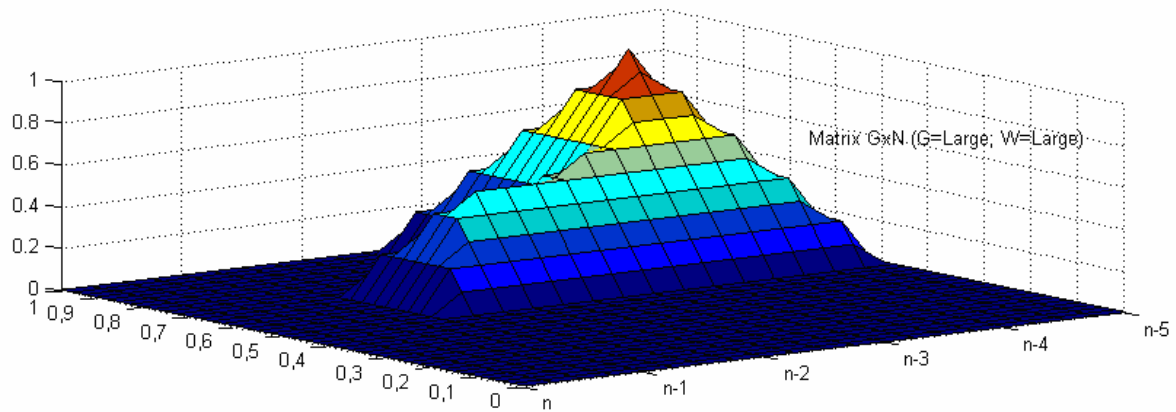


Figura 4.2: Matrice (GXN), esempio 1,  $E_2$

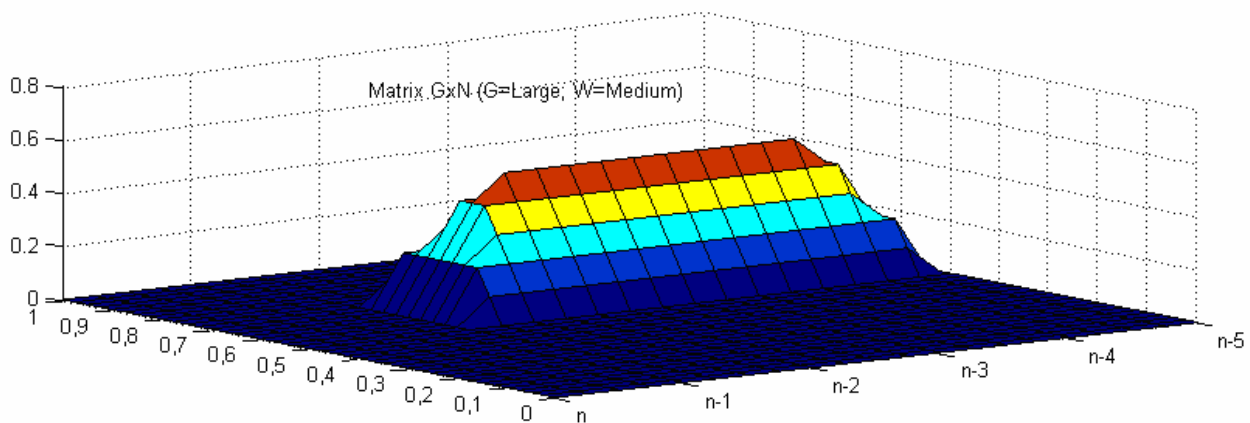


Figura 4.3: Matrice(GXN), esempio1,  $E_3$

Quindi, per la manifestazione di degrado  $E_1$  si ottiene come risultato della procedura fuzzy il vettore indicato nella Fig. 4.4 ottenendo, con la procedura di defuzzyficazione, l'esponente di sicurezza  $n=3$  di cui alla Tab. 4.2, mentre per le manifestazioni di degrado  $E_2$  ed  $E_3$  si ottengono, rispettivamente i risultati (Tab.4.2)  $n=3,25$  e  $n=3,88$ , rispettivamente, come mostrato Fig. 4.5 e Fig. 4.6.

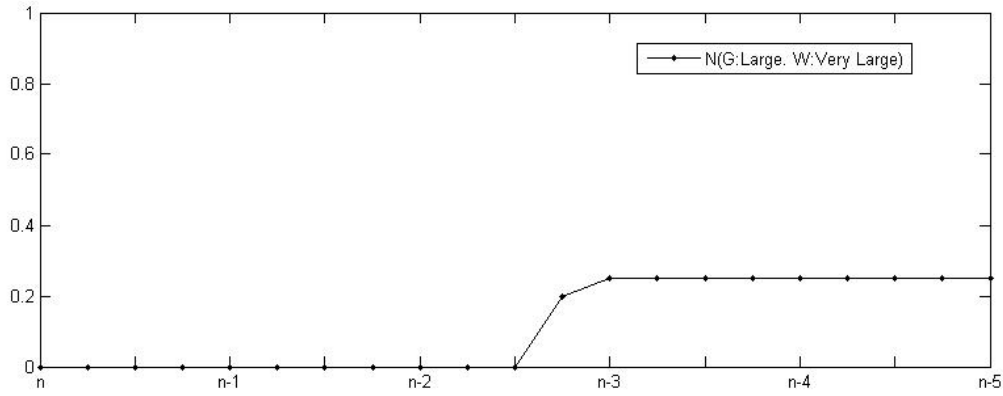


Figura 4.4: *Esponente di sicurezza  $E_1$ , esempio 1*

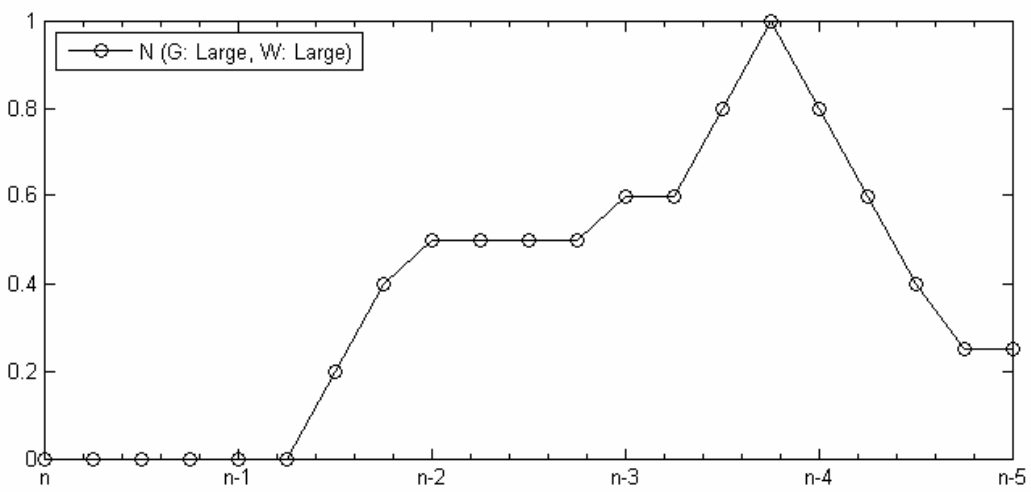


Figura 4.5: *Esponente di sicurezza  $E_2$ , esempio 1*

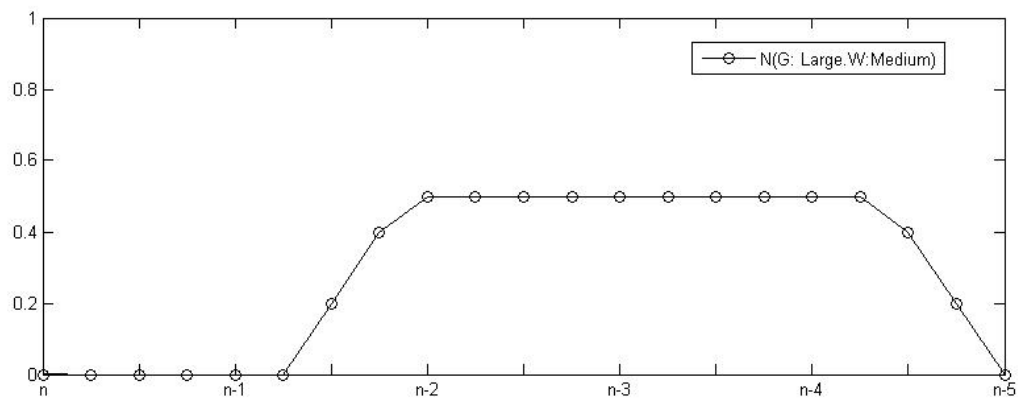


Figura 4.6: *Esponente di sicurezza  $E_3$ , esempio 1*

Si ottiene, per l'esempio 1, un esponente di sicurezza finale (4.1), dovuto alla contemporanea presenza delle tre manifestazioni di degrado, pari a  $n = 2,77$ .

Infatti, nel caso in esame:

$$P_f = 1 - \left[ (1 - 10^{-3}) \cdot (1 - 10^{-3,25}) (1 - 10^{-3,88}) \right] \quad \text{da cui} \quad n = \text{Log}_{10} \left( \frac{1}{P_f} \right) = 2,77$$

Si è di fronte ad una situazione di gravità, nell'esempio, la misura della sicurezza è negativa. Di fatto, i coefficienti di sicurezza per ogni manifestazione di degrado, risultano avere un valore inferiore a 4 rispettivamente  $n=3$  ( $G_{ij}=L$ ,  $W_{ijk}=VL$ ),  $n=3,25$  ( $G_{ij}=L$ ,  $W_{ijk}=L$ ),  $n=3,88$  ( $G_{ij}=L$ ,  $W_{ijk}=M$ ). La presenza simultanea delle tre manifestazioni di degrado riduce ulteriormente questo valore, come previsto in un procedimento il cui fine sia quello di andare a vantaggio della sicurezza.

Si è quindi simulata la situazione opposta (Esempio 2, Tab. 4.3), vale a dire quella in cui l'operatore dia il giudizio linguistico Small a tutte e tre le manifestazioni di degrado. Secondo la Tab. 4.2 si può osservare come il peso, deciso a priori dagli esperti, sia differente per ogni manifestazione di degrado e, rispettivamente, Medium, Slightly Small e Very Small (Tab. 4.2).

Si può notare, come indicato in precedenza, che pur mantenendo lo stesso giudizio linguistico Small, il peso, sulla valutazione della sicurezza, vari e si ottengono per l'esponente valori che aumentano al diminuire del peso. In questo caso particolare si ottengono valori di  $n$  superiori a 4 rispettivamente  $n=5,12$  ( $G_{ij}=S$ ,  $W_{ijk}=M$ ),  $n=5,62$  ( $G_{ij}=S$ ,  $W_{ijk}=SS$ ),  $n=6$  ( $G_{ij}=S$ ,  $W_{ijk}=VS$ ), come mostrato in Fig. 4.7, Fig. 4.8, Fig. 4.9 .

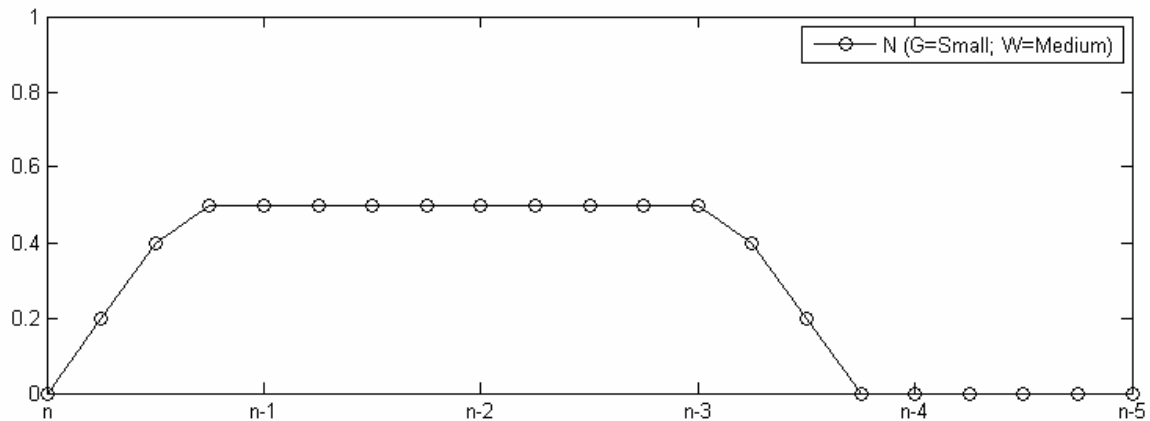


Figura 4.7: Esponente di sicurezza  $E_1$ , esempio 1

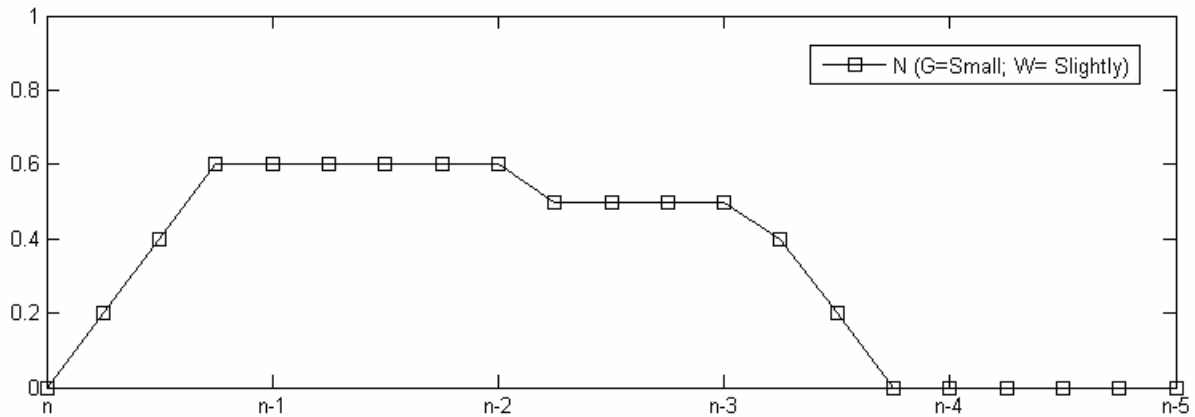


Figura 4.8: Esponente di sicurezza  $E_2$ , esempio 2

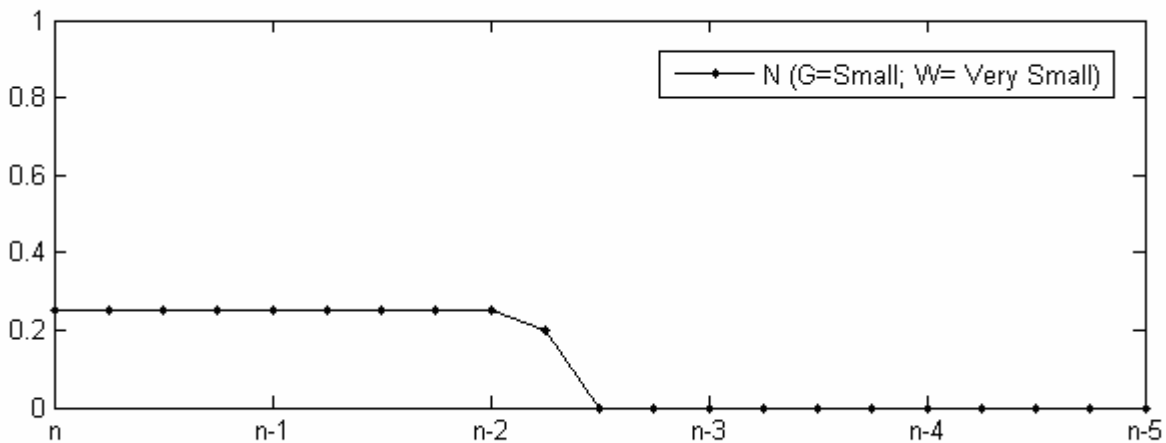


Figura 4.9: Esponente di sicurezza  $E_3$ , esempio 3

Applicando la (4.1) si ottiene che il valore dell'esponente di sicurezza, quando sono presenti contemporaneamente le tre manifestazioni di degrado, risulta pari a 4,96, valore superiore a 4. La misura della sicurezza in questo caso risulta positiva.

Si considera ora il caso (Esempio 3, Tab. 4.3) in cui l'operatore dia per la manifestazione di degrado  $E_1$  giudizio linguistico di gravità Large, mentre per le manifestazioni  $E_2$  e  $E_3$  dia giudizio Small. In questo esempio solo la manifestazione di degrado  $E_1$  dà un valore di  $n$  inferiore a 4 (Fig. 4.4, Tab. 4.2), mentre il valore dell'esponente per le manifestazioni di degrado  $E_2$ ,  $E_3$  risulta rispettivamente pari a 5,62 (Fig. 4.8) e 6 (Fig. 4.9). L'esponente di sicurezza, a causa della contemporanea presenza delle tre manifestazioni di degrado, risulta pari a 2,99, ben al di sotto di 4. La manifestazione di degrado  $E_1$ , pertanto, incide pesantemente sulla misura della sicurezza, questo deriva direttamente

dal peso che essa ha sulla sicurezza attuale della struttura in esame, peso deciso a priori dal personale esperto.

Infatti, se l'operatore dà giudizio Large alla manifestazione di degrado  $E_3$  ( $n= 3,88$  Fig. 4.6) e Small per le manifestazioni  $E_1$  ( $n=5,12$  Fig. 4.8) ed  $E_2$  ( $n=5,62$  Fig. 4.9) (Esempio 4, Tab. 4.3), si ottiene che il coefficiente  $n$ , per la presenza simultanea delle tre manifestazioni di degrado, risulta essere 3,85. Questo risultato non si discosta molto dal valore limite 4, la presenza dei nidi di ghiaia, infatti, in una sezione, riduce l'area della sezione resistente del calcestruzzo.

Infine, si considera il caso (Esempio 5, Tab. 4.3) in cui l'operatore dia il giudizio Large per la manifestazione di degrado  $E_2$  ( $n= 3,25$ ) e Small per  $E_1$  ( $n= 5,12$ ) ed  $E_3$  ( $n= 6$ ), si ottiene un coefficiente di sicurezza finale pari a 3,24. Questo risultato, rispetto al precedente, si allontana dal limite 4 e ciò può essere facilmente spiegato con la considerazione che la corrosione delle barre longitudinali ha un peso maggiore (Large) rispetto alla presenza di nidi di ghiaia (Medium). Questi esempi vogliono essere una dimostrazione di come sia fondamentale il peso che viene attribuito a priori alle singole manifestazioni di degrado sull'obiettivo che si intende perseguire. Il ruolo degli esperti è fondamentale, infatti il risultato finale è fortemente influenzato dalla relazione giudizio-peso e non dal giudizio soggettivo che l'operatore non esperto esprime sulla manifestazione di degrado durante l'ispezione visiva.

Nel metodo proposto ha un ruolo determinante l'attribuzione del peso da parte del personale esperto.

Per chiarire questo concetto ipotizziamo che uno stesso elemento strutturale venga ispezionato da due operatori diversi (Tab. 4.4).

Tabella 4.4: Valutazione degrado da parte di due operatori distinti

Manifestazione di degrado $E_i$	Giudizio linguistico $G_{ij}$		Obiettivo: sicurezza attuale $W_{ijk}$		Esponente di sicurezza $n$
	Operatore				
$E_1$ Fessure a taglio	1	Medium	$W_{126}$	Large	3,88
	2	Large	$W_{137}$	Very Large	3,00

L'operatore 1 dà giudizio Medium alla manifestazione di degrado  $E_1$ , l'operatore 2, invece, attribuisce alla stessa manifestazione di degrado un giudizio Large. Si può notare come il risultato

dell'esponente di sicurezza sia, in entrambi i casi, inferiore al valore limite pari a 4, rispettivamente 3,88 (Fig. 4.10) e 3,00 (Fig. 4.4).

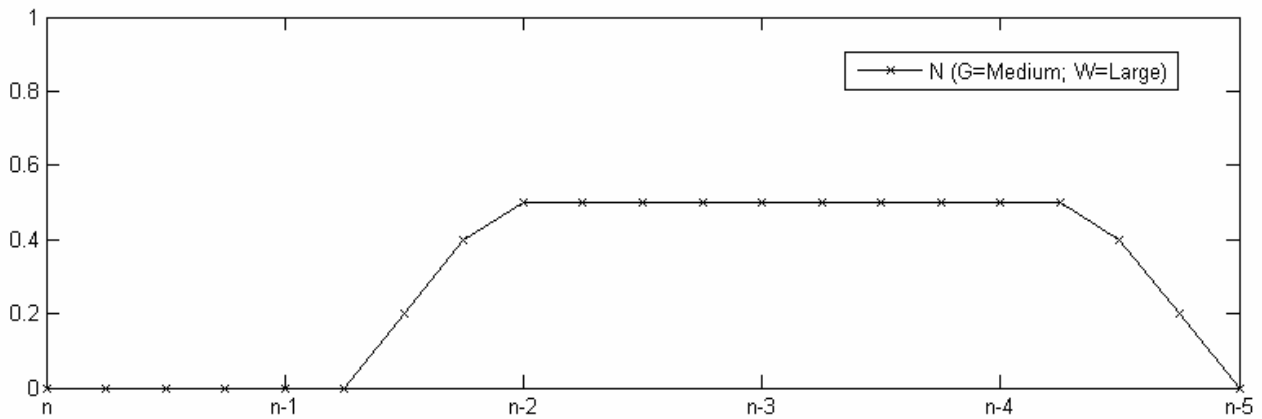


Figura 4.10: *Esponente di sicurezza  $G=M, W=L$*

La misura della sicurezza ha dato in entrambi i casi valore negativo. E' quindi chiaro che, più che il giudizio soggettivo dell'operatore, il parametro che influenza maggiormente il risultato sia il peso attribuito a ciascun tipo di degrado. Questo metodo è quindi affidabile. L'affidabilità deriva dalla capacità della logica fuzzy di affrontare l'incertezza.

## Capitolo 5

### Struttura iperstatica

La logica fuzzy, applicata all'ispezione visiva di manufatti, è stata proposta in relazione a strutture semplici come le strutture isostatiche e nel capitolo precedente si è fatto riferimento ad una trave semplicemente appoggiata. Le strutture isostatiche sono caratterizzate da un meccanismo di collasso unico e noto, che non varia né al variare della geometria, né al variare dei carichi. Il peso  $W_{ijk}$  che una manifestazione di degrado ha sulla sicurezza strutturale deve necessariamente tenere in conto questo aspetto. Diviene logico, ad esempio, che la corrosione dei ferri in mezzera all'intradosso di una trave semplicemente appoggiata, abbia maggior peso della stessa manifestazione di degrado all'estremità della trave [19].

In questo capitolo si intende applicare il metodo a strutture complesse come appunto le strutture iperstatiche.

Si è scelta una struttura iperstatica tipo come quella in Fig. 5.1 con particolare riferimento al telaio a due campate bidimensionale in cemento armato rappresentato in Fig. 5.2.

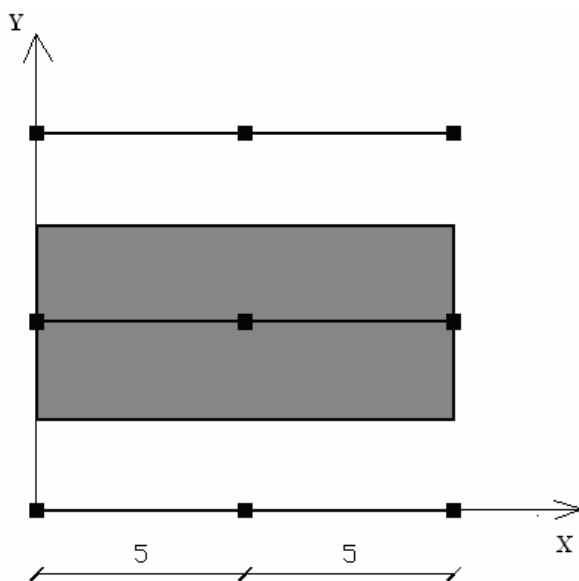


Figura 5.1: Vista in piana dell'edificio

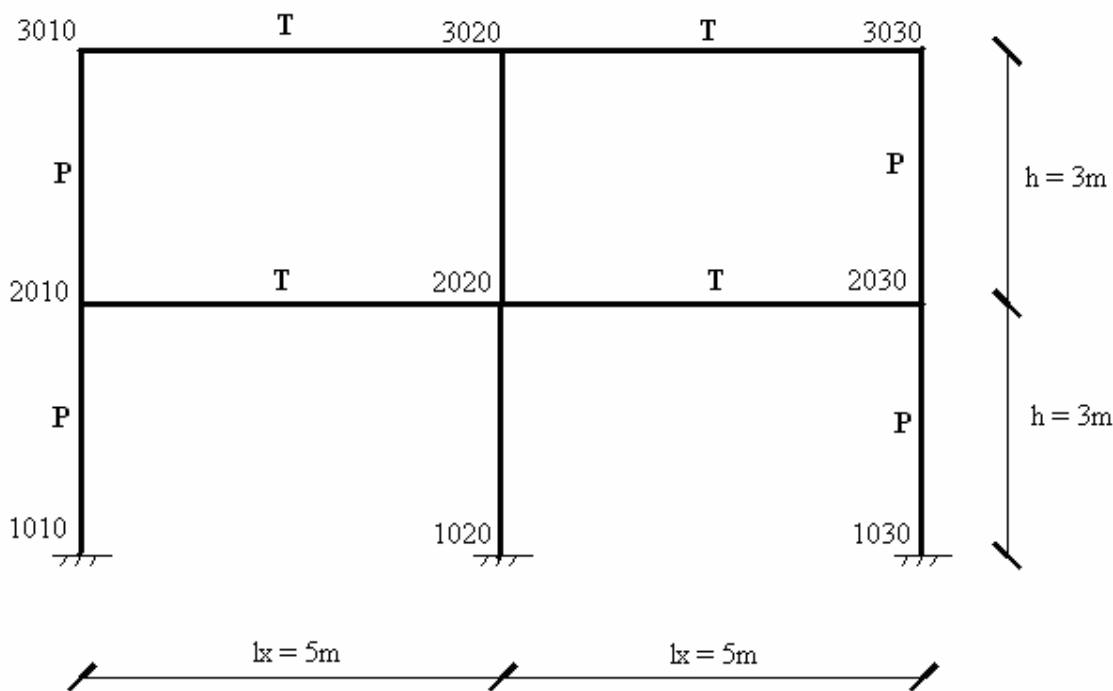


Figura 5.2: Vista frontale della struttura iperstatica tipo

La situazione si presenta maggiormente complessa, infatti il meccanismo di collasso nelle strutture iperstatiche non è unico, dipende oltre che dalla geometria, anche dall'entità e dalla disposizione dei carichi [20]. Ogni elemento strutturale ha un proprio peso all'interno di un meccanismo di collasso.

La manifestazione di degrado dipenderà, non solo dalla localizzazione nell'elemento strutturale, ma anche dall'importanza che l'elemento strutturale ha nell'insieme struttura.

Diviene necessario attribuire oltre al peso che una singola manifestazione di degrado ha sulla sicurezza attuale, anche il peso che l'elemento strutturale, sia esso trave, sia esso pilastro, ha sulla struttura nella sua totalità. E' altresì indispensabile assegnare una resistenza differenziata ai vari elementi strutturali in modo da capire quale sia l'elemento che cede prima rispetto agli altri.

A tal fine si è eseguita sulla struttura bidimensionale tipo (Fig. 5.2) un'analisi elastica non lineare a plasticità concentrata in accordo con EN 1998-1:2004 [21]. Lo scopo del presente studio non è quello di eseguire una verifica, ma è quello di individuare, tramite la formazione delle cerniere plastiche, le sezioni che raggiungono il limite di snervamento sino a formare un meccanismo di collasso [20]. Infatti, se la struttura in esame è iperstatica, cioè dotata di vincoli esterni in numero sovrabbondante rispetto a quelli staticamente sufficienti a garantire l'equilibrio, la nascita di una cerniera plastica generalmente non produce la labilizzazione; a tal fine è necessario che si attivino più cerniere in numero o posizioni tali da consentire un meccanismo.



Tramite la formazione delle cerniere plastiche e la localizzazione di quest'ultime, si possono individuare quali siano gli elementi che risultano la causa principale del cinematismo di collasso. Lo scopo è quello di attribuire un peso differente agli elementi strutturali di un manufatto esistente. L'ipotesi di considerare la struttura bidimensionale è valida, perché l'edificio scelto nell'esempio, risulta essere regolare in pianta, così come in elevazione.

Allo scopo verrà applicata alla struttura un'azione sismica. L'azione sismica sarà caratterizzata da una componente accelerometrica orizzontale del moto sismico. Per i calcoli verrà utilizzato il software DRAIN2DX<sup>1</sup>. Si applicheranno accelerogrammi di eventi sismici noti come quello relativo al terremoto di El Centro, Imperial Valley in California (USA) nel 1940 e al terremoto del Friuli (Italia) nel 1976, i cui diagrammi in funzione del tempo, verranno mostrati più avanti.

## 5.1 Analisi

### 5.1.1 Dati di input

#### 5.1.1.1 Geometria dell'edificio

$l_x = 5\text{m}$  lunghezza delle campate in direzione x;

$l_y = 4,5\text{m}$  lunghezza delle campate in direzione y;

$h = 3\text{m}$  altezza dei piani;

$h_f = 0,26\text{m}$  spessore solaio.

#### 5.1.1.2 Carichi variabili

Piani intermedi: Categoria di riferimento C1 (ambiente suscettibile di affollamento)

$q_k = 3 \text{ KN/m}^2$

Ultimo Piano: Categoria di riferimento H ( $H_1$  accessibili per la sola manutenzione)

$q_k = 0,5 \text{ KN/m}^2$

#### 5.1.1.3 Classe di duttilità

---

<sup>1</sup> DRAIN-2DX: Static and Dynamic Analysis of Inelastic Plane Structures, è un software sviluppato presso la University of Illinois a Urbana-Champaign e fornito dal professor Mark Aschheim. Programma agli elementi finiti per l'analisi sismica, lineare e non lineare, di telai piani.

La struttura sarà verificata per la classe di duttilità media (DCM). Le rotazioni delle colonne a livello di fondazione sono impedito (vincolo di incastro). Gli orizzontamenti verranno considerati infinitamente rigidi, ovvero si ipotizza che non vi siano spostamenti relativi tra i diversi punti sullo stesso piano. Questa ipotesi è valida data la natura del solaio, realizzato in cemento armato.

#### 5.1.1.4 Numerazione dei nodi

I numeri dei nodi inseriti nei dati di Input del programma sono indicati nella Fig. 5.2.

#### 5.1.1.5 Sezioni elementi trasversali

##### Colonne

Le proprietà geometriche della sezione utilizzata sono riassunte nella Tab. 6.1, dove:

$b_c$  è la larghezza della colonna in direzione  $y$ ;

$h_c$  è l'altezza della colonna in direzione  $x$ ;

$A_c$  è l'area delle sezioni trasversali;

$I_{cy}$  è il momento d'inerzia attorno all'asse  $y$ ;

$A_{cs}$  è l'area efficace a taglio:  $A_{cs} = 0,83 A_c$ .

Tabella 5.1: Proprietà geometriche delle sezioni trasversali delle colonne

cs	$b_c$ (cm)	$h_c$ (cm)	$A_c$ (cm <sup>2</sup> )	$I_{cy}$ (cm <sup>4</sup> )	$A_{cs}$ (cm <sup>2</sup> )
P	30	30	900	67500	747

Il tipo di sezione viene assegnato ad ogni colonna del telaio ed è rappresentato nella Fig. 5.2.

Le colonne del piano terra risultano possedere un'armatura pari a  $(3+3)\phi 14$  mentre quelle del piano primo possiedono un'armatura pari a  $(2+2)\phi 14$ .

##### Travi

Le sezioni delle travi sono a T con le proprietà geometriche riassunte nella Tab. 6.2, dove:

$b_w$  è la larghezza dell'anima in direzione  $y$ ;

$h_w$  è l'altezza dell'anima in direzione  $x$ ;

$b_f$  è la larghezza della flangia in direzione  $y$ ;

$h_f$  è l'altezza della flangia in direzione  $x$ ;

$A_b$  è l'area della sezione trasversale;

$z_g$  è la distanza del baricentro dal bordo superiore;

$I_{by}$  è il momento d'inerzia attorno all'asse  $y$ ;

$A_{bs}$  è l'area efficace a taglio:  $A_{bs} = b_w (h_w + h_f)$

Tabella 5.2: Proprietà geometriche delle sezioni trasversali delle travi

bs	$b_w$ (cm)	$h_w$ (cm)	$b_f$ (cm)	$h_f$ (cm)	$A_b$ (cm <sup>2</sup> )	$z_g$ (cm)	$I_{by}$ (cm <sup>4</sup> )	$A_{bs}$ (cm <sup>2</sup> )
T	30	50	186	26	6336	22	2238144	1680

Per quanto riguarda l'armatura presente nelle sezioni delle travi sono stati utilizzati rispettivamente  $4\phi 14$  in zona tesa e  $3\phi 14$  in zona compressa. Il tipo di sezione utilizzato per le travi è rappresentato nella Fig. 5.2.

#### 5.1.1.6 Carichi e masse

Tipi di carichi applicati alla struttura:

Carichi permanenti:

- $g_s$ : peso proprio del solaio =  $\gamma_c \cdot h_f = 25 \cdot 0,26 = 6,5 \text{ KN/m}^2$ ;
- $g_c$ : peso proprio colonne;
- $g_b$ : peso proprio travi;
- $g_f = 1 \text{ KN/m}^2$  permanenti portati copertura;
- $g_f = 0,5 \text{ KN/m}^2$  permanenti portati piani intermedi.

Carichi variabili:

- $q_k = 0,5 \text{ KN/m}^2$  variabili copertura;
- $q_k = 3 \text{ KN/m}^2$  variabili piani intermedi.

#### 5.1.1.7 Combinazioni di carico

Al fine di determinare le masse nodali, si è utilizzata la seguente combinazione dei carichi:

$$\sum G_{kj} \cup \sum \phi \psi_{Ei} Q_{ki}$$

Dove:

- $G_{kj}$  e  $Q_{ki}$  sono i valori caratteristici delle azioni permanenti e variabili, rispettivamente;
- $\phi$  è pari a 1 per la copertura e 0,8 per i piani intermedi;
- $\psi_{Ei}$  è un coefficiente di combinazione per la  $i$ -esima azione variabile, questi coefficienti tengono conto della probabilità che i carichi  $Q_{ki}$  non agiscano contemporaneamente sull'intera struttura durante il terremoto. Si assume il suo valore pari a 0,6 per le azioni va-

riabili in un edificio suscettibile ad affollamento, pari a 0 per l'azione variabile dovuta al vento o alla neve.

Per ogni piano, verrà considerata la seguente distribuzione dei carichi:

1. carichi distribuiti

- peso proprio del solaio:  $1,0 g_s l_y = 1 \cdot 6,5 \cdot 4,5 = 29,25$  KN/m
- peso proprio della trave in direzione x:  $1,0 \gamma_c b_w h_w = 1 \cdot 25 \cdot 0,3 \cdot 0,5 = 3,75$  KN/m
- carico variabile:  $1,0 \varphi 0,6 q_k l_y = 1 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 4,5 = 1,35$  KN/m copertura;
- carico variabile:  $1,0 \varphi 0,6 q_k l_y = 1 \cdot 0,8 \cdot 0,6 \cdot 3 \cdot 4,5 = 6,48$  KN/m piani intermedi;

2. carichi puntuali

- peso proprio della trave in direzione y:  $1,0 \gamma_c b_w h_w l_y = 3,75 \cdot 4,5 = 16,87$  KN;
- peso proprio della colonna superiore:  $1,0 \gamma_c b_{c,sup} h_{c,sup} h/2$ ;
- peso proprio della colonna inferiore:  $1,0 \gamma_c b_{c,inf} h_{c,inf} h/2$ .

I valori sono riportati nella Tab. 5.3.

Tabella 5.3: Valori dei carichi distribuiti su ogni piano

PIANI	COPERTURA	PIANO PRIMO
Carichi distribuiti (KN/m)		
Peso proprio solaio	29,25	29,25
Peso proprio trave in direzione x	3,75	3,75
Variabili	1,35	6,48
Carico totale	34,35	39,48
Carichi puntuali (KN) colonne esterne		
Peso proprio trave in direzione y	16,87	16,87
Colonna superiore	0	3,37
Colonna inferiore	3,37	3,37
$P_{e,tot}$	20,25	23,61
Carichi puntuali (KN) colonne interne		
Peso proprio trave in direzione y	16,87	16,87
Colonna superiore	0	3,37
Colonna inferiore	3,37	3,37
$P_{i,tot}$	20,25	23,61

### 5.1.1.8 Carichi nodali

Si assume che le travi risultino incastrate alle estremità. Pertanto le reazioni verticali e i momenti agli appoggi sono pari a:

$$R_i = \frac{q_{\text{tot}} \cdot l_x}{2} \quad M_i = \frac{q_{\text{tot}} \cdot l_x^2}{12}$$

Nei nodi i carichi orizzontali sono pari a zero, mentre i carichi verticali sono dati dalla somma delle reazioni  $R_i$  ed i carichi puntuali  $P_i$  indicati nella Tab. 5.3. Per quanto riguarda i momenti ai nodi  $M_i$ , essi devono essere sommati (con i loro segni) nei nodi interni. Uno schema per i carichi nodali rispetto al piano primo e rappresentato nella Fig.5.4.

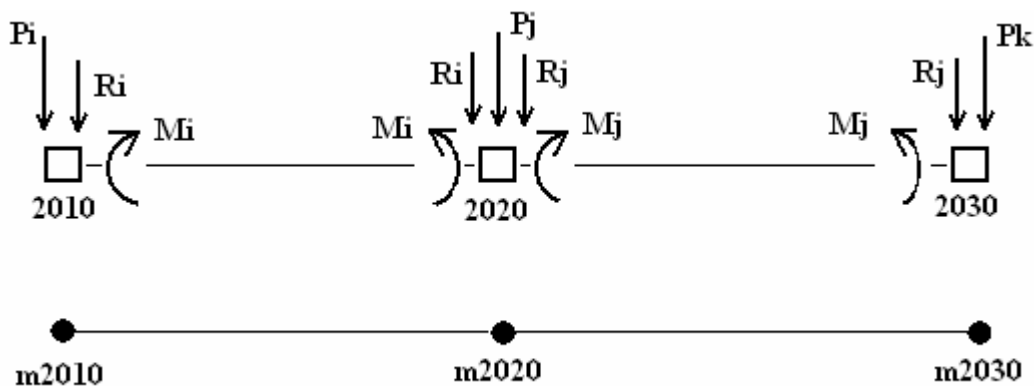


Figura 5.4: Carichi nodali e masse nodali

I valori dei carichi nodali agenti in ogni piano sono riportati nella Tab. 5.4, dove vengono distinti in nodi interni ed esterni.

Tabella 5.4: carichi verticali

PIANI	Nodi esterni				Nodi interni			
	$P_e$ (KN)	$R_e$ (KN)	$P_e + R_e$ (KN)	$M_e$ (KN·m)	$P_i$ (KN)	$R_i$ (KN)	$P_i + R_i$ (KN)	$M_i$ (KN·m)
Copertura	20,25	85,87	106,12	71,56	20,25	171,75	192	0
Primo piano	23,62	98,70	122,32	82,25	23,62	197,4	221,02	0

### 5.1.1.9 Masse nodali

Le masse nodali sono ottenute dividendo i carichi verticali concentrati in ogni nodo per l'accelerazione di gravità ( $g = 9,81 \text{ m/sec}^2$ ). Quindi per esempio per i nodi del piano primo (Fig. 6.4):

$$m_{2010} = \frac{P_i + R_i}{g} \quad m_{2020} = \frac{P_j + R_i + R_j}{g} \quad m_{2030} = \frac{P_j + R_j}{g}$$

In base alla convenzione dei segni adottata dal software DRAINDX risultano negative le forze rivolte verso il basso, i momenti positivi se hanno verso antiorario.

I valori delle masse nodali sono indicate nella Tab. 5.5.

Tabella 5.5: Masse nodali

PIANI	Nodo	Masse nodali m (KN/(cm/sec <sup>2</sup> ))
Copertura	3010	0,108
	3020	0,196
	3030	0,108
Piano primo	2010	0,125
	2020	0,225
	2030	0,125

## 5.2 Risultati ottenuti

Di seguito si presentano i risultati applicando dapprima l'accelerogramma relativo al terremoto di El Centro, Imperial Valley in California (1940) e quelli derivanti dall'applicazione dell'accelerogramma relativo all'evento sismico avvenuto in Friuli (1976) rappresentati rispettivamente in Fig. 5.5 e 5.6.

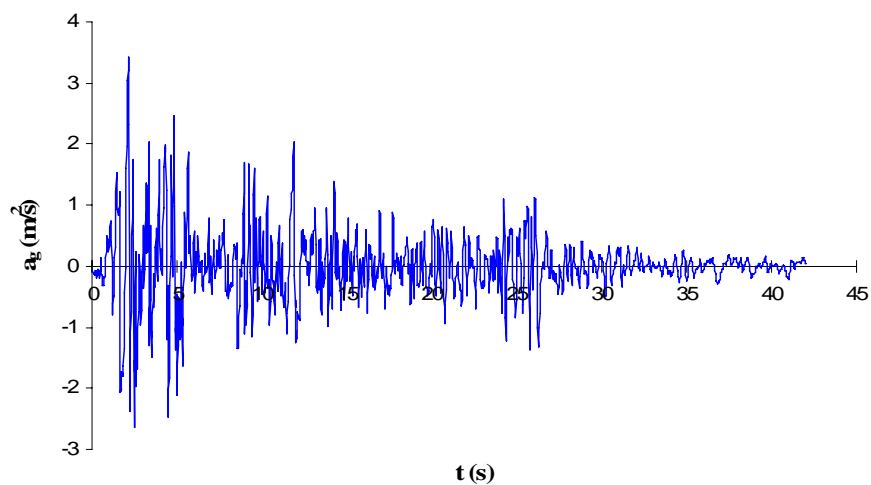


Figura 5.5: Accelerogramma El Centro (California), 1940

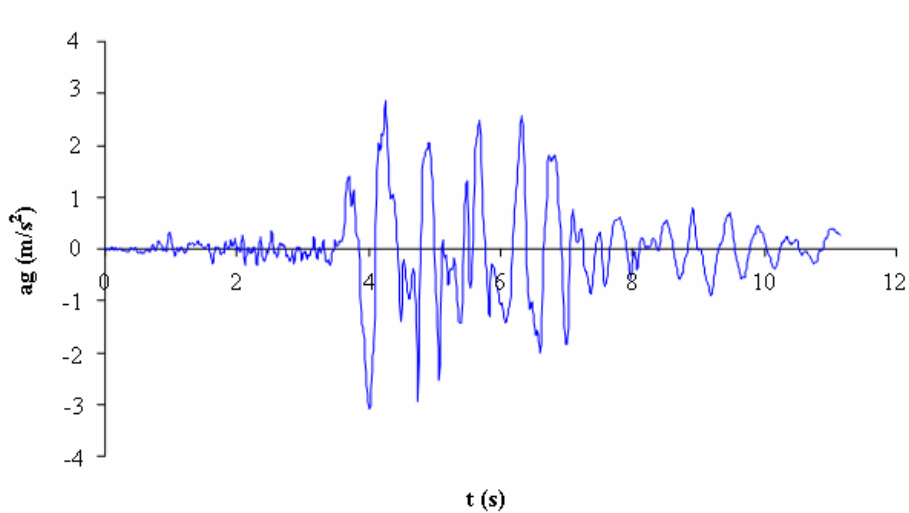


Figura 5.6: *Accelerogramma Friuli (Italia), 1976*

La storia dello sviluppo delle cerniere plastiche nella struttura in esame è rappresentato nella Fig. 5.7 (per il terremoto El Centro) e nella Fig. 5.8 (per il terremoto Friuli), dove i cerchi pieni rappresentano le cerniere plastiche formate al tempo  $t$ , mentre i cerchi vuoti simboleggiano le cerniere plastiche sviluppate in precedenza.

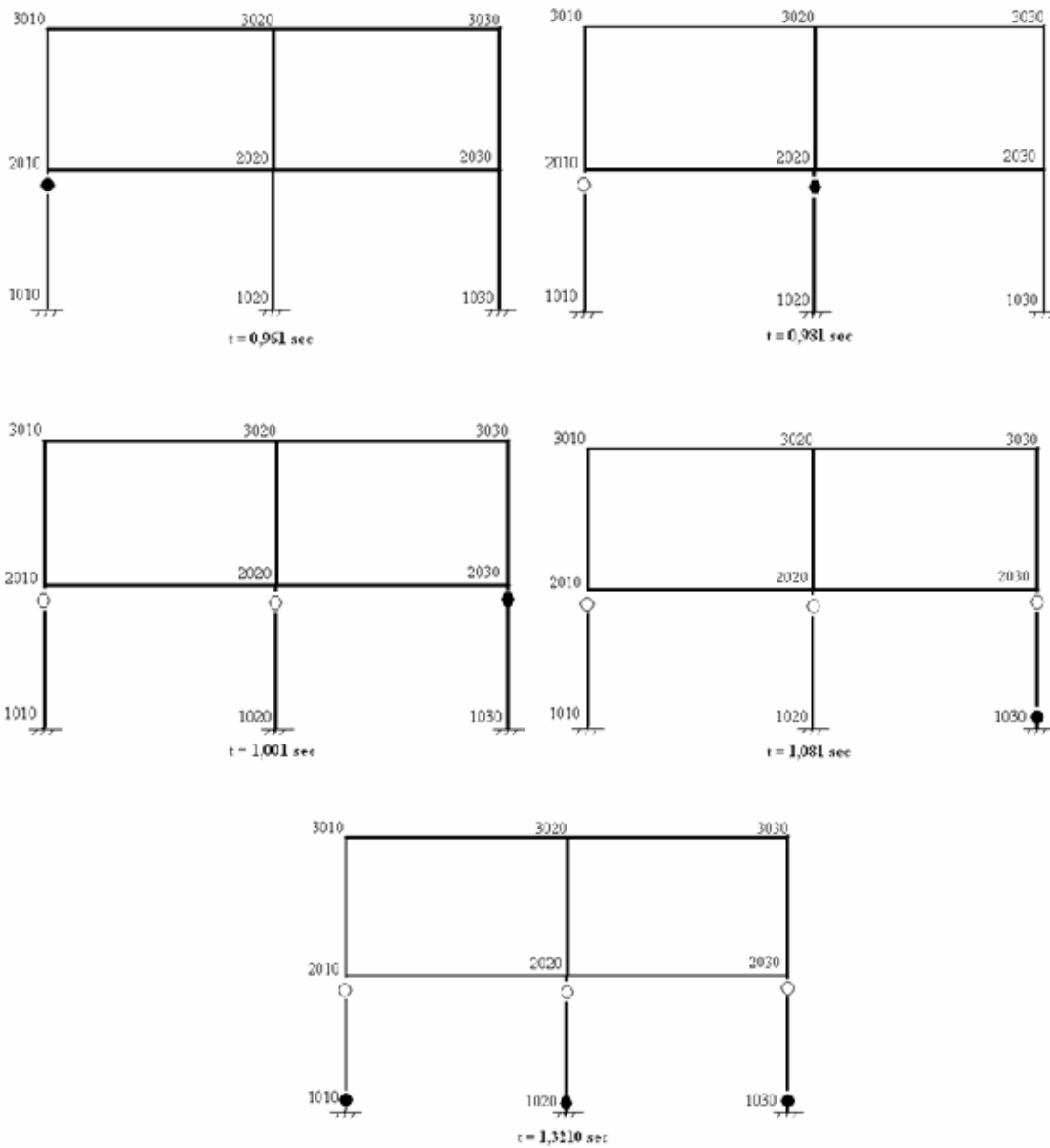


Figura 5.7: Storia della formazione delle cerniere plastiche terremoto El Centro



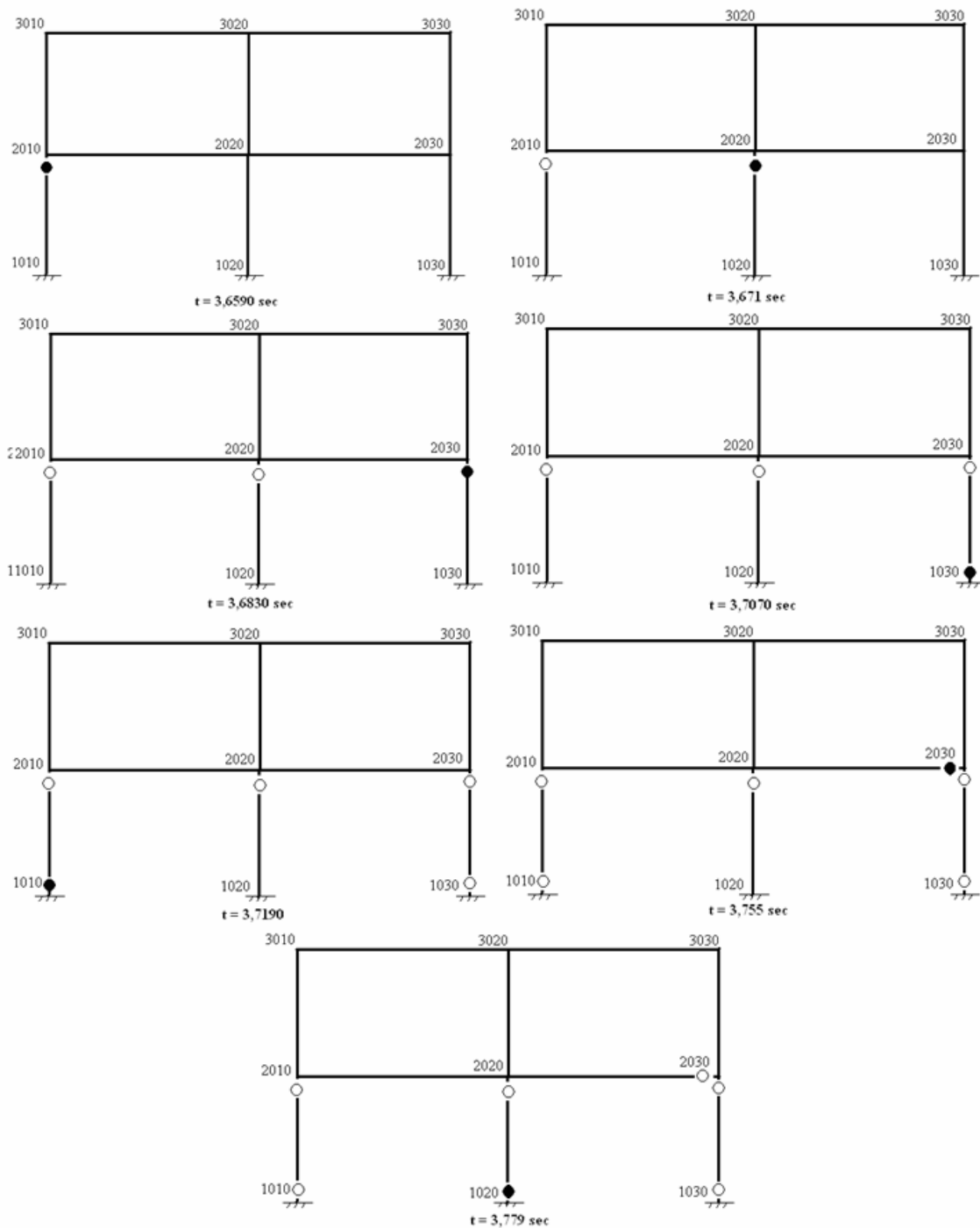


Figura 5.8: *Storia della formazione delle cerniere plastiche terremoto Friuli*

La prima cerniera plastica si forma nella sezione maggiormente sollecitata, e quindi, ad ogni ulteriore aumento del carico, si vengono a formare altre cerniere plastiche finché la struttura non si trasforma in un meccanismo. Questa non simultanea formazione delle cerniere plastiche comporta rotazioni plastiche rilevanti nelle cerniere che si sono formate per prime, per consentire la redistribuzione dei momenti fra le sezioni critiche [20].

Dalla Fig. 5.7 e dalla Fig. 5.8 si può notare come al tempo  $t=1,3210\text{sec}$  (terremoto El Centro) e al tempo  $t= 3,779\text{sec}$  (terremoto Friuli) nella struttura in esame, si sia formato il meccanismo di piano

soffice che comporta la plasticizzazione, anticipata rispetto alle travi, di gran parte dei pilastri del piano terra. Si è attivato in entrambi i casi un meccanismo fragile globale.

Risulta quindi evidente come una possibile riduzione di sezione, causata da un qualsivoglia danneggiamento, dei pilastri inferiori possa ulteriormente indebolire la struttura stessa e anticipare il collasso. Il peso che i pilastri del piano terra assumono rispetto agli altri elementi della struttura è senza alcun dubbio maggiore. Si potrebbe dare una gerarchia agli elementi seguendo la storia della formazione delle cerniere plastiche. Il problema è che questo tipo di analisi può essere effettuato solo quando del manufatto, oggetto di ispezione, si conosca perfettamente sia la geometria della struttura e delle sezioni, sia i carichi applicati. A questo punto diviene necessario attribuire a priori dei pesi ai vari elementi sfruttando l'impostazione di progetto dettata dalle norme attuali [22]. Queste ultime infatti, prevedono che le costruzioni in cemento armato, posseggano in ogni caso un'adeguata capacità di dissipare energia in campo inelastico per azioni cicliche ripetute, senza che ciò comporti riduzioni significative della resistenza nei confronti delle azioni sia verticali che orizzontali. Sono definite con chiarezza le regioni sedi di plasticizzazione. Queste sono studiate con attenzione in termini di duttilità disponibile e di accuratezza nel dettaglio. Sono accuratamente "aggirati" i modi di rottura non desiderati, in quanto fragili. Le regioni più fragili sono protette attraverso un accurato dimensionamento delle zone più duttili, che vengono "sacrificate" a questo fine. In tal modo le zone più fragili sono vincolate a restare elastiche.

A questo punto il peso che ogni elemento strutturale possiede in una struttura iperstatica può coincidere con il meccanismo ottimale di sviluppo delle plasticizzazioni.

Ragionando in termini di peso, si deve affidare ai pilastri maggiore peso rispetto alle travi, all'interno di questa differenziazione è necessario dare maggiore peso alle manifestazioni di degrado legate al taglio rispetto a quelle legate alla flessione. Quest'ultimo aspetto è stato già preso in considerazione quando si è considerata la struttura isostatica, infatti è stato dato maggiore peso  $W$  alle manifestazioni di degrado che provocano rotture di tipo fragile, come la fessurazione a taglio nell'estremità delle travi, rispetto alle manifestazioni di degrado legate alla flessione. Resta dunque il problema di affidare ai pilastri un maggiore peso rispetto alle travi. All'interno di questa diversità si dovrà tenere conto del fatto che i pilastri che formano il piano terra, hanno maggiore peso rispetto a quelli corrispondenti al piano primo. Viene a formarsi quindi la nuova Tab. 5.6 in cui viene aggiunta la colonna dei pesi  $WE$  che l'elemento strutturale ha all'interno della struttura in esame. Ad ogni elemento strutturale  $E_i$  viene attribuito, dal personale esperto, il peso  $WE_{ijkm}$  che esso ha all'interno della struttura tramite un insieme *crisp* di giudizi linguistici:  $WE_{ijkm}$  [Small (S), Medium (M), Large (L)].

Tale peso andrà a modificare secondo la logica fuzzy (procedura: prodotto cartesiano), l'esponente di sicurezza  $n$ , ricavato secondo la procedura già descritta e applicata, relativo all'elemento strutturale considerato nella sua singolarità in base alla manifestazione di degrado considerata. Al giudizio di gravità, per ogni elemento strutturale, verranno associati due pesi: uno legato alla manifestazione di degrado del singolo elemento  $W_{ijkl}$ , uno legato all'importanza che tale elemento riveste nella struttura complessiva dal punto di vista della sicurezza  $WE_{ijklm}$ .

Tabella 5.6: Scheda di Valutazione Tipo.

Elemento strutturale	Manifestazione di degrado	Giudizio linguistico	Obiettivo: Sicurezza attuale	Peso dell'elemento strutturale
$E_i$	$E_{ij}$	$G_{ijk}$	$W_{ijkl}$	$WE_{ijklm}$

Le funzioni di appartenenza  $\mu(x)$  associate ad ogni variabile linguistica Small, Medium, Large del Peso  $WE_{ijklm}$ , hanno un dominio di appartenenza  $X$  che è compreso tra 0 e 1.

Si è scelto di utilizzare le funzioni di appartenenza di tipo triangolare asimmetrico mostrate nella Fig.5.9 (Appendice A6) in cui il valore corrispondente alla membership massima della funzione Small corrisponde al valore medio dell'esponente di sicurezza  $n$  defuzzyficato.

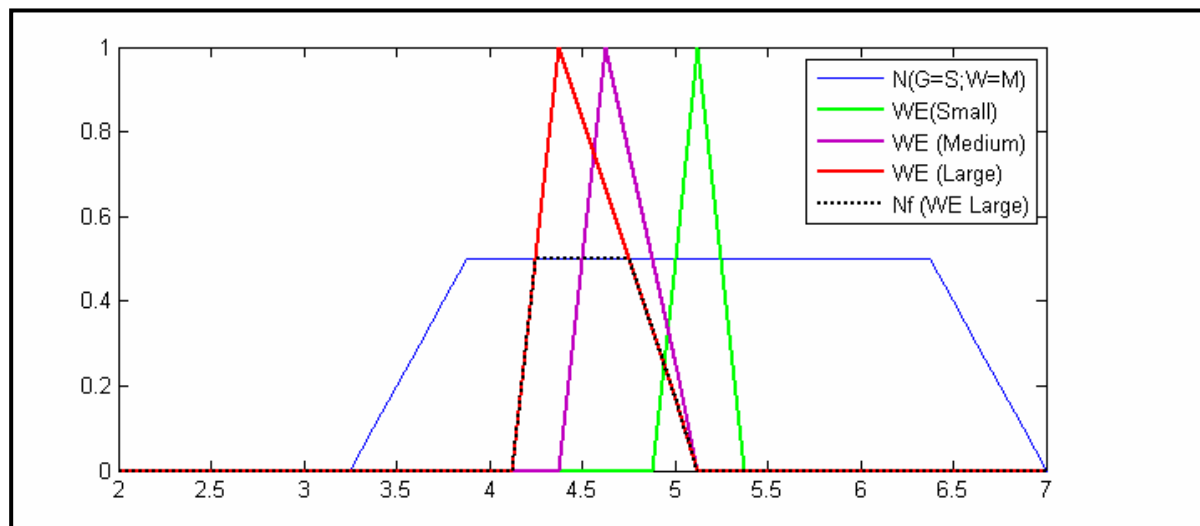


Figura 5.9: Membership functions per i pesi  $WE_{ijklm}$

Come si può notare dalla Fig. 5.9 il punto medio del coefficiente di sicurezza  $n$  pari a 5,12, associato al giudizio di gravità  $G=Small$  e al peso  $W=Medium$ , corrisponde al valore della membership massima della funzione Small del peso  $WE$  associato ad ogni elemento strutturale. Il valore dell'esponente finale fuzzyficato ricavato dalla procedura di prodotto cartesiano ( $N \times WE$ ) viene defuzzyficato scegliendo il valore medio tra i valori di  $n$  aventi membership massima.

Di seguito si mostrano i coefficienti finali ottenuti al variare del peso dell'elemento strutturale.

Nella Fig. 5.10 si nota come attribuendo peso Small all'elemento strutturale, questo non modifichi il valore dell'esponente di sicurezza di partenza pari a 5,12. Da notare, invece, come sia il peso Medium, sia il peso Large, modifichino il valore dell'esponente, diminuendo il valore  $n$  pari a 5,12 all'interno di un *range* definito da esperti. Infatti dando peso Medium si ottiene un valore del coefficiente di sicurezza finale pari a 4,69 (Fig. 5.11), dando peso Large invece si ottiene un valore inferiore, pari a 4,5 (Fig. 5.12).

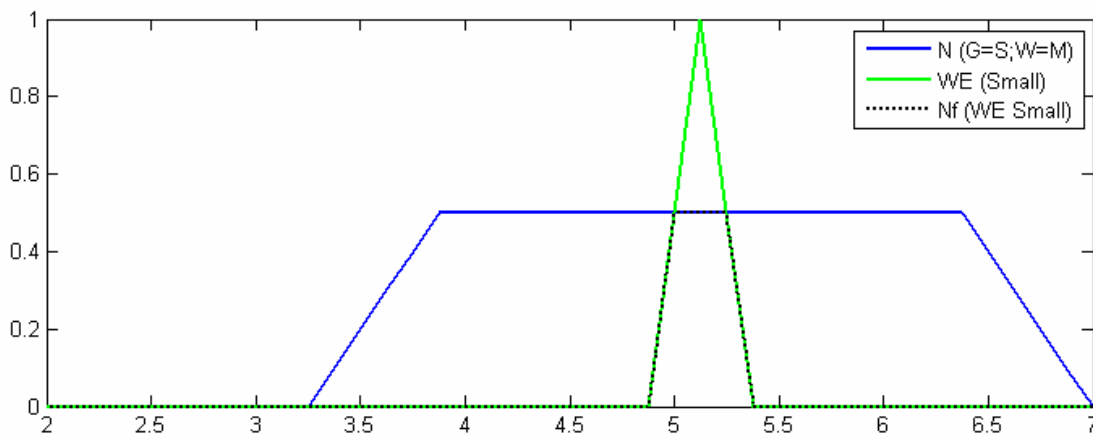


Figura 5.10: Valore dell'esponente di sicurezza con peso  $WE = \text{Small}$

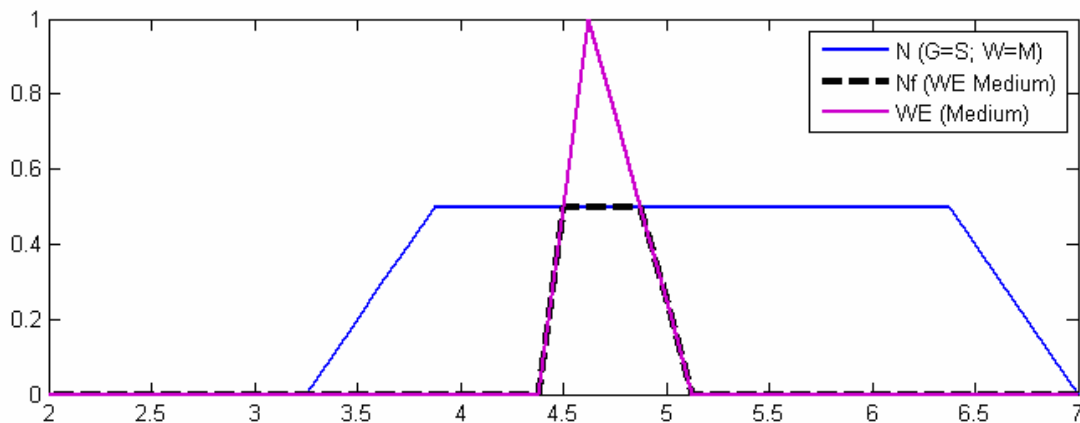


Figura 5.11: Valore dell'esponente di sicurezza con peso  $WE = \text{Medium}$

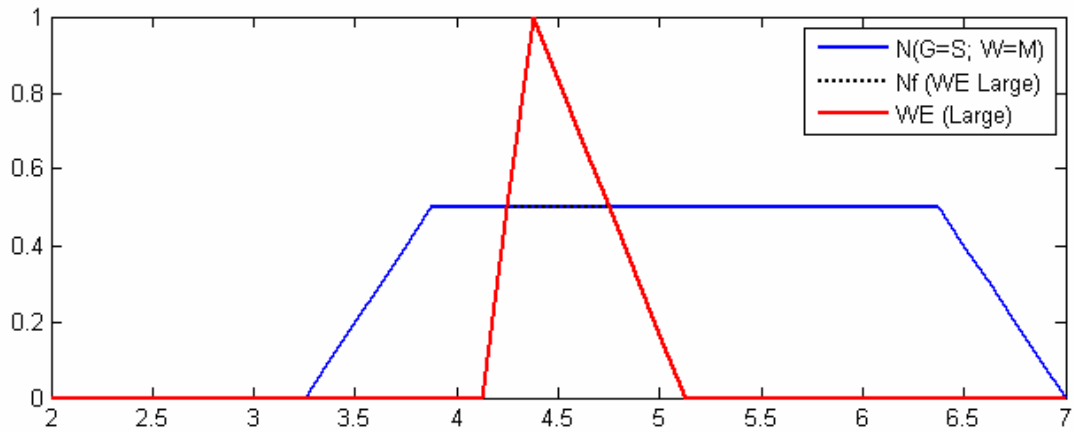


Figura 5.12: Valore dell'esponente di sicurezza con peso WE= Large

### 5.3 Applicazione alla struttura iperstatica

Di seguito si applica il metodo proposto alla struttura iperstatica di Fig. 5.2, attribuendo agli elementi strutturali il peso WE che essi hanno all'interno della struttura in esame, peso che viene attribuito a priori da esperti prima che l'ispezione abbia luogo. In base alle precedenti considerazioni si assegna il peso Large ai pilastri che costituiscono il piano terra, Medium a quelli costituenti il piano primo ed infine si attribuisce il peso Small alle travi (Fig.5.13).

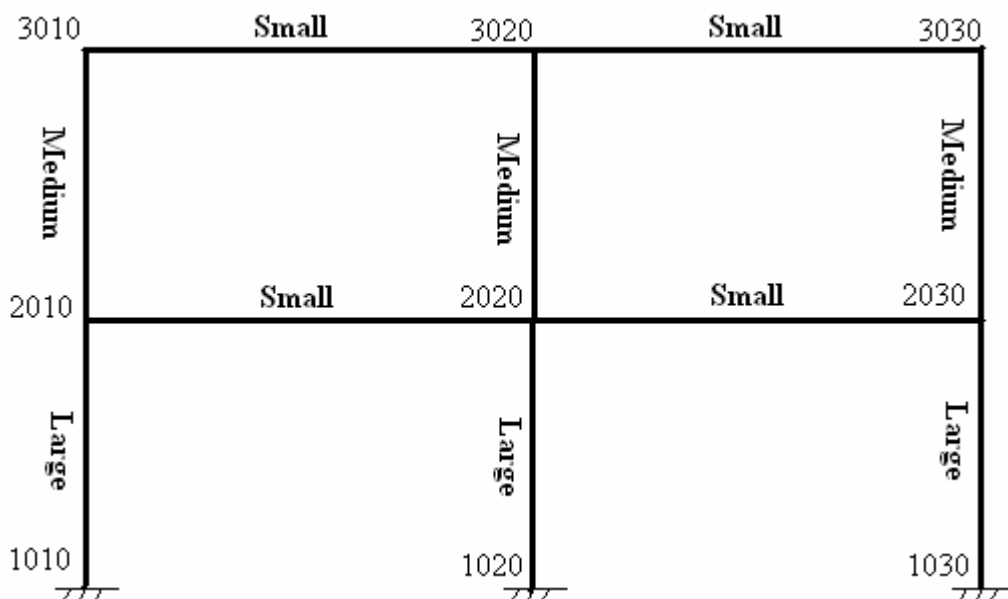


Figura 5.13: Peso WE attribuito agli elementi strutturali

Si ipotizza che la struttura in esame si trovi in uno stato avanzato di degrado e che la scheda di valutazione sia indicata nella Tab. 5.7 per quanto riguarda le travi e nella Tabella 5.8 per i pilastri.

Tabella 5.7: Scheda di valutazione del degrado e conseguente valore dell'esponente di sicurezza per le travi.

Manifestazione di degrado $E_i$	Giudizio linguistico $G_{ij}$		Obiettivo: sicurezza attuale $W_{ijk}$		Esponente di sicurezza $n$
$E_1$ Fessure a taglio	Small	$G_{11}$	Medium	$W_{114}$	5,12
	Medium	$G_{12}$	Large	$W_{126}$	3,88
	Large	$G_{13}$	Very Large	$W_{137}$	3,00
$E_2$ Fessure a momento	Small	$G_{21}$	Slightly Small	$W_{213}$	5,62
	Medium	$G_{22}$	Medium	$W_{224}$	4,5
	Large	$G_{23}$	Large	$W_{236}$	3,25

Tabella 5.8: Scheda di valutazione del degrado e conseguente valore dell'esponente di sicurezza per i pilastri.

Manifestazione di degrado $E_i$	Giudizio linguistico $G_{ij}$		Obiettivo: sicurezza attuale $W_{ijk}$		Esponente di sicurezza $n$
$E_1$ Corrosione Ferri	Small	$G_{11}$	Medium	$W_{114}$	5,12
	Medium	$G_{12}$	Large	$W_{126}$	3,88
	Large	$G_{13}$	Very Large	$W_{137}$	3,00
$E_2$ Distacco del copriferro	Small	$G_{21}$	Slightly Small	$W_{213}$	5,62
	Medium	$G_{22}$	Medium	$W_{224}$	4,5
	Large	$G_{23}$	Large	$W_{236}$	3,25

Si mostrano le schede di valutazione (Tab. 5.9, Tab. 5.10) del degrado per ogni elemento strutturale.

Tabella 5.9: Scheda di valutazione del degrado e conseguente valore dell'esponente di sicurezza pilastri

$E_i$	Manifestazione di degrado $E_i$	Giudizio linguistico $G_{ij}$	Obiettivo: sicurezza attuale $W_{ijk}$	Esponente di sicurezza $n$	Peso elemento strutturale $WE$	Esponente di sicurezza pesato	Esponente di sicurezza finale $n$	
<b>Pilastrata 1010-2010-3010</b>	E <sub>1010-2010</sub>	E <sub>11</sub> Corrosione Ferri	Medium	Large	3,88	Large	3,25	3,16
		E <sub>12</sub> Spalling	Medium	Medium	4,5		3,88	
	E <sub>2010-3010</sub>	E <sub>11</sub> Corrosione Ferri	Medium	Large	3,88	Medium	3,44	3,36
		E <sub>12</sub> Spalling	Medium	Medium	4,5		4,13	
<b>Pilastrata 1020-2020-3020</b>	E <sub>1020-2020</sub>	E <sub>11</sub> Corrosione Ferri	Small	Medium	5,12	Large	4,50	4,37
		E <sub>12</sub> Spalling	Small	Slightly Small	5,62		4,94	
	E <sub>2020-3020</sub>	E <sub>11</sub> Corrosione Ferri	Small	Medium	5,12	Medium	4,69	4,54
		E <sub>12</sub> Spalling	Small	Slightly Small	5,62		5,06	
<b>Pilastrata 1030-2030-3030</b>	E <sub>1030-2030</sub>	E <sub>11</sub> Corrosione Ferri	Large	Very Large	3,00	Large	2,50	2,31
		E <sub>12</sub> Spalling	Large	Large	3,25		2,75	
	E <sub>2030-3030</sub>	E <sub>11</sub> Corrosione Ferri	Large	Very Large	3,00	Medium	2,69	2,47
		E <sub>12</sub> Spalling	Large	Large	3,25		2,88	

Tabella 5.10: Scheda di valutazione del degrado e conseguente valore dell'esponente di sicurezza travi

$E_i$	Manifestazione di degrado $E_i$	Giudizio linguistico $G_{ij}$	Obiettivo: sicurezza attuale $W_{ijk}$	Esponente di sicurezza $n$	Peso elemento strutturale $WE$	Esponente di sicurezza pesato	Esponente di sicurezza finale $n$
$E_{2010-2010}$	$E_{11}$ Fessure a taglio	Small	Medium	5,12	Small	5,12	5,00
	$E_{12}$ Fessure a momento	Small	Slightly Small	5,62		5,62	
$E_{2020-2030}$	$E_{11}$ Fessure a taglio	Medium	Large	3,88	Small	3,88	3,87
	$E_{12}$ Fessure a momento	Small	Slightly Small	5,62		5,62	
$E_{3010-3020}$	$E_{11}$ Fessure a taglio	Medium	Very Large	3,88	Small	3,88	3,79
	$E_{12}$ Fessure a momento	Medium	Large	4,50		4,50	
$E_{3020-3030}$	$E_{11}$ Fessure a taglio	Medium	Large	3,88	Small	3,88	3,16
	$E_{12}$ Fessure a momento	Large	Large	3,25		3,25	

## 5.4 Analisi dei risultati

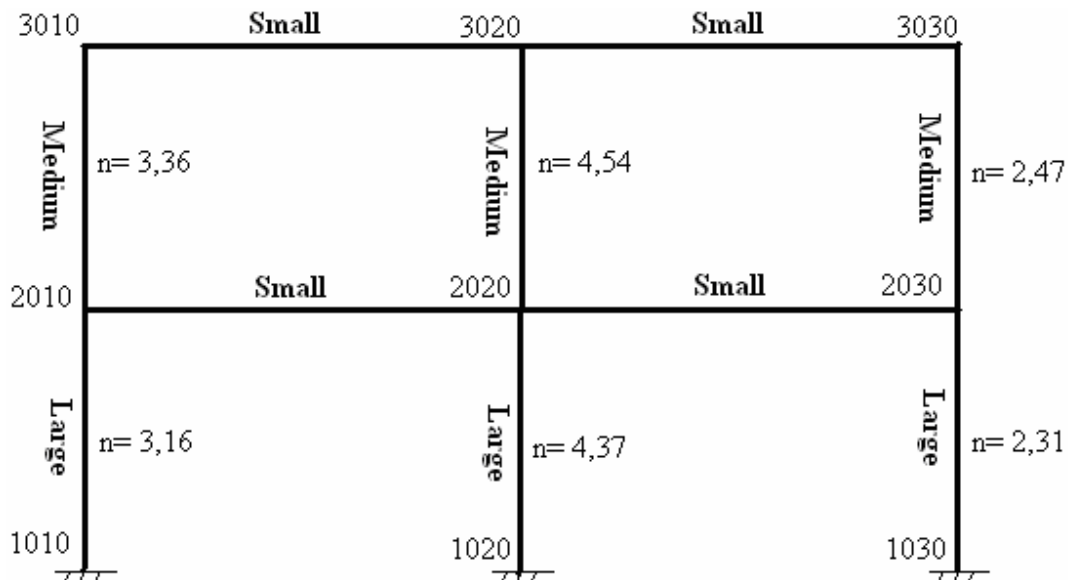


Figura 5.14: coefficiente di sicurezza finale



Dalla Fig. 5.14, in cui ad ogni elemento strutturale è associato il coefficiente di sicurezza, si evince come, nonostante si sia dato volutamente lo stesso giudizio linguistico di gravità alle manifestazioni di degrado associate ai pilastri corrispondenti a piani diversi, il peso differente, (Large pilastri inferiori, Medium pilastri superiori), abbia influenzato il coefficiente di sicurezza finale. Di seguito, si mostrano i risultati ottenuti facendo riferimento alla pilastrata 1010-2010-3010, alla pilastrata 1020-2020-3020, alla pilastrata 1030-2030-3030 ed infine alle travi a cui è stato dato peso Small.

Caso 1: pilastrata 1010-2010-3010.

Al pilastro inferiore  $E_{1010-2010}$  si è assegnato per entrambe le manifestazioni di degrado, giudizio linguistico soggettivo Medium ottenendo rispettivamente  $n=3,88$ ,  $n=4,5$  (diversi valori dei coefficienti di sicurezza perché il peso che ogni singola manifestazione di degrado ha sulla sicurezza è differente, rispettivamente Large, Medium). Lo stesso giudizio linguistico e di conseguenza stesso risultato  $n=3,88$ ,  $n=4,5$ , è stato dato al pilastro superiore  $E_{2010-3010}$  (Fig. 5.15, Fig. 5.16).

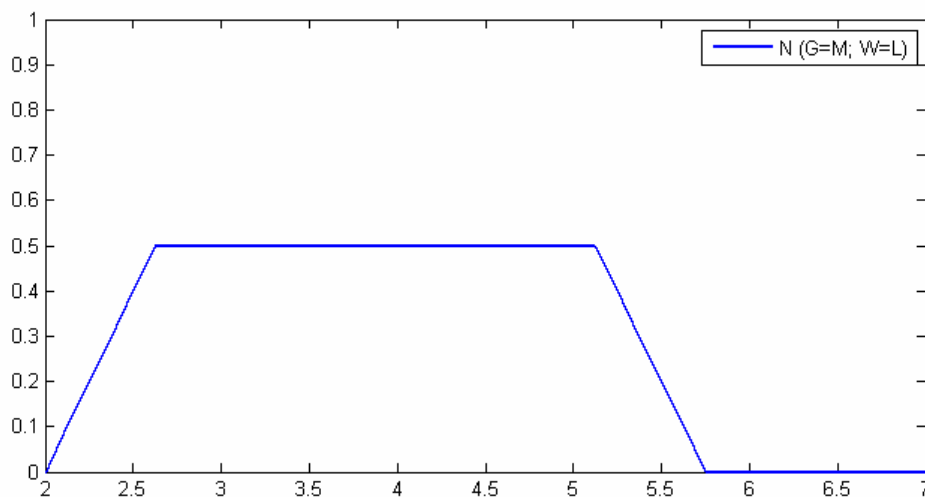


Figura 5.15: Coefficiente di sicurezza  $G_{ijk}=\text{Medium}$ ,  $W_{ijkl}=\text{Large}$

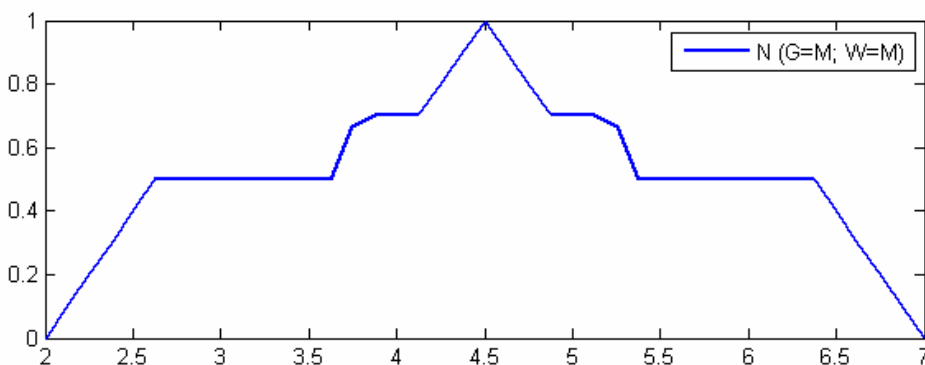


Figura 5.16: Coefficiente di sicurezza  $G_{ijk}=\text{Medium}$ ,  $W_{ijkl}=\text{Medium}$

La differenza è che il peso WE associato all'elemento  $E_{1010-2010}$  è Large, mentre il peso dell'elemento  $E_{2010-3010}$  è Medium. Tali pesi modificano, secondo la logica fuzzy, l'esponente di sicurezza associato ad ogni manifestazione di degrado, con il risultato che l'elemento strutturale  $E_{1010-2010}$  ha rispettivamente un coefficiente di sicurezza pesato pari a 3,25 (Fig. 5.17) e 3,88 (Fig. 5.18), mentre l'elemento  $E_{2010-3010}$  ha rispettivamente un coefficiente di sicurezza pari a 3,44 (Fig. 5.19) e 4,13 (Fig. 5.20).

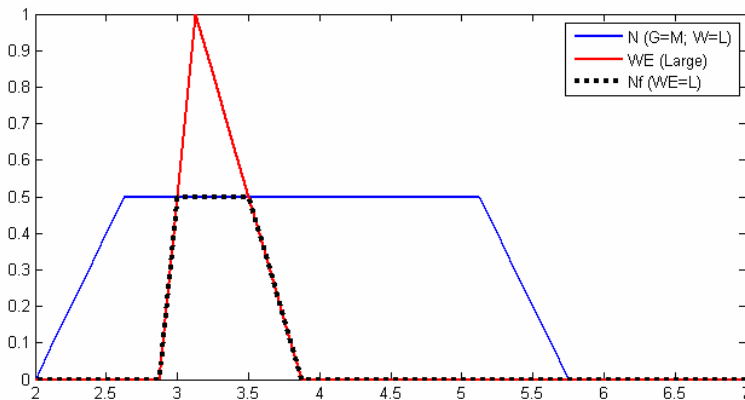


Figura 5.17: Coefficiente di sicurezza  $G_{ijk}=\text{Medium}$ ,  $W_{ijkl}=\text{Large}$ ,  $WE_{ijklm}=\text{Large}$

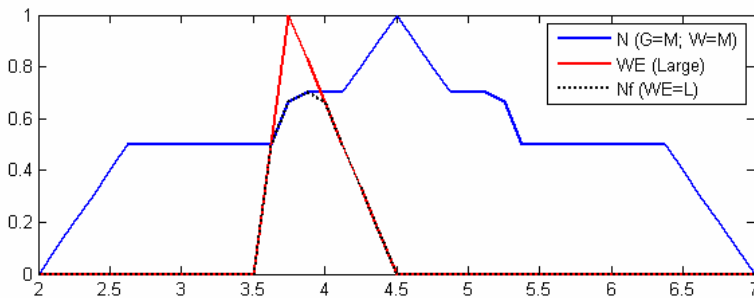


Figura 5.18: Coefficiente di sicurezza  $G_{ijk}=\text{Medium}$ ,  $W_{ijkl}=\text{Medium}$ ,  $WE_{ijklm}=\text{Large}$

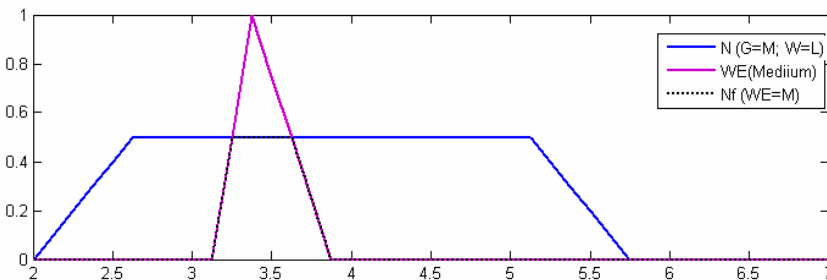


Figura 5.19: Coefficiente di sicurezza  $G_{ijk}=\text{Medium}$ ,  $W_{ijkl}=\text{Large}$ ,  $WE_{ijklm}=\text{Medium}$

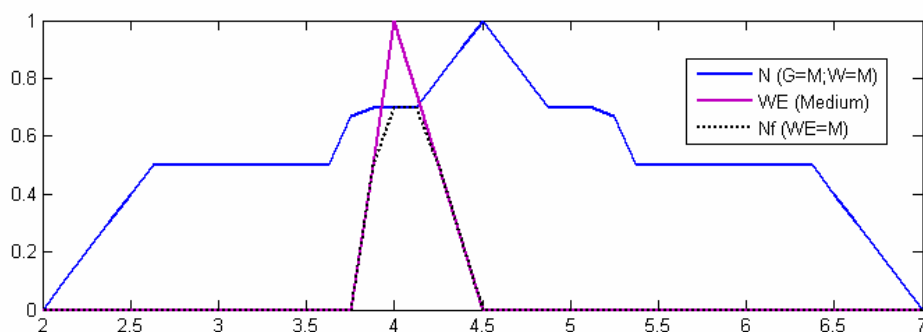


Figura 5.20: Coefficiente di sicurezza  $G_{ijk}=Medium$ ,  $W_{ijkl}=Medium$ ,  $WE_{ijklm}=Medium$

Risulta chiaro come, sia il peso Large, sia il peso Medium, riducano il coefficiente di sicurezza  $n$  ottenendo un coefficiente di sicurezza differente che dipende dal peso che l'elemento strutturale ha nella struttura iperstatica. Da notare come il coefficiente di sicurezza non pesato  $n=3,88$  associato alla manifestazione di degrado: corrosione ferri di armatura, vicino al limite di sicurezza pari a 4, si sia ridotto al valore 3,25, per l'elemento strutturale  $E_{1010-2010}$  mentre per l'elemento  $E_{2010-3010}$  si sia ridotto al valore 3,44. Valori differenti corrispondenti al peso Large e Medium che abbattano ulteriormente il coefficiente  $n$  di sicurezza andando a vantaggio della sicurezza. Allo stesso modo il coefficiente di sicurezza non pesato  $n=4,5$  associato alla manifestazione di degrado distacco del copriferro si è ridotto al valore 3,88, per l'elemento strutturale  $E_{1010-2010}$  mentre per l'elemento  $E_{2010-3010}$  si è ridotto al valore 4,13. E' interessante notare come i valori del coefficiente di sicurezza rispettivamente pari a 3,88 e 4,5, ricavati secondo la procedura già descritta, relativi all'elemento strutturale considerato nella sua singolarità in base alla manifestazione di degrado considerate, danno un valore ai limiti della sicurezza per la prima manifestazione di degrado e un valore in sicurezza per la seconda manifestazione di degrado. Si ricorda come la verifica della sicurezza risulti positiva se  $n \geq 4$ . La procedura fuzzy che relaziona il coefficiente di sicurezza con il peso che l'elemento strutturale ha all'interno della struttura, riduce ulteriormente il coefficiente  $n$  all'interno di un range deciso a priori da esperti. Infatti attribuendo il peso Large si evince come per entrambe le manifestazioni di degrado la misura della sicurezza non sia più soddisfatta, mentre attribuendo il peso Medium la misura della sicurezza risulti soddisfatta solo per la manifestazione di degrado distacco del copriferro.

Caso 2: pilastrata 1020-2020-3020.

Nel caso in esame è stato assegnato sia all'elemento  $E_{1020-2020}$ , sia all'elemento  $E_{2020-3030}$  ad entrambe le manifestazioni di degrado, giudizio linguistico soggettivo Small ottenendo rispettivamente  $n=5,12$  (Fig. 5.21),  $n=5,62$  (Fig. 5.22) (diversi valori dei coefficienti di sicurezza perché il peso che

ogni singola manifestazione di degrado ha sulla sicurezza è differente, rispettivamente: Medium, Slightly Small).

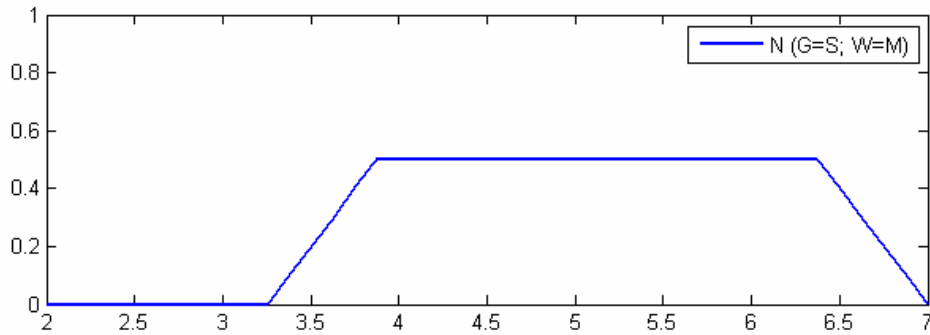


Figura 5.21: Coefficiente di sicurezza  $G_{ijk}=Small$ ,  $W_{ijkl}= Medium$

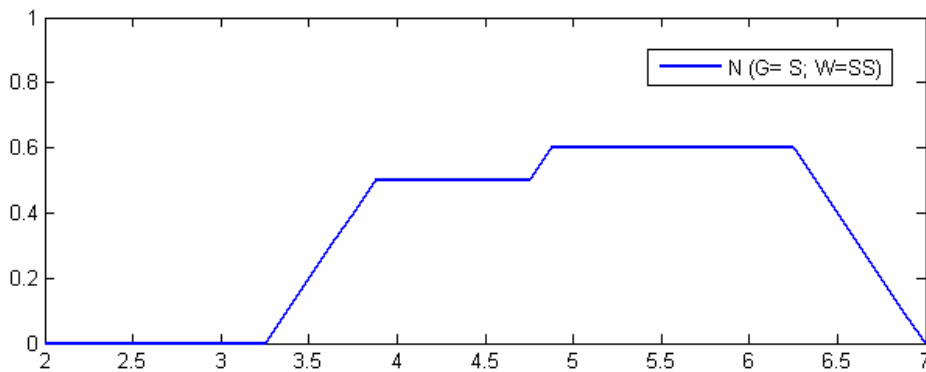


Figura 5.22: Coefficiente di sicurezza  $G_{ijk}=Small$ ,  $W_{ijkl}= Slightly Small$

Il peso WE associato all'elemento  $E_{1020-2020}$  è Large, mentre il peso dell'elemento  $E_{2020-3020}$  è Medium.

Risultato: l'elemento strutturale  $E_{1020-2020}$  ha rispettivamente un coefficiente di sicurezza pesato pari a 4,50 (Fig.5.23) e 4,94 (Fig. 5.24), mentre l'elemento  $E_{2020-3020}$  ha rispettivamente un coefficiente di sicurezza pari a 4,69 (Fig. 5.25) e 5,06 (Fig. 5.26).

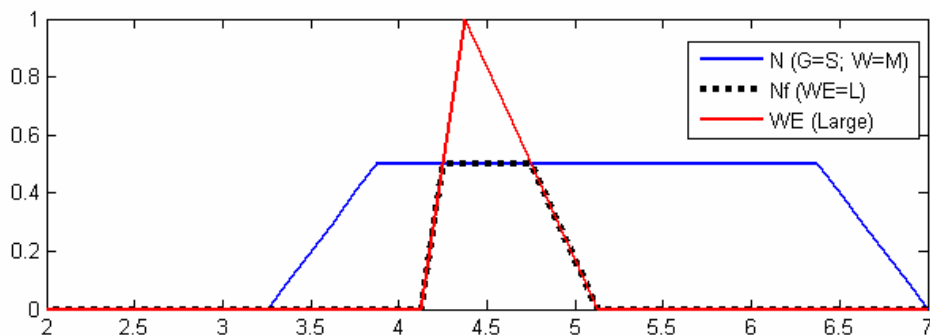


Figura 5.23: Coefficiente di sicurezza  $G_{ijk}=Small$ ,  $W_{ijkl}=Medium$ ,  $WE_{ijklm}=Large$

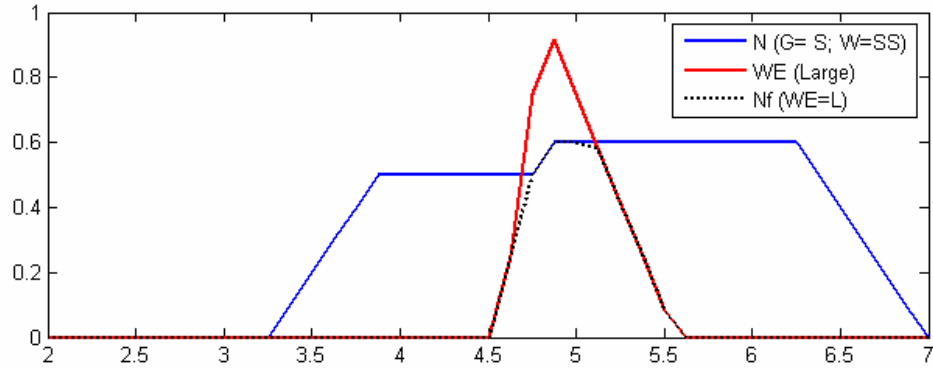


Figura 5.24: Coefficiente di sicurezza  $G_{ijk}=Small$ ,  $W_{ijkl}=Slightly\ Small$ ,  $WE_{ijklm}=Large$

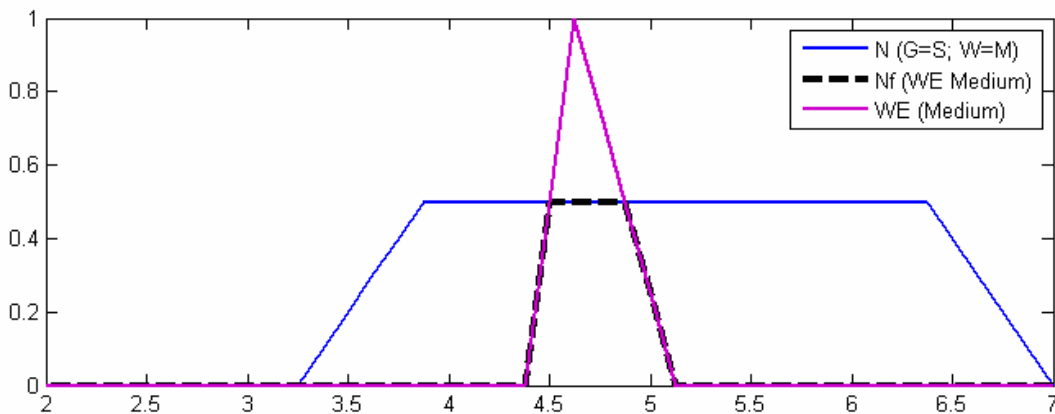


Figura 5.25: Coefficiente di sicurezza  $G_{ijk}=Small$ ,  $W_{ijkl}=Medium$ ,  $WE_{ijklm}=Medium$

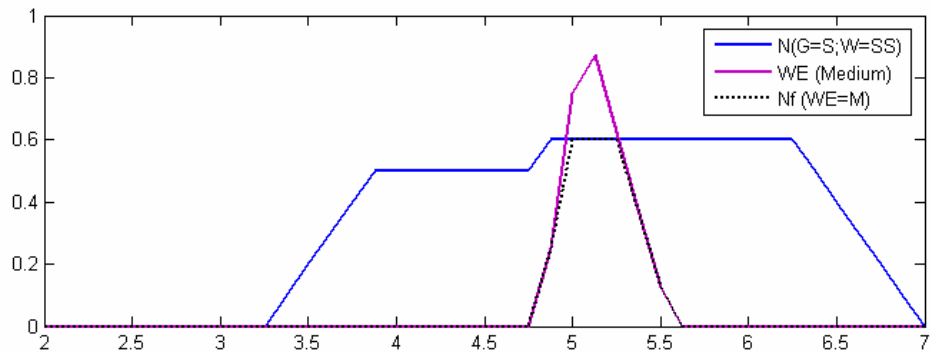


Figura 5.26: Coefficiente di sicurezza  $G_{ijk}=Small$ ,  $W_{ijkl}=Slightly\ Small$ ,  $WE_{ijklm}=Medium$

Anche in questo caso sia il peso Large, sia il peso Medium riducono il coefficiente di sicurezza n ottenendo un coefficiente di sicurezza differente che dipende dal peso che l'elemento strutturale ha nella struttura iperstatica. Da notare come, nonostante si sia abbattuto il coefficiente n, ci si trovi comunque in condizione di sicurezza in quanto per entrambi gli elementi il risultato finale pesato supera il limite pari a 4.

Caso 3: pilastrata 1030-2030-3030.

In questo caso è stato assegnato sia all'elemento  $E_{3010-3020}$ , sia all'elemento  $E_{3020-3030}$ , ad entrambe le manifestazioni di degrado, giudizio linguistico soggettivo Large ottenendo rispettivamente  $n=3,00$  (Fig. 5.27),  $n=3,25$  (Fig. 5.28) (diversi valori dei coefficienti di sicurezza perché il peso che ogni singola manifestazione di degrado ha sulla sicurezza è differente, rispettivamente: Very Large, Large).

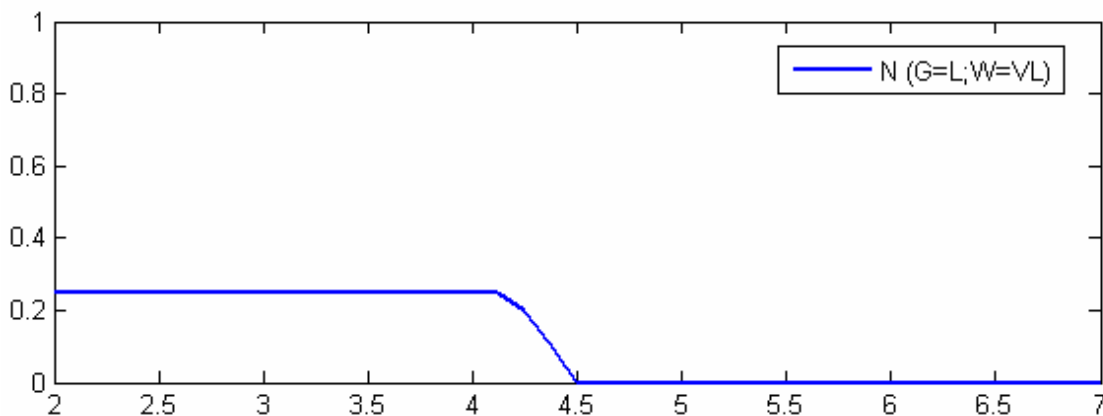


Figura 5.27: Coefficiente di sicurezza  $G_{ijk}=Large$ ,  $W_{ijkl}= Very Large$

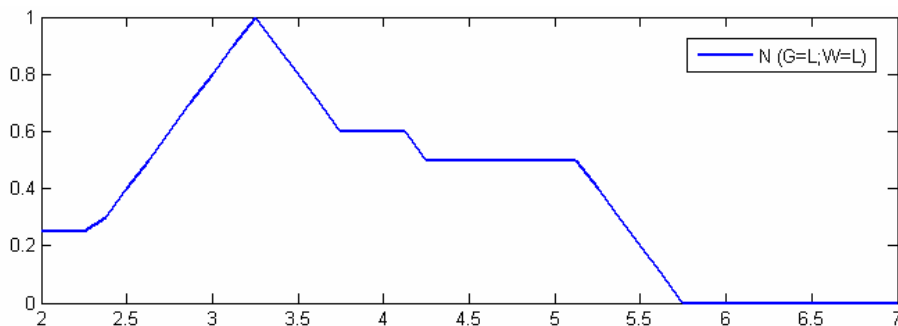


Figura 5.28: Coefficiente di sicurezza  $G_{ijk}=Large$ ,  $W_{ijkl}= Large$

Il peso WE associato all'elemento  $E_{3010-3020}$  è Large, mentre il peso dell'elemento  $E_{3020-3030}$  è Medium.

Risultato: l'elemento strutturale  $E_{3010-3020}$  ha rispettivamente valori del coefficiente di sicurezza pesato pari a 2,50 (Fig. 5.29) e 2,75 (Fig. 5.30), mentre l'elemento  $E_{3020-3030}$  ha rispettivamente valori del coefficiente di sicurezza pari a 2,69 (Fig. 5.31) e 2,88 (Fig. 5.32).

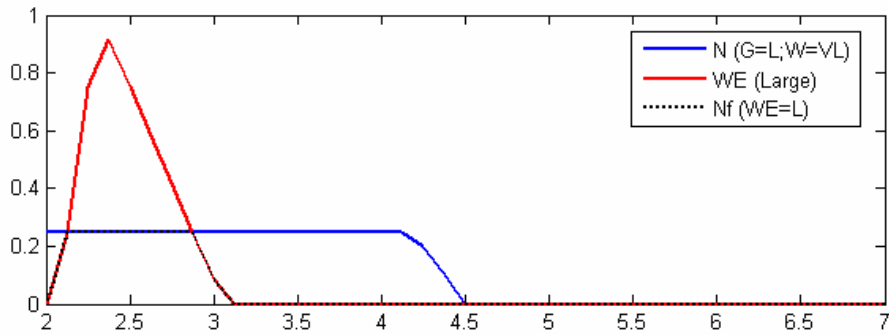


Figura 5.29: Coefficiente di sicurezza  $G_{ijk}=Large$ ,  $W_{ijkl}=Very Large$ ,  $WE_{ijklm}=Large$

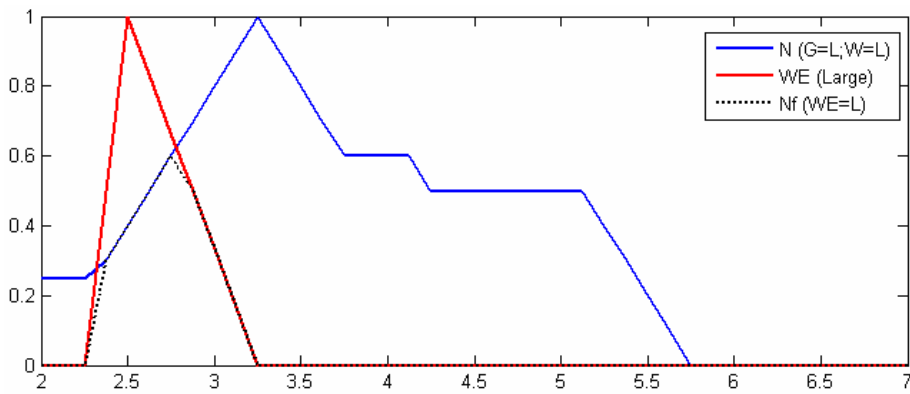


Figura 5.30: Coefficiente di sicurezza  $G_{ijk}=Large$ ,  $W_{ijkl}=Large$ ,  $WE_{ijklm}=Large$

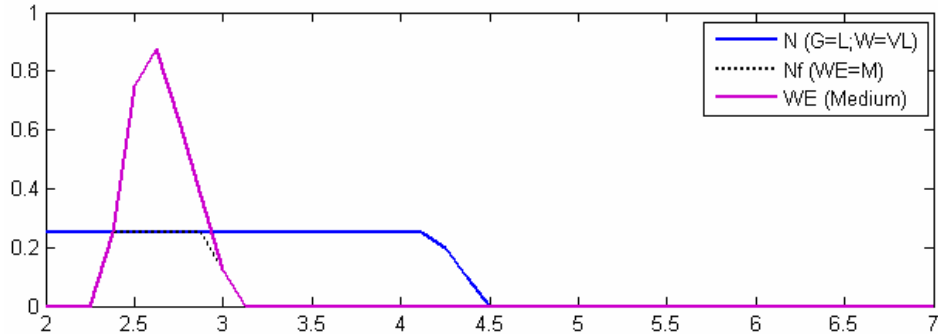


Figura 5.31: Coefficiente di sicurezza  $G_{ijk}=Large$ ,  $W_{ijkl}= Very Large$ ,  $WE_{ijklm}=Medium$

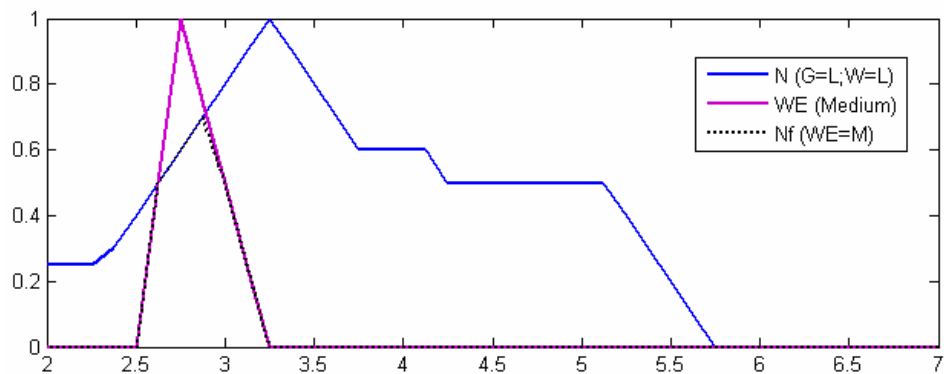


Figura 5.32: Coefficiente di sicurezza  $G_{ijk}=Large$ ,  $W_{ijkl}= Large$ ,  $WE_{ijklm}=Medium$

Anche in questo caso sia il peso Large, sia il peso Medium riducono il valore di  $n$  ottenendo un coefficiente di sicurezza differente che dipende dal peso che l'elemento strutturale ha nella struttura iperstatica. Da notare come, in questo caso, si parta da valori del coefficiente di sicurezza rispettivamente pari a 3,00 e 3,25, ottenuti dalla combinazione fuzzy tra il giudizio linguistico di gravità e il peso che la singola manifestazione di degrado ha sulla sicurezza attuale del singolo elemento strutturale. Valori che danno una condizione di non sicurezza per l'elemento strutturale. Il peso WE che l'elemento strutturale ha sull'intera struttura rispettivamente Large e Medium, abbatta ulteriormente all'interno di un range, stabilito da esperti, il coefficiente  $n$ . Nel caso in esame ci troviamo per entrambi gli elementi strutturali in condizioni di non sicurezza.

Di seguito si analizzano i risultati ottenuti per le travi. A questi elementi strutturali è stato dato peso WE Small. Come si può notare dalla Tab. 5.10 tale peso non modifica il coefficiente di sicurezza  $n$  ottenuto dalla combinazione  $G_{ij}-W_{ijk}$ . Infatti, per scelta, il valore medio del coefficiente di sicurezza, ottenuto dalla media tra il valore massimo di  $n$  e il valore minimo fra quelli con membership massima, corrisponde al valore massimo della funzione di appartenenza Small del peso WE. Questa corrispondenza non altera il coefficiente di sicurezza dell'elemento strutturale in esame, nello specifico le travi. Il coefficiente  $n$  finale dipende dunque dal peso che le manifestazioni di degrado hanno sulla sicurezza dell'elemento e non dal peso che l'elemento ha sulla sicurezza strutturale.



## Capitolo 6

### **Esempio applicativo: ponte sito sulla SS.195, Cagliari**

Lo scopo del capitolo è quello di presentare l'applicazione della procedura ad una struttura reale [23], [24].

Si confrontano i risultati ottenuti tramite l'applicazione della logica fuzzy all'ispezione visiva con il metodo deterministico per la valutazione dello stato dei ponti proposto dal CIAS (Centro Internazionale di Aggiornamento Sperimentale-Scientifico) [7]. Successivamente si verifica, con una metodologia di indagine classica, basata sull'applicazione del Model Code (validando il modello con sperimentazioni realistiche di laboratorio) [13], in quale stato limite si trovino gli elementi strutturali oggetto di ispezione visiva. Di fatto nell'applicare la logica fuzzy si ottiene il valore dell'esponente di sicurezza e si valuta se questo rientri nel limite pari a 4, valore corrispondente allo SLU.

L'opera oggetto d'indagine sperimentale è l'impalcato di un ponte costruito nei primi anni '60, sito lungo la SS 195 in provincia di Cagliari in un ambiente fortemente aggressivo (Foto 6.1). Da un punto di vista strategico, questo manufatto svolge un ruolo fondamentale garantendo il collegamento diretto con diverse strutture legate alle produzioni industriali e artigianali e con importanti località turistiche.



Foto 6.1. *Prospetto laterale del ponte*

## 6.1 Descrizione dell'opera

La soletta e i traversi, costituenti l'impalcato, sono in calcestruzzo armato gettato in opera. In progetto era previsto l'uso di un cemento "730" l'attuale CEM I 42,5 con dosaggio di 350 Kg di cemento per m<sup>3</sup> di calcestruzzo.

Le travi principali, in tutto 14 (Foto 6.2), sono invece prefabbricate in cap (SCAC denominate TAS 80/32) in commercio almeno fino agli anni '80 (Fig. 6.1). Dall'analisi degli elaborati progettuali non è stato possibile risalire alla classe del calcestruzzo e alla maschera dei cavi di precompressione.

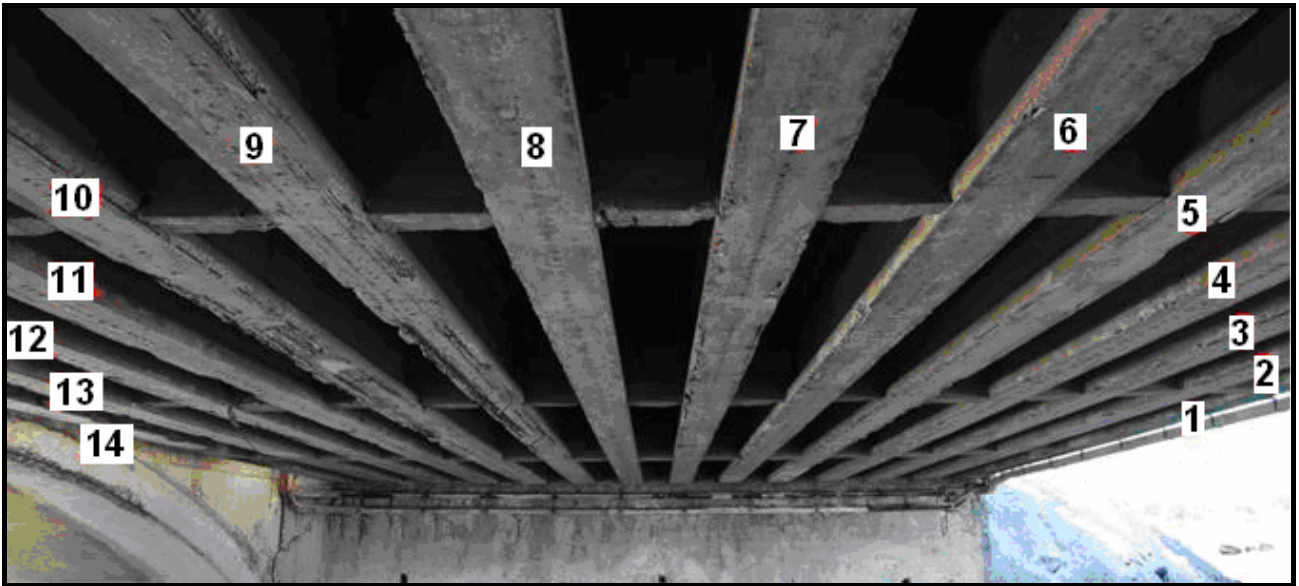


Foto 6.2: *Visuale completa delle travi*

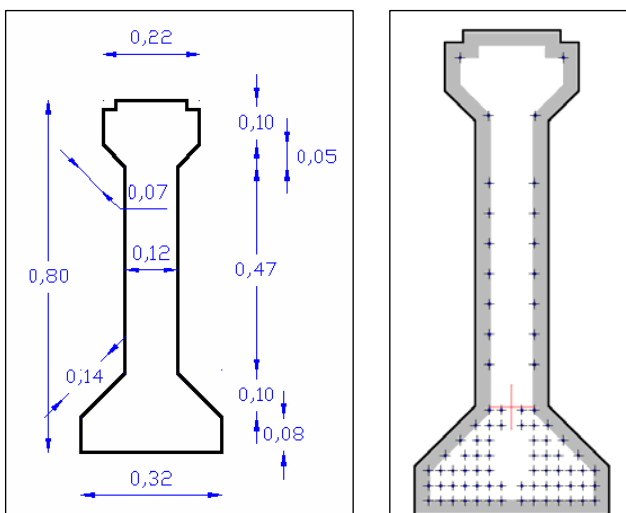


Figura 6.1: *Sezione trasversale trave TAS 80/32 e ipotesi sulla configurazione della maschera di precompressione*

Sulla classe del calcestruzzo si ritiene, anche per raffronto con la soletta, che sia verosimile l'uso di un calcestruzzo di classe C32/40 ( $R_{ck}=40 \text{ N/mm}^2$ ).

Il rinforzo delle travi è costituito da 82 treccie 3\*24/10 in acciaio armonico, con un rendimento elevato.

L'esame visivo dell'impalcato mette in luce chiaramente lo stato di pessima conservazione delle travi. Si evidenzia uno stato di degrado diffuso del calcestruzzo, ma soprattutto, sia per effetto della carbonatazione, sia per la scarsità del copriferro, appaiono del tutto compromesse le treccie di precompressione, per lo meno negli strati più superficiali (Foto 6.3).



Foto 6.3: *Stato di degrado sulle travi costituenti l'impalcato*

Di seguito si mostrano i risultati ottenuti dall'applicazione della logica fuzzy all'ispezione visiva (di seguito abbreviata FL) e quelli ottenuti con l'applicazione del Metodo di Valutazione Numerica (MVN) proposto dal CIAS. Con l'applicazione della FL all'ispezione visiva si misura la vulnerabilità con la valutazione del coefficiente di sicurezza  $n$  e quest'ultimo, a sua volta, si confronta con il valore limite caratteristico dello SLU (pari a 4 per un tempo di 50 anni). Successivamente si valuta, tramite le procedure indicate nel MC, lo stato limite in cui versano le travi costituenti l'impalcato del ponte.

## 6.2 Valutazione della vulnerabilità mediante l'applicazione della logica fuzzy all'ispezione visiva

Attraverso la campagna di indagine *in situ*, si è potuto verificare che lo spessore del copriferro, variabile tra 5 e 15 mm, è del tutto insufficiente a proteggere le treccie di precompressione [2]. Tutte le armature dello strato più superficiale (14 treccie solo all'intradosso) risultano ampiamente ossidate ed è evidente, ad un'osservazione visiva, che hanno perso gran parte della loro presollecitazione iniziale. Infatti alcune di esse sono lasche (Foto 6.4) o addirittura recise (Foto 6.5).



Foto 6.4: Treccie lasche nella trave n°9



Foto 6.5: Treccie recise nella trave n°14

Le manifestazioni di degrado comuni, riscontrate durante il sopralluogo, sono: la corrosione dei ferri longitudinali inferiori e il conseguente distacco del copriferro (due manifestazioni di degrado per elemento  $E_i$ ). Tali manifestazioni sono presenti, in alcuni elementi, su tutta la lunghezza della trave, altre volte, invece, risultano localizzate in zone di limitata estensione. La corrosione dei ferri longitudinali inferiori, nel caso in esame, ha peso differente se localizzata in mezzeria rispetto che alle estremità. Infatti in una trave semplicemente appoggiata il cinematismo di collasso è unico e avviene quando in mezzeria si forma la cerniera plastica. Da qui nasce l'esigenza di valutare il fenomeno della corrosione considerando la trave divisa in tre parti: la mezzeria e le estremità destra e sinistra (Foto 6.6), dando di conseguenza un peso differente alla manifestazione stessa a seconda della sua localizzazione [25],[26],[27].



Foto 6.6: *Suddivisione della trave in tre parti*

Nella Tab. 6.1 (riferita alla mezzeria della trave) e nella Tab. 6.2 (riferita agli appoggi) per ogni elemento  $E_i$ , sono elencate le manifestazioni di degrado riscontrate durante l'ispezione visiva. Queste manifestazioni possono pregiudicare la capacità portante dell'elemento strutturale e per questo motivo sono definite come SLU.

Tabella 6.1: Scheda di Valutazione del degrado in MEZZERIA e esponente di sicurezza.

Manifestazione di degrado $E_{ij}$	Giudizio linguistico $G_{ijk}$		Obiettivo: sicurezza attuale $W_{ijkl}$		Esponente di sicurezza $n$
$E_{i1}$ distacco del copriferro	Small	$G_{i11}$	Small	$W_{i213}$	5,75
	Medium	$G_{i12}$	Slightly Small	$W_{i224}$	4,62
	Large	$G_{i13}$	Medium	$W_{i236}$	3,88
$E_{i2}$ corrosione armatura	Small	$G_{i21}$	Medium	$W_{i114}$	5,12
	Medium	$G_{i22}$	Slightly Large	$W_{i126}$	4,38
	Large	$G_{i23}$	Large	$W_{i137}$	3,25

Tabella 6.2: Scheda di Valutazione del degrado ESTREMITA' SX e DX ed esponente di sicurezza.

Manifestazione di degrado $E_{ij}$	Giudizio linguistico $G_{ijk}$		Obiettivo: sicurezza attuale $W_{ijkl}$		Esponente di sicurezza $n$
$E_{i1}$ distacco del copriferro	Small	$G_{i11}$	Small	$W_{i213}$	5,75
	Medium	$G_{i12}$	Slightly Small	$W_{i224}$	4,62
	Large	$G_{i13}$	Medium	$W_{i236}$	3,88
$E_{i2}$ corrosione armatura	Small	$G_{i21}$	Slightly Small	$W_{i114}$	5,62
	Medium	$G_{i22}$	Medium	$W_{i126}$	4,50
	Large	$G_{i23}$	Slightly Large	$W_{i137}$	3,50


Lo scopo della procedura è quello di verificare quali siano le travi che si trovano nello SLU (situazione di non sicurezza) e quali non lo siano, tutto questo può essere misurato tramite la seguente disuguaglianza: la misura della sicurezza risulta positiva se  $n \geq 4$ .

Il metodo proposto è impostato sulla compilazione, durante l'ispezione visiva, di una serie di schede ispettive (Tab. 6.3, Tab. 6.4) in numero pari a 6 per elemento strutturale. Nel caso in questione ogni elemento  $E_i$  sarà corredato da due schede: una per il degrado distacco del copriferro  $E_{i1}$  e una per il

degrado ossidazione armature di precompressione  $E_{12}$ . Nella scheda, per ogni manifestazione, viene descritto il fenomeno in atto e le cause più probabili del suo manifestarsi<sup>1</sup>.

L'operatore in questa scheda deve riportare il giudizio di gravità soggettivo  $G_{ijk}$ : Small, Medium, Large. Ad ogni giudizio viene associata un'immagine fotografica in cui è presente la manifestazione di degrado e il conseguente livello di gravità. Tale giudizio viene successivamente inserito nella Tabella di Valutazione. Infatti, le informazioni derivanti dalle ispezioni vengono poi inserite nel software (Appendice A7), il quale a sua volta, restituisce l'esponente di sicurezza defuzzyficato. In questo modo è possibile gestire con sistematicità le informazioni derivanti dalle ispezioni e valutare successivamente lo stato di conservazione degli elementi oggetto di indagine. Lo scopo è quello di ricavare una gerarchia di gravità sullo stato di conservazione delle travi che formano l'impalcato del ponte.



Tabella 6.3: Scheda ispettiva manifestazione di degrado : Distacco del copriferro

Localizzazione nell'elemento strutturale: .....			
Giudizio Linguistico di gravità G	SMALL	MEDIUM	LARGE
			
<p>Descrizione:</p> <p>Difetto che si può manifestare dapprima con delle lesioni parallele agli spigoli o lungo i ferri di armatura e, successivamente, con il distacco completo del calcestruzzo di copertura dei ferri d'armatura.</p>			
<p>Cause:</p> <p>Il deterioramento del calcestruzzo di ricoprimento delle barre, che generalmente deriva dal fenomeno della carbonatazione e/o dall'esiguo spessore del copriferro, possono far sì che l'aria, penetrando all'interno del conglomerato, ossidi l'armatura producendo un aumento di volume e la conseguente espulsione del copriferro.</p>			

<sup>1</sup> Cfr. A. Ceccotti, E. Giangreco, L. Jurina, S. Martinello, E. Siviero, S. Tattoni, R. Bruson, G. Caramel, L. Maliardi, A. Papaleo, L. Perrone, *Manuale per la valutazione dello stato dei ponti*, 4 Emme Service Spa, Bolzano, 2002.



Tabella 6.4: Scheda ispettiva manifestazione di degrado: ossidazione barre di armatura

Localizzazione nell'elemento strutturale: .....			
Giudizio Linguistico di gravità G	SMALL	MEDIUM	LARGE
			
<p>Descrizione:</p> <p>Difetto rilevabile sulle strutture in calcestruzzo. L'ossidazione dell'armatura si presenta o in modo diretto, laddove vi è il distacco del copriferro, o in modo indiretto (l'armatura è ossidata ma il copriferro è apparentemente intatto)</p>			
<p>Cause:</p> <p>L'ossidazione è causata dal contatto con l'aria e facilitata dalla presenza dell'acqua; nel caso di calcestruzzi porosi o mal confezionati in ambienti aggressivi (carbonatazione) è proprio l'ossidazione che porta il rigonfiamento dell'armatura causando il distacco del cls e quindi lo scoprimento.</p>			

La scheda di valutazione (Tab. 6.1, Tab. 6.2), che viene compilata successivamente, mostra, per ogni tipo di degrado  $E_{ij}$ , il giudizio linguistico soggettivo  $G_{ijk}$  che l'operatore può scegliere per ogni trave  $E_i$ , durante l'indagine.

Per ciascun giudizio linguistico  $G_{ijk}$ , attribuito alla manifestazione di degrado  $E_{ij}$ , si associa il peso  $W_{ijkl}$  che ogni giudizio ha sulla sicurezza attuale del manufatto. Per i giudizi linguistici e i pesi si sono usate le funzioni di appartenenza rispettivamente in Fig. 3.1 e Fig. 3.2.

Dai documenti esaminati, la struttura in esame è stata progettata e costruita secondo le regole.

In questo caso si può assumere che la struttura, in presenza dei carichi richiesti dal regolamento, si trovi in condizioni di sicurezza e per questo motivo, riferendosi alla misura della sicurezza indicata con  $P_f = 10^{-n}$ , si può accettare a priori un valore dell'esponente di sicurezza  $n$  pari a 7.

Si sono utilizzate per l'esponente di sicurezza le funzioni di appartenenza, come mostrato nella Fig. 3.5. Per ogni manifestazione di degrado vengono applicate le procedure di fuzzyficazione, inferenza e defuzzyficazione (Cap. 3). Quindi, per ogni tipo di degrado si ottiene l'esponente di sicurezza defuzzyficato  $n$  come mostrato nella Tab. 6.1 e Tab. 6.2 al variare di  $G_{ijk}$ . Si evince come  $n$  abbia valori maggiori di 4 quando per la manifestazione di degrado  $E_{i1}$  si attribuiscono giudizi di gravità: Small, Medium, invece per la manifestazione di degrado  $E_{i2}$  si ottengono valori inferiori a 4 quando si attribuisce alla manifestazione di degrado giudizio di gravità Large. La scheda ispettiva in mano all'operatore durante l'indagine sarà del tipo mostrato in Tab. 6.3 e Tab. 6.4.

Con questa procedura si ha un'indicazione di come le manifestazioni di degrado rilevate mediante ispezione visiva possano influenzare la sicurezza dell'elemento strutturale sotto esame. Nel caso in questione per ogni elemento strutturale  $E_i$  sono presenti sei coefficienti di sicurezza  $n$ . Infatti l'elemento è stato suddiviso in tre parti: estremità destra, mezzeria, estremità sinistra, per ogni parte sono presenti due manifestazioni di degrado. Lo scopo però è quello di ottenere un unico coefficiente che tenga conto della presenza o meno delle due manifestazioni e delle differenziazioni date all'interno dell'elemento per ogni manifestazione di degrado.

A questo scopo, per ricavare la probabilità di fallimento  $P_f$  dell'elemento dovuta alla contemporanea presenza delle manifestazioni di degrado si applica la già nota espressione:

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_{f_i}) \quad (6.1)$$

Dove  $m$  indica il numero dei coefficienti di sicurezza presenti nell'elemento strutturale, nel caso in esame  $m$  è pari a 6.

## 6.3 Risultati.

Nella Tab. 6.5 si mostrano i risultati dell'ispezione visiva per ogni trave costituente l'impalcato del ponte. Nella prima colonna abbiamo l'elemento oggetto dell'ispezione visiva, nella seconda e terza colonna l'esponente di sicurezza defuzzyficato per le manifestazioni di degrado  $E_{i1}$   $E_{i2}$  presenti nell'estremità destra, nella quarta e quinta i risultati ottenuti in mezzeria per le due manifestazioni di degrado, nella sesta e settima colonna quelli ottenuti nell'estremità sinistra infine, nell'ultima colonna, si riporta l'esponente di sicurezza finale ottenuto attraverso l'applicazione dell'equazione (6.1).

Tabella 6.5: Risultati per  $i=1$  a  $7$

Elemento strutturale $E_i$	<i>Appoggio dx</i>		<i>Mezzeria</i>		<i>Appoggio sx</i>		n finale
	n per $E_{i1}$	n per $E_{i2}$	n per $E_{i1}$	n per $E_{i2}$	n per $E_{i1}$	n per $E_{i2}$	
$E_1$	3,88	3,50	3,88	3,25	3,88	3,50	2,80
$E_2$	5,75	5,62	3,88	3,25	4,62	5,62	3,14
$E_3$	5,75	5,62	3,88	3,25	4,62	4,50	3,12
$E_4$	5,75	5,62	4,62	4,38	4,62	4,50	3,90
$E_5$	3,88	3,50	3,88	3,25	4,62	4,50	2,92
$E_6$	3,88	3,50	3,88	3,25	4,62	4,50	2,92
$E_7$	3,88	3,50	3,88	3,25	4,62	4,50	2,92
$E_8$	5,75	5,62	4,62	5,12	5,75	5,62	4,40
$E_9$	3,88	4,50	3,88	3,25	3,88	3,50	2,88
$E_{10}$	3,88	3,50	3,88	3,25	3,88	3,50	2,80
$E_{11}$	5,75	5,62	3,88	3,25	5,75	5,62	3,15
$E_{12}$	5,75	5,62	3,88	3,25	5,75	5,62	3,15
$E_{13}$	5,75	5,62	3,88	3,25	4,62	5,62	3,14
$E_{14}$	3,88	3,50	3,88	3,25	3,88	3,50	2,80

Dall' istogramma (Fig.6.2) si evince chiaramente che solo la trave  $E_8$  si trova in sicurezza con  $n$  superiore a 4, la trave  $E_4$  presenta un valore di  $n$  leggermente al di sotto del limite, mentre le restanti travi, soprattutto le travi con  $n$  pari a 2,80, si trovano in una situazione di non sicurezza. Infatti, l' 85,7% delle travi risultano non affidabili ( $n$  inferiori a 3), il restante 14,3% si trovano in condizioni di affidabilità (elemento 4 e 8).

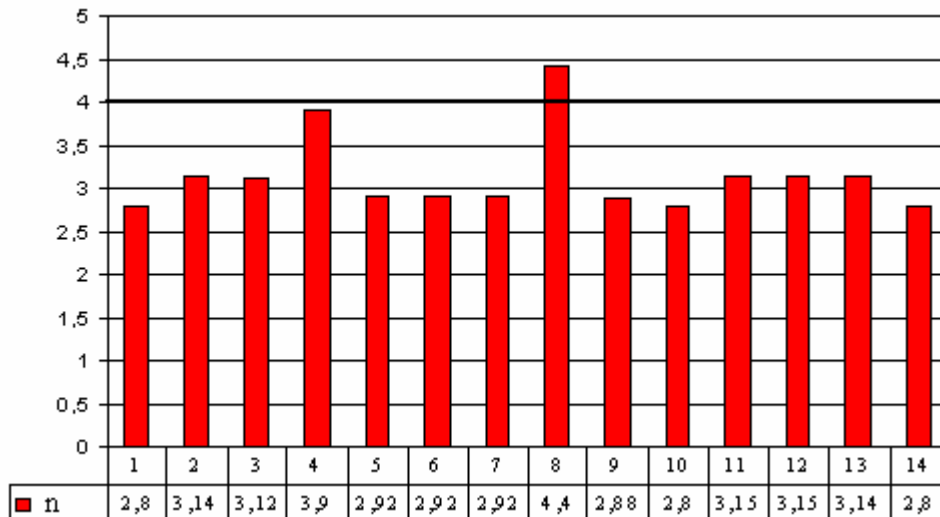


Figura 6.2: Risultati FL

Di seguito si riportano i valori linguistici di gravità attribuiti a ciascun elemento.



Foto 6.7: Manifestazioni di degrado presenti elemento  $E_1$

All'elemento  $E_1$  (Foto 6.7) è stato attribuito un giudizio Large ad entrambe le manifestazioni di degrado analizzate lungo l'intera estensione dell'elemento strutturale.

All'elemento  $E_2$  è stato attribuito il giudizio Small per quanto attiene la corrosione e il conseguente distacco nella parte

destra dell'elemento (Foto 6.8), nella parte centrale, per entrambe le manifestazioni di degrado, è stato espresso giudizio Large (Foto 6.9), per l'estremità sinistra, per quanto attiene la corrosione, è stato attribuito il giudizio Small, mentre al distacco è stato attribuito il giudizio Medium (Foto 6.10).



Foto 6.8 e Foto 6.9: *Manifestazioni di degrado presenti nell'estremità dx in mezzeria dell'elemento E<sub>2</sub>*



Foto 6.10: *Manifestazioni di degrado presenti nell'estremità sx dell'elemento E<sub>2</sub>*

All'elemento E<sub>3</sub> nella parte destra (Foto 6.11) si è attribuito un giudizio Small sia per la corrosione, sia per il distacco; nella parte centrale (Foto 6.12) è stato attribuito il giudizio Large per entrambe le manifestazioni, allo stesso modo, nella parte sinistra (Foto 6.13) è stato attribuito il giudizio Medium.



Foto 6.11, Foto 6.12: *Manifestazioni di degrado presenti nell'estremità dx e in mezzeria dell'elemento E<sub>3</sub>*



Foto 6.13: *Manifestazioni di degrado presenti nell'estremità sx dell'elemento E<sub>3</sub>*

All'elemento E<sub>4</sub>, nella parte destra (Foto 6.14) è stato attribuito il giudizio Small mentre, sia nella parte centrale, che in quella a sinistra (Foto 6.14, Foto 6.15), il giudizio di gravità riguardante la corrosione e il distacco è Medium.



Foto 6.14, Foto 6.15: *Manifestazioni di degrado presenti nell'estremità dx, in mezzeria e nell'estremità sx di E<sub>4</sub>*

All'elemento E<sub>5</sub>, sia per la parte destra, sia per quella centrale (Foto 6.16), si è attribuito per le manifestazioni di degrado corrosione e distacco, il giudizio Large, mentre per la parte sinistra (Foto 6.17), per entrambe le manifestazioni, il giudizio è Medium.



Foto 6.16, Foto 6.17: *Manifestazioni di degrado presenti nell'estremità dx, in mezzeria e all'estremità sx dell'elemento E<sub>5</sub>*

All'elemento E<sub>6</sub> sia nella parte destra, sia nella parte centrale (Foto 6.18), per entrambe le manifestazioni, è stato dato giudizio Large, per la parte sinistra (Foto 6.19) il giudizio per entrambe è Medium.



Foto 6.18, Foto 6.19: *Manifestazioni di degrado presenti nell'estremità dx, in mezzeria e nell'estremità sx dell'elemento E<sub>6</sub>,*

All'elemento E<sub>7</sub> sia nella parte destra, sia nella parte centrale (Foto 6.20), per entrambe le manifestazioni, è stato dato giudizio Large, per la parte sinistra (Foto 6.21), per entrambe le manifestazioni, è stato dato giudizio Medium.



Foto 6.20, Foto 6.21: *Manifestazioni di degrado presenti nell'estremità dx, in mezzeria, nell'estremità sx dell'elemento E<sub>7</sub>*



All'elemento  $E_8$  sia per la parte destra, sia per la parte sinistra, (Foto 6.22, Foto 6.23) è stato dato giudizio Small ad entrambe le manifestazioni, per la parte centrale (Foto 6.24) il giudizio riguardante la corrosione è Small mentre per il distacco è Medium.



Foto 6.22, Foto 6.23: *Manifestazioni di degrado presenti nell'estremità dx, nell'estremità sx dell'elemento  $E_8$*



Foto 6.24: *Manifestazioni di degrado presenti in mezzeria dell'elemento  $E_8$*

All'elemento E<sub>9</sub> per la parte centrale e per l'estremità sinistra (Foto 6.25. Foto 6.26) è stato dato giudizio Large ad entrambe le manifestazioni, per la parte destra (Foto 6.27) alla corrosione è stato attribuito giudizio Medium, mentre al distacco giudizio Large.



Foto 6.25, Foto 6.26: *Manifestazioni di degrado presenti in mezzeria, nell'estremità sx dell'elemento E<sub>9</sub>*



Foto 6.27: *Manifestazioni di degrado presenti nell'estremità dx e in mezzeria dell'elemento E<sub>9</sub>*

All'elemento E<sub>10</sub> è stato dato il giudizio Large ad entrambe le manifestazioni per tutta l'estensione dell'elemento (Foto 6.28, Foto 6.29, Foto 6.30).



Foto 6.28, Foto 6.29: *Manifestazioni di degrado presenti nell'estremità dx, in mezzeria dell'elemento E<sub>10</sub>*



Foto 6.30: *Manifestazioni di degrado presenti nell'estremità sx dell'elemento E<sub>10</sub>*

Agli elementi E<sub>11</sub>, E<sub>12</sub> per la parte destra (Foto 6.31, Foto 6.32) e per la parte sinistra (Foto 6.33, Foto 6.34) è stato dato giudizio Small ad entrambe le manifestazioni, nella parte centrale (Foto 6.35, Foto 6.34) per entrambe è stato dato giudizio Large.



Foto 6.31, Foto 6.32: *Manifestazioni di degrado presenti nell'estremità dx dell'elemento  $E_{11}$  e dell'elemento  $E_{12}$*



Foto 6.33, Foto 6.34: *Manifestazioni di degrado presenti nell'estremità sx dell'elemento  $E_{11}$  e dell'elemento  $E_{12}$*



Foto 6.35: *Manifestazioni di degrado presenti in mezzeria dell'elemento E<sub>11</sub>*

All'elemento E<sub>13</sub> è stato dato giudizio Medium al distacco, Small alla corrosione nella parte destra, nella parte centrale Large, nella parte a sinistra è stato dato giudizio Small ad entrambe le manifestazioni.



Foto 6.36, Foto 6.37: *Manifestazioni di degrado presenti nell'estremità dx e in mezzeria dell'elemento E<sub>13</sub>*



Foto 6.38: *Manifestazioni di degrado presenti nell'estremità sx dell'elemento E<sub>13</sub>*

All'elemento E<sub>14</sub> è stato dato giudizio di gravità Large ad entrambe le manifestazioni per tutta l'estensione dell'elemento (Foto 6.39, Foto 6.40, Foto 6.41).



Foto 6.39, Foto 6.40: *Manifestazioni di degrado presenti nell'estremità dx e in mezzeria dell'elemento E<sub>14</sub>*



Foto 6.41: *Manifestazioni di degrado presenti nell'estremità sx dell'elemento E<sub>14</sub>*

## 6.4 Valutazione dello stato del ponte mediante il Metodo di Valutazione Numerica proposto dal CIAS

Si applica la procedura denominata Metodo di Valutazione Numerica (MNV) alle 14 travi costituenti l'impalcato del ponte seguendo la stessa numerazione utilizzata per la prima procedura (Fig.6.2). Si fa riferimento alle Schede Difettologiche<sup>1</sup> relative ai fenomeni di degrado sopra elencati ovvero: distacco del copriferro, ossidazione armatura di precompressione. Per ogni manifestazione di degrado si valuta la difettosità relativa DR data da:

$$DR = \sum(G \cdot K_1 \cdot K_2) \quad (6.2)$$

Ogni Scheda contiene i parametri valutativi da assegnare per ogni singolo stato di degrado, ovvero il peso G da attribuire ad ogni manifestazione, il coefficiente d'estensione  $K_1$  e il coefficiente d'intensità  $K_2$ .

Per quanto riguarda il distacco del copriferro (Scheda Difettologica 1.5) i parametri risultano:

- Peso  $G=2$ ;
- Coefficiente d'estensione  $K_1$  pari a 0,2 (appena presente), 0,5 (~50% della lunghezza), 1 (~tutta la lunghezza);
- Coefficiente d'intensità  $K_2$  pari a 0,2 (appena presente), 0,5 (~50% della larghezza), 1 (~tutta la superficie).

Per quanto riguarda l'armatura ossidata (Scheda Difettologica 1.6) i parametri risultano:

- Peso  $G=5$ ;
- Coefficiente d'estensione  $K_1$  pari a 0,2 (appena presente), 0,5 (~50% della superficie), 1 (~tutta la superficie);
- Coefficiente d'intensità  $K_2$  pari a 0,2 (accennata), 0,5 (intaccato ~ 50% del diametro), 1 (completamente eroso).

Nella Tab. 6.6 si mostrano, per ogni manifestazione di degrado, i risultati ottenuti:

---

<sup>1</sup> Rif. A. Ceccotti, E. Giangreco, L. Jurina, S. Martinello, E. Siviero, S. Tattoni, R. Bruson, G. Caramel, L. Maliardi, A. Papaleo, L. Perrone, *Manuale per la valutazione dello stato dei ponti*, 4 Emme Service Spa, Bolzano, 2002.



Tabella 6.6: Risultati manuale CIAS per i =1 to 14

<b>Distacco del copriferro G=2</b>			
Elemento strutturale $E_i$	Coefficiente d'estensione $K_1$	Coefficiente d'intensità $K_2$	Difettosità relativa DR
$E_1$	1	0,2	0,4
$E_2$	0,5	0,2	0,2
$E_3$	0,5	0,2	0,2
$E_4$	0,2	0,2	0,08
$E_5$	1	0,5	1
$E_6$	0,5	0,5	0,5
$E_7$	1	0,5	1
$E_8$	0,2	0,2	0,08
$E_9$	1	1	2
$E_{10}$	1	1	2
$E_{11}$	0,5	0,2	0,2
$E_{12}$	0,2	0,5	0,2
$E_{13}$	0,2	0,5	0,2
$E_{14}$	0,5	0,5	0,5
<b>Armatura ossidata G=5</b>			
Elemento strutturale $E_i$	Coefficiente d'estensione $K_1$	Coefficiente d'intensità $K_2$	Difettosità relativa DR
$E_1$	0,2	1	1
$E_2$	0,2	1	1
$E_3$	0,2	1	1
$E_4$	0,2	1	1
$E_5$	0,5	1	2,5
$E_6$	0,5	1	2,5
$E_7$	0,5	1	2,5

E <sub>8</sub>	0,2	1	1
E <sub>9</sub>	1	1	5
E <sub>10</sub>	1	1	5
E <sub>11</sub>	0,5	1	2,5
E <sub>12</sub>	0,5	1	2,5
E <sub>13</sub>	0,5	1	2,5
E <sub>14</sub>	0,5	1	2,5
$DR = \sum (G \cdot K_1 \cdot K_2)$			
Elemento strutturale E <sub>i</sub>	DR (G=2)	DR (G=5)	$DR = \sum (G \cdot K_1 \cdot K_2)$
E <sub>1</sub>	0,4	1	1,4
E <sub>2</sub>	0,2	1	1,2
E <sub>3</sub>	0,2	1	1,2
E <sub>4</sub>	0,08	1	1,08
E <sub>5</sub>	1	2,5	3,5
E <sub>6</sub>	0,5	2,5	3
E <sub>7</sub>	1	2,5	3,5
E <sub>8</sub>	0,08	1	1,08
E <sub>9</sub>	2	5	7
E <sub>10</sub>	2	5	7
E <sub>11</sub>	0,2	2,5	2,7
E <sub>12</sub>	0,2	2,5	2,7
E <sub>13</sub>	0,2	2,5	2,7
E <sub>14</sub>	0,5	2,5	3

Il manuale non impone un valore limite di DR, questo valore viene deciso di volta in volta basandosi generalmente sulle risorse finanziarie a disposizione dell'Ente concessionario o

proprietario del bene. Le opere che necessitano di interventi vengono classificate in base al valore di DR. Nel caso in esame si può supporre che per:

per  $DR > 5$  si consigli una campagna d'indagine che accerti le reali caratteristiche dei materiali e della struttura, nell'ottica di valutarne la capacità portante ritenuta a rischio; per  $DR > 2,5$  un intervento straordinario per il recupero tecnologico dei materiali e l'eliminazione della fonte del degrado; per un valore di DR molto basso, una procedura di archiviazione dell'ispezione per un confronto negli anni avvenire.

Nel caso in esame, come si evince dall'istogramma (Fig. 6.42), gli elementi  $E_1, E_2, E_3, E_4, E_8$  mostrano fenomeni di degrado che non determinano la necessità imminente di un intervento, gli elementi  $E_5, E_6, E_7, E_{11}, E_{12}, E_{13}, E_{14}$  invece, sono in una condizione di quasi sicurezza, i restanti risultano essere inaffidabili.

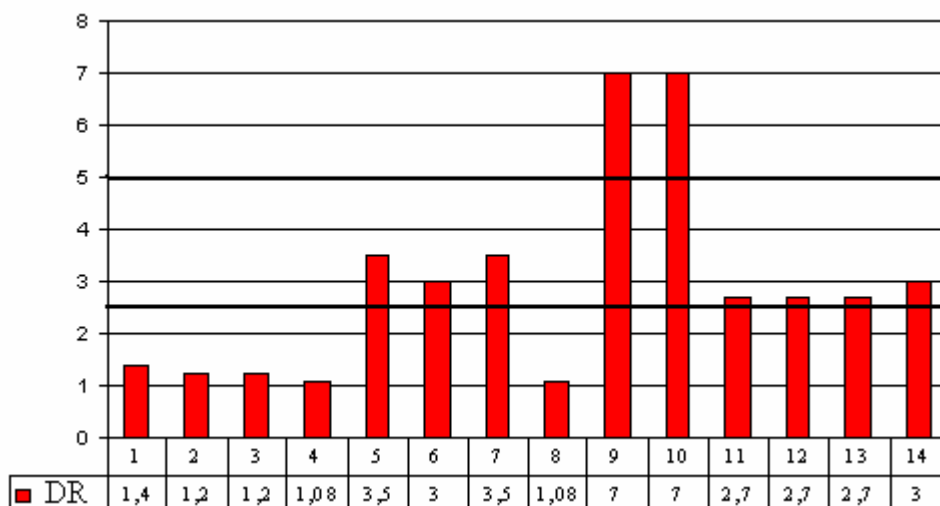


Figura 6.42: Risultati seconda procedura

Si analizzano di seguito i 14 elementi e i rispettivi coefficienti di difettosità relativa DR.

L'elemento  $E_1$  è caratterizzato dalla presenza di una forte corrosione di intensità pari a 1 ma concentrata lungo le aree periferiche laterali (Foto 6.7). Gli elementi  $E_2$  ed  $E_3$ , presentano, allo stesso modo, una forte corrosione localizzata lungo l'area centrale dell'elemento (Foto 6.9, Foto 6.12).  $E_4$  presenta un distacco del copriferro di lieve entità con conseguente corrosione delle armature esposte con localizzazione limitata a piccole aree (Foto 6.14, Foto 6.15). Gli elementi  $E_5$  ed  $E_7$  presentano il fenomeno della corrosione con conseguente distacco del copriferro distribuito lungo tutta la lunghezza delle aree periferiche laterali (Foto 6.16, Foto 6.20). L'elemento  $E_6$  presenta il fenomeno della corrosione con conseguente distacco distribuito lungo una singola area periferica laterale e non su tutta la lunghezza della trave (Foto 6.18). L'elemento  $E_8$  presenta una corrosione limitata a piccole superfici localizzate nell'area centrale e il distacco del copriferro

risulta appena accennato (Foto 6.22). Gli elementi E<sub>9</sub> ed E<sub>10</sub> presentano, per entrambe le manifestazioni di degrado, una situazione di evidente gravità dettata da elevata intensità e ampia diffusione (Foto 6.25, Foto 6.26, Foto 6.27, Foto 6.28, Foto 6.29, Foto 6.30). Gli elementi E<sub>11</sub>, E<sub>12</sub>, E<sub>13</sub> manifestano una corrosione di forte intensità localizzata lungo le aree periferiche laterali con conseguente distacco del copriferro (Foto 6.31, Foto 6.32, Foto 6.35, Foto 6.36, Foto 6.37). L'elemento E<sub>14</sub> presenta una forte corrosione con conseguente distacco del copriferro distribuito principalmente nelle aree periferiche laterali ma presente anche nell'area centrale (Foto 6.39, Foto 6.40, Foto 6.41).

## 6.5 Confronto dei risultati ottenuti con i due metodi

Di seguito si confrontano i risultati ottenuti dall'applicazione della logica fuzzy all'ispezione visiva (FL) con i risultati ottenuti mediante l'applicazione del Metodo di Valutazione Numerica proposto dal CIAS (MVN). Per poter effettuare il confronto si sono normalizzati i risultati ottenuti sia per la FL, sia per il MVN (Fig. 6.43). La misura della sicurezza con la FL risulta positiva se  $n \geq 4$ , con il MVN se  $DR \leq 5$ .

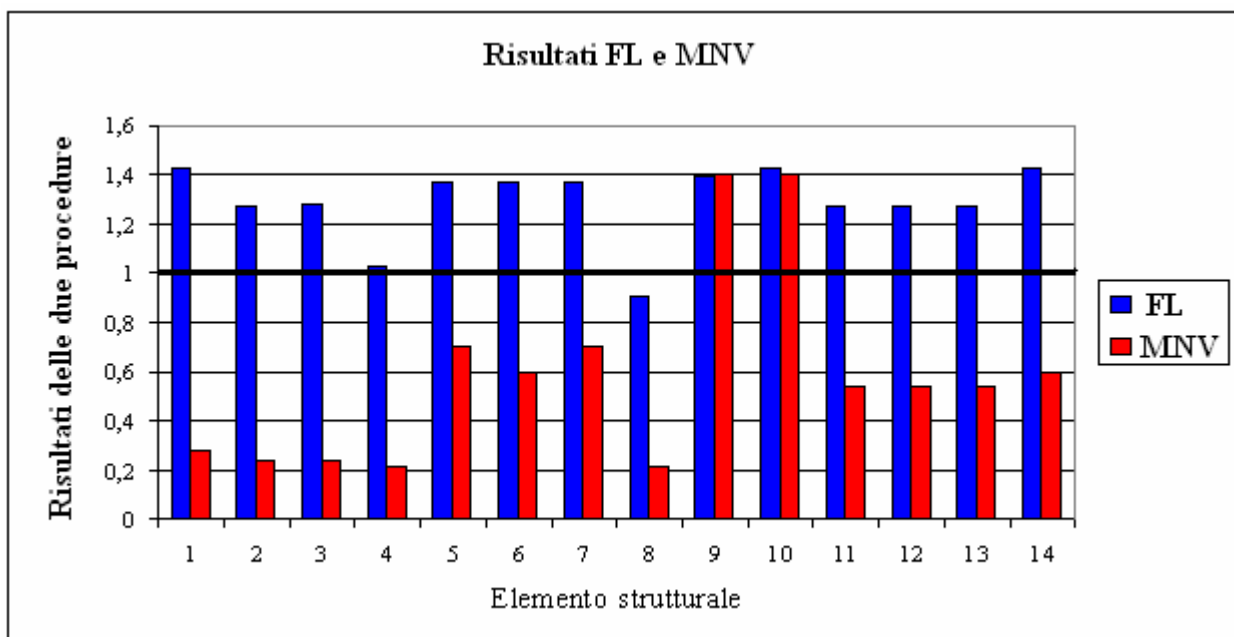


Figura 6.43: Risultati normalizzati FL e MNV

Riferendosi all'istogramma in Fig. 6.43 la misura della sicurezza risulta positiva se l'esito delle due procedure risulta inferiore al limite 1. Si può immediatamente notare come le due procedure diano risultati concordi solo per gli elementi E<sub>9</sub> ed E<sub>10</sub> e che la misura della sicurezza risulta positiva secondo la FL per l'elemento E<sub>8</sub> mentre, con il MVN, risulti positiva per tutti gli elementi tranne che per gli elementi E<sub>9</sub> e E<sub>10</sub>. Si analizzano di seguito, elemento per elemento, i risultati ottenuti.

Si considerano inizialmente gli elementi strutturali  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ .

Con la FL, in particolare modo per l'elemento  $E_1$  ( $n= 2,8$ , Tab. 6.5, Fig. 6.2), si ottengono risultati negativi. La misura della sicurezza, si ricorda, risulta positiva se l'esponente  $n$  risulta superiore o uguale al limite 4.

Dall'applicazione del MVN si ottengono risultati positivi (Fig.6.42, Tab. 6.6) per gli elementi  $E_1$ ,  $E_2$  ed  $E_3$ , inferiori al valore 2,5. Tale valutazione si basa, secondo il MVN, sulla presenza di una forte corrosione di intensità pari a 1 ma concentrata lungo le aree periferiche laterali (Foto 6.7). Il fatto che, la manifestazione di degrado si presenti localizzata non in tutta la superficie della trave, ma solo nelle parti laterali, porta ad un abbattimento del coefficiente di estensione per la corrosione  $K_1$  pari a 0,2. Tale coefficiente riduce il peso  $G$  pari a 5, ad un valore pari a 1. Con la FL è stato dato un peso differente a seconda della localizzazione del danno, invece, con l'applicazione del MVN, se il fenomeno di degrado non risulta presente nella totalità dell'elemento, il peso che la manifestazione assume, viene abbattuto fino alla metà e oltre, come nel caso in esame.

Per l'elemento strutturale  $E_4$  con la FL si è ottenuto un valore pari a 3,9 (Tab. 6.5, Fig. 6.2) prossimo al limite 4, con il MVN un valore di DR basso pari a 1,08 (Fig.6.42, Tab. 6.6). Dall'istogramma si evince come l'elemento analizzato tramite la FL si presenti al limite del margine di sicurezza, mentre, con la MVN questo margine aumenta a sfavore della sicurezza.

Per gli elementi  $E_5$ ,  $E_6$ ,  $E_7$  con la FL si ottengono risultati fortemente negativi con valori di  $n$  pari a 2,92 (Tab. 6.5, Fig. 6.2). Gli elementi presentano nella parte destra ed in mezzeria, una situazione di degrado avanzato, i cavi di precompressione risultano laschi e in alcuni casi, recisi. Con il MVN si ottengono valori di DR superiori al limite 2,5 (Fig. 6.42, Tab. 6.6) ma inferiori al limite 5. Questo comporta un intervento di ripristino del danno ma non una campagna di indagine che accerti la capacità portante dell'elemento stesso. In pratica con la FL si raggiunge uno SLU, con il MVN si ritiene non raggiunto tale stato limite.

Per l'elemento  $E_8$  i risultati ottenuti con le due procedure sono concordi. Il coefficiente di sicurezza  $n$  risulta 4,4 (Tab. 6.5, Fig. 6.2) superiore al limite 4; con il MVN si ottiene un valore di DR basso pari a 1,08 (Fig.6.42, Tab. 6.6).

Per gli elementi  $E_9$ ,  $E_{10}$  si ottengono allo stesso modo risultati concordi nel dare valore negativo. Si ottiene un valore dell'esponente di sicurezza fortemente negativo pari a 2,8 (Tab. 6.5, Fig. 6.2) per entrambi gli elementi, allo stesso modo con il MVN si ottengono valori di DR pari a 7 (Fig. 6.42, Tab. 6.6), superiori al limite 5. In questo caso, con entrambe le procedure, si evidenzia il raggiungimento dello SLU.

Per gli elementi  $E_{11}$ ,  $E_{12}$ ,  $E_{13}$ ,  $E_{14}$  con la FL si ottengono valori inferiori al limite 4 (Tab. 6.5, Fig. 6.2): raggiungimento dello SLU. Con il MVN, invece, si ottengono valori superiori, di poco, al limite 2,5 (Fig. 6.42, Tab. 6.6), il che suggerisce degli interventi di recupero ma non il controllo delle capacità portanti degli elementi esaminati.

Dai risultati ottenuti con il MVN si dimostra come il peso  $G$ , attribuito alla manifestazione di degrado, dipenda fortemente dal coefficiente di estensione e dal coefficiente di intensità. Si prenda, ad esempio, la manifestazione di degrado ossidazione ferri armatura, avente peso  $G$  pari a 5. Peso assolutamente giustificato dal fatto che tale manifestazione di degrado riduca la sezione resistente della trave, per tali ragioni tale manifestazione può provocare nell'elemento strutturale uno SLU e quindi, il collasso dell'intero elemento. Nel caso in esame, si parla di travi isostatiche caratterizzate da un singolo meccanismo di collasso; la cerniera plastica che rende la struttura labile si forma in mezzzeria, in corrispondenza della sezione con momento massimo. Nel caso in cui, l'ossidazione dell'armatura di precompressione dovesse essere localizzata in mezzzeria (coefficiente d'estensione  $K_1$  pari a 0,5) e dovesse risultare completamente eroso, (coefficiente d'intensità  $K_2$  pari a 1) il peso  $G$  della manifestazione di degrado si ridurrebbe a 2,5. Tale manifestazione di degrado, concentrata solo in mezzzeria, nella realtà dei fatti, potrebbe provocare, in certe condizioni di carico, il cedimento improvviso dell'elemento. Il peso  $G$  attribuito a tale manifestazione di degrado indurrebbe ad un giudizio di apparente sicurezza.

Con l'applicazione della logica fuzzy all'ispezione visiva la manifestazione di degrado ha pesi  $W$  differenti a seconda non solo della sua intensità (Giudizio Small, Medium, Large attribuito dall'operatore durante l'ispezione), ma anche della localizzazione del degrado all'interno dell'elemento stesso.

Nel caso di ossidazione dell'armatura di precompressione in mezzzeria, dando giudizio linguistico  $G$  Large (peso  $W$  attribuito dagli esperti Very Large) si ottiene un coefficiente di sicurezza pari a 3,25, valore che dà una risultato negativo per quanto riguarda la misura della sicurezza e che tiene conto maggiormente della localizzazione della manifestazione di degrado all'interno dell'elemento stesso. Si può concludere come il peso assunto dalla manifestazione di degrado stessa, la sua localizzazione all'interno dell'elemento strutturale, influenzino a vantaggio della sicurezza, il coefficiente  $n$ .

I risultati ottenuti con il MVN non dipendono da questi parametri ma solo dall'intensità e dall'estensione della manifestazione di degrado e il manuale<sup>2</sup> attribuisce gli stessi coefficienti  $K_1$  e  $K_2$  indipendentemente dal peso della manifestazione di degrado. Si noti, infatti come  $K_1$  e  $K_2$

---

<sup>2</sup> Cfr.: nota 1.

assumano gli stessi valori pari a 0,2-0,5-1 per la manifestazione distacco del copriferro  $G=2$  e per la manifestazione ossidazione armatura di precompressione di peso  $G=5$ . Il limite di sicurezza, nel caso in esame, imposto pari a 5, non risulta fisso. Questo può provocare a prima vista una lettura non immediata dei risultati, la loro interpretazione dipende dalle scelte imposte dall'Ente proprietario e concessionario dei beni e non dalla sicurezza strutturale dell'elemento stesso.

Sarebbe interessante applicare un approccio di tipo fuzzy al MVN proposto dal CIAS, in particolare si potrebbe interpretare l'equazione DR come l'intersezione tra le tre funzioni fuzzy che rappresentano i coefficienti  $K_1$  e  $K_2$  e il peso  $G$ .

## 6.6 Valutazione dello stato limite degli elementi $E_i$ mediante l'applicazione del Model Code

Nel caso in esame si considera come stato limite di riferimento la depassivazione delle armature. Il raggiungimento di questo stato, infatti, non porta a gravi conseguenze (come il pericolo per la vita umana) e per tali ragioni è considerato uno stato limite di esercizio. All'interno di uno stato limite la variabile che descrive la resistenza è da confrontarsi con la variabile che descrive il carico.

Nel caso dello stato limite di depassivazione, causato dal fenomeno della carbonatazione, il copriferro è definito come la resistenza e la profondità di carbonatazione come il carico. Poiché la profondità di carbonatazione aumenta con il passare del tempo, questa variabile carico deve essere definita come tempo dipendente [13].

L'equazione che descrive la dipendenza della profondità di carbonatazione dal tempo e che determina quindi la possibilità che lo stato limite di depassivazione venga superato è [13], [28], [29], [30]:

$$g(a, x_c(t)) = a - x_c(t) \quad (6.3)$$

Con

$$x_c(t) = \sqrt{2K_e K_c (K_t R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t)} C_s \sqrt{t} W(t) \quad (6.4)$$

In cui:

- a è la profondità del copriferro [mm];
- $x_c(t)$  è la profondità di carbonatazione al tempo t [mm];
- t è il tempo [anni];
- $K_e$  funzione ambientale pari a:

$$K_e = \left( \frac{1 - \left( \frac{RH_{real}}{100} \right)^{f_e}}{1 - \left( \frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right)^{g_e} \quad (6.5)$$

$RH_{real}$  umidità relativa dello strato carbonatato [%];

$RH_{ref}$  umidità relativa di riferimento [%];



$f_e$  e  $g_e$  esponenti costanti;

$K_c$  parametro di trasferimento dell'esecuzione pari a:

$$K_c = \left( \frac{t_c}{7} \right)^{b_c} \quad (6.6)$$

$t_c$  periodo di curing [giorni];

$b_c$  esponente di regressione;

$K_t$  parametro di regressione;

$R_{ACC,0}^{-1}$  inverso della resistenza alla carbonatazione;

$\varepsilon_t$  termine di errore;

$C_s$  impatto ambientale;

$W(t)$  parametro delle condizioni atmosferiche.

I coefficienti presenti nella (6.3), (6.4) sono verificabili all'interno del M.C. (Annesso B pag. 46-60). La quantificazione stocastica dei singoli parametri riguardanti le travi, costituenti l'impalcato del ponte, oggetto di indagine, è riportata nella Tab. 6.7.

Tabella 6.7: Elenco variabili stocastiche che descrivono l'andamento della profondità di carbonatazione al variare del tempo

Variabile		Unità di misura	Distribuzione	Valore Medio	Deviazione standard
$\varepsilon_{xc}$		mm	normale	0	2,0
$K_e$	$RH_{real;S}$	%	beta	m= 66.88; a= 40; b= 100	
	$RH_{ref}$	%	costante	65	-
	$f_e$	-	costante	2,5	-
	$g_e$	-	costante	5,0	-
$K_c$	$b_c$	-	normale	0,567	0,024
	$t_c$	giorni	costante	2	-
$K_t$		-	normale	1,25	0,35

$R_{ACC,0}^{-1}$		$(\text{mm}^2/\text{anno})/(\text{KgCO}_2/\text{m}^3)$	normale	4.230	1.650
$\epsilon_t$		$(\text{mm}^2/\text{anno})/(\text{KgCO}_2/\text{m}^3)$	normale	315,5	48
$C_S$		$\text{KgCO}_2/\text{m}^3$	normale	$8,2 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
T		anni	costante	100	-
W	ToW	-	costante	0	-
	$b_W$	-	normale	0,446	0,163
	$p_{SR}$	-	costante	0	-
	$t_0$	anni	costante	0,67	-

### 6.6.1 Quantificazione dei parametri e risultato

Per poter calcolare il valore della funzione ambientale  $K_e$  (6.5) si tiene conto del valore dell'umidità relativa di riferimento dello strato carbonatato,  $RH_{\text{real}}$ . Tale valore è stato calcolato con distribuzione di tipo beta utilizzando i dati registrati dalla stazione meteorologica dell'aeroporto di Elmas, (Cagliari) ottenendo un valore medio pari a 66,88%.

Il parametro delle condizioni atmosferiche  $W(t)$  è stato assunto pari all'unità in quanto lo studio si concentra sulla parte dell'impalcato non esposta a precipitazioni piovose.

Per l'anidride carbonica  $C_S$  è stata utilizzata la quantità media presente nell'atmosfera in condizioni standard. Di fatto il ponte si trova in aperta campagna e in zona esposta ai venti tipici del luogo (Maestrale).

Per quanto riguarda il valore dell'inverso della resistenza alla carbonatazione  $R_{ACC,0}^{-1}$ , non essendo disponibili dati di prove, si è fatto riferimento alle indicazioni presenti in letteratura a seconda del tipo di calcestruzzo, per le travi dell'impalcato è stato utilizzato un calcestruzzo compatibile con l'attuale CEM I 42,5 con valore medio di  $R_{ACC,0}^{-1}$  di 4230  $(\text{mm}^2/\text{anno})/(\text{kgCO}_2/\text{m}^3)$ .

I restanti valori inseriti nel calcolo sono costanti desunti dalla normativa [13].

Il valore medio di previsione della profondità di carbonatazione  $x_c(t)$  (6.4), considerando una vita di servizio di progetto  $t_{SL}$  pari a 100 anni, risulta avere il seguente andamento (Fig. 6.44):

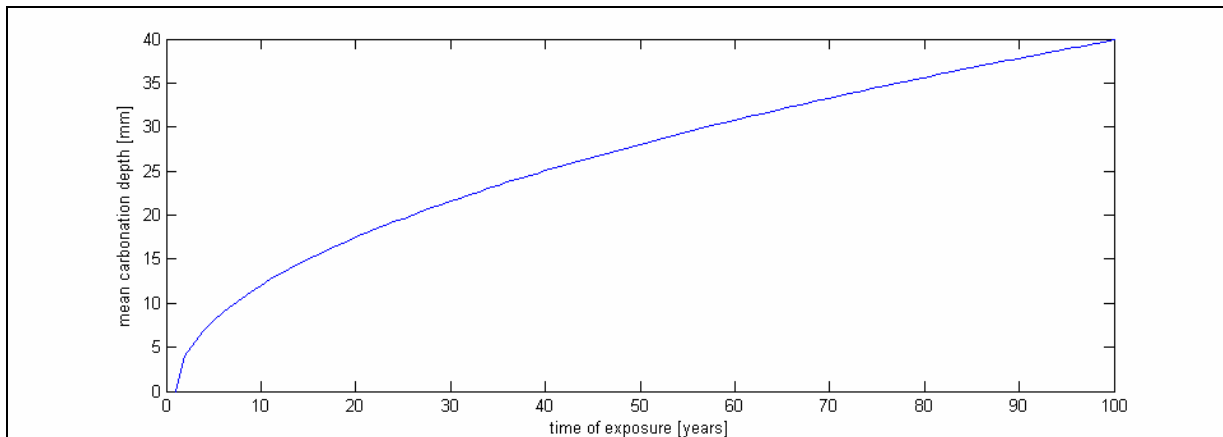


Figura 6.44: Andamento medio della profondità di carbonatazione secondo il Model Code

L'impalcato del ponte, costruito tra il 1963 e il 1964, ha 45 anni di vita di servizio. Dai risultati raggiunti (utilizzando solo i valori medi), tramite l'applicazione del M.C., si è ottenuta una profondità di carbonatazione media di 28,3 mm. Per testare l'affidabilità sono state eseguite delle prove di laboratorio, necessarie per misurare, su alcuni campioni di calcestruzzo prelevati, la profondità di carbonatazione.

## 6.6.2 Indagine sperimentale

Prima di eseguire le misurazioni e le prove, si è provveduto all'identificazione delle travi costituenti l'impalcato secondo quanto indicato in Fig. 6.2.

In data 6 ottobre 2009, sono stati prelevati dei campioni di calcestruzzo, tramite la prova *pull-out*, nelle travi identificate con i numeri: 2 (n°1 prelievo), 7 (n°1 prelievo), 10 (n°2 prelievi) e 14 (n°1 prelievo). La prova è stata eseguita sull'anima delle travi (Foto 6.44).



Foto 6.44: prova di pull-out trave E<sub>7</sub>

Grazie al test colorimetrico, eseguito con la fenolftaleina all'1% in alcol etilico, è stato possibile misurare la profondità di carbonatazione ottenendo i seguenti risultati (Foto 6.45, Tab. 6.8):



Foto 6.45: risultati test colorimetro

Tabella 6.8: Risultati ottenuti dal test di laboratorio

Elemento strutturale E <sub>i</sub>	Profondità [mm]
E <sub>2</sub>	28
E <sub>7</sub>	19
E <sub>10</sub>	28
E <sub>10</sub>	27
E <sub>14</sub>	15

Si confrontano i risultati ottenuti dai test (Tab. 6.8) con il valore medio ottenuto con l'applicazione del M.C. (Fig. 6.43), si ottiene un riscontro positivo per le travi numero 2 e 10 poiché il risultato auspicato tramite la norma coincide con il risultato della prova. Ciò non avviene per le travi 7 e 14, che hanno rispettivamente una profondità di carbonatazione di 19 e 15 mm, risultati che, secondo il M.C., sarebbero stati raggiunti, per la trave 7, al ventiduesimo anno di vita di servizio, mentre per la trave 14 al quattordicesimo anno.

Si deve sottolineare che i dati ottenuti dall'elaborazione analitica, sono dei valori medi. Questo conferma il fatto che per le travi 2 e 10 il risultato è più che positivo, mentre per le travi 7 e 14 si è in una condizione che si allontana, in senso negativo, dai risultati attesi con l'applicazione del M.C..

Si possono fare due ipotesi: la prima, è che i dati in nostro possesso siano insufficienti per confermare negativamente o positivamente l'applicazione del M.C. al caso specifico, la seconda è che la prova risulti essere localizzata in parti meno danneggiate e che quindi non sia espressione dell'intero elemento strutturale.

La misura della profondità di carbonatazione, tramite estrazione del cuneo di cls, è stata localizzata in un punto ben preciso della trave. Il risultato finale del test può variare in base al punto scelto per l'estrazione del campione di calcestruzzo. Il risultato non descrive lo stato globale dell'elemento trave. Sarebbe stato auspicabile prelevare più campioni, tuttavia tale procedura avrebbe indebolito la trave. Il ponte, infatti, è in uso e rappresenta il collegamento diretto tra la città di Cagliari e i Comuni della costa Sud Occidentale.

L'esito della prova, nella trave 14, non descrive compiutamente lo stato in cui versa l'intero elemento strutturale. Infatti, da osservazione diretta, si evince uno stato di avanzato degrado che contrasta sostanzialmente con il dato sperimentale e non risulta essere collimante con il valore medio della profondità di carbonatazione  $x(t)$  espresso dalla procedura del M.C.. Ne deriva che le travi oggetto di sperimentazione hanno superato lo stato limite di depassivazione, trovandosi quindi in uno stato limite ultimo. In questo studio lo scopo non è tanto quello di validare la procedura dettata dal M.C. con prove sperimentali, ma è quello di verificare in quale SL versino gli elementi strutturali oggetto di ispezione visiva.

### 6.6.3 Confronti

Applicando la logica fuzzy, si è sviluppata una procedura specifica per la manipolazione e l'interpretazione dei giudizi linguistici soggettivi derivanti da un controllo visivo da parte di personale non qualificato, al fine di valutare, in modo oggettivo, con l'utilizzo di tecnici esperti, il livello di sicurezza della struttura in esame.

Mettendo a confronto i risultati ottenuti tramite l'applicazione della logica fuzzy all'ispezione visiva e tramite l'applicazione del M.C., si evince come l'ispezione visiva rappresenti un metodo d'indagine a basso costo con risultati finali che tendono a vantaggio della sicurezza. Infatti, si è dimostrato tramite l'applicazione del MC, come il fronte di carbonatazione superasse lo spessore minimo del copriferro variabile tra i 5-15mm, superando lo stato limite di depassivazione sino al raggiungimento dello SLU.

I risultati, per quanto riguarda l'applicazione della FL, sono riportati nella Tab. 6.8 e nella Fig. 6.2. Da ciò si desume come solo le travi 4 e 8 si trovino in una condizione di sicurezza. I risultati ottenuti con l'applicazione del M.C. sono riportati nella Fig. 6.44 in cui si evince come la profondità media di carbonatazione  $x(t)$  attualmente abbia superato il valore medio dello spessore del copriferro. Gli elementi strutturali, in base a queste considerazioni, si trovano in uno stato limite ultimo.

Lo scopo del confronto è quello di dimostrare le potenzialità di un metodo che, basandosi solo sull'aspetto visivo del degrado, sia in grado di fornire una corretta valutazione di quest'ultimo e della sua evoluzione nella struttura al passare del tempo.

## Conclusioni

Il censimento delle opere strutturali rappresenta un passo fondamentale nella gestione dei manufatti. La sua funzione non è quella di valutare o descrivere lo stato di degrado o di verificare le capacità resistive delle opere, bensì, quello di acquisire un maggior numero di dati derivati dall'analisi visiva e dal rilievo di tipo geometrico, utili al fine di valutare la quantità e la tipologia delle strutture da sottoporre a forme di vigilanza occasionale o continua. Diviene dunque necessario, prima che ogni campagna di ispezioni abbia luogo, circoscrivere i casi da sottoporre ad indagine. Censimento, che tenga conto, non solo della condizione di degrado della singola opera, ma offra anche una prima selezione tipologica dei manufatti stessi [7]. Il censimento infatti prevede la raccolta di numerosi dati utilizzando una Scheda di Acquisizione sul campo, impostata attraverso una suddivisione delle informazioni tipo:

- identificazione;
- dati generali;
- caratteristiche costruttive;
- caratteristiche geometriche.

Una parte delle informazioni, contenute nella scheda, servirà a costituire la rete delle opere oggetto di indagine, una parte invece, come le caratteristiche costruttive e le caratteristiche geometriche, servirà alla preparazione della Scheda Ispettiva che accompagnerà, in un secondo momento, l'ispezione visiva *in situ*.

Con l'applicazione del metodo proposto, l'ispezione visiva diviene un esame oggettivo della situazione di degrado delle strutture oggetto di indagine. La valutazione numerica del coefficiente di sicurezza  $n$  consente di programmare interventi mirati di manutenzione e nei casi più gravi, che possono implicare un rischio strutturale, di eseguire indagini più approfondite, potendo così stabilire delle priorità di intervento. La particolarità del metodo è la possibilità che le ispezioni visive possano essere effettuate sistematicamente anche da personale non esperto. In questo modo, i costi derivanti da questo tipo di indagine, vengono abbattuti pur mantenendo costante l'affidabilità del risultato che si traduce nel valore del coefficiente di sicurezza  $n$ .

Il sistema permette di ordinare in maniera chiara i dati derivanti dall'ispezione visiva anche quando il numero delle opere è rilevante. In pratica per ogni struttura, oggetto di studio, viene impostato un sistema *software*<sup>1</sup> che restituisce, per ogni elemento strutturale, il coefficiente di sicurezza  $n$ . La manipolazione dei giudizi linguistici soggettivi, tramite la preventiva elaborazione di un procedimento basato sull'applicazione della logica fuzzy, consente di ottenere risultati in cui la variabile soggettiva viene limitata o addirittura rimossa. Questa fase precede l'ispezione visiva stessa ed è di fondamentale importanza.

Lo scopo dell'applicazione del metodo proposto è quello di valutare e di gestire tutte le informazioni derivanti dalle ispezioni visive. In questo modo gli esperti possono, attraverso la valutazione del coefficiente di sicurezza  $n$ , valutare con un criterio omogeneo, lo stato di conservazione delle opere oggetto di indagine, in modo tale da poter creare all'interno di una struttura o tra più strutture una gerarchia di intervento. Questo consente una valutazione economica di massima per la programmazione degli interventi manutentivi. Risulta di facile applicazione in quanto si basa semplicemente sulla riconoscibilità, attraverso le schede ispettive, delle manifestazioni di degrado presenti e sul giudizio di gravità linguistico da associare alle manifestazioni.

Tale sistema informatico di gestione, basato sull'applicazione del *software*, considera, non solo il peso che la manifestazione di degrado possiede, ma la contestualizza all'interno dell'elemento di appartenenza. Infatti, per ogni manifestazione di degrado, il personale esperto decide a priori tramite giudizio linguistico il peso  $W$  che la manifestazione di degrado possiede all'interno dell'elemento  $e$ , nel caso di strutture iperstatiche, il peso  $WE$  che l'elemento ha all'interno dell'intera struttura. Questo consente una valutazione specifica di dettaglio e una valutazione più ampia della condizione del manufatto nel suo insieme tenendo conto della morfologia del sistema strutturale.

---

<sup>1</sup> Vedi Appendice A7



## Bibliografia

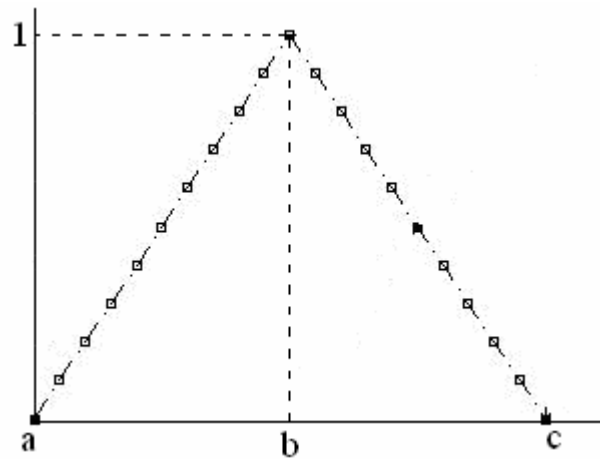
- [1] L. Bertolini, *Materiali da costruzione - Volume II: Degrado, prevenzione, diagnosi, restauro*, Città Studi Edizioni, Torino, 2006
- [2] L. Coppola, *La diagnosi del degrado delle strutture in calcestruzzo*. L'Industria Italiana del Cemento. Ottobre 1993, 657-666.
- [3] M. Acito, *Misura Fuzzy della vulnerabilità di manufatti stradali e ferroviari in c.a. interessati da degrado*. 13° Congresso CTE, Pisa, Novembre 2000.
- [4] D.I. Blockley, *Predicting the likelihood of structural accidents*, Proceedings of Institutions of Civil Engineering 59, 1975, 659-668.
- [5] A. B. Tee, M. D. Bowman and K.C. Sinha, *A fuzzy mathematical approach for bridge condition evaluation*. Civil Engineering System. Marzo 1988, 17-24.
- [6] Zhao, Zhiye, Chen Chuanyu. *A Fuzzy system for concrete bridge damage diagnosis*. Computers and Structures 80, 2002, 629-641.
- [7] A. Ceccotti, E. Giangreco, L. Jurina, S. Martinello, E. Siviero, S. Tattoni, R. Bruson, G. Caramel, L. Maliardi, A. Papaleo, L. Perrone, *Manuale per la valutazione dello stato dei ponti*, 4 Emme Service Spa, Bolzano, 2002.
- [8] Yeong Min Kim, Chee Kyeong Kim, Geon Ho Hong, *Fuzzy Set based crack diagnosis system for reinforced concrete structures*. Computers and Structures 85, 2007, 1828-1844.
- [9] L.A. Zadeh, *Fuzzy sets*. Information and control 8, 1965, 338-353.
- [10] Kosko, Bart (ed.). *Neural Networks and Fuzzy Systems. System Approach to Machine Intelligence*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- [11] Von Altrock, Constantin (ed.) 1995. *Fuzzy Logic and Neurofuzzy Applications Explained*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1992.

- [12] UNI ENV 1990: 2004 Eurocodice *Criteri generali di progettazione strutturale*, CEN/TC 250, Maggio 2004.
- [13] CEB FIP: Model Code 2006: *Model Code for Service Life Design*, Bulletin fib n°34.
- [14] M. V. Piras, L. Deias, F. Mistretta, *Fuzzy logic application to the vulnerability assessment of concrete structures affected by degradation*, International Conference on Inspection, Appraisal, Repairs and Maintenance of Structures, Yantai China, 23-25 april 2010.
- [15] M. V. Piras, L. Deias, F. Mistretta, *Vulnerability analysis of a reinforced concrete structure by visual inspection*, International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management IABMAS 2010, Philadelphia, Pennsylvania, USA, July 11-15 2010.
- [16] A. Migliacci, *L'architettura dell'equilibrio e della formazione*, Volume I, Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 2006.
- [17] E. Giangreco, *Ingegneria delle strutture. Volume II, Metodi di analisi*, P. Bisegna, B. Caffarelli, A. Castaldi, M. Como, G. Croci, G. Faella, A. Grimaldi, F. Maceri, A. Migliacci, R. Damasco, G. Serino, R. Sparacio, Capitolo XI, A. Migliacci, *La sicurezza strutturale*, Utet, Torino, 2002, 654- 713.
- [18] P. E Pinto, *Elementi di Analisi Probabilistica della Sicurezza*. Roma, 1972.
- [19] S. Perno, Z. Rinaldi, C. Valente, L. Pardi, *Effetti della corrosione sulla sicurezza di elementi di cemento armato*, Giornate AICAP '99, Torino, 4-6 novembre 1999.
- [20] Ch. Massonnet, M. Save, *Calcolo plastico a rottura delle costruzioni*, Clup, Milano, 1980.
- [21] EN 1998-1: 2004 Eurocodice 8. Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for building, aprile 2005.
- [22] NCT2008 - Norme tecniche per le costruzioni, D.M. 14 Gennaio 2008.

- [23] M. V. Piras, L. Deias, F. Mistretta, *Vulnerability assessment of a concrete bridge through fuzzy logic analysis of visual inspection compared to chemical inspection*, International Association for Bridge and Structural Engineering Symposium, IABSE, Venice, Italy, 22-24 September 2010.
- [24] B. De Nicolo, D. Meloni, F. Mistretta, M.V. Piras, *Inspection Based Approach for Security Assessment Concrete Bridges*, 12th International Conference on Structural Faults + Repair-2010, Edinburgh, 15th - 17th June 2010.
- [25] F. Biondini, F. Bontempi, DM. Frangopol, PG. Malerba, *Cellular Automata Approach to Durability Analysis of Concrete Structures in Aggressive Environments*. ASCE J. of Structural Engineering, 130(11), 2004, 1724-1737.
- [26] F. Biondini, F. Bontempi, DM. Frangopol, PG. Malerba, *Probabilistic Service Life Assessment and Maintenance Planning of Concrete Structures*, ASCE J. of Structural Engineering, 132(5), 2006, 810-825.
- [27] F. Biondini, F. Bontempi, DM. Frangopol, PG. Malerba, *Time-variant Performance of the Certosa Cable-Stayed Bridge*, Structural Engineering International, 16(3), 2006, 235-244.
- [28] CEB: Comité Euro-International du Béton, *New Approach to Durability Design, An example for carbonation induced corrosion*, Bulletin d'Information n°238.
- [29] DARTS, 2004. *Durable and Reliable Tunnel Structures: Deterioration Modelling*, European Commission, Growths 2000", Contract G1RD-CT-2000-00467, Project GrD1-25633, 2004.
- [30] F. Mistretta, M.V. Piras, G. Concu, *Validazione della procedura di calcolo della profondità di carbonatazione secondo M.C. N°34, 2006. Applicazione ad un ponte in c.a.p.*, XVIII Convegno CTE, Brescia, 11, 12, 13, Novembre 2010.

## [A1] Costruzione delle funzioni fuzzy

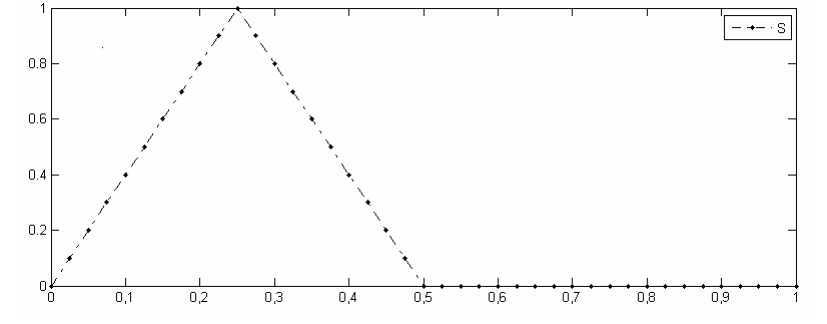
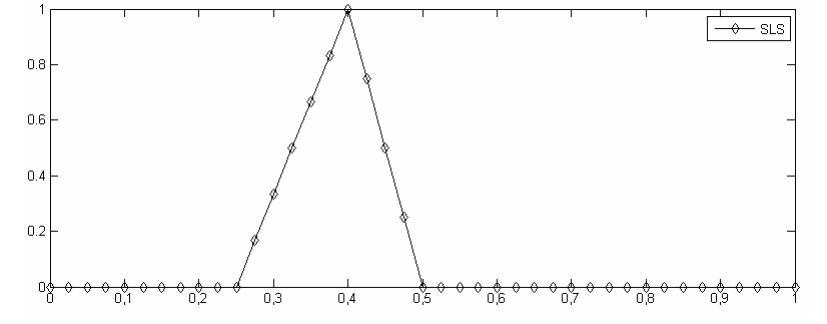
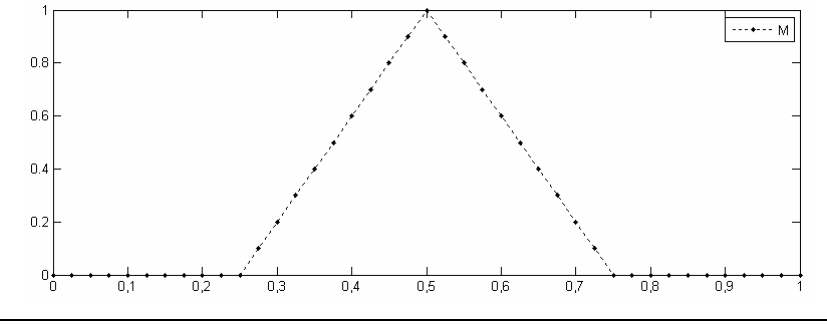
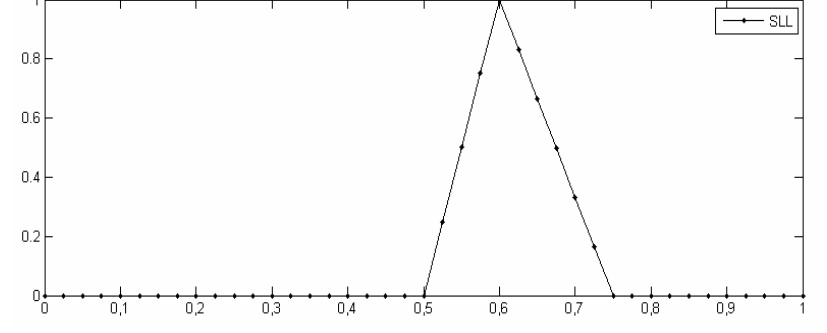
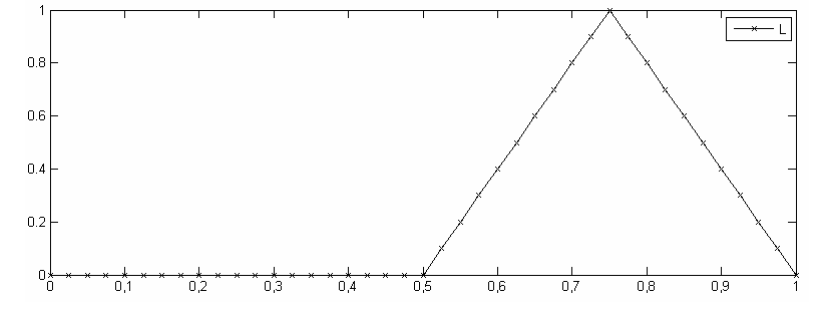
Si sono utilizzate per i giudizi linguistici  $G_{ij}$ , per il peso  $W_{ijk}$  e per l'esponente di sicurezza  $N$ , funzioni di appartenenza di tipo triangolare aventi il seguente andamento:

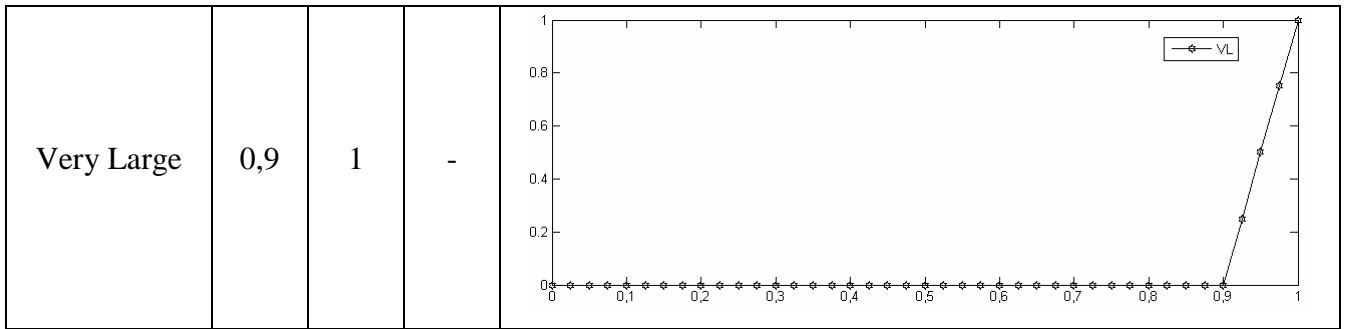
$$\mu(x) = \begin{array}{|l|l|} \hline 0 & \text{se } x < a \\ \hline \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x < b \\ \hline 1 & \text{se } x = b \\ \hline \frac{c-x}{c-b} & \text{se } b < x < c \\ \hline 0 & \text{se } x > c \\ \hline \end{array}$$


Vi è però una differenza tra il dominio delle funzioni di appartenenza utilizzate. Sia per i giudizi  $G_{ij}$ , sia per il peso  $W_{ijk}$ , si è discretizzato il dominio  $[0,1]$  delle funzioni fuzzy in  $N_f=41$  punti con 40 intervalli di ampiezza pari a 0,025 mentre per l'esponente di sicurezza  $N$  si è discretizzato il dominio  $[n_{\min}=2, n_{\max}=7]$  in  $N_e=21$  punti con 20 intervalli di ampiezza pari a 0,05, ottenendo così nel primo caso vettori di dimensione  $41 \times 1$  nel secondo caso invece  $21 \times 1$ .

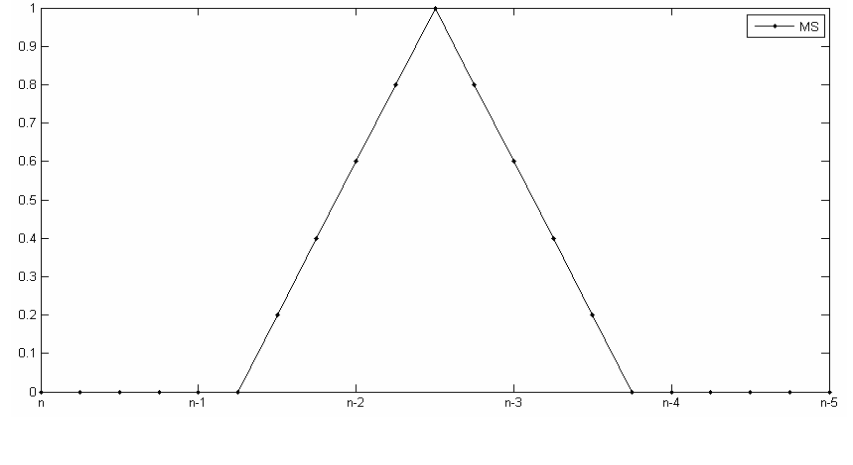
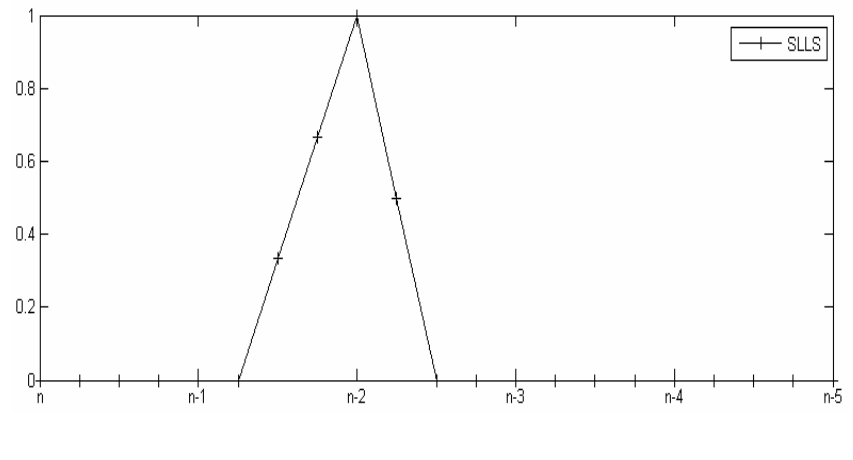
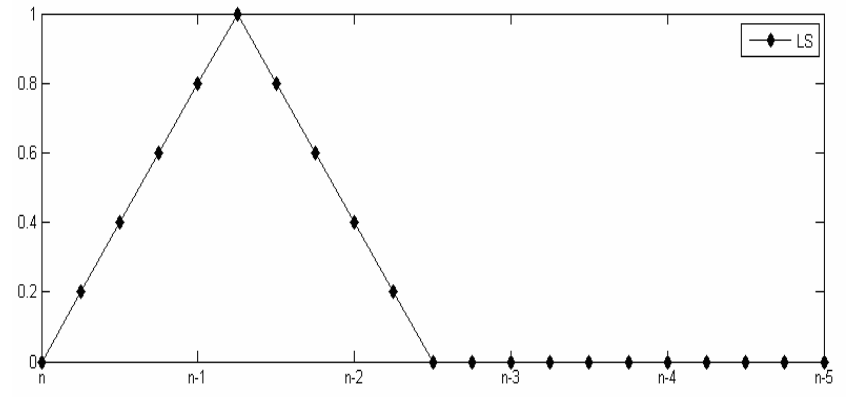
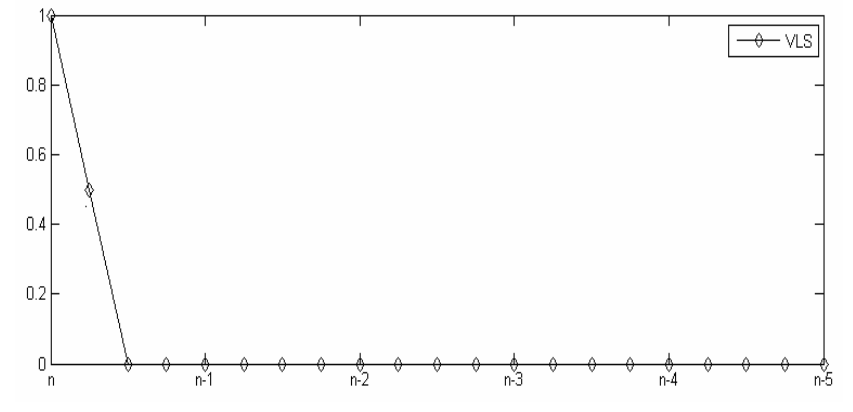
Di seguito si elencano i valori di  $a$ ,  $b$ ,  $c$  per le funzioni di appartenenza adottate sia per  $G_{ij}$  sia per  $W_{ijk}$  e per l'esponente di sicurezza  $N$ .

Funzioni di appartenenza $G_{ij}, W_{ijk}$	$a$	$b$	$c$	Grafico
Very Small	-	0	0,1	

Small	0	0,25	0,5	
Slightly Small	0,25	0,4	0,5	
Medium	0,25	0,5	0,75	
Slightly Large	0,5	0,6	0,75	
Large	0,5	0,75	1	



Funzioni appartenenza N (n = 7)	a	b	c	Grafico
Very Small	7	6,5	-	
Small	7	5,75	4,5	
Slightly Small	5,75	5	4,5	

Medium	5,75	4,5	3,25	
Slightly Large	4,5	4	3,25	
Large	4,5	3,25	2	
Very Large	-	2,25	2	



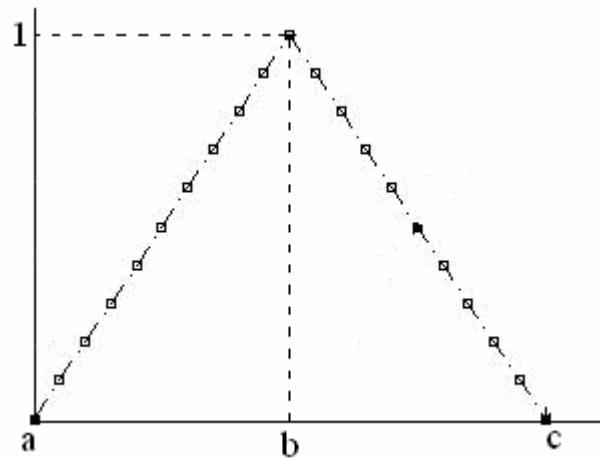






## [A6] Costruzione delle funzioni fuzzy relative al peso WE.

Si sono utilizzate per il peso WE che l'elemento strutturale ha all'interno della struttura iperstatica, funzioni di appartenenza di tipo triangolare aventi il seguente andamento:

$$\mu(x) = \begin{array}{|l|l|} \hline 0 & \text{se } x < a \\ \hline \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x < b \\ \hline 1 & \text{se } x = b \\ \hline \frac{c-x}{c-b} & \text{se } b < x < c \\ \hline 0 & \text{se } x > c \\ \hline \end{array}$$


Per il peso WE si è discretizzato il dominio [0,1] delle funzioni fuzzy in  $N_f=41$  punti, ottenendo così vettori di dimensione 41x1.

Di seguito si elencano i valori di a, b, c per le funzioni di appartenenza. Il *range* di variazione del dominio del peso WE varia da -1 a +0,25, l'origine risulta coincidente con l'esponente n defuzzificato non pesato. Nel grafico sottostante si mostrano le funzioni di appartenenza Small, Medium, Large quando al giudizio linguistico di gravità viene dato valore Small e al peso valore Medium. Il valore dell'esponente di sicurezza defuzzificato vale 5,12.

Funzioni di appartenenza $WE_{ijk}$	a	b	c	Grafico
Small	-0,25	n	0,25	
Medium	-0,75	-0,5	n	
Large	-1	-0,75	n	

## [A7] Software

Il software utilizzato in questo lavoro è stato sviluppato dall'Ing. Elettronico Luisa Deias.

L'implementazione delle procedure illustrate è stata fatta mediante l'utilizzo del linguaggio fortran.

Il giudizio linguistico e il peso associato all'elemento oggetto della valutazione, sono i principali dati in ingresso al programma. Tali funzioni vengono descritte mediante delle funzioni triangolari discretizzate, come mostrate in Fig.3.1, Fig.3.2, e pertanto matematicamente rappresentate mediante vettori.

Un documento di testo dati.txt contiene le informazioni in ingresso del nostro programma e contiene pertanto tutti i dati in ingresso oltre che i parametri modificabili dall'utente.

Il file si presenta come segue:

Dati in ingresso:

Punti sull'asse x delle v.f. (S,M,L: discretizzazione dominio [0,1]) [N]

41

Valore max dell'esponente di sicurezza [Nmax]

7

Valore min dell'esponente di sicurezza [Nmin]

2

Punti sull'asse x delle v.f per l'esponente di sicurezza (SS,MS,LS: dominio [Nmax,Nmin]) [NS]

21

Esponente di concentrazione per le variabili fuzzy (exp=2 --> Acito)

1

Esponente di concentrazione per le v.f. per l'esponente di sicurezza

1

VARIABILI FUZZY:

membership function: VERY SMALL [1:TRIANG; 2:TRAPZ; 3:S-CURVE]

1

parametri per la m.f. [TRIANG:b,c; TRAPZ:b,c,d; S-CURVE: alfa,beta,gamma]

0d0 0.1d0

esponente di concentrazione

1

membership function: SMALL [1:TRIANG; 2:TRAPZ; 3:PI-CURVE]

1

parametri per la m.f. [TRIANG:a,b,c; TRAPZ:a,b,c,d; PI-CURVE: beta,gamma]

0d0 0.25d0 0.5d0

esponente di concentrazione

1

membership function: SLIGHTLY SMALL [1:TRIANG; 2:TRAPZ; 3:PI-CURVE]

1

parametri per la m.f. [TRIANG:a,b,c; TRAPZ:a,b,c,d; PI-CURVE: beta,gamma]

0.25d0 0.4d0 0.5d0

esponente di concentrazione

1

membership function: MEDIUM [1:TRIANG; 2:TRAPZ; 3:PI-CURVE]

1

parametri per la m.f. [TRIANG:a,b,c; TRAPZ:a,b,c,d; PI-CURVE: beta,gamma]

0.25d0 0.5d0 0.75d0

esponente di concentrazione

1

membership function: SLIGHTLY LARGE [1:TRIANG; 2:TRAPZ; 3:PI-CURVE]

1

parametri per la m.f. [TRIANG:a,b,c; TRAPZ:a,b,c,d; PI-CURVE: beta,gamma]

0.5d0 0.6d0 0.75d0

esponente di concentrazione

1

membership function: LARGE [1:TRIANG; 2:TRAPZ; 3:PI-CURVE]

1

parametri per la m.f. [TRIANG:a,b,c; TRAPZ:a,b,c,d; PI-CURVE: beta,gamma]

0.5d0 0.75d0 1d0

esponente di concentrazione

1

membership function: VERY LARGE [1:TRIANG; 2:TRAPZ; 3:S-CURVE]

1

parametri per la m.f. [TRIANG:a,b; TRAPZ:a,b,c; S-CURVE: alfa,beta,gamma]

0.9d0 1d0

esponente di concentrazione

1

VARIABILI FUZZY PER L'ESPONENTE DI SICUREZZA: (NOTA: VERYSMALLSAFE corrisponde a una curva VERYLARGE etc.)

membership function: VERYSMALLSAFE [1:TRIANG; 2:TRAPZ; 3:S-CURVE]

1

parametri per la m.f. [TRIANG:a,b; TRAPZ:a,b,c; S-CURVE: alfa,beta,gamma]

6.5d0 7d0

esponente di concentrazione

1

membership function: SMALLSAFE [1:TRIANG; 2:TRAPZ; 3:PI-CURVE]

1

parametri per la m.f. [TRIANG:a,b,c; TRAPZ:a,b,c,d; PI-CURVE: beta,gamma]

4.5d0 5.75d0 7d0

esponente di concentrazione

1

membership function: SLIGHTLYSMALLSAFE [1:TRIANG; 2:TRAPZ; 3:PI-CURVE]

1

parametri per la m.f. [TRIANG:a,b,c; TRAPZ:a,b,c,d; PI-CURVE: beta,gamma]

4.5d0 5d0 5.75d0

esponente di concentrazione

1

membership function: MEDIUMSAFE [1:TRIANG; 2:TRAPZ; 3:PI-CURVE]

1

parametri per la m.f. [TRIANG:a,b,c; TRAPZ:a,b,c,d; PI-CURVE: beta,gamma]

3.25d0 4.5d0 5.75d0

esponente di concentrazione

1

membership function: SLIGHTLYLARGESAFE [1:TRIANG; 2:TRAPZ; 3:PI-CURVE]

1

parametri per la m.f. [TRIANG:a,b,c; TRAPZ:a,b,c,d; PI-CURVE: beta,gamma]

3.25d0 4d0 4.5d0

esponente di concentrazione

1

membership function: LARGESAFE [1:TRIANG; 2:TRAPZ; 3:PI-CURVE]

1

parametri per la m.f. [TRIANG:a,b,c; TRAPZ:a,b,c,d; PI-CURVE: beta,gamma]

2d0 3.25d0 4.5d0

esponente di concentrazione

1

membership function: VERYLARGESAFE [1:TRIANG; 2:TRAPZ; 3:S-CURVE]

1

parametri per la m.f. [TRIANG:b,c; TRAPZ:b,c,d; S-CURVE: alfa,beta,gamma]

2d0 2.5d0

esponente di concentrazione

1

!nota: la variabile fuzzy LARGESAFE ha il valore massimo per  $n=N_{max}$

!(ovvero  $n=8$  che corrisponde alla probabilità  $10^{-n}$  più piccola)

!analogamente MEDIUMSAFE ha il max in  $n-2$  e SMALLSAFE in  $n-4$  (ovvero

!esponente pari a  $n=4$  per  $N_{max}=8$  che corrisponde alla probabilità

!più alta)

E' necessario fornire in ingresso il valore di giudizio ( $G_{ij}$ ) e il valore del peso ( $W_{ijk}$ ), scegliendo nel primo caso tra tre possibili valori: SMALL=2; MEDIUM=4; LARGE=6, nel secondo caso tra sette possibili valori: VERY SMALL=1; SMALL=2; SLIGHTLY SMALL=3; MEDIUM=4; SLIGHTLY LARGE= 5; LARGE=6; VERY LARGE=7. (Fig.1)

