

## Giornata di Studio

*Rischio sismico e prevenzione: scuole, ospedali ed altre strutture strategiche*  
*Aula magna del Campus di Matera – Università degli studi della Basilicata*



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI DELLA  
BASILICATA



# La gestione del ciclo vita delle costruzioni attraverso una nuova procedura basata sull'affidabilità

**Michele D'Amato**

Università degli Studi della Basilicata (Matera)

DIUSS – Dipartimento per l'innovazione Umanistica, Scientifica e Sociale

email: [michele.damato@unibas.it](mailto:michele.damato@unibas.it)

*Matera, 18 Maggio 2026*

## Sommario

### 1. Introduzione

### 2. Richiami di affidabilità

### 3. Una nuova procedura basata sull'affidabilità per la gestione del ciclo vita delle costruzioni nuove ed esistenti

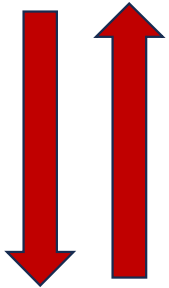
### 4. Applicazione a casi studio

### 5. Conclusioni

## Introduzione

La gestione del ciclo di vita ha l'obiettivo di prevedere il futuro dell'opera, controllando i fattori che potrebbero comprometterne le prestazioni. Poiché tale previsione è soggetta a **incertezze**, è necessaria una **descrizione probabilistica di tutte le variabili** che determinano il comportamento dell'opera..

**RISCHIO**



**AFFIDABILITA'**

È ormai riconosciuto che le decisioni relative alla **progettazione e alla valutazione delle costruzioni debbano basarsi su criteri fondati sul rischio**, tenendo conto delle perdite in termini di vite umane e lesioni, dei danni economici e dei danni ambientali **causati da una risposta strutturale indesiderata**, come il crollo o il superamento degli stati limite (di resistenza e/o di servizio), mettendo in relazione i potenziali cedimenti con le loro conseguenze (ad esempio, quelle economiche).

L'approccio basato sull'affidabilità si concentra sulla **probabilità che si verifichi una risposta strutturale indesiderata**, ovvero **la probabilità di fallimento nel corso della vita utile o la probabilità di fallimento annuale**, nel rispetto di determinati requisiti di affidabilità, in base alle conseguenze del fallimento, ai costi e alle risorse impiegate

**Un approccio basato sull'affidabilità ammette sempre una piccola probabilità di fallimento!**

## Perchè applicare una procedura basata sull'affidabilità per la valutazione del ciclo vita delle costruzioni?

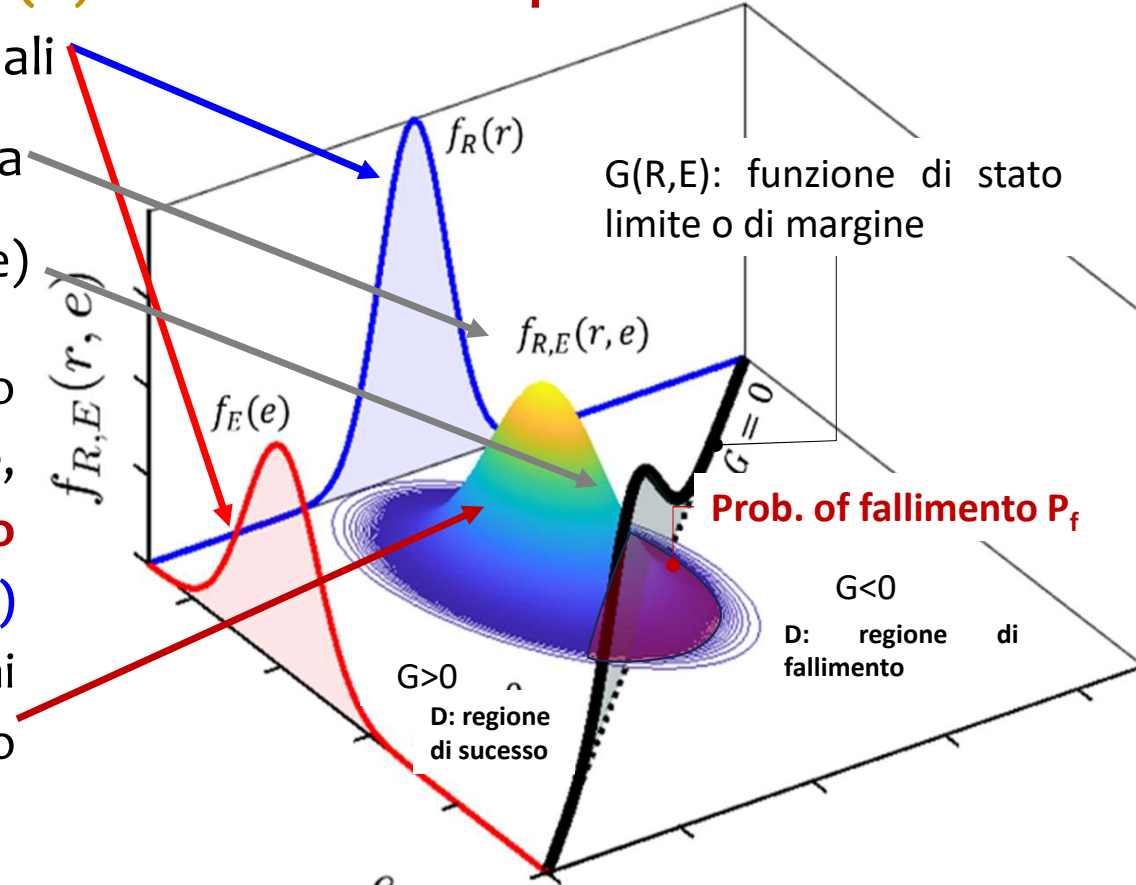
- Per verificare se la costruzione soddisfi, entro una determinata vita residua, i requisiti di affidabilità per uno specifico stato limite o per tutti gli stati limite, oppure per stimare la vita residua effettiva, ovvero l'intervallo di tempo entro il quale la costruzione esistente può essere utilizzata soddisfacendo i criteri minimi di affidabilità.
- Per applicare un approccio unitario alle costruzioni nuove ed esistenti, poiché, una volta entrata in servizio, una nuova costruzione diventa immediatamente una costruzione esistente. In questo modo, si supererà la classica distinzione tra costruzioni nuove ed esistenti adottata da numerose norme e documenti tecnici.
- La procedura è in linea con alcune bozze recenti di norme internazionali, basate sull'affidabilità e che tengono conto delle analisi costi-benefici, ad esempio il Bollettino fib n. 80 (2016), il JCSS (2001) e la norma ISO 2394 (2015).

## Affidabilità

Si assume che la **capacità (C)** e la **domanda (D)** siano due v.a. indipendenti

- $f_R(r)$ ,  $f_E(e)$ : funzioni di probabilità marginali
- $f_{R,E}(r,s)$ : funzione di probabilità congiunta
- $G(R, S) \leq 0$ : stato limite (funz. di margine)

L'affidabilità di una struttura o di un elemento strutturale è una misura della probabilità che, entro un determinato intervallo denominato periodo di riferimento ( $t_{ref}$ ), la capacità (C) superi la domanda (D) a causa delle condizioni ambientali e dell'utilizzo della struttura o dell'elemento strutturale.



## Probabilità di fallimento

L'affidabilità  $L$  è un concetto complementare  
probabilità di fallimento  $P_f$ :

$$L = P[R > E] = 1 - P_f$$

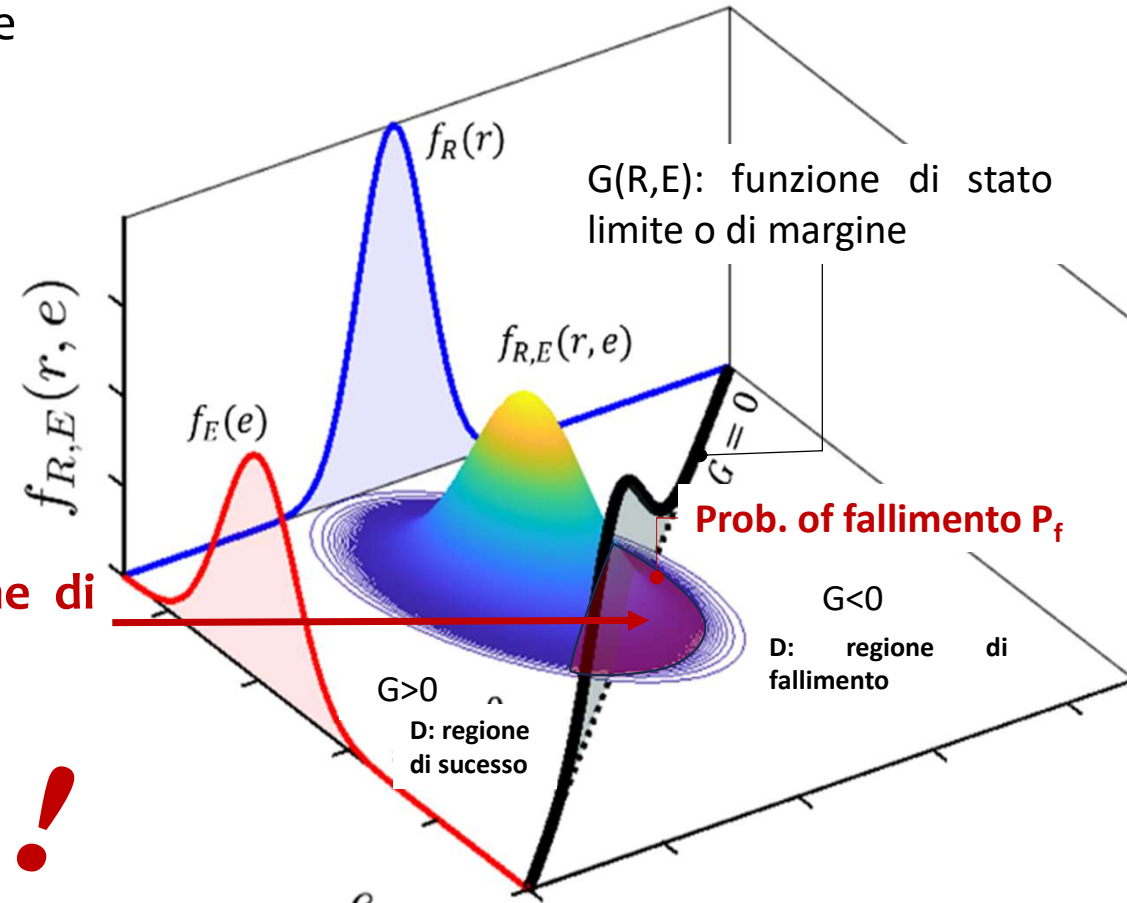
$P_f$  è la probabilità che  $E$  (domanda) supera  
 $R$  (capacità):

$$P_f = P[R \leq E] = \int_D \int f_{R,E}(r, e) dr de$$

$P_f$  è il volume  $f_{R,E}(r, s)$  tagliato dalla funzione di stato limite (funzione di margine).



La prob. di fallimento corrisponde alla prob. di superamento di uno stato limite. !



# Probabilità di fallimento

Se  $E$  (domanda) e  $R$  (capacità) sono indipendenti:

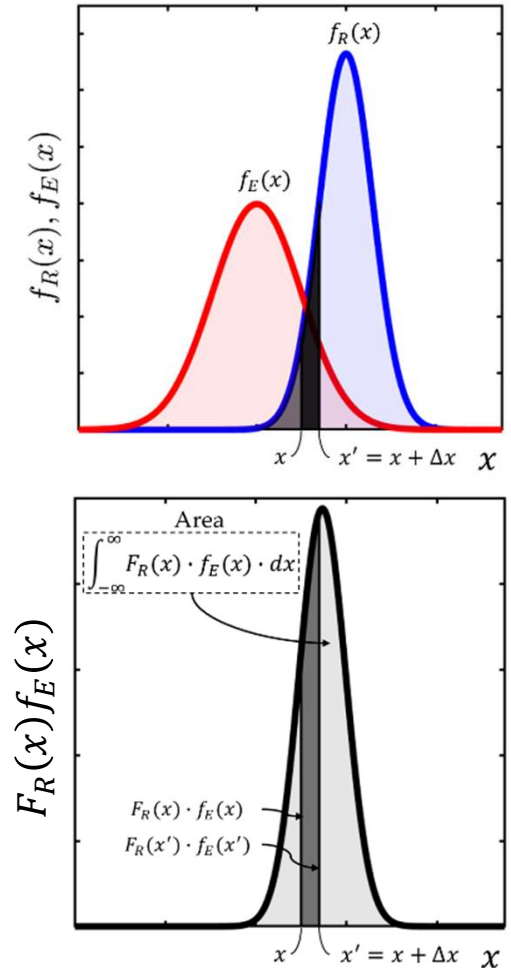
$$f_{R,E}(r, e) = f_R(r) f_E(e)$$

$$P_f = P[R \leq E] = \int_D \int_{-\infty}^{\infty} f_{R,E}(r, e) dr de = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{E \geq r} f_R(r) f_E(e) dr de$$

$P_f$  può essere riscritto come integrale singolo, noto come 'integrale e di convoluzione'

$$P_f = P[R \leq E] = \int_{-\infty}^{\infty} \underbrace{F_R(x) f_E(x)}_{\text{Densità di fallimento}} dx$$

L'integrale della densità di fallimento, i.e. cioè l'area della funzione fornisce la **prob. di fallimento  $P_f$**



## Indice di Affidabilità

L'integrale di convoluzione può essere risolto analiticamente se **R** e **E** sono indipendenti e normalmente distribuite. La funzione  $Z = G(R, E)$  è ancora un funzione normale definite **margin**e di sicurezza o **margin**e di affidabilità (essa rappresenta lo stato limite).

$$P_f = P[Z \leq 0] = \Phi\left(\frac{0 - \mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi(-\beta)$$

Indice di affidabilità

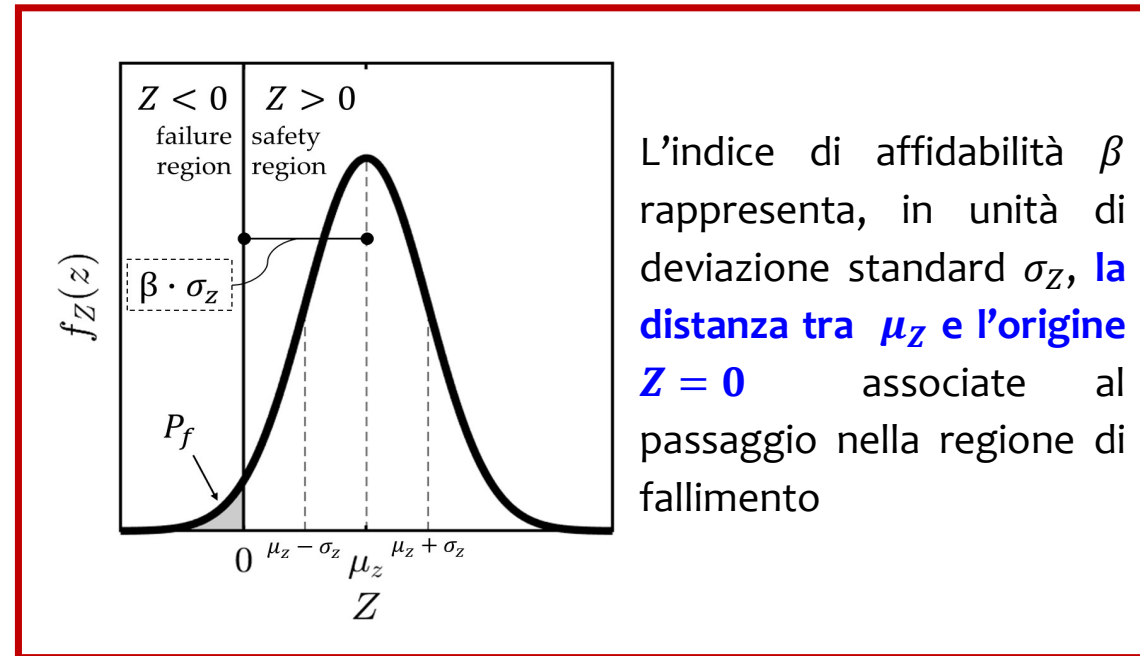
$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}}$$

(Cornell,1969)

$\Phi$  Funzione normale standard

$\mu_R, \mu_E$  Valore medio di R e E

$\sigma_R^2, \sigma_E^2$  Varianza di R and E



L'indice di affidabilità  $\beta$  rappresenta, in unità di deviazione standard  $\sigma_Z$ , la distanza tra  $\mu_Z$  e l'origine  $Z = 0$  associate al passaggio nella regione di fallimento

**$\beta$  consente calcolare in modo esatto la  $P_f$  solo se tutte le distribuzioni sono normali. Negli altri casi  $P_f$  calcolata con  $\beta$  è solo un'approssimazione.**

## Indici di affidabilità target

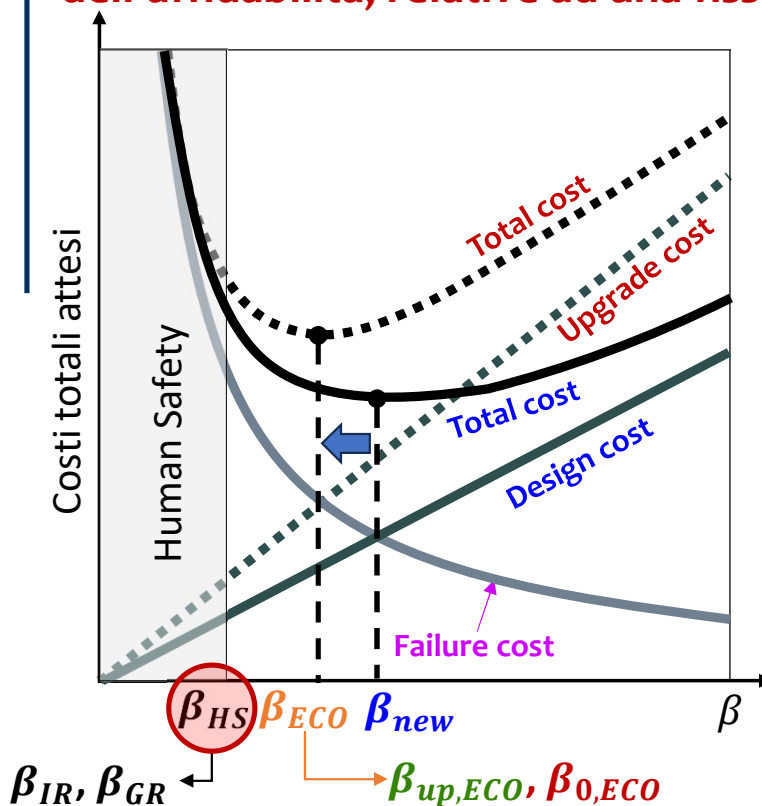
In un approccio basato sull'affidabilità, i **requisiti prestazionali** sono definiti in termini di affidabilità target, ovvero **l'affidabilità minima richiesta per garantire un livello accettabile di sicurezza e funzionalità di un insieme strutturale**, o di un elemento, entro un periodo di riferimento prestabilito  $t_{ref}$  (JCSS PMC, 2001).

Ci sono **diverse normative e documenti tecnici che definiscono, in modo più o meno esplicito, i concetti relativi all'affidabilità strutturale** e alle modalità con cui essa può essere presa in considerazione. Molti di questi si riferiscono a **costruzioni nuove o esistenti** e forniscono, per ciascuno stato limite, un indice di affidabilità che considera come **periodo di riferimento 1 anno (comunemente indicato come  $\beta_1$ ) e/o 50 anni ( $\beta_{50}$ )**, differenziato anche per classi di conseguenza (CC).

**Le classi di conseguenza** tengono conto delle conseguenze di un **fallimento strutturale (in caso di superamento dello stato limite)**, come ad esempio perdita di vita umane, perdite economiche e danni ambientali.

## Indici di affidabilità target: considerazioni economiche *fib Bulletin n. 80 (2016)*

$\beta_{ECO}$  dipende da un criterio di ottimizzazione economica, **minimizzando i costi totali attesi in funzione dell'affidabilità, relative ad una fissata vita residua.**



### Costi totali attesi

**Failure Cost ( $C_{failure}$ ):** costi di adeguamento o sostituzione, perdite economiche dovute all'indisponibilità o al malfunzionamento dell'opera, conseguenze sociali, effetti ambientali negativi ed effetti psicologici;

#### Nuovo

$$C_{tot} = C_{design} + C_{failure}$$

**Design Cost ( $C_{design}$ ):** costi relativi alla progettazione, all'amministrazione e alla gestione, etc.

#### Esistente

$$C_{tot} = C_{upgrade} + C_{failure}$$

**Upgrade Cost ( $C_{upgrade}$ ):** costi relativi a studi, progettazione, amministrazione e gestione, perdite economiche dovute a interruzioni dell'attività, sostituzione degli utenti, ecc.

Gli indici target per le costruzioni esistenti sono inferiori rispetto a quelli delle nuove costruzioni, **poiché nelle prime i costi necessari per raggiungere un elevato livello di affidabilità sono solitamente più elevati rispetto alle seconde.**

# Indici di affidabilità target

## Nuovi edifici, SLU

Classe di Conseguenza	$\beta_1$	$\beta_{50}$
CC3	5.2	4.3
CC2	4.7	3.8
CC1	4.2	3.3

## Edifici esistenti, SLU

Classe di Conseguenza	$\beta_{up,ECO}$	$\beta_{0,ECO}$
CC3	4.3 - 0.5 = 3.8	4.3 - 1.5 = 2.8
CC2	3.8 - 0.5 = 3.3	3.8 - 1.5 = 2.3
CC1	3.3 - 0.5 = 2.8	3.3 - 1.5 = 1.8

Reference	Construction type
ISO 2394 (1998)	NA
JCSS PMC (2001)	NA
EN 1990 (2002)	NA
fib Bulletin n. 34 (2006)	RC frames structures
ISO 13822 (2010)	NA
fib Bulletin n. 65 (2013)	RC structure
ISO 2394 (2015)	NA
fib Bulletin n. 80 (2016)	RC frame structure/bridge

In accordo a **fib Bulletin n. 80 (2016)**,  $\beta_{ECO}$  può essere derivato per le CCs a partire dai valori per gli edifici nuovi:

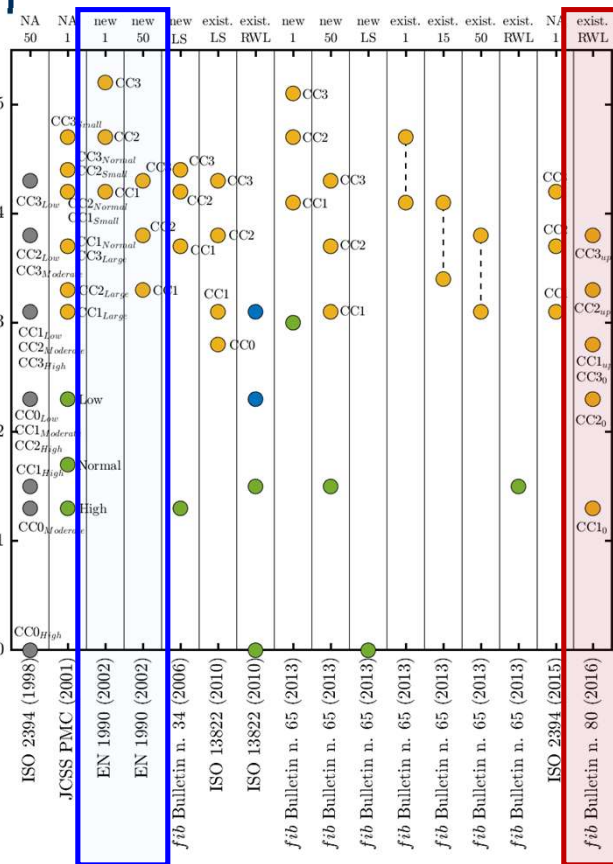
- per  $\beta_{0,ECO}$  la riduzione è  $\Delta\beta_{0,ECO} = 1.5$
- per  $\beta_{up,ECO}$  la riduzione è  $\Delta\beta_{up,ECO} = 0.5$

$\beta_{0,ECO}$ : Indice target al di sotto del quale la costruzione deve essere adeguata

$$\beta_{0,ECO} = \beta_{new} - 1.5$$

$\beta_{up,ECO}$ : Indice target per l'adeguamento

$$\beta_{up,ECO} = \beta_{new} - 0.5$$



## Indici di affidabilità target: Considerazioni sulla sicurezza delle persone *fib Bulletin n. 80 (2016)*

I limiti relativi alla **sicurezza delle persone** rivestono un ruolo particolarmente importante per le strutture esistenti **con una durata di vita residua limitata**. Essi comprendono i seguenti criteri:

- **Rischio Individuale (IR)** criterio da considerare per assicurare rischi accettabili per gli occupanti o frequentatori.
- **Rischio di Gruppo (GR)** spesso utilizzato dalle amministrazioni per evitare incidenti con un numero elevato di vittime.

**Se la sicurezza delle persone è il fattore determinante nella progettazione, è auspicabile assumere una probabilità di fallimento annuale costante.**

### Rischio Individuale, IR

La probabilità di fallimento target  $P_{f,IR}$  è dipendente dalla probabilità condizionata di decessi  $P_{c|f}$ , considerando il livello ammissibile per il rischio individuale di  $10^{-5}$  all'anno (Diamantidis, 2001).

$$P_{f,IR} = \frac{10^{-5}}{P_{c|f}} \cdot t_{ref} \begin{cases} \text{CC1} & P_{f,IR} = t_{ref} \cdot 10^{-5} / 0.01 \\ \text{CC2} & P_{f,IR} = t_{ref} \cdot 10^{-5} / 0.05 \\ \text{CC3} & P_{f,IR} = t_{ref} \cdot 10^{-5} / 0.20 \end{cases}$$

### Criteri per il Rischio di Gruppo (GR)

$$P_{f,GR} \cong \frac{A \cdot n^{-2}}{P_{N|f}} \cdot t_{ref}$$

n: numero di decessi

	Edifici	Ponti
	$A = 5 \cdot 10^{-5}$	$n = 0.09 \cdot S$
		$A = 2.75 \cdot 10^{-5}$
		$P_{N f} = 0.055$
CC1	Nessun valore	
CC2	$n = 0.27 \cdot A_{col}^{0.50} - 1 \geq 0; P_{N f} = 0.01$	
CC3	$n = 0.59 \cdot A_{col}^{0.56} - 1 \geq 0; P_{N f} = 0.05$	

## Considerazioni combinando la sicurezza economica-umana

*fib Bulletin n. 80 (2016)*

$$\bar{\beta}_0(t_{ref}) = \max(\bar{\beta}_{0,ECO}; \bar{\beta}_{0,HS})$$

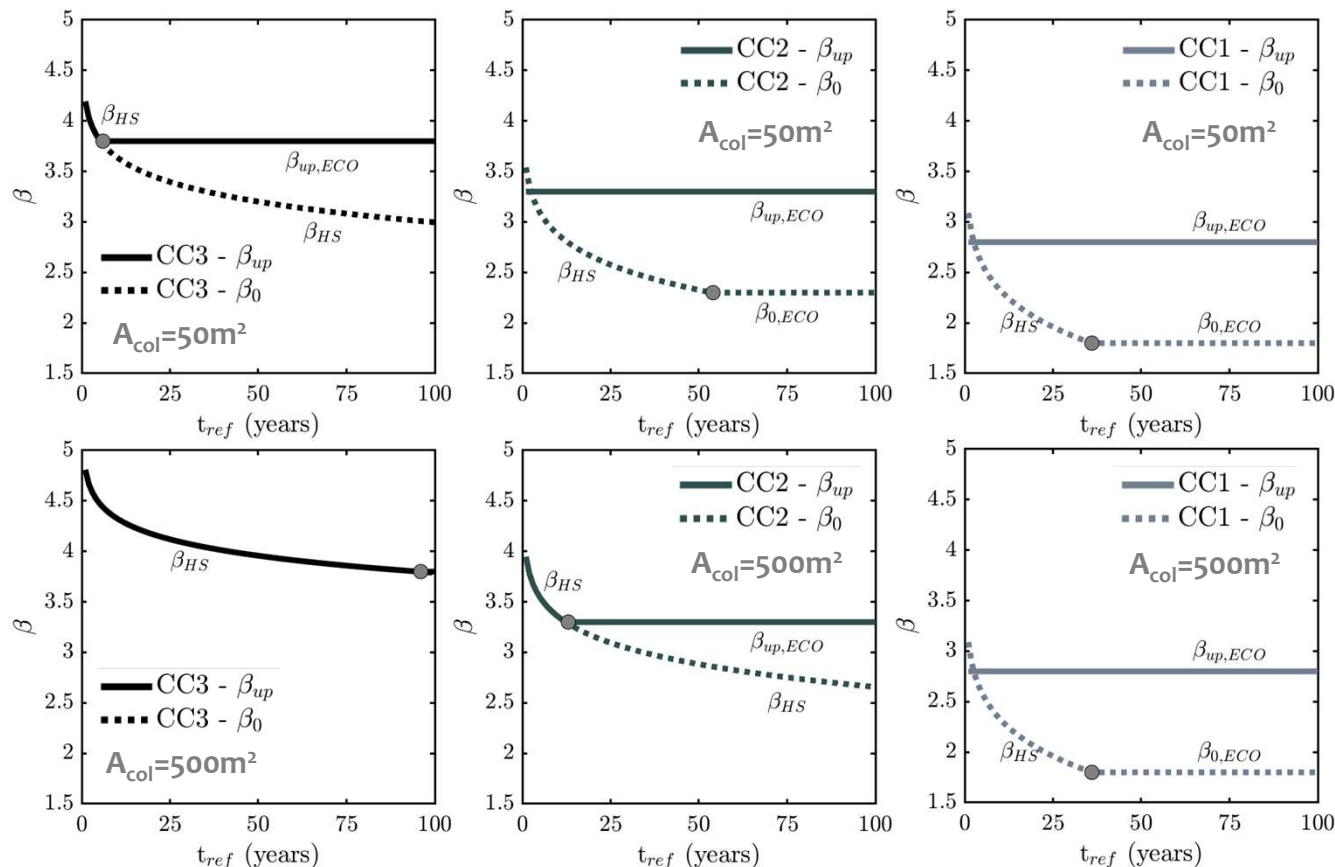
$$\bar{\beta}_{up}(t_{ref}) = \max(\bar{\beta}_{up,ECO}; \bar{\beta}_{up,HS})$$

Indice minimo di Affidabilità degli Edifici

CC	$\beta_{0,HS}$	$\beta_{0,ECO}$
CC3	$A_{col} < 20m^2$	$-\Phi^{-1}[(5 \cdot 10^{-5}) \cdot t_{ref}]$
CC3	$A_{col} \geq 20m^2$	$-\Phi^{-1}\left[\frac{(5 \cdot 10^{-5}) \cdot (0.59A_{col}^{0.56} - 1)^{-2}}{0.20} \cdot t_{ref}\right]$
CC2	$A_{col} < 100m^2$	$-\Phi^{-1}[(2 \cdot 10^{-4}) \cdot t_{ref}]$
CC2	$A_{col} \geq 100m^2$	$-\Phi^{-1}\left[\frac{(5 \cdot 10^{-5}) \cdot (0.27A_{col}^{0.5} - 1)^{-2}}{0.05} \cdot t_{ref}\right]$
CC1	For any given $A_{col}$	$-\Phi^{-1}[(1 \cdot 10^{-3}) \cdot t_{ref}]$

Indice per l'adeguamento degli Edifici

CC	$\beta_{up,HS}$	$\beta_{up,ECO}$
CC3	$A_{col} < A_{inter}$	-
CC3	$A_{col} \geq A_{inter}$	$-\Phi^{-1}\left[\frac{(5 \cdot 10^{-5}) \cdot (0.59A_{col}^{0.56} - 1)^{-2}}{0.20} \cdot t_{ref}\right]$
CC2	$A_{col} < A_{inter}$	-
CC2	$A_{col} \geq A_{inter}$	$-\Phi^{-1}\left[\frac{(5 \cdot 10^{-5}) \cdot (0.27A_{col}^{0.5} - 1)^{-2}}{0.05} \cdot t_{ref}\right]$
CC1	For any given $A_{col}$	-

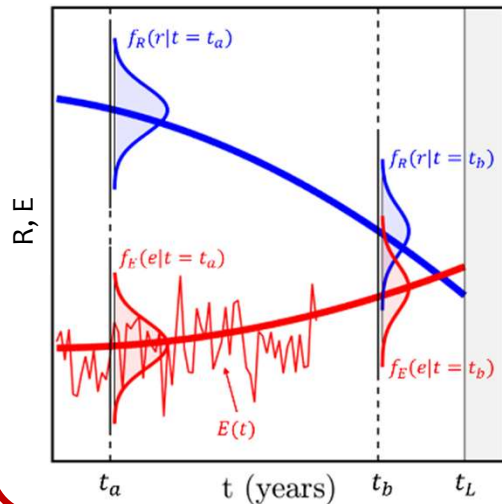


$t_{ref}$  è il periodo di riferimento utilizzato per la valutazione dei valori relativi alle azioni variabili, alle proprietà dei materiali in funzione del tempo, ecc., nonché per la definizione e/o la verifica del livello di affidabilità target

## Affidabilità tempo-dipendente

È noto che l'affidabilità strutturale dipende dal tempo, poiché dipende dalle variabili casuali dipendenti dal tempo che definiscono un **processo stocastico**. Pertanto, è possibile ottenere una  $P_f(t)$  istantanea partendo dalle  $f_R(t)$  e  $f_E(t)$  istantanee.

$$P_f(t) = P[R(t) < E(t)]$$



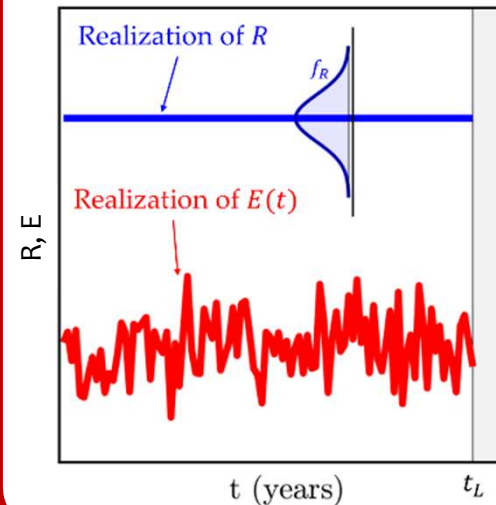
La probabilità di fallimento istantanea  $P_f(t)$  può essere integrata su un intervallo di tempo compreso tra 0 e t per ottenere **la probabilità di fallimento in quel periodo**.

## Affidabilità tempo-integrata

L'effetto del carico può essere considerato sull'intero intervallo temporale mediante una **distribuzione dei valori estremi**, trasformandosi da processo a **variabile aleatoria**. Inoltre, si assume che la **Resistenza sia indipendente dal tempo**.

$$P_f(t) = P[R < E_{max}(t_{ref})]$$

$E_{max}(t_{ref})$  è il massimo effetto del carico  $t_{ref}$ .



Nell'approccio integrato nel tempo, tutte le distribuzioni si riferiscono all'intera vita utile della struttura. **Con riferimento ai carichi, si considerano i carichi massimi previsti. Mentre, per la resistenza, si considera il valore minimo (come prima approssimazione).**

I documenti tecnici seguono l'**approccio tempo-integrato**. Essi propongono indici di affidabilità target riferiti a un determinato  $t_{ref}$ . **Tuttavia, non forniscono alcuna informazione su come tale valore target vari nel tempo all'interno dell'intervallo  $t_{ref}$ .**



Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Structures

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/structures](http://www.elsevier.com/locate/structures)



Tatangelo, M., Audisio, L., D'Amato, M., Gigliotti, R., & Braga, F. (2024). *A new reliability-based procedure for life-cycle management of new and existing constructions*. **Structures**, 70:107837. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107837>

1. Viene proposta una procedura per convertire un approccio tempo-integrato in uno tempo-dipendente per la valutazione dell'affidabilità di costruzioni nuove e esistenti;
2. Vengono definiti indici di affidabilità target dipendenti dal tempo e soglie di attenzione;
3. La procedura può essere applicata sia con metodi di affidabilità di Livello II sia di Livello I (fattori parziali).

## Una nuova procedura basata sull'affidabilità

- Consiste nella **conversione di un approccio integrato nel tempo in uno dipendente dal tempo**, che valuta, all'interno di un **determinato intervallo di tempo**, l'**affidabilità stimata da confrontare con quella target per un dato stato limite**.
- **Può essere applicato alla progettazione di nuove costruzioni o alla valutazione di quelle esistenti, poiché si basa su una metodologia unitaria che riguarda l'intero ciclo di vita.**

### Metodo di LIVELLO II

#### Indici di affidabilità target

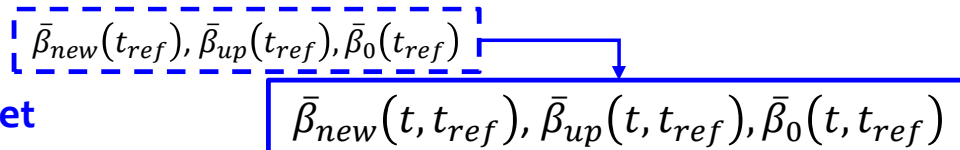
#### Capacità all'i-esimo anno

$\beta_{1,i} = \beta_{1,i}(R_i, E_i)$  Affidabilità annuale all'i-esimo anno

$(R_i, E_i)$  resistenza strutturale (o dell'elemento) ed effetto del carico con PDFs valutati all'i-esimo anno

$R_i$  è noto grazie alla legge di degrado, ad esempio dovuta alla corrosione dell'acciaio

$E_i$  La sua PDF si riferisce ai valori massimi registrati in un determinato intervallo di tempo (periodo di riferimento di base), poi convertiti in una PDF annuale per il calcolo di  $\beta_{1,i}$



### Metodo di LIVELLO I

#### Materiali

L'incertezza del materiale dipende da  $\bar{\beta}$ :

$$\gamma_{M,i} = \gamma_{Rd,1} \cdot \gamma_{Rd,2} \cdot \gamma_{m,i}$$

$$\gamma_{m,iup}(t) = \gamma_{m,i} [\bar{\beta}_{up}(t, t_{ref})]$$

$$\gamma_{m,i0}(t) = \gamma_{m,i} [\bar{\beta}_0(t, t_{ref})]$$

#### Carico

L'incertezza del carico dipende da  $\bar{\beta}$ :

$$\gamma_{G,j} = \gamma_{Ed} \cdot \gamma_{g,j}; \gamma_{Q,j} = \gamma_{Ed} \cdot \gamma_{g,j}$$

$$\gamma_{q,jup}(t) = \gamma_{q,j} [\bar{\beta}_{up}(t, t_{ref})]$$

$$\gamma_{q,j0}(t) = \gamma_{q,j} [\bar{\beta}_0(t, t_{ref})]$$

## Approccio tempo-dipendente

La probabilità di fallimento ( $P_f$ ) è ottenuta dalla probabilità di successo ( $P_s$ ) all'interno di un dato  $t_{ref}$ , ottenuta dall'intersezione delle probabilità annuali ( $P_{s,i}$ ), (**eventi indipendenti**).

$$P_s(t) = P_{s,1} \cdot P_{s,2} \cdot \dots \cdot P_{s,n} = \prod_{i=1}^t P_{s,i} \quad \text{Se } P_{s,1}=P_{s,i} \text{ è costante} \Rightarrow P_s(t) = (P_{s,1})^t$$

Melchers & Beck (2017)

La probabilità di fallimento  $P_f$  è la **complementare** della probabilità di successo

$$P_{s,i} = 1 - P_{f,i}$$

$P_s$

*Fallimento annuale Non-uniforme*

$$P_{f,i} \neq P_{f,1} \Rightarrow P_f(t) = 1 - \prod_{i=1}^t P_{s,i} = 1 - \prod_{i=1}^t (1 - P_{f,i})$$

*Fallimento annuale Uniforme*

Trascurando i termini di secondo ordine

$$P_{f,i} = P_{f,1} \Rightarrow P_f(t) = 1 - \prod_{i=1}^t P_{s,i} = 1 - \prod_{i=1}^t (1 - P_{f,i}) = 1 - (1 - P_{f,1})^t \cong 1 - \left[ (1 - t \cdot P_{f,1}) + t(t-1) \frac{P_{f,1}^2}{2} - \dots \right]$$

$$P_f(t) \cong t \cdot P_{f,1}$$

Indice di Affidabilità nel tempo

Formulazione semplificata

$$\beta(t) = -\Phi^{-1}[P_f(t)]$$

## Indici di affidabilità target tempo-dipendenti

Gli indici di affidabilità target nel tempo vengono determinati **convertendo** l'indice di affidabilità di riferimento  $\bar{\beta}(t_{ref})$  in  $\bar{\beta}(t, t_{ref})$ , esprimendo l'indice di affidabilità target  $\bar{\beta}(t)$ , valutato al tempo  $t$  per un dato  $t_{ref}$ .

Si noti che se  $t_{ref}$  è dato,  $\bar{\beta}(t)$  è **unicamente** definito. Questo è il motivo per cui la notazione  $\bar{\beta}(t, t_{ref})$  è adottata per rimarcare il concetto che  $\bar{\beta}(t)$  dipende da  $t_{ref}$ .

**Assumendo che  $\bar{P}_{f1}$  sia costante,  $\bar{\beta}(t, t_{ref})$  può essere calcolato come segue.** Formulazione semplificata

Noto  $\bar{\beta}(t_{ref})$ ,  $\bar{P}_{f,1}$  annuale può essere ottenuto iterativamente

$$\bar{P}_f(t_{ref}) = \Phi[-\bar{\beta}(t_{ref})] = 1 - (1 - \bar{P}_{f,1})^{t_{ref}}$$

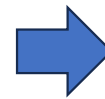
$$\bar{P}_{f,1} = \Phi(-\bar{\beta}_1)$$

**La probabilità di fallimento cumulate al t-esimo anno**

$$\bar{P}_f(t, t_{ref}) = 1 - (1 - \bar{P}_{f1})^t$$

**Indice di affidabilità al t-esimo anno**

$$\bar{\beta}(t, t_{ref}) = -\Phi^{-1}[\bar{P}_f(t, t_{ref})]$$



**La probabilità di fallimento cumulate al t-esimo anno**

$$\bar{P}_f(t, t_{ref}) \cong t \cdot \bar{P}_{f1} = t \cdot \frac{\Phi[-\bar{\beta}(t_{ref})]}{t_{ref}}$$

**Indice di affidabilità al t-esimo anno**

$$\bar{\beta}(t, t_{ref}) \cong -\Phi^{-1} \left\{ t \cdot \frac{\Phi[-\bar{\beta}(t_{ref})]}{t_{ref}} \right\}$$

## Indici di affidabilità target tempo-dipendenti



- $t_{in}$  anno di iniziale (anno a partire dal quale viene definita l'affidabilità target)

- $t_{ref}$  periodo di riferimento (periodo di tempo stabilito per la valutazione delle azioni variabili, delle proprietà dei materiali, e per la definizione e/o la verifica del livello di affidabilità target)

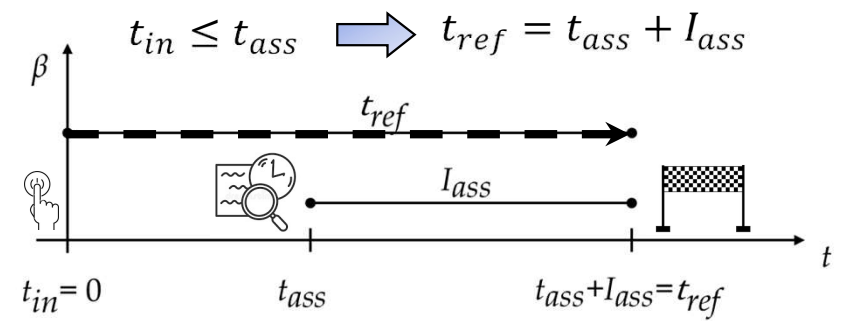
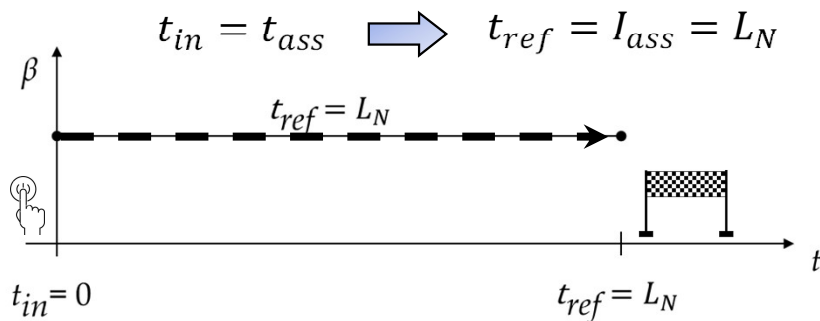


- $t_{ass}$  anno di valutazione (anno a partire dal quale viene valutata l'affidabilità)

- $I_{ass}$  intervallo di valutazione (intervallo che termina alla fine di  $t_{ref}$ )

### Nuove costruzioni (Progetto)

### Costruzioni esistenti



# Indici di affidabilità target tempo-dipendenti

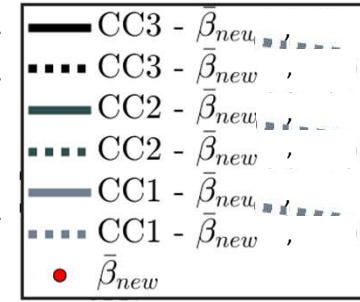
**Nuovi Edifici** Il tempo iniziale è sempre noto e uguale a  $t_{in} = 0$

A titolo di esempio, si assume che :

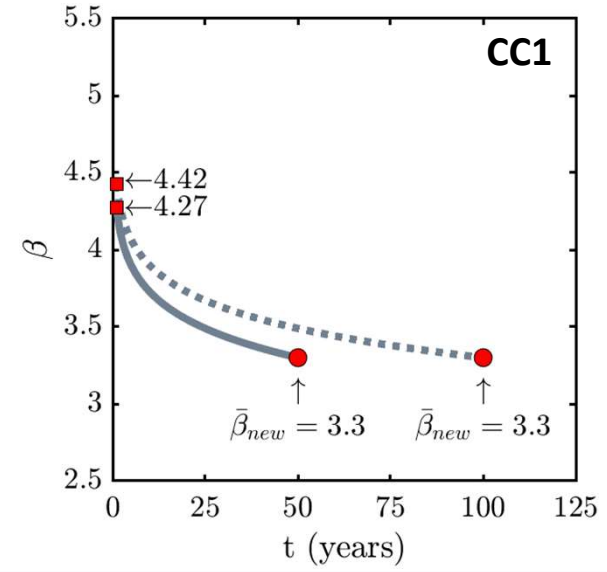
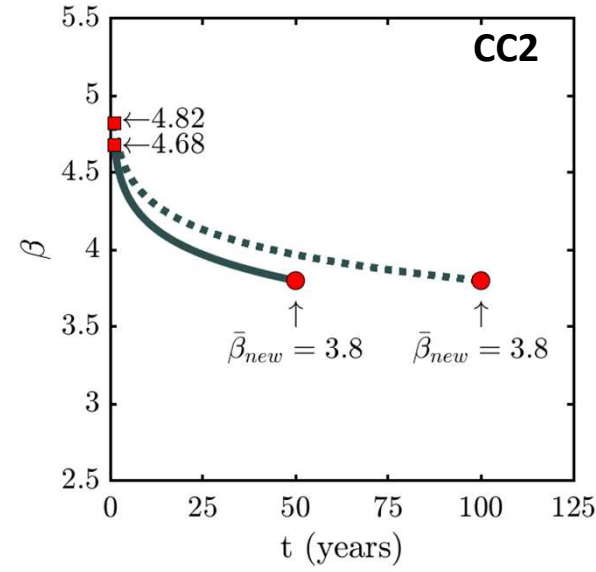
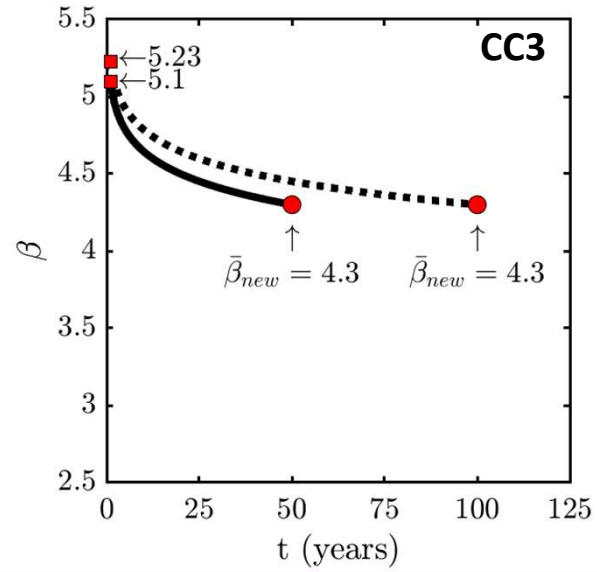
$$\begin{cases} t_{ref} = L_N = 50 \rightarrow \bar{\beta}(t, 50) \\ t_{ref} = L_N = 100 \rightarrow \bar{\beta}(t, 100) \end{cases}$$

$$\bar{\beta}(t, t_{ref}) = -\Phi^{-1} \left\{ \frac{t}{t_{ref}} \cdot \Phi[-\bar{\beta}(t_{ref})] \right\}$$

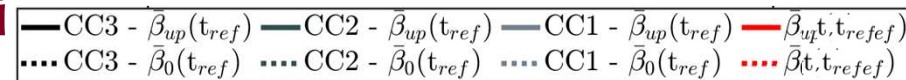
Consequence Class	$\beta_{new}$
CC3	4.3
CC2	3.8
CC1	3.3



$L_N$  vita nominale



# Indici di affidabilità target tempo-dipendenti



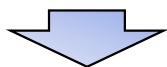
## Edifici Esistenti

A titolo di esempio, si assume che:

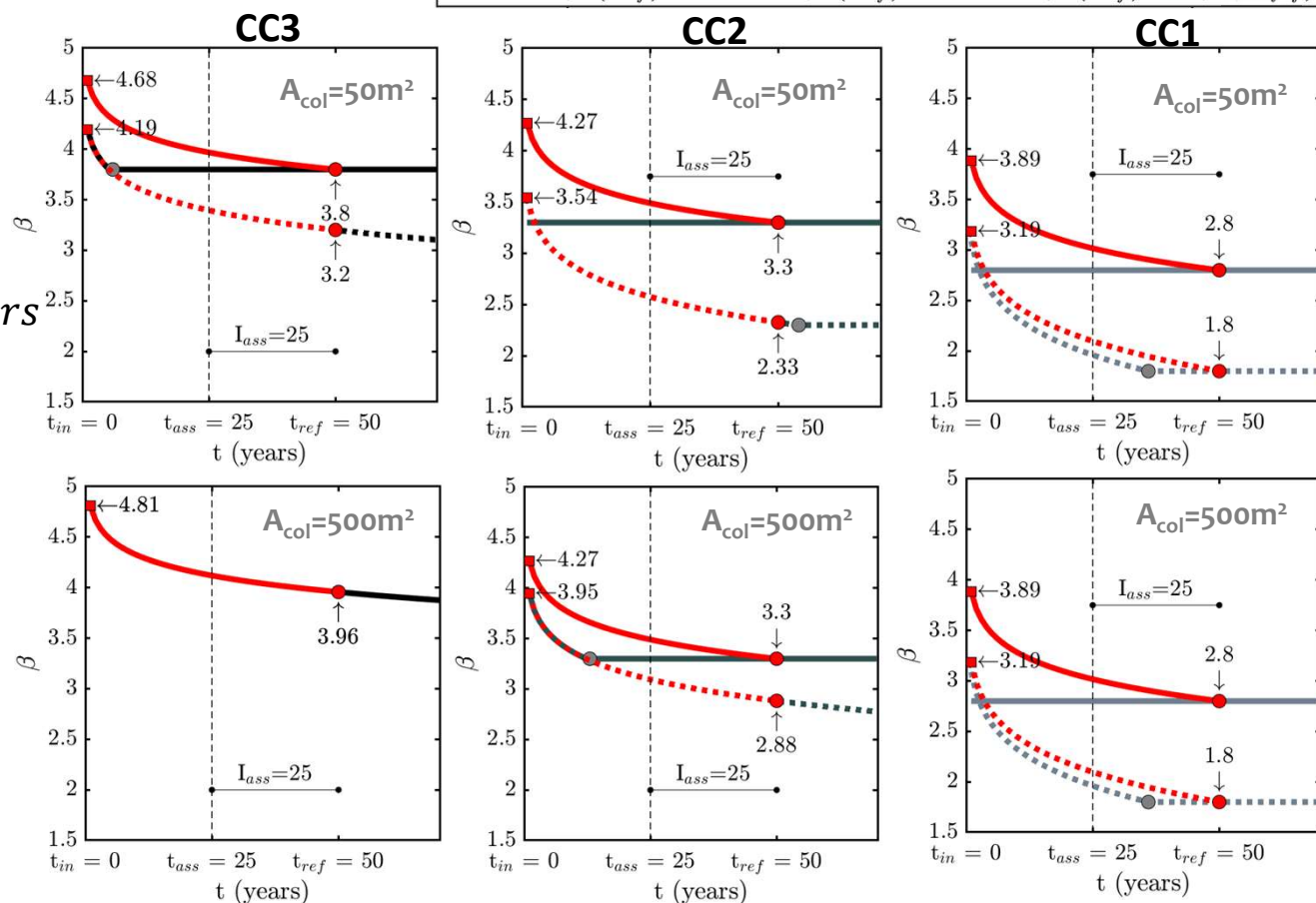
$$\begin{aligned}
 A_{col} &= 50m^2 & \left\{ \begin{array}{l} t_{in} = 0 \text{ years} \\ t_{ass} = 25 \text{ years} \\ I_{ass} = 25 \text{ years} \end{array} \right. \\
 A_{col} &= 500m^2 & \rightarrow t_{ref} = 50 \text{ years}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{\beta}_0 &= \max(\bar{\beta}_{0,ECO}; \bar{\beta}_{0,HS}) \\
 \bar{\beta}_{up} &= \max(\bar{\beta}_{up,ECO}; \bar{\beta}_{up,HS})
 \end{aligned}$$

(fib Bulletin n. 80, 2016)

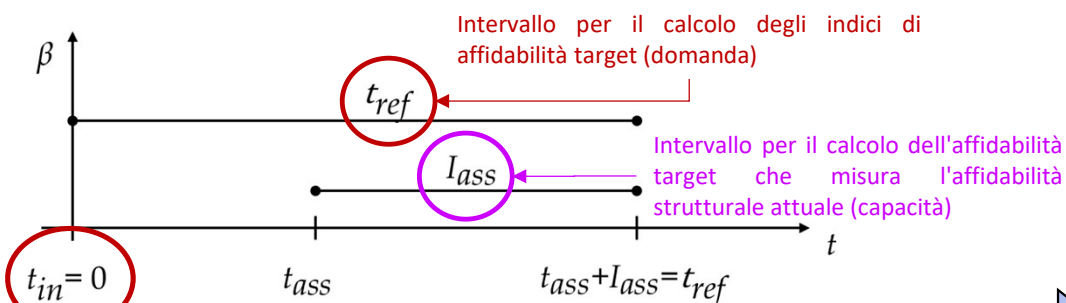


$$\bar{\beta}(t, t_{ref}) = -\Phi^{-1} \left\{ \frac{t}{t_{ref}} \cdot \Phi[-\bar{\beta}(t_{ref})] \right\}$$



# Indici di affidabilità target tempo-dipendenti

**In generale, il tempo iniziale  $t_{in}$  non è noto**



**Se  $t_{in}$  non è noto? Se  $t_{in} \ll t_{ass}$ ?**

$t_{in}$  può essere convenzionalmente derivato una volta definiti  $t_{ass}$ ,  $I_{ass}$  e  $t_{ref}$

$t_{in}^*$

**Condizione da soddisfare**

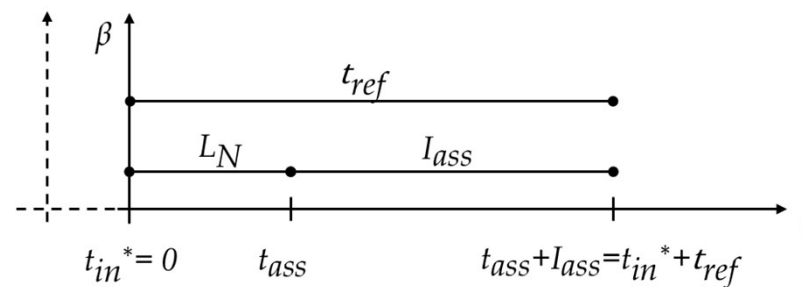
$$t_{ass} + I_{ass} = t_{in}^* + t_{ref}$$

dove

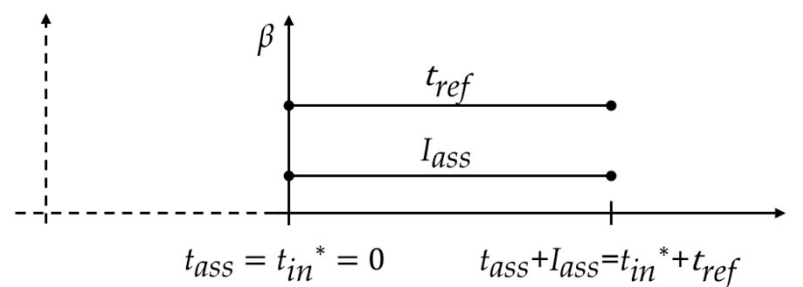
**Limitazione**

$$I_{ass} \leq t_{ref} \leq I_{ass} + L_N$$

**Approccio (a)**  $t_{in}^* = t_{ass} - L_N \rightarrow t_{ref} = I_{ass} + L_N$



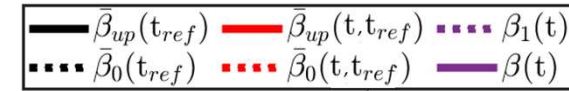
**Approccio (b)**  $t_{in}^* = t_{ass} \rightarrow t_{ref} = I_{ass}$



# Valutazione dell'affidabilità

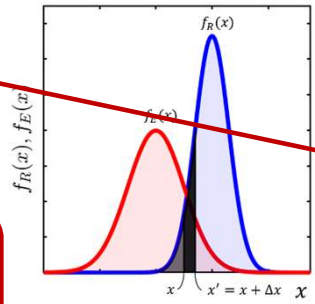
Confronto indice affidabilità attuale con indice affidabilità target

$$\bar{\beta}(t, t_{ref}) \text{ Vs } \beta(t)$$



Indice di affidabilità annuale stimato

$$\beta_{1,i} = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}}$$



Indice di affidabilità attuale

$$\beta(t) = -\Phi^{-1} \left\{ 1 - \prod_{i=1}^t [1 - \Phi(-\beta_{1,i})] \right\}$$

**Anno attenzionato**  
**Intervallo attenzionato**

$$t_a$$

$$I_A = t_{lim} - t_a$$

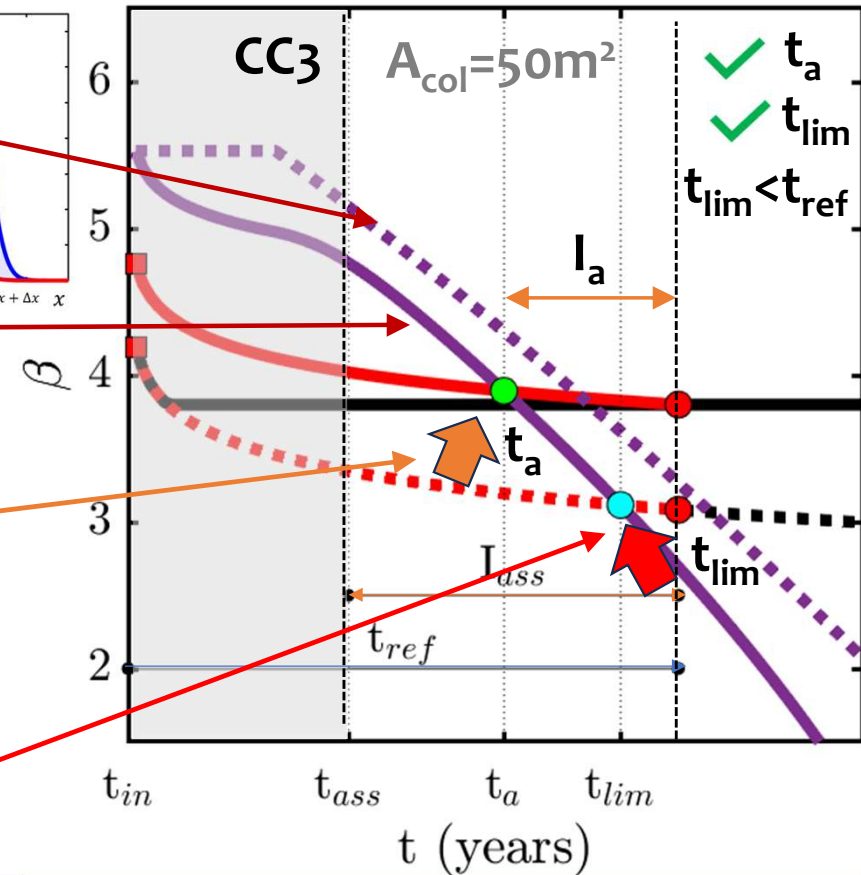
Si dovrebbero considerare misure operative quali il monitoraggio, il cambio di destinazione d'uso e la limitazione dei carichi imposti o da traffico.

**Anno limite**  
**Vita residua**

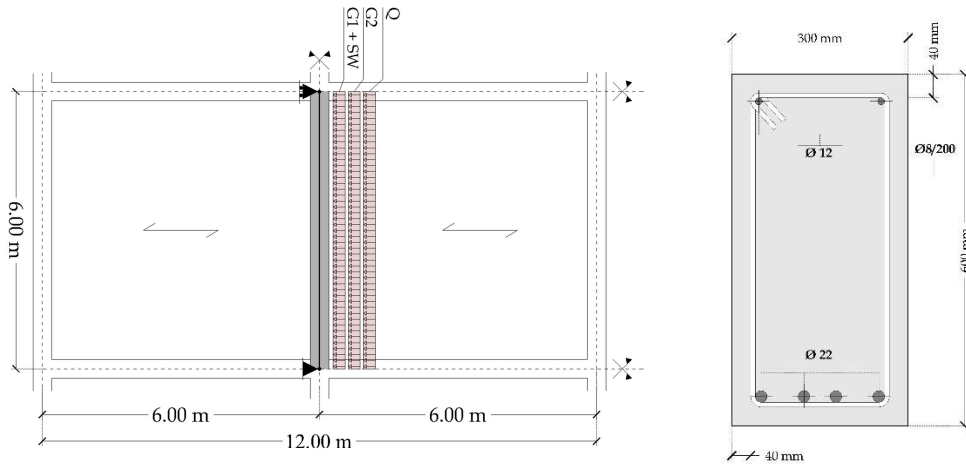
$$t_{lim}$$

$$R_L = t_{lim} - t_{ass}$$

È possibile impiegare costruzioni che soddisfino i criteri minimi di affidabilità



# Esempio



## Capacità

$$M_R(t, \vartheta_{MR}) = A_S(t) \cdot f_{ys} \cdot \left( d - \frac{A_S(t) \cdot f_{ys}}{2 \cdot B \cdot f_c} \right)$$

## Domanda

$$M_E(\vartheta_{ME}) = \frac{1}{8} \cdot (S_W + G_1 + G_2 + Q) \cdot L_S^2$$

## Modelli probabilistici per le variabili fondamentali della capacità

Variable	Notation	Distribution	$\mu_X/X_k$	$V_X$
Concrete compressive strength	$f_c$	Log-Normal	1.24	0.18
Steel tensile strength	$f_{ys}$	Log-Normal	1.12	0.053
Area of reinforcing steel	$A_S$	Normal	1	0.02
Concrete cover	$COV$	Normal	1	0.03
Model uncertainty (bending moment)	$\vartheta_{MR}$	Log-Normal	1	0.05

## Modelli probabilistici per le variabili fondamentali della domanda

Variable	Notation	Distribution	$\mu_X/X_k$	$V_X$
Beam self-weight	$S_W$	Normal	1	0.04
Structural permanent load (slab)	$G_1$	Normal	1	0.04
Non-structural permanent load (slab)	$G_2$	Normal	1	0.10
Imposed load (base reference period of 5 years)	$Q$	Gumbel	0.2	1.10
Model uncertainty (bending moment)	$\vartheta_{ME}$	Log-Normal	1	0.10

## Legge di degrado (Corrosione)

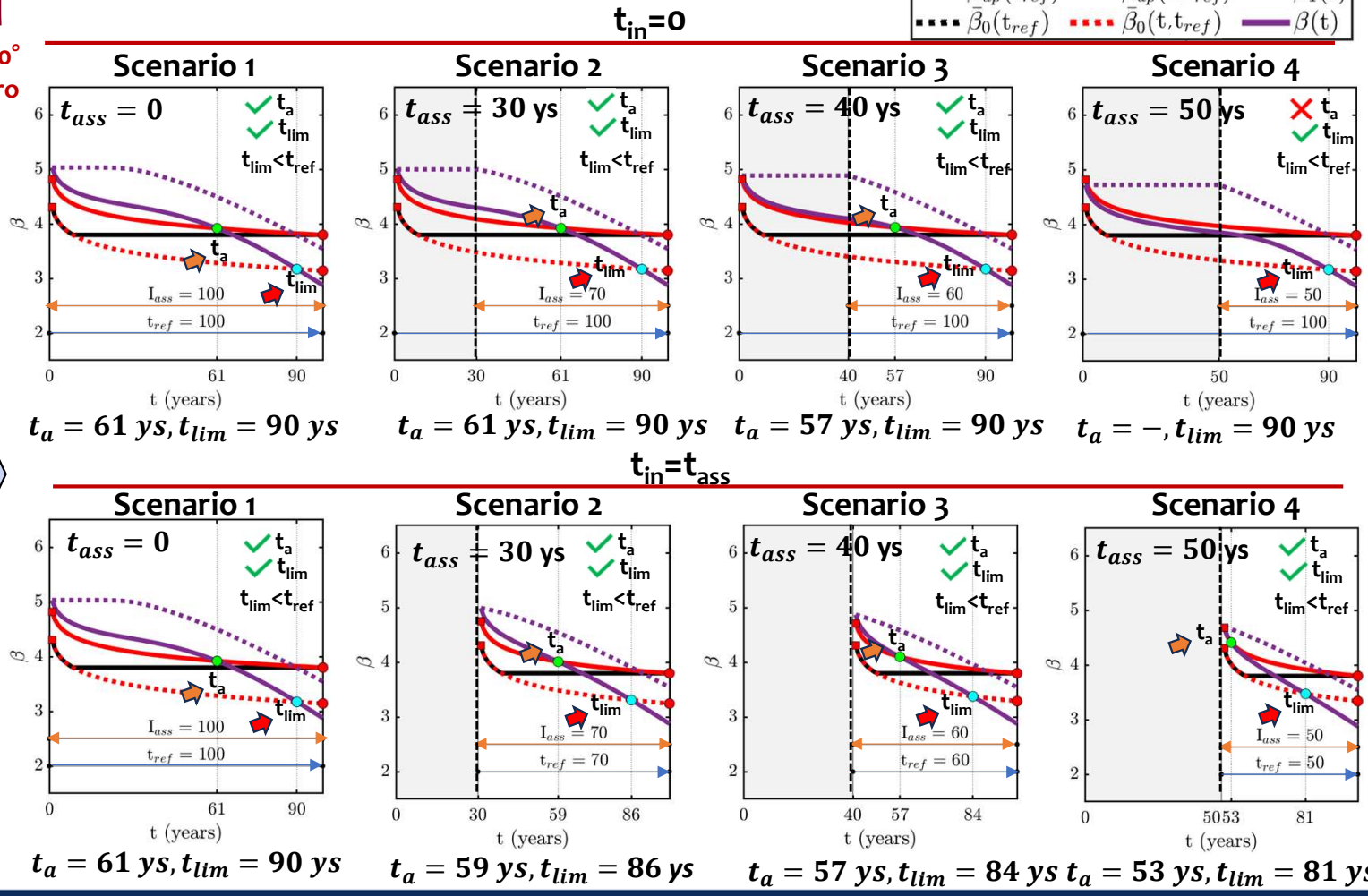
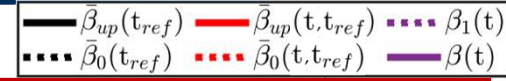
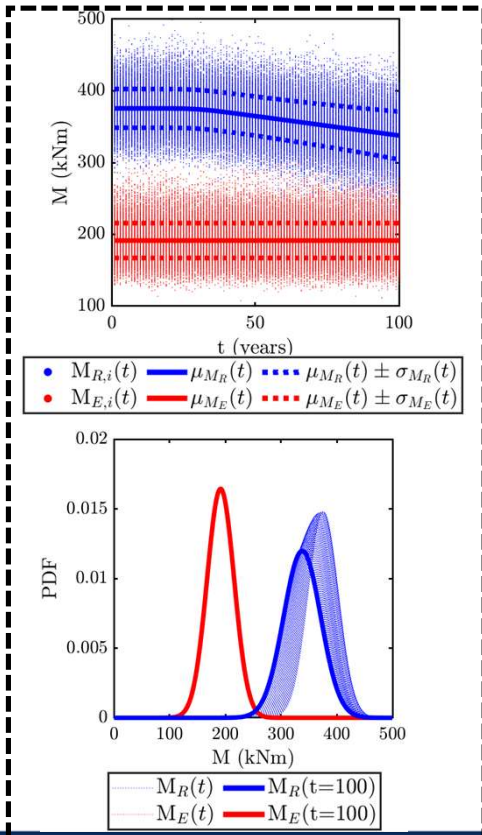
$$\Delta A_S = 0.0366 \cdot \phi \cdot i_{cor} \cdot (t - t_i) \quad (\text{Li \& Ye, 2018})$$

	Mean	COV
$i_{cor}$	0.777 mm/year	0.56
$t_i$	30 <sup>th</sup> year	0.20

# Valutazione di Livello II

La valutazione dell'affidabilità si riferisce al 100° anno di età della trave, considerando quattro anni diversi per la prima valutazione  $t_{ass}$

Simulazioni di Monte Carlo



# Metodo di Livello I (fattori parziali) $\bar{\beta}(t_{ref}) \rightarrow \gamma[\bar{\beta}(t_{ref})]$

**STEP 1** → Noti i target di affidabilità  $\bar{\beta}_0(t_{ref})$  e  $\bar{\beta}_{up}(t_{ref})$ , si determinano i fattori parziali da applicare ai valori caratteristici della capacità strutturale  $R_k$  e della domanda  $E_k$  come funzioni di  $\bar{\beta}_0(t, t_{ref})$  e  $\bar{\beta}_{up}(t, t_{ref})$ , nell'anno generico  $t$ .

**Capacità**  $R_{d,i} = R \left\{ \eta_i \cdot \frac{X_{k,i}}{\gamma_{M,i}} = \eta_i \cdot X_{d,i}; a_d \right\}, \quad i \geq 1$

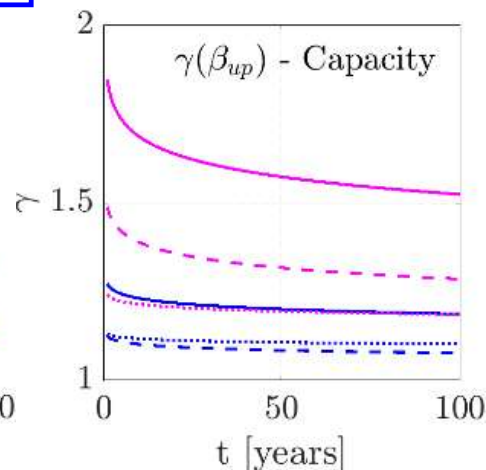
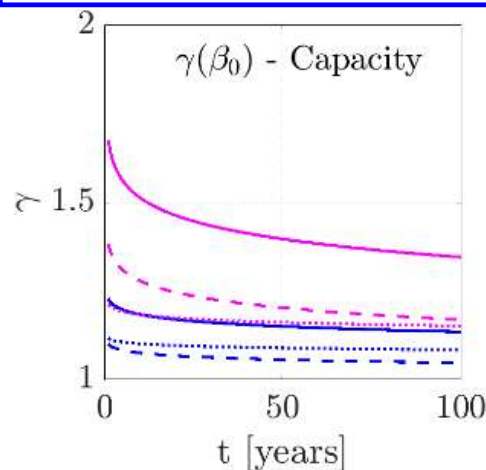
L'incertezza sul materiale dipende da  $\bar{\beta}$ :

$$\gamma_{M,i} = \gamma_{Rd,1} \cdot \gamma_{Rd,2} \cdot \gamma_{m,i}$$

$$\gamma_{m,iup}(t) = \gamma_{m,i}[\bar{\beta}_{up}(t, t_{ref})]$$

$$\gamma_{m,i0}(t) = \gamma_{m,i}[\bar{\beta}_0(t, t_{ref})]$$

$$\begin{matrix} \dots\dots \gamma_s(t) & \dots\dots \gamma_{Rd,S}(t) & \dots\dots \gamma_S(t) \\ \dots\dots \gamma_c(t) & \dots\dots \gamma_{Rd,C}(t) & \dots\dots \gamma_C(t) \end{matrix}$$



**Domanda**  $E_{d,i} = E \{ \gamma_{Gj} \cdot G_k; \gamma_P \cdot P; \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}; \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \},$

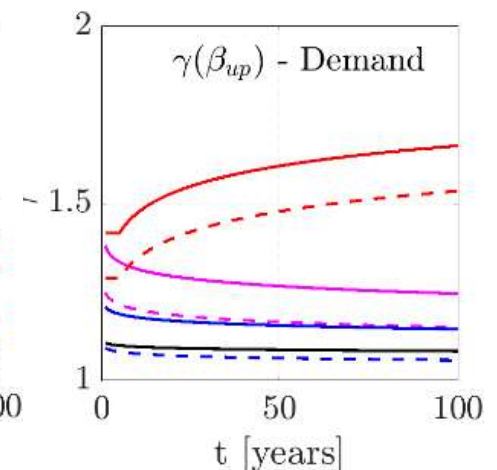
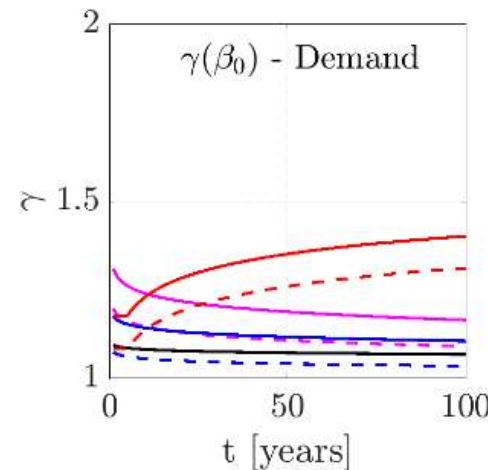
L'incertezza sul carico dipende da  $\bar{\beta}$ :

$$\gamma_{G,J} = \gamma_{Ed} \cdot \gamma_{g,j}; \gamma_{Q,J} = \gamma_{Ed} \cdot \gamma_{g,j}$$

$$\gamma_{q,jup}(t) = \gamma_{q,j}[\bar{\beta}_{up}(t, t_{ref})]$$

$$\gamma_{q,j0}(t) = \gamma_{q,j}[\bar{\beta}_0(t, t_{ref})]$$

$$\begin{matrix} \text{---} \gamma_{Ed}(t) & \dots\dots \gamma_{g1}(t) & \dots\dots \gamma_{g2}(t) & \text{---} \gamma_{G1}(t) \\ \text{---} \gamma_{G2}(t) & \dots\dots \gamma_q(t) & \text{---} \gamma_Q(t) & \end{matrix}$$



## Metodo di Livello I (fattori parziali)

$$R_d = \frac{R}{\gamma[\bar{\beta}(t_{ref})]} = R_d[\bar{\beta}(t_{ref})] \quad \text{Vs} \quad E_d = \gamma[\bar{\beta}(t_{ref})] \cdot E = E_d[\bar{\beta}(t_{ref})]$$

Capacità Domanda

STEP 2 → Se  $R_d[\bar{\beta}_{up}(t_{ref})] > E_d[\bar{\beta}_{up}(t_{ref})]$  allora i requisiti di affidabilità sono soddisfatti in  $t_{ref}$ . Si noti che il degrado potrebbe modificare l'affidabilità nel tempo. Pertanto,  $t_{lim}$  e  $t_a$  dovrebbero essere stimati considerando la legge di degrado della capacità partendo dai valori stimati da  $t_{ass}$ .

STEP 3 → Se  $R_d[\bar{\beta}_{up}(t_{ref})] < E_d[\bar{\beta}_{up}(t_{ref})]$  e  $R_d[\bar{\beta}_0(t_{ref})] > E_d[\bar{\beta}_0(t_{ref})]$  allora l'indice di affidabilità stimato risulta superiore a quello minimo ma, comunque, inferiore all'indice di affidabilità di adeguamento. In questo caso occorre prendere in considerazione misure operative quali il monitoraggio, il cambio di destinazione d'uso, la limitazione dei carichi imposti o da traffico.

Anno di attenzione  $R_d[t_a, \bar{\beta}_{up}(t_a, t_{ref})] = E_d[t_a, \bar{\beta}_{up}(t_a, t_{ref})]$

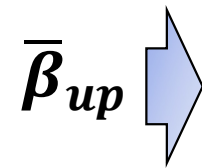
STEP 4 → Se  $R_d[\bar{\beta}_0(t_{ref})] < E_d[\bar{\beta}_0(t_{ref})]$  l'affidabilità stimata non soddisfa i requisiti di affidabilità.

Anno limite  $R_d[t_{lim}, \bar{\beta}_0(t_{lim}, t_{ref})] = E_d[t_{lim}, \bar{\beta}_0(t_{lim}, t_{ref})]$

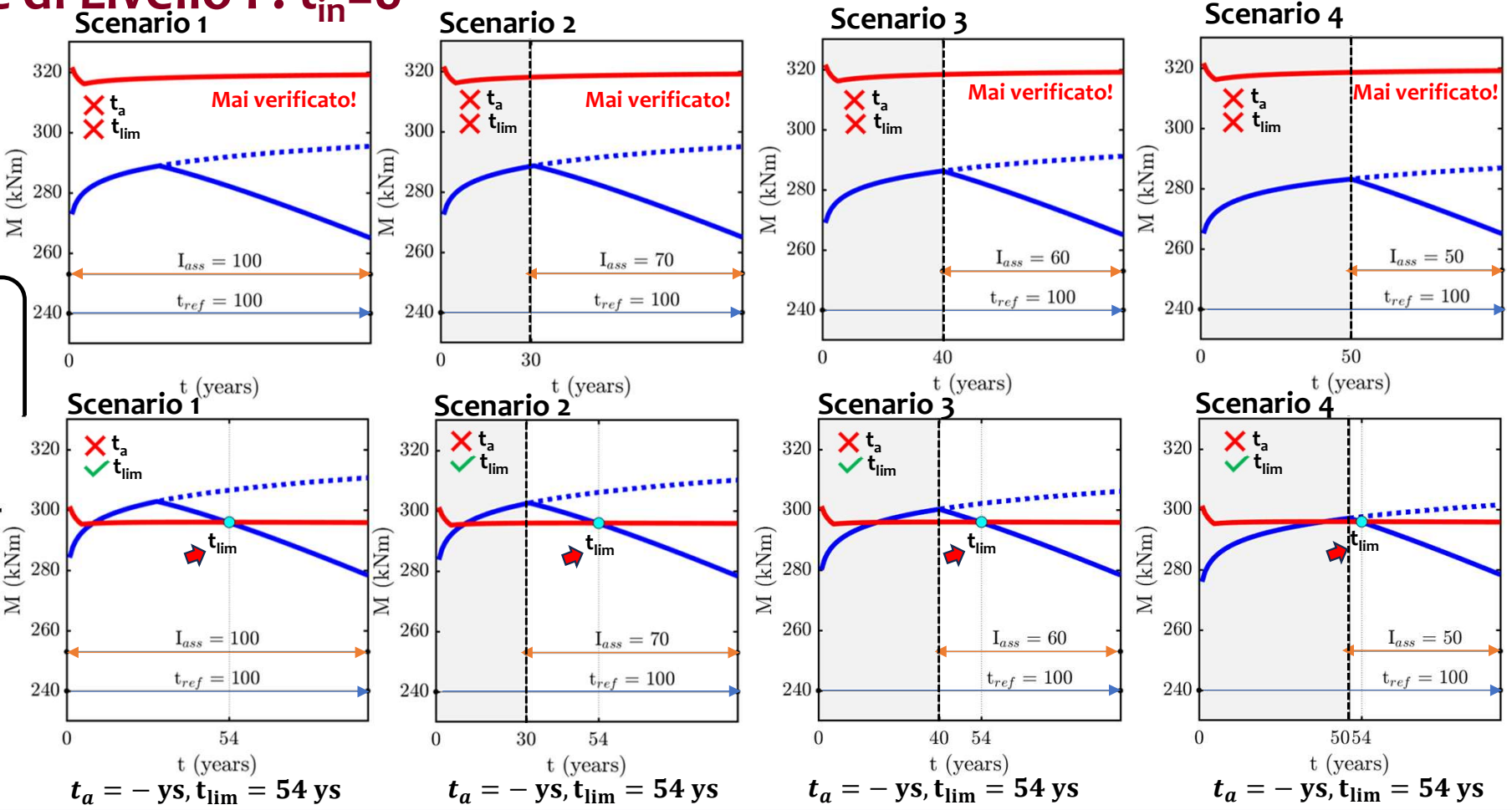
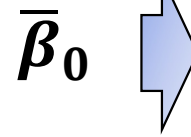
# Valutazione di Livello I : $t_{in}=0$



$t_{ref}$  è noto



—  $M_{E,d}(t)$   
—  $M_{R,d}(t)$   
 Corrosione inclusa  
- - -  $M_{R,d}^*(t)$   
 Corrosione esclusa



# Valutazione di Livello I: $t_{in} = t_{ass}$

$t_{ref}$  è noto

$\bar{\beta}_{up}$

—  $M_{E,d}(t)$

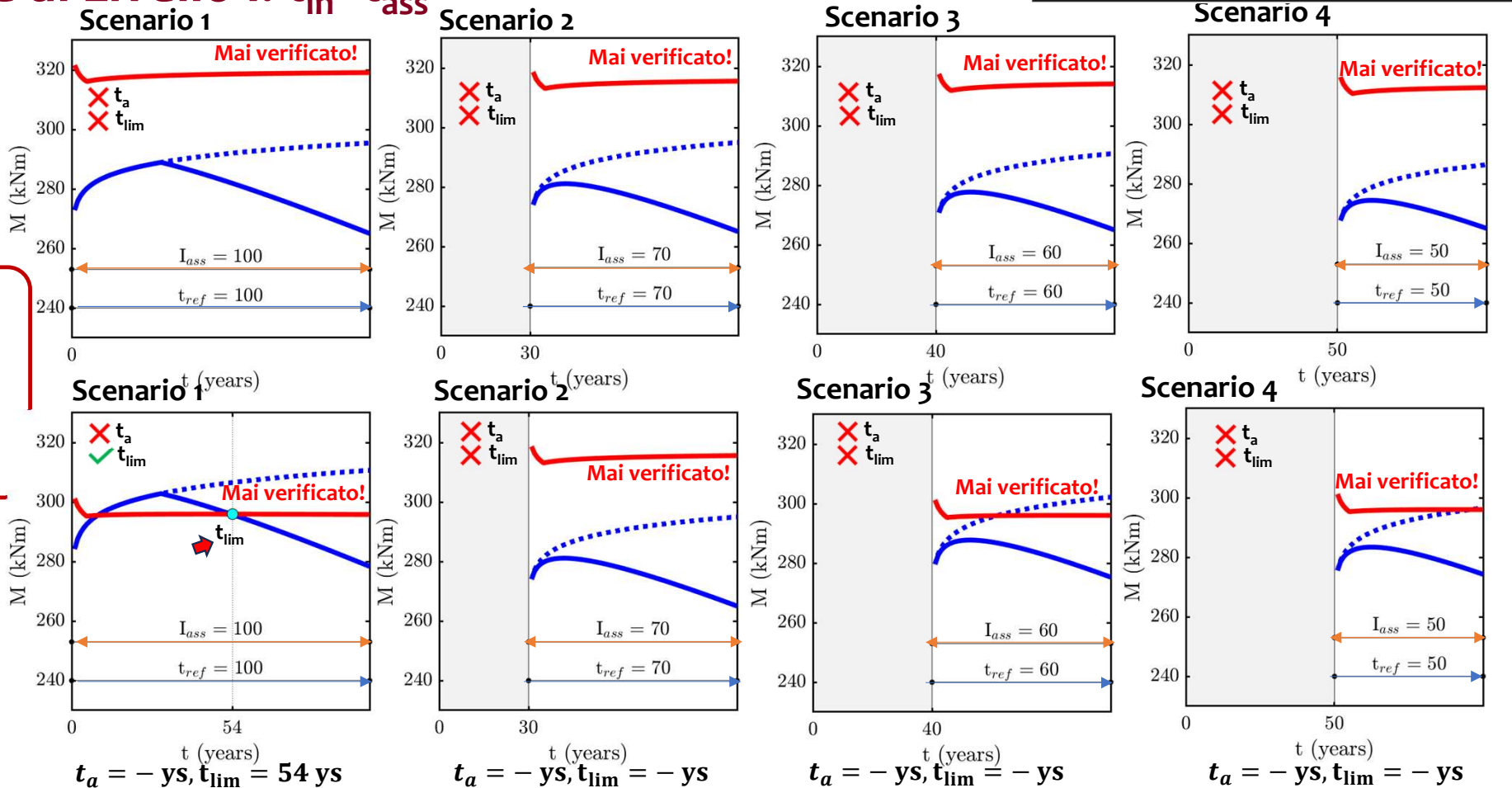
—  $M_{R,d}(t)$

Corrosione inclusa

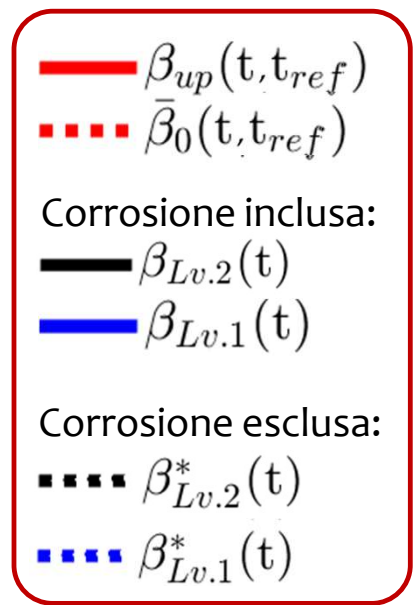
⋯  $M_{R,d}^*(t)$

Corrosione esclusa

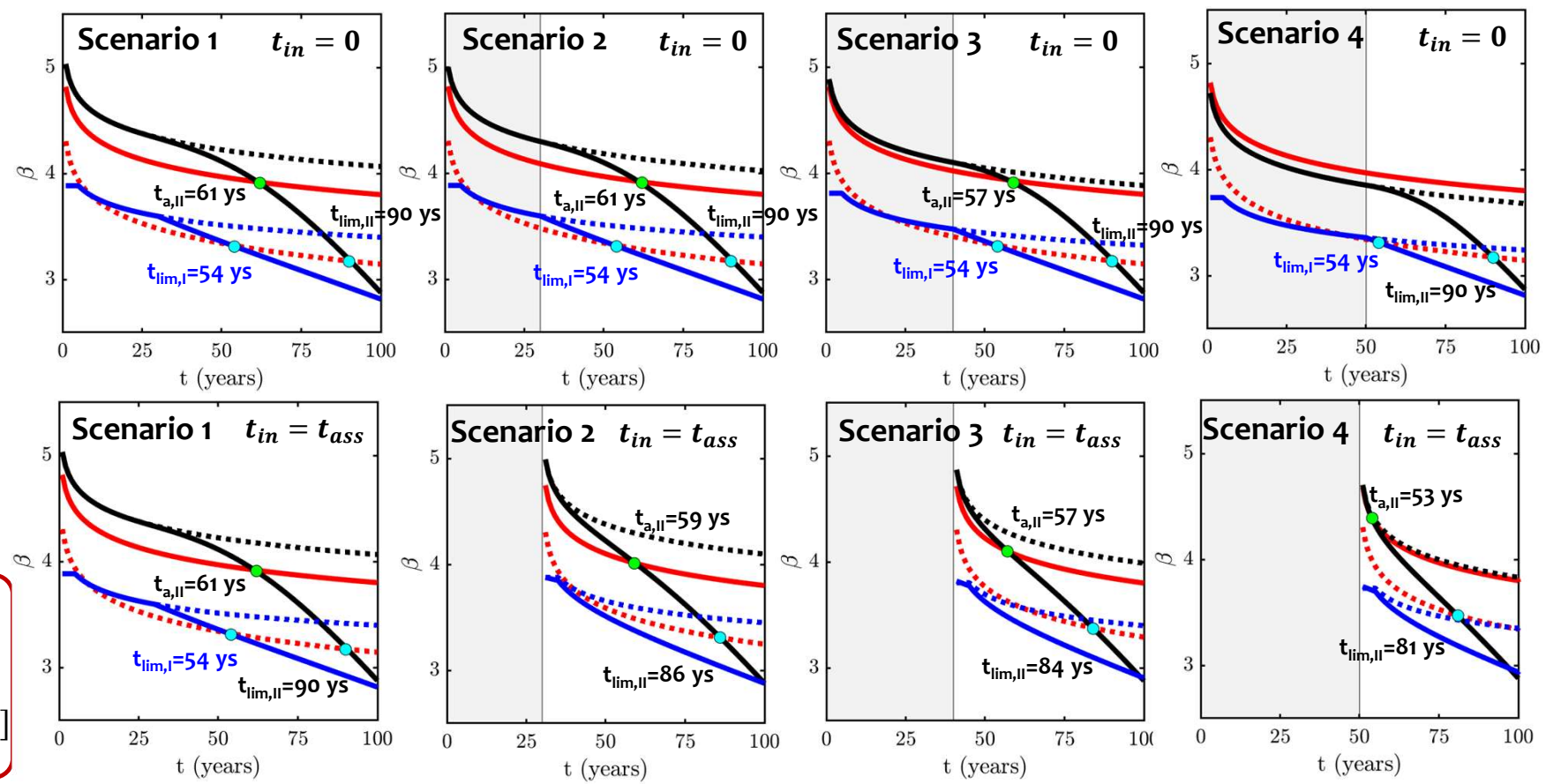
$\bar{\beta}_0$



# Applicazione: confronto tra metodo di Livello II e metodo di Livello I



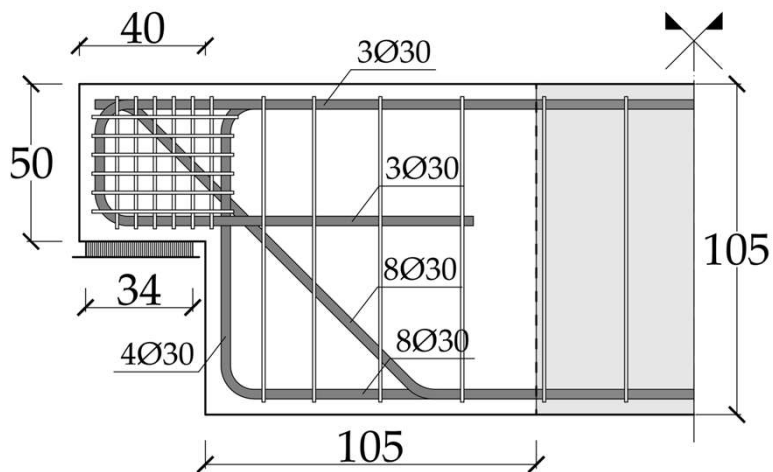
$\beta_{Lv,1}(t), \beta_{Lv,1}^*(t)$   
 si riferisce alla condizione  
 $M_{R,d}[t, \beta(t)] = M_{E,d}[t, \beta(t)]$



**Il metodo di Livello I risulta sempre più conservativo rispetto a quello di Livello II in tutti gli scenari considerati.**

# Affidabilità di una sella Gerber

## Modelli probabilistici per le variabili fondamentali di capacità



Descrizione	Armatura in acciaio
Armatura longitudinale in acciaio (superiore)	3Ø30
Armatura longitudinale in acciaio (inferiore)	8Ø30
Armatura diagonale in acciaio	8Ø30
Armatura verticale in acciaio	4Ø30
Armatura orizzontale in acciaio	3Ø30
Staffe	Ø10/10; Ø10/15; Ø10/20
Staffe nel becco (verticali e orizzontali)	Ø10/5

Variabile	Notazione	Distribuzione	$\mu_X/X_k$	$V_X$
Resistenza alla compressione del calcestruzzo	$f_c$	Log-Normale	1	0.142
Resistenza alla compressione dell'acciaio	$f_{ys}$	Log-Normale	1	0.053
Area dell'acciaio per armature	$A_s$	Normale	1	0.02
Copriferro	$COV$	Normale	1	0.03
Incertezza del modello per la forza di trazione	$\vartheta_{TR}$	Log-Normale	1	0.05
Incertezza del modello per la compressione assiale	$\vartheta_{AR}$	Log-Normale	1	0.05
Incertezza del modello per la compressione diagonale	$\vartheta_{CR}$	Log-Normale	1.40	0.25
Incertezza dei modelli per modelli a semi-giunto in c.a.	$\vartheta_M$	Log-Normale	1	0.05

## Modelli probabilistici per le variabili fondamentali della domanda

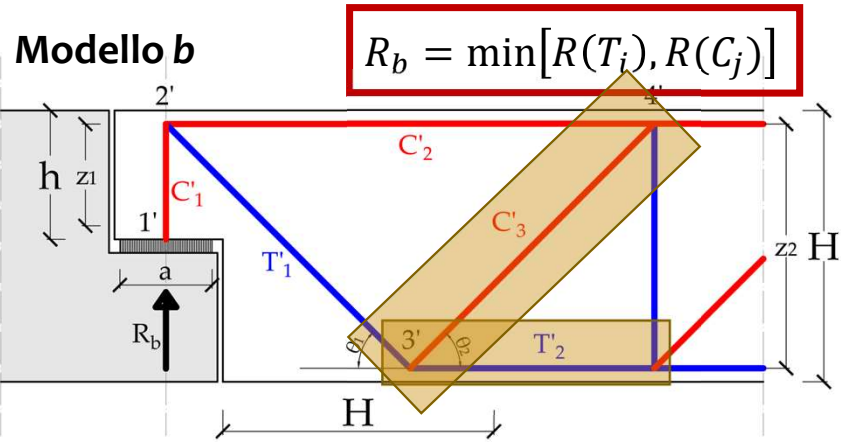
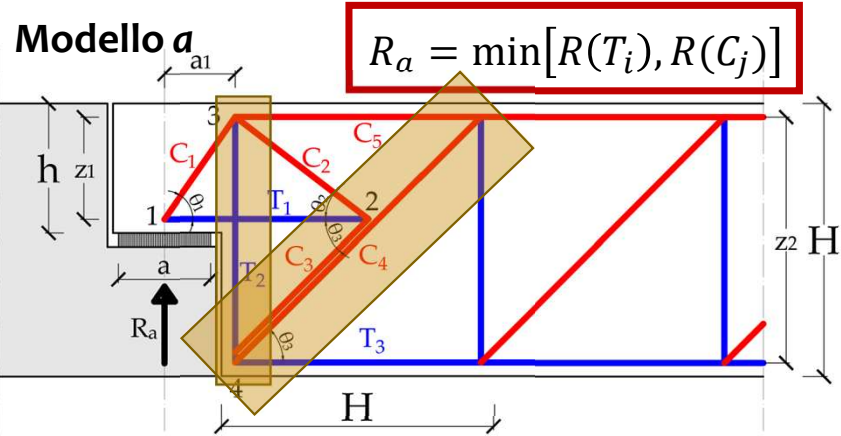
Variabile	Notazione	Distribuzione	$\mu_X/X_k$	$V_X$
Peso proprio della trave	$S_W$	Normale	1	0.04
Carico permanente strutturale (soletta)	$G_1$	Normale	1	0.04
Carico permanente non strutturale (soletta)	$G_2$	Normale	1	0.10
Carico da traffico (periodo di riferimento di base di 1 anno)	$Q$	Gumbel	0.7	0.075
Incertezza del modello per le forze assiali	$\vartheta_{AE}$	Log-Normale	1	0.05
Incertezza del modello per le forze di taglio	$\vartheta_{SE}$	Log-Normale	1	0.10

## Legge di degrado (corrosione) (Li & Ye, 2018)

$$\Delta A_s = 0.0366 \cdot \phi \cdot i_{cor} \cdot (t - t_i)$$

	Media	COV
$i_{cor}$	0.777 mm/anno	0.56
$t_i$	30 <sup>th</sup> anno	0.20

# Affidabilità di una sella Gerber



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

ELSEVIER CrossMark ScienceDirect

Procedia Structural Integrity 78 (2026) 404–411

www.elsevier.com/locate/procedia

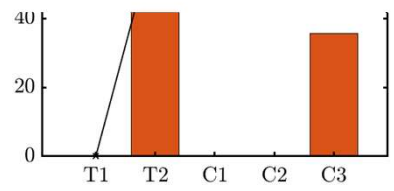
Structural Integrity  
**Procedia**

XX ANIDIS Conference

## A new reliability-based procedure for the life-cycle management of constructions: application to RC bridge half-joint

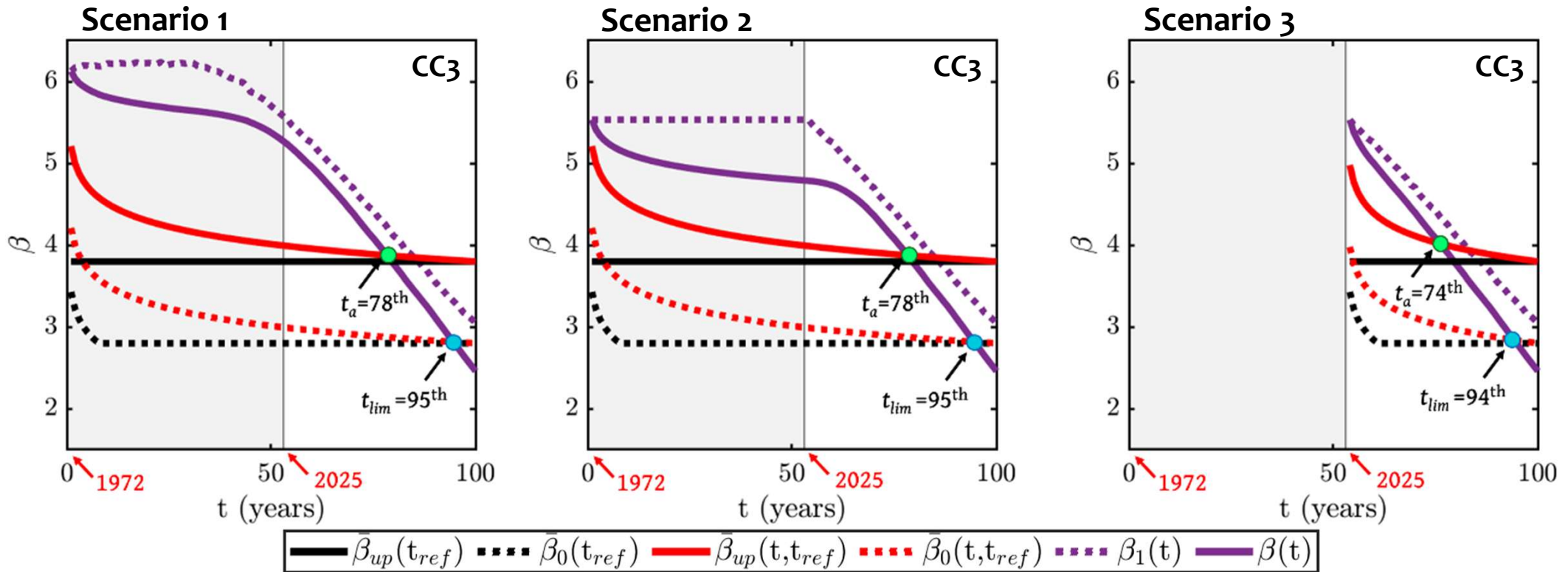
Matteo Tatangelo<sup>a,\*</sup>, Lorenzo Audisio<sup>a</sup>, Michele D'Amato<sup>b</sup>, Rosario Gigliotti<sup>a</sup>, Franco Braga<sup>a</sup>

<sup>a</sup>DISG, Dept. of Structural and Geotechnics Engineering, Sapienza University of Rome, Via Eudossiana 18, 00184 Rome, Italy  
<sup>b</sup>DIUSS, Dept. for Humanistic, Scientific and Social Innovation, University of Basilicata, Via Lanera, Matera 75100, Italy



$$R = R_a + R_b$$

- Scenario 1 →  $t_{in}$  è noto  $t_{ref} = I_{ass} + (t_{ass} - t_{in}) \gg \gg \beta_1$  non è noto da  $t_{in}$  a  $t_{ass}$
- Scenario 2 →  $t_{in}$  è noto  $t_{ref} = I_{ass} + (t_{ass} - t_{in}) \gg \gg \beta_1$  non è noto da  $t_{in}$  a  $t_{ass}$  ed è assunto costante
- Scenario 3 → **Approccio (b)**  $t_{in} = t_{in}^* = t_{ass} \rightarrow t_{ref} = I_{ass}$



## Conclusioni

1. Le procedure basate sull'affidabilità consentono di monitorare il ciclo di vita di una costruzione, controllando le probabilità di fallimento (insuccesso) per i diversi stati limite
2. I criteri economici e sulla sicurezza delle persone definiscono gli indici di affidabilità target, svolgendo un ruolo cruciale nel ciclo di vita basato sull'affidabilità
3. La procedura proposta può essere generalizzata per diversi tipi di costruzioni
4. E' necessario formulare una metodologia chiara e unitaria che fornisca indici di affidabilità target per tutti gli stati limite (ultimi, di servizio, di fatica, ecc.), tenendo conto delle classi di conseguenza e dei tipi di costruzione esaminati
5. La procedura può essere applicata sia con metodi di affidabilità di Livello II sia di Livello I (fattori parziali)