

# PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA



## PROGETTO DEFINITIVO

### EUROLINK S.C.p.A.

IMPREGILO S.p.A. (MANDATARIA)  
SOCIETÀ ITALIANA PER CONDOTTE D'ACQUA S.p.A. (MANDANTE)

COOPERATIVA MURATORI E CEMENTISTI - C.M.C. DI RAVENNA SOC. COOP. A.R.L. (MANDANTE)

SACYR S.A.U. (MANDANTE)

ISHIKAWAJIMA - HARIMA HEAVY INDUSTRIES CO. LTD (MANDANTE)  
A.C.I. S.C.P.A. - CONSORZIO STABILE (MANDANTE)

<p>IL PROGETTISTA Prof. Ing. F.Braga Ordine Ingegneri Roma N° 7072 Dott. Ing E. Pagani Ordine Ingegneri Milano n° 15408</p> 	<p>IL CONTRAENTE GENERALE  Project Manager (Ing. P.P. Marcheselli)</p>	<p>STRETTO DI MESSINA Direttore Generale e RUP Validazione (Ing. G. Fiammenghi)</p>	<p>STRETTO DI MESSINA Amministratore Delegato (Dott. P. Ciucci)</p>
---	--	---	---

<p><i>Unità Funzionale</i>      OPERA DI ATTRAVERSAMENTO <i>Tipo di sistema</i>        STUDI DI BASE <i>Raggruppamento di opere/attività</i>      ANALISI GLOBALI <i>Opera - tratto d'opera - parte d'opera</i>      Generale <i>Titolo del documento</i>      Analisi del rischio di accadimento di eventi rari per analisi agli stati limite ultimi (SLU)</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">PB0028_F0</div>
---	--

CODICE	<table border="1" style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td>C</td><td>G</td><td>3</td><td>6</td><td>0</td><td>0</td><td>P</td><td>C</td><td>L</td><td>D</td><td>P</td><td>S</td><td>B</td><td>A</td><td>2</td><td>G</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>F0</td> </tr> </table>	C	G	3	6	0	0	P	C	L	D	P	S	B	A	2	G	0	0	0	0	0	0	0	1	F0
C	G	3	6	0	0	P	C	L	D	P	S	B	A	2	G	0	0	0	0	0	0	0	1	F0		

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
F0	20-06-2011	EMISSIONE FINALE	GL	FB	FB



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi del rischio di accadimento di eventi rari per analisi agli stati limite ultimi (SLU)</b>	<i>Codice documento</i> PB0028_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

## INDICE

INDICE .....		3
1 Introduzione .....		5
2 Rassegna dei metodi di affidabilità .....		5
3 Valori di riferimento dell'indice di affidabilità $\beta$ .....		6
4 Approccio per la calibrazione dei valori di progetto .....		8
5 Combinazione delle azioni tramite i coefficienti $\psi_0$ .....		13
6 Conclusioni .....		19
7 Bibliografia .....		20



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi del rischio di accadimento di eventi rari per analisi agli stati limite ultimi (SLU)</b>	<i>Codice documento</i> PB0028_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

## 1 Introduzione

In via di principio, i valori numerici dei coefficienti parziali e dei coefficienti  $\psi$  possono essere determinati in uno dei due modi seguenti:

- a) Sulla base della calibrazione con riferimento ad una esperienza consolidata nella costruzione di edifici.

NOTA: Per la maggior parte dei coefficienti parziali e dei coefficienti  $\psi$  proposti negli Eurocodici attualmente disponibili questo è il Principio fondamentale

- b) Sulla base della interpretazione statistica di dati sperimentali ed osservazioni sul campo. (Ciò dovrebbe essere condotto nell'ambito di una teoria probabilistica dell'affidabilità).

Quando si usa il metodo b), o da solo o in combinazione con il metodo a), i coefficienti parziali per differenti materiali ed azioni per gli stati limite ultimi dovrebbero essere calibrati in modo che i livelli di affidabilità per le strutture rappresentative siano il più vicino possibile ai valori di affidabilità di riferimento.

## 2 Rassegna dei metodi di affidabilità

Le procedure di calibrazione probabilistica dei coefficienti parziali possono essere suddivise in due classi principali:

- metodi completamente probabilistici (Livello III), e
- metodi di affidabilità al primo ordine (FORM) (Livello II).

NOTA 1: I metodi completamente probabilistici (Livello III) forniscono, in via di principio, soluzioni corrette ai problemi di affidabilità così come formulati. I metodi di Livello III sono raramente impiegati nella calibrazione dei codici di progetto a causa della frequente mancanza di dati statistici

NOTA 2: I metodi di livello II impiegano alcune approssimazioni ben definite e portano a risultati che possono essere considerati sufficientemente accurati nella maggior parte delle applicazioni strutturali

In entrambi i metodi di Livello II e Livello III, la misura dell'affidabilità dovrebbe essere identificata con la probabilità di sopravvivenza  $P_s = (1 - P_f)$ , dove  $P_f$  è la probabilità di fallimento per il livello prestazionale (stato limite) considerato e nell'ambito di un periodo di riferimento adeguato. Se la

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi del rischio di accadimento di eventi rari per analisi agli stati limite ultimi (SLU)</b>	<i>Codice documento</i> PB0028_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

probabilità di fallimento calcolata è maggiore di un valore di riferimento prestabilito  $P_0$ , allora la struttura dovrebbe essere considerata non sicura rispetto a quel determinato stato limite.

NOTA: La “probabilità di fallimento” ed il suo corrispondente indice di affidabilità (vedere C5) sono solo valori di riferimento che non rappresentano necessariamente le frequenze di fallimento effettive ma piuttosto sono impiegati come valori operativi a scopi di calibrazione dei codici e di confronto dei livelli di affidabilità delle strutture

### 3 Valori di riferimento dell'indice di affidabilità $\beta$

I valori di riferimento dell'indice di affidabilità  $\beta$  per diverse situazioni di progetto, e per periodi di riferimento di 1 anno e 50 anni, sono indicati in Tabella 3.1 (prospetto C2). I valori di  $\beta$  nel prospetto C2 corrispondono ai livelli di sicurezza per gli elementi strutturali nella classe di affidabilità RC3, RC2 e RC1, sia per gli Stati Limite Ultimi che di Esercizio. Tutti i valori di  $\beta$  sono ottenuti per arrotondamento superiore.

*Tabella 3.1 Prospetto C2 – Valori di riferimento dell'indice di affidabilità  $\beta$  per gli elementi strutturali di Classe RC3, RC2 e RC1, per gli Stati Limite Ultimi e di Esercizio, e per vita di riferimento  $V_R$  pari a 1 anno e a 50 anni. I valori in grassetto sono riportati nell'EC0, mentre gli altri sono dedotti*

	SLU		SLE	
	1	50	1	50
RC3	<b>5.2</b>	<b>4.3</b>	3.6	2.4
RC2	<b>4.7</b>	<b>3.8</b>	<b>2.9</b>	<b>1.5</b>
RC1	<b>4.2</b>	<b>3.3</b>	2.1	-0.4

I valori sopra riportati possono essere ottenuti assumendo un periodo di ritorno  $T_f$  per lo SLU in classe RC2 pari rispettivamente a 500,000 e 500 anni. I valori relativi alle classi RC3 e RC1 sono ottenuti rispettivamente moltiplicando e dividendo per 10 detto periodo di ritorno, come rappresentato nella tabella seguente (Tabella 3.2).

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi del rischio di accadimento di eventi rari per analisi agli stati limite ultimi (SLU)</b>	<b>Codice documento</b> PB0028_F0	<b>Rev</b> F0	<b>Data</b> 20-06-2011	

*Tabella 3.2 Prospetto C2-bis – Valori di riferimento dei periodi di ritorno del fallimento e dei relativi tassi di fallimento per gli elementi strutturali di Classe RC3, RC2 e RC1, per gli Stati Limite Ultimi e di Esercizio. Tali valori sono gli stessi per tutte le vite di riferimento  $V_R$*

	Periodi di ritorno		Tasso di fallimento	
	SLU	SLE	SLU	SLE
RC3	5,000,000	5,000	2E-7	2E-4
RC2	500,000	500	2E-6	2E-3
RC1	50,000	50	2E-5	2E-2

Dalla Tabella 3.2 (prospetto C2-bis) si evince che, indipendentemente dalla vita di riferimento, il tasso di fallimento del relativo stato limite rimane costante all'interno della classe di affidabilità. Ciò implica che la progettazione eseguita in questo inquadramento affidabilistico mira a produrre strutture a *tasso di fallimento costante*.

Detto dunque  $T_f$  il periodo di ritorno, la probabilità di fallimento, nell'ipotesi di processo poissoniano, è data da:  $P_f = 1 - \exp(-V_R/T_f)$ , da cui si ottiene il corrispondente valore dell'indice di affidabilità:  $\beta = -\Phi^{-1}(P_f) = \Phi^{-1}(1-P_f)$ . La dipendenza di  $\beta$  dalla vita di riferimento e dal periodo di ritorno si ottiene come:

$$\beta = \Phi^{-1} \left[ \exp \left( -\frac{V_R}{T_f} \right) \right]$$

Questa espressione consente di determinare gli indici di affidabilità riferiti a vite di riferimento differenti. Ad esempio, per  $V_R = 200$  anni, si ha:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi del rischio di accadimento di eventi rari per analisi agli stati limite ultimi (SLU)		Codice documento PB0028_F0	Rev F0	Data 20-06-2011

*Tabella 3.3 Prospetto C2-ter – Valori di riferimento dell'indice di affidabilità  $\beta$  per gli elementi strutturali di Classe RC3, RC2 e RC1, per gli Stati Limite Ultimi e di Esercizio, e per vita di riferimento  $V_R$  pari a 50 anni e a 200 anni. I valori in grassetto sono riportati nell'EC0, mentre gli altri sono dedotti*

	SLU		SLE	
	50	200	50	200
RC3	<b>4.3</b>	4.0	2.4	1.8
RC2	<b>3.8</b>	3.4	<b>1.5</b>	0.5
RC1	<b>3.3</b>	2.7	-0.4	-2.1

A questi valori dell'indice di affidabilità corrispondono le probabilità di fallimento presentate nella Tabella 3.4.

*Tabella 3.4 Prospetto C2-quater – Valori di riferimento della probabilità di fallimento  $P_f$  per gli elementi strutturali di Classe RC3, RC2 e RC1, per gli Stati Limite Ultimi e di Esercizio, e per vita di riferimento  $V_R$  pari a 50 anni e a 200 anni*

	SLU		SLE	
	50	200	50	200
RC3	1E-5	4E-5	9.9E-3	3.9E-2
RC2	1E-4	4E-4	9.5E-2	3.3E-1
RC1	1E-3	4E-3	6.3E-1	9.8E-1

Dall'esame della precedente tabella si evince che, rimanendo costante il tasso di fallimento, la probabilità di fallimento aumenta all'aumentare del periodo di riferimento.

## 4 Approccio per la calibrazione dei valori di progetto

Per quanto riguarda la domanda, i valori di progetto degli effetti delle azioni  $E_d$  dovrebbero essere definiti in modo tale che la probabilità di avere un valore più sfavorevole sia:

$$P(E > E_d) = \Phi(\alpha_E \beta)$$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi del rischio di accadimento di eventi rari per analisi agli stati limite ultimi (SLU)</b>	<b>Codice documento</b> <i>PB0028_F0</i>	<b>Rev</b> <i>F0</i>	<b>Data</b> <i>20-06-2011</i>	

dove  $\alpha_E$  è il coefficiente di sensibilità ricavato dal FORM, che può essere preso uguale a -0.7, a condizione che:  $0.16 < \sigma_E / \sigma_R < 7.6$ . Si ha dunque:

$$P(E > E_d) = \Phi(-0.7\beta)$$

Quando il modello dell'azione contiene diverse variabili di base, l'espressione precedente dovrebbe essere utilizzata solo per la variabile dominante. Per le azioni non dominanti, i valori di progetto possono essere definiti dalla relazione:

$$P(E > E_d) = \Phi(-0.4 \cdot 0.7\beta) = \Phi(-0.28\beta)$$

NOTA Per  $\beta = 3,8$ , i valori definiti da questa espressione corrispondono approssimativamente al frattile al 90%

Le espressioni fornite in Tabella 4.1 (prospetto C3) dovrebbero essere usate per valutare i valori di progetto di variabili con distribuzione di probabilità assegnata.

**Tabella 4.1** *Prospetto C3 – Valori di progetto per diverse funzioni di distribuzione*

Distribuzione	Valori di progetto
Normale	$\mu - \alpha\beta\sigma$
Lognormale	$\mu \exp(-\alpha\beta V)$ per $V = \sigma/\mu < 0.2$
Gumbel	$u - \frac{1}{a} \ln[-\ln\Phi(-\alpha\beta)]$ <p>dove: <math>u = \mu - \frac{0.577}{a}</math>    <math>a = \frac{\pi}{\sigma\sqrt{6}}</math></p> $u - \frac{1}{a} \ln[-\ln\Phi(-\alpha\beta)]$ <p>dove: <math>u = \mu - \frac{0.577}{a}</math>    <math>a = \frac{\pi}{\sigma\sqrt{6}}</math>, per cui:</p> $\mu - \frac{0.577\sigma\sqrt{6}}{\pi} - \frac{\sigma\sqrt{6}}{\pi} \ln[-\ln\Phi(-\alpha\beta)] =$ $\mu \left\{ 1 - \frac{V\sqrt{6}}{\pi} \{0.577 + \ln[-\ln\Phi(-\alpha\beta)]\} \right\}$

NOTA In queste espressioni,  $\mu$ ,  $\sigma$  e  $V$  sono, rispettivamente, il valore medio, lo scostamento tipo ed il coefficiente di variazione di una variabile assegnata. Per le azioni variabili, questi dovrebbero essere basati sullo stesso periodo di riferimento di  $\beta$

Si osservi che la relazione generale per definire i valori di progetto è:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
<b>Analisi del rischio di accadimento di eventi rari per analisi agli stati limite ultimi (SLU)</b>	<i>Codice documento</i> PB0028_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011

$$E_d = \gamma_{Sd} E[\gamma_{f,i} F_{rep,i}] \quad \text{dove} \quad F_{rep,V_R} = \psi F_{k,V_R} \quad (0 \leq \psi \leq 1)$$

in cui  $\psi = 1$  identifica il valore rappresentativo con il valore caratteristico, mentre  $\psi < 1$  identifica il valore di combinazione.

L'equazione precedente in molti casi si può semplificare in:

$$E_d = E[\gamma_{F,i} F_{rep,i}]$$

Un metodo per ottenere il coefficiente parziale consiste nel dividere il valore di progetto di un'azione variabile per il suo valore rappresentativo o caratteristico, come segue:

$$\gamma_{F,V_R} = \frac{E_{d,V_R}}{E_{rep,V_R}}$$

I coefficienti parziali  $\gamma_F$  di riferimento sono definiti, per ogni Stato Limite, nella classe di affidabilità RC2 e per una vita di riferimento pari a 50 anni (vd. Prospetto B3 in EN1990:2002). Si ha dunque:

$$\gamma_F = \gamma_{F,RC2,50} = \frac{E_{d,RC2,50}}{E_{k,50}}$$

Se si vogliono definire coefficienti parziali su classi di affidabilità e periodi di riferimento differenti, si può operare ad esempio come segue:

$$\gamma_{F,RCi,V_R} = \frac{E_{d,RCi,V_R}}{E_{d,RC2,50}} \frac{E_{k,50}}{E_{k,V_R}} \gamma_F$$

Si definisce dunque il fattore  $K_{FI}$  moltiplicativo dei coefficienti parziali delle azioni come segue:

$$K_{FI} = \frac{\gamma_{F,RCi,V_R}}{\gamma_F} = \frac{E_{d,RCi,V_R}}{E_{d,RC2,50}} \frac{E_{k,50}}{E_{k,V_R}}$$

Nell'ipotesi di distribuzione normale, lognormale o Gumbel della domanda, tale fattore si determina rispettivamente come (si ricordi che  $\alpha_E$  è negativo):

$$K_{FI} = \frac{1 - \alpha_{E,V_R} \cdot \beta_{RCi,V_R} \cdot V_{E,V_R}}{1 - \alpha_{E,50} \cdot \beta_{RC2,50} \cdot V_{E,50}} \frac{1 + k_{5\%} \cdot V_{E,50}}{1 + k_{5\%} \cdot V_{E,V_R}}$$

$$K_{FI} = \frac{\exp(-\alpha_{E,V_R} \cdot \beta_{RCi,V_R} \cdot V_{E,V_R}) \exp(k_{5\%} \cdot V_{E,50})}{\exp(-\alpha_{E,50} \cdot \beta_{RC2,50} \cdot V_{E,50}) \exp(k_{5\%} \cdot V_{E,V_R})}$$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi del rischio di accadimento di eventi rari per analisi agli stati limite ultimi (SLU)</b>	<b>Codice documento</b> PB0028_F0	<b>Rev</b> F0	<b>Data</b> 20-06-2011	

$$K_{FI} = \frac{1 - \frac{V_{E,V_R} \sqrt{6}}{\pi} \{0.577 + \ln[-\ln \Phi(-\alpha_{E,V_R} \beta_{RCi,V_R})]\}}{1 - \frac{V_{E,50} \sqrt{6}}{\pi} \{0.577 + \ln[-\ln \Phi(-\alpha_{E,50} \beta_{RC2,50})]\}} \frac{1 - \frac{V_{E,50} \sqrt{6}}{\pi} \{0.577 + \ln[-\ln \Phi(k_{5\%})]\}}{1 - \frac{V_{E,V_R} \sqrt{6}}{\pi} \{0.577 + \ln[-\ln \Phi(k_{5\%})]\}}$$

Dalle equazioni precedenti si possono trarre utili indicazioni circa la variazione dei coefficienti parziali al variare della classe di affidabilità e del periodo di riferimento.

Si osservi ad esempio che, nel caso in cui si voglia modificare solo la classe di affidabilità mantenendo invariato il periodo di riferimento (ad es., 50 anni), poiché le statistiche delle distribuzioni rimangono invariate, le equazioni precedenti si semplificano in:

$$K_{FI} = \frac{1 - \alpha_{E,50} \cdot \beta_{RCi,50} \cdot V_{E,50}}{1 - \alpha_{E,50} \cdot \beta_{RC2,50} \cdot V_{E,50}}$$

$$K_{FI} = \frac{\exp(-\alpha_{E,50} \cdot \beta_{RCi,50} \cdot V_{E,50})}{\exp(-\alpha_{E,50} \cdot \beta_{RC2,50} \cdot V_{E,50})}$$

$$K_{FI} = \frac{1 - \frac{V_{E,50} \sqrt{6}}{\pi} \{0.577 + \ln[-\ln \Phi(-\alpha_{E,50} \beta_{RCi,50})]\}}{1 - \frac{V_{E,50} \sqrt{6}}{\pi} \{0.577 + \ln[-\ln \Phi(-\alpha_{E,50} \beta_{RC2,50})]\}}$$

La Tabella 4.3 riporta i fattori moltiplicativi  $K_{FI}$  dei coefficienti parziali dell'azione combinata, supposta Gumbel, nel passaggio da 50 a 200 anni di periodo di riferimento, mantenendo invariata la classe di affidabilità. Tali fattori sono valutati per diversi valori dei coefficienti di variazione (CoV= 0.2, 0.3, 0.4, 0.5) delle distribuzioni a 50 e 200 anni. Valori dei CoV proposti in letteratura (vedi Melchers 1999) e normalmente utilizzati per la caratterizzazione statistica di differenti tipologie di carico sono riportate in Tabella 4.2. Si considera l'ipotesi che il coefficiente di variazione non si riduca all'aumentare del periodo di riferimento.

**Tabella 4.2** Coefficienti di variazione per differenti tipi di carico

Tipo di Carico	CoV	Periodo ritorno (anni)	Distrib.	Riferimento
Peso proprio	0.10		Normale	Nowak (1999)
Permanente	0.10		Normale	c.s.
Max su 1 corsia	0.10	75	Normale	Nowak (1999), Moses (2001)

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
Analisi del rischio di accadimento di eventi rari per analisi agli stati limite ultimi (SLU)		Codice documento PB0028_F0	Rev F0	Data 20-06-2011

Max su multicorsie	0.07	75	Normale	c.s.
Modello carico	0.18		Normale	Moses e Ghosn (1985)
Max vento	0.10	50	Gumbel	Ellingwood et al. (1980)
Modello vento	0.25		Normal	c.s.

*Tabella 4.3 Fattori moltiplicativi  $K_{FI}$  dei coefficienti parziali dell'azione combinata, supposta Gumbel, nel passaggio da 50 a 200 anni di periodo di riferimento. I fattori sono valutati per diversi valori dei coefficienti di variazione (CoV) delle distribuzioni a 50 e 200 anni*

		RC2,200			
RC2,50	CoV	0.20	0.30	0.40	0.50
	0.20	0.94	0.98	1.02	1.05
	0.30		0.92	0.96	0.98
	0.40			0.91	0.94
	0.50				0.90

Da tale tabella si evince che, al variare del periodo di riferimento all'interno della stessa classe di affidabilità, i coefficienti parziali delle azioni rimangono sostanzialmente invariati. Tale conclusione è giustificata dalle considerazioni svolte al paragrafo precedente per cui l'obiettivo della progettazione è di mantenere costante il tasso di fallimento.

Se invece si vuole modificare la classe di affidabilità mantenendo invariato il periodo di riferimento, si ottiene quanto presentato nella Tabella 4.4, che riporta i fattori moltiplicativi  $K_{FI}$ , sempre nell'ipotesi di distribuzione Gumbel. Tali fattori sono valutati per diversi valori dei coefficienti di variazione (CoV= 0.2, 0.3, 0.4, 0.5) della distribuzione.

*Tabella 4.4 Fattori moltiplicativi  $K_{FI}$  (nell'ipotesi di distribuzione Gumbel) al variare della classe di affidabilità, valutati per diversi valori dei coefficienti di variazione (CoV) della distribuzione.*

		RC3,50			
CoV		0.20	0.30	0.40	0.50
RC2,50		1.11	1.13	1.15	1.16

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi del rischio di accadimento di eventi rari per analisi agli stati limite ultimi (SLU)</b>	<b>Codice documento</b> <i>PB0028_F0</i>	<b>Rev</b> <i>F0</i>	<b>Data</b> <i>20-06-2011</i>	

Si osservi che tali fattori sono compatibili con quello, pari a  $K_{FI} = 1.1$ , definito nella Tabella B3 dell'Eurocodice 0 relativa alla differenziazione dell'affidabilità mediante la modifica dei coefficienti parziali.

La Tabella 4.5 riporta i fattori moltiplicativi  $K_{FI}$ , nel passaggio da RC2,50 a RC3,200. Tali fattori sono valutati per diversi valori dei coefficienti di variazione (CoV= 0.2, 0.3, 0.4, 0.5) della distribuzione a 50 anni e a 200 anni.

*Tabella 4.5 Fattori moltiplicativi  $K_{FI}$ , nel passaggio da RC2,50 a RC3,200, valutati per diversi valori dei coefficienti di variazione (CoV) della distribuzione a 50 anni e a 200 anni*

		RC3,200				
		CoV	0.20	0.30	0.40	0.50
RC2,50	CoV	0.20	1.04	1.12	1.19	1.24
	0.20			1.05	1.11	1.16
	0.30				1.05	1.10
	0.40					1.06
	0.50					

Anche in questo caso si osserva che l'aumento del periodo di riferimento non apporta significative variazioni al fattore amplificativo dei coefficienti parziali che rimane sostanzialmente pari ad 1.1.

Si può dunque concludere che per differenziare l'affidabilità fra la classe RC2 ed RC3 è necessario moltiplicare i coefficienti parziali delle azioni per 1.1, in linea anche con quanto riportato nella Tabella B3 dell'Eurocodice 0. L'aumento del periodo di riferimento non comporta invece incrementi dei coefficienti parziali, in virtù della filosofia di progettazione che prevede la costanza del tasso di fallimento. E' opportuno infine osservare che il fattore 1.1 dovrebbe essere applicato solamente alle azioni sfavorevoli.

## **5 Combinazione delle azioni tramite i coefficienti $\psi_0$**

Le singole azioni variabili nel tempo, che sono essenzialmente processi casuali  $p(t)$ , possono essere modellate tramite la distribuzione dei massimi all'interno di un determinato periodo di riferimento  $T$ :  $X = \max_T[p(t)]$ .

Per molti processi si può approssimare in maniera accettabile la distribuzione dei massimi con una distribuzione Gumbel.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi del rischio di accadimento di eventi rari per analisi agli stati limite ultimi (SLU)</b>	<i>Codice documento</i> PB0028_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

Quando due o più azioni variabili nel tempo agiscono simultaneamente, si fa riferimento alla teoria della combinazione stocastica delle azioni. Una considerazione fondamentale è che, se tali azioni sono indipendenti, come spesso è il caso, è molto improbabile che esse raggiungano il massimo storico nello stesso momento.

Ad esempio, se si considerano due processi variabili nel tempo,  $p_1(t)$  e  $p_2(t)$ , agenti simultaneamente in un determinato periodo di riferimento  $T$ , per i quali è possibile esprimere il loro effetto combinato mediante una combinazione lineare  $p_1(t) + p_2(t)$ , la variabile casuale di interesse è:

$$X = \max_T [p_1(t) + p_2(t)]$$

La corretta distribuzione di  $X$  può essere derivata solo in pochi casi. Una possibile soluzione al problema è data dalla regola di combinazione di Turkstra, cui molte normative fanno riferimento, che considera invece il processo:

$$X = \max_T \left\{ \max_T [p_1(t)] + p_2(t) \quad p_1(t) + \max_T [p_2(t)] \right\}$$

Tale regola di combinazione considera che il massimo valore della somma di due azioni variabili casualmente si abbia in corrispondenza del massimo di una delle due azioni. Tale risultato può essere generalizzato ad un qualsiasi numero di azioni indipendenti.

A tal proposito si fa riferimento al modello di Ferry Borges-Castanheta (FBC), in cui il processo è generato da una sequenza di variabili casuali indipendenti ed identicamente distribuite, ognuna agente in un dato intervallo di tempo deterministico. Il processo FBC è dato da una serie di impulsi rettangolari di ampiezza variabile ad ogni successivo intervallo  $t_i$ , detto *periodo di base*. La Figura 5.1 mostra il caso di due azioni che, nel periodo di riferimento  $T$ , danno luogo a  $N_i = T/t_i$  ripetizioni.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Analisi del rischio di accadimento di eventi rari per analisi agli stati limite ultimi (SLU)	Codice documento PB0028_F0	Rev F0	Data 20-06-2011

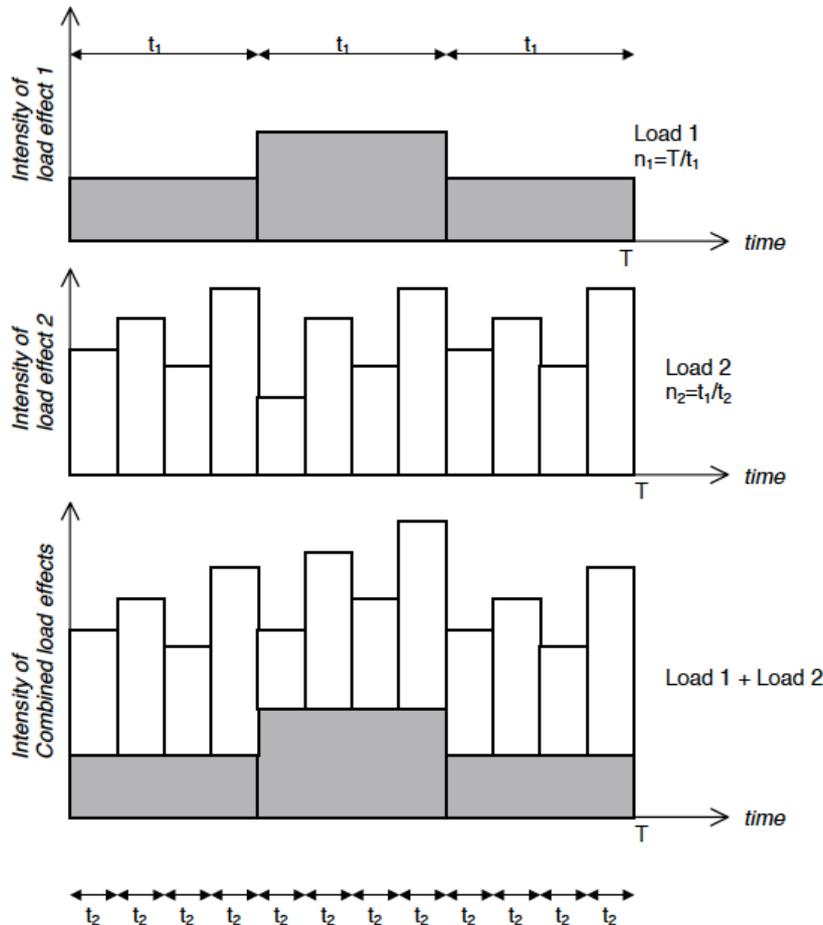


Figura 5.1 *Illustrazione della combinazione di due sollecitazioni secondo il modello di Ferry Borges-Castanheta*

Si osservi che, come riportato nelle note del par. 4.1.3 dell'Eurocodice 0, il periodo di base per le azioni di traffico sui ponti stradali è preso pari ad una settimana.

Stante l'ipotesi di indipendenza, la distribuzione del massimo valore nel periodo di riferimento  $T$  è data da:

$$F_{\max_T X_i}(x_i) = [F_{X_i}(x_i)]^{N_i}$$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi del rischio di accadimento di eventi rari per analisi agli stati limite ultimi (SLU)</b>	<b>Codice documento</b> PB0028_F0	<b>Rev</b> F0	<b>Data</b> 20-06-2011	

Quando diversi processi FBC agiscono in contemporanea e il rapporto degli intervalli di azione può essere espresso tramite un numero intero, è possibile, in linea di principio, ottenere la distribuzione dei valori estremi della combinazione mediante una formula iterativa.

Il *format* della normativa italiana ed europea (Eurocodice 0) impiega un coefficiente di combinazione  $\psi_{0i}$  diverso per ogni azione variabile. Tali coefficienti forniscono il rapporto tra frattili delle distribuzioni dei valori estremi e dei valori puntuali. Essi sono calibrati in modo che la probabilità di eccedenza del valore di progetto derivante dalla combinazione di più azioni sia dello stesso ordine della probabilità di eccedenza del valore di progetto derivante da una sola azione. Per azioni variabili nel tempo tali coefficienti dipendono dai parametri della distribuzione, dai coefficienti di sensibilità e dal periodo di base  $t_i$  assunto per eventi stazionari.

La relazione generale impiegata nell'Eurocodice 0 è la seguente (l'equazione sotto riportata corregge anche un errore presente nella versione originale):

$$\frac{F_s^{-1}[\Phi(-0.4\beta_1)]^{N_1}}{F_s^{-1}[\Phi(-0.7\beta)]} \quad \text{dove:} \quad \beta_1 = \Phi^{-1}\left[\frac{\Phi(-0.7\beta)}{N_1}\right]$$

ed in cui  $F_s$  è la funzione distribuzione di probabilità dei valori estremi dell'azione non dominante nel periodo di riferimento  $T = V_R$ ,  $T_1$  è il più grande dei periodi di base per le azioni da combinare,  $N_1 = \text{round}(T/T_1)$ ,  $V$  è il coefficiente di variazione dell'azione non dominante per il periodo di riferimento. Il periodo di base di una azione è quello all'interno del quale il valore dell'azione è costante.

La Tabella 5.1 (prospetto C4) fornisce le espressioni per ricavare i coefficienti  $\psi_0$  nel caso di due azioni variabili, relativamente al caso di distribuzione normale o Gumbel.

**Tabella 5.1** Prospetto C4 – Espressioni per il calcolo di  $\psi_0$  nel caso di due azioni variabili

Distribuzione	$\psi_0 = F_{\text{non dominante}} / F_{\text{dominante}}$
Normale (approssimazione)	$\frac{1 + (0.28\beta - 0.7 \ln N_1)V}{1 + 0.7\beta V}$
Gumbel (approssimazione)	$\frac{1 - 0.78V[0.58 + \ln(-\ln\Phi(0.28\beta)) + \ln N_1]}{1 - 0.78V[0.58 + \ln(-\ln\Phi(0.7\beta))]}$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi del rischio di accadimento di eventi rari per analisi agli stati limite ultimi (SLU)</b>	<b>Codice documento</b> <i>PB0028_F0</i>	<b>Rev</b> <i>F0</i>	<b>Data</b> <i>20-06-2011</i>	

dove  $T$  è il periodo di riferimento (sopra denominato  $V_R$ ),  $T_1$  è il più grande dei periodi di base per le azioni da combinare,  $N_1 = \text{round}(T/T_1)$ ,  $V$  è il coefficiente di variazione dell'azione non dominante per il periodo di riferimento.

Si osserva che in entrambe le tabelle A2.1 e A2.3 dell'EN1990:2002/A1 relative rispettivamente ai valori raccomandati dei fattori  $\psi$  per ponti stradali e ferroviari, si ha sostanzialmente sempre che  $\psi_1 = \psi_0$  (tranne che per l'azione del vento), mentre  $\psi_2$  è sempre nullo (tranne che per i carichi termici e di costruzione).

Dal prospetto C4 si comprende che, nel caso in cui si voglia cambiare la classe di affidabilità e/o il periodo di riferimento, la ricalibrazione del coefficiente di combinazione si esegue facilmente una volta che si conosca il tipo di distribuzione dell'azione, se normale o Gumbel. Nel seguito, in analogia con quanto fatto sopra per i coefficienti parziali, si assume una distribuzione di tipo Gumbel.

La Tabella 5.2 riporta i fattori moltiplicativi  $K_{Cl}$  dei coefficienti di combinazione, supposta Gumbel, nel passaggio da 50 a 200 anni di periodo di riferimento, mantenendo invariata la classe di affidabilità. Tali fattori sono valutati per diversi valori dei coefficienti di variazione (CoV= 0.05, 0.10, 0.15, 0.20) dei valori estremi delle distribuzioni a 50 e 200 anni. Si considera l'ipotesi che tali coefficienti di variazione non varino al variare del periodo di riferimento. Le tabelle sono riferite a periodi di base pari a 0.02 (una settimana), 0.083 (un mese), 0.25 (tre mesi), 0.5 (sei mesi) e 1.0 (un anno).

*Tabella 5.2 Fattori moltiplicativi  $K_{Cl}$  dei coefficienti di combinazione (supposta Gumbel) nel passaggio da 50 a 200 anni di periodo di riferimento, mantenendo invariata la classe di affidabilità*

		RC2,200				
RC2,50	CoV/t	0.02	0.083	0.25	0.5	1.0
	0.05	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
	0.10	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
	0.15	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04
	0.20	1.05	1.05	1.05	1.05	1.04

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi del rischio di accadimento di eventi rari per analisi agli stati limite ultimi (SLU)</b>	<b>Codice documento</b> <i>PB0028_F0</i>	<b>Rev</b> <i>F0</i>	<b>Data</b> <i>20-06-2011</i>	

Da tale tabella si evince che, al variare del periodo di riferimento all'interno della stessa classe di affidabilità, i coefficienti di combinazione delle azioni rimangono sostanzialmente invariati, indipendentemente dal periodo di base dell'azione.

Se invece si vuole modificare la classe di affidabilità mantenendo invariato il periodo di riferimento, si ottiene quanto presentato nella Tabella 5.3, che riporta i fattori moltiplicativi  $K_{Cl}$ , sempre nell'ipotesi di distribuzione Gumbel. Tali fattori sono valutati per gli stessi valori dei coefficienti di variazione e dei periodi di base visti sopra.

**Tabella 5.3** Fattori moltiplicativi  $K_{Cl}$ , (nell'ipotesi di distribuzione Gumbel), al variare della classe di affidabilità, da RC2 ad RC3

		RC3,50				
RC2,50	CoV/t	0.02	0.083	0.25	0.5	1.0
	0.05	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
	0.10	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
	0.15	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
	0.20	0.93	0.93	0.93	0.93	0.94

Si osservi che anche in questo caso dalla tabella si evince che, al variare della classe di affidabilità mantenendo costante il periodo di riferimento, i coefficienti di combinazione delle azioni rimangono sostanzialmente invariati, indipendentemente dal periodo di base dell'azione.

La Tabella 5.4 riporta i fattori moltiplicativi  $K_{Cl}$ , nel passaggio da RC2,50 a RC3,200. Tali fattori sono valutati per gli stessi valori dei coefficienti di variazione e dei periodi di base visti sopra.

**Tabella 5.4** Fattori moltiplicativi  $K_{Cl}$  nel passaggio da RC2,50 a RC3,200

		RC3,200				
RC2,50	CoV/t	0.02	0.083	0.25	0.5	1.0
	0.05	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
	0.10	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
	0.15	0.97	0.97	0.97	0.98	0.98
	0.20	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi del rischio di accadimento di eventi rari per analisi agli stati limite ultimi (SLU)</b>	<i>Codice documento</i> PB0028_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

Anche in questo caso si osserva che l'aumento del periodo di riferimento non apporta significative variazioni al fattore amplificativo dei coefficienti di combinazione che rimane sostanzialmente pari ad 1.0.

Si può dunque concludere che la differenziazione dell'affidabilità fra la classe RC2 ed RC3 non richiede la modifica dei coefficienti di combinazione delle azioni. Anche l'aumento del periodo di riferimento non comporta variazioni di tali coefficienti.

## 6 Conclusioni

Dall'analisi dei valori degli indici di affidabilità  $\beta$  riportati nell'Eurocodice 0 è possibile dedurre che, indipendentemente dalla vita di riferimento, il tasso di fallimento associato ad uno stato limite rimane costante all'interno di una fissata classe di affidabilità. Una progettazione eseguita con questo inquadramento affidabilistico mira a produrre strutture a tasso di fallimento costante.

In conformità a quanto previsto dall'Eurocodice 0, aumenti del periodo di riferimento non comportano quindi variazioni dei coefficienti parziali delle azioni. Queste variazioni risultano invece necessarie nel passaggio da una classe di affidabilità ad un'altra. In linea anche con quanto riportato nella Tabella B3 dell'Eurocodice 0, per differenziare l'affidabilità fra la classe RC2 ed RC3 è necessario in particolare moltiplicare i coefficienti parziali delle azioni per un fattore di 1.1. Questo aumento dei coefficienti dovrebbe essere applicato alle sole azioni sfavorevoli.

Per quanto riguarda i coefficienti di combinazione  $\psi$ , questi sono calibrati, secondo il format della normativa italiana ed europea, in modo tale che la probabilità di eccedenza del valore di progetto derivante dalla combinazione di più azioni sia dello stesso ordine della probabilità di eccedenza del valore di progetto derivante da una sola azione. Per azioni variabili nel tempo tali coefficienti dipendono sostanzialmente dai parametri della distribuzione, dai coefficienti di sensibilità e dal periodo di base  $t_i$  assunto per eventi stazionari.

Utilizzando le espressioni fornite nell'Eurocodice 0 per la calibrazione dei coefficienti si osserva che, al variare del periodo di riferimento all'interno di una stessa classe di affidabilità, i coefficienti  $\psi$  rimangono sostanzialmente invariati indipendentemente dal periodo di base dell'azione. Stessa cosa accade mantenendo costante il periodo di riferimento variando invece la classe di affidabilità.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Analisi del rischio di accadimento di eventi rari per analisi agli stati limite ultimi (SLU)</b>	<i>Codice documento</i> PB0028_F0	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20-06-2011	

Si può dunque concludere che la differenziazione dell'affidabilità fra la classe RC2 ed RC3 non richiede la modifica dei coefficienti di combinazione delle azioni. Anche l'aumento del periodo di riferimento non comporta variazioni di tali coefficienti.

## 7 Bibliografia

- /1/ Eurocode 0, 1990. Basis of structural design, 2002.
- /2/ Borges J F and Castanheta M, Structural Safety, Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1985.
- /3/ Melchers R E, Structural Reliability: Analysis and Prediction, 2nd edition, J Wiley, 1999.