



Rendiconti  
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL  
*Memorie di Scienze Fisiche e Naturali*  
121° (2003), Vol. XXVII, t. I, pp. 267-289

REMO CALZONA\*

## **Safety and performances for Messina bridge**

### *1. Introduzione*

Signore e Signori,  
nella prima decade del terzo millennio probabilmente sarà costruito il Ponte sullo Stretto di Messina, che realizzerà un collegamento stabile tra la Sicilia e la Calabria mediante un ponte sospeso con luce centrale di 3300 m., due carreggiate stradali ed una piattaforma ferroviaria con due binari.

Lo stato dell'arte del progetto preliminare è illustrato nelle figure 1a, 1b, 1c e 1d. Il nuovo passo sarà il progetto esecutivo, costruttivo e la costruzione.

L'impalcato largo 60 m. è costituito da tre cassoni indipendenti in acciaio, il centrale che supporta il traffico ferroviario e i due laterali che sopportano le carreggiate stradali.

I cassoni longitudinali sono sostenuti da cassoni trasversali ad interasse di 30 m. che sono vincolati all'estremità da dei pendini verticali.

Il sistema di sospensione è costituito da due coppie di cavi lunghi 5300 m. ad una distanza di 52 m.

Le torri sono delle strutture snelle in acciaio alte 383 m. con due gambe di sezione allungata collegate da quattro travi trasversali.

Le fondazioni sono del tipo profondo di circa 60 m.

A confronto con i più grandi ponti sospesi costruiti durante l'ultima decade del 20° secolo (fig. 2): il Great Belt Bridge in Danimarca, con campata centrale di 1624 m., il più grande nel mondo con sezione di impalcato a profilo aerodinamico; l'Akashi Kaikyo Bridge in Giappone, con campata centrale di 1990 m., il più grande con impalcato reticolare; il Tsing Ma ad Hong Kong il più grande ponte stradale e ferroviario costruito recentemente, che rappresentano lo stato dell'arte dei ponti sospesi costruiti nel XX secolo.

\* Professore Ordinario di Tecnica delle Costruzioni. Facoltà d'Ingegneria, Università degli Studi di Roma «La Sapienza». E-mail: remo.calzona@inwind.it



Fig. 1a

# Preliminary Plan (1)

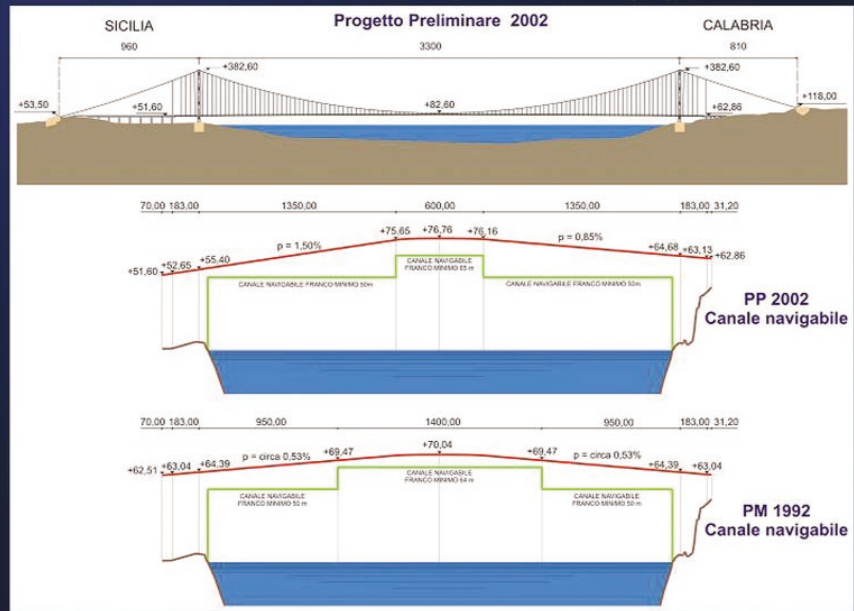


Fig. 1b

# Preliminary Plan (2)

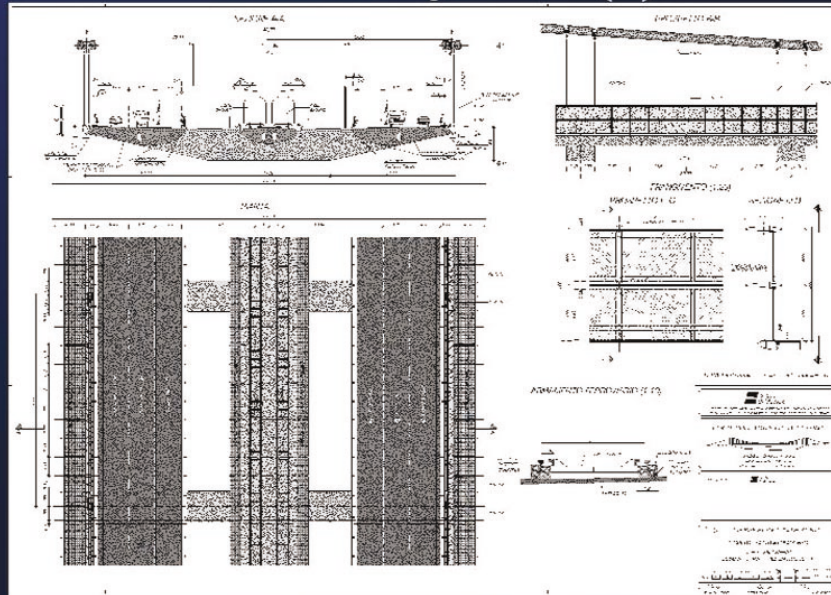


Fig. 1c

## SEZIONI LONGITUDINALE E TRASVERSALE DELLA TORRE

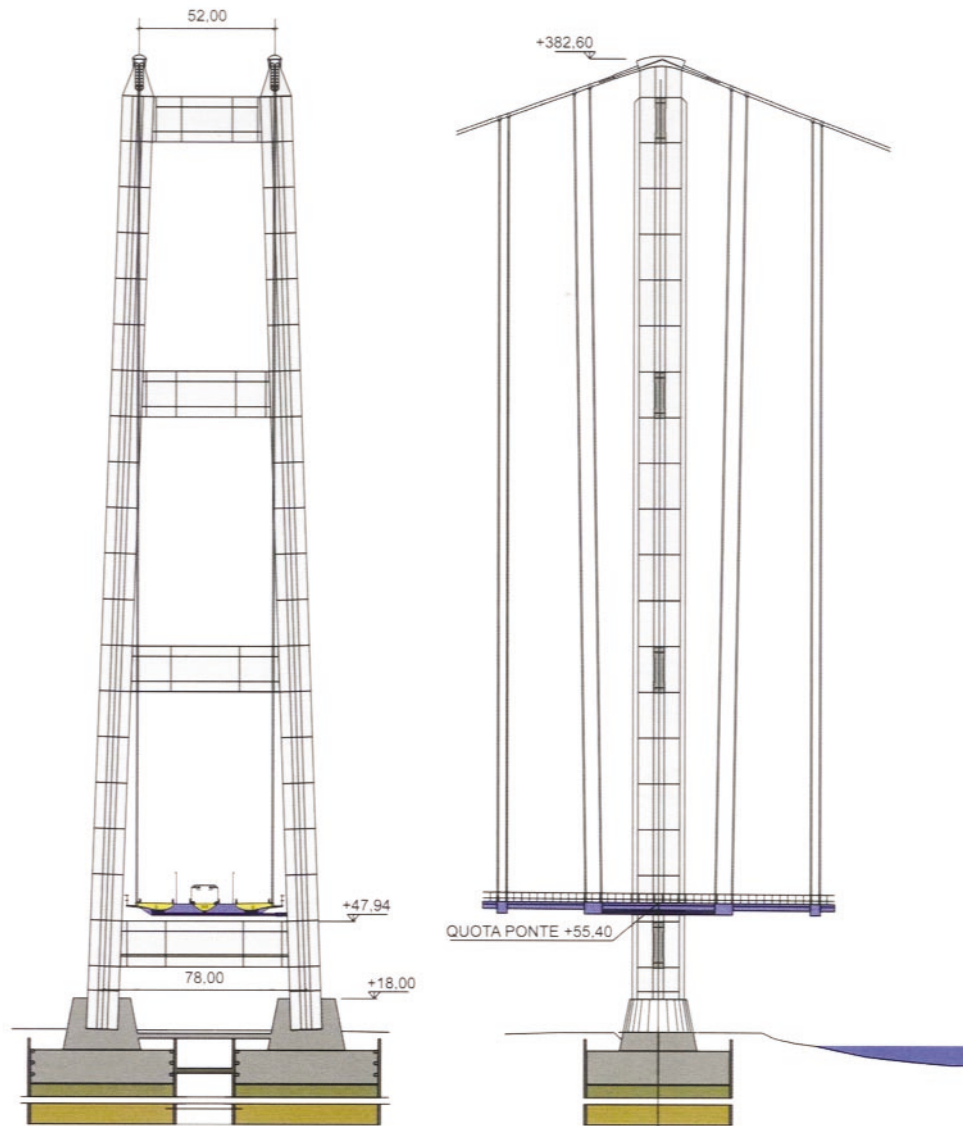


Fig. 1d

## Long-span Suspension Bridges in the world

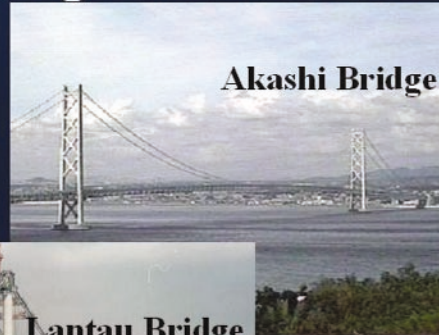


Fig. 2

## Design characteristic of the Messina Strait Bridge

The greatest central span ( $L = 3300\text{ m}$ )

The most width deck ( $B = 60\text{ m}$ )

The greatest traffic loads (6 highway lanes and 2 rails)

The most high towers ( $H = 376\text{ m}$ )

The most long cables (about 5 km)

The greatest foundations and anchors

The longest Service ( $T = 200\text{ years}$ )

Fig. 3



Il proposto Ponte di Messina ha le caratteristiche illustrate nella fig. 3.

Inoltre il Ponte è localizzato in una zona con severe azioni ambientali: terremoto, vento, alta temperatura ed insolazione.

La previsione consapevole della realizzazione con successo dell'opera ed il suo libero e permanente utilizzo poggia da una parte sullo sviluppo dei materiali e delle tecnologie, dall'altra sulla più approfondita conoscenza dei fenomeni ambientali che cimentano il ponte (vento, sisma e temperatura) e sulla maggiore affidabilità dei modelli teorici di comportamento per valutare e predire la resistenza strutturale, la durabilità, ossia «La Sicurezza e le Prestazioni Attese» che è il tema del mio intervento.

## 2. Concetto di sicurezza

Nel cuore del Mediterraneo, 26 secoli fa, il primo *artifex* (ingegnere) della mitologia greca, Dedalus (fig. 4), costruì una macchina volante per scappare da Creta: semplicemente due ali di cera e piume di uccello.

**Dedalus:  
the first *artifex***

**Icarus' failure:  
the symbol of  
downfall**



Fig. 4

Ma quando suo figlio Icaro volò troppo alto e vicino al sole la cera si sciolse e Icaro cadde e morì.

La caduta di Icaro rimane il simbolo della caduta delle loro realizzazioni che gli Ingegneri rifuggiranno.

Nelle figure 5a, 5b, 5c e 5d sono mostrati alcuni casi famosi di crolli di ponti, che ricordano agli Ingegneri la necessità di garantire, *a priori*, la sicurezza strutturale.

Il concetto di sicurezza a confronto con la rottura strutturale è il più importante argomento del processo progettuale.

Evitare la rottura o ciò che è più corretto assicurare una sufficientemente bassa probabilità di rottura è il lavoro degli Ingegneri.

Sicuro, dal latino *securum* [se (sine) + cura] (fig. 6), significa essere in uno stato senza affanno, senza preoccupazione. «*securi pro salute, de gloria certabant*» (Tacito): «Sicuri (certi) della salvezza combattevano per la gloria».

Un'opera è per noi più o meno sicura se oggi solleva più o meno preoccupazioni per l'uso futuro.

La sicurezza, condizione di ciò che è sicuro, privo di rischi e pericoli, è così uno stato d'animo ed il concetto di sicurezza trova maggiore collocazione nel campo della psicologia, ossia nel campo delle scienze umane, che non in quello delle scienze fisiche o matematiche, come correntemente, tra gli ingegneri, si suppone.

L'entità della preoccupazione dipende dalle conseguenze dell'evento sfavorevole che dovesse verificarsi in futuro durante la vita di servizio dell'opera.

Più gravi sono le conseguenze dell'evento sfavorevole e più grande è la richiesta di sicurezza.

Secondo questo indirizzo il livello di sicurezza del Ponte di Messina dovrà essere più grande di quello di un ponte ordinario, essendo più grande la perdita correlata in termini di vite umane e di valore economico della costruzione.

La sicurezza strutturale è assicurata se la resistenza  $R$  è sempre più alta degli attesi effetti delle azioni durante la vita di servizio, sintetizzata dalla ineguaglianza

$$R \text{ (resistenza)} > S \text{ (effetto delle azioni)}$$
$$\text{o}$$
$$R - S > 0$$

Le quantità fisiche riguardanti la resistenza e le azioni sono quantità statistiche: questo significa che la ineguaglianza deve essere intesa in senso probabilistico.

La probabilità dell'evento  $R > S$  deve essere sufficientemente alta o, la probabilità dell'evento sfavorevole  $R < S$  che è la probabilità di collasso  $P_c$ , dovrà essere sufficientemente piccola.

La probabilità dell'evento sfavorevole  $R < S$ , la probabilità di collasso, è rappresentata dall'integrale di convoluzione:



Fig. 5a

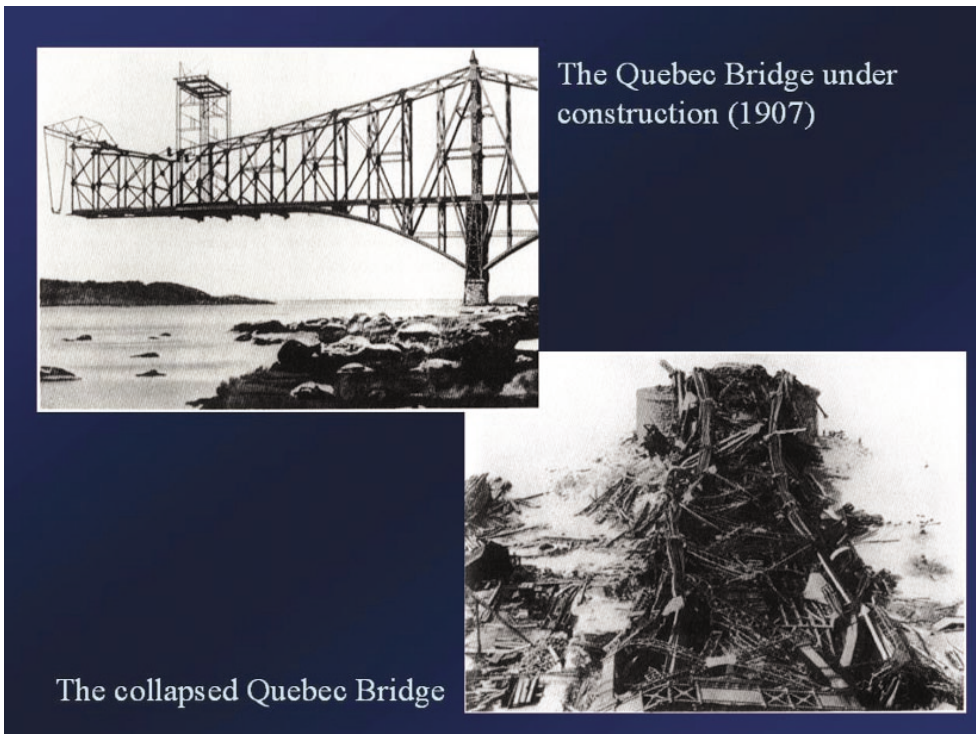


Fig. 5b



RHINE BRIDGE AT KOBLENZ (GERMANY)



Fig. 5c

A FAILED LIBERTY SHIP (1940)

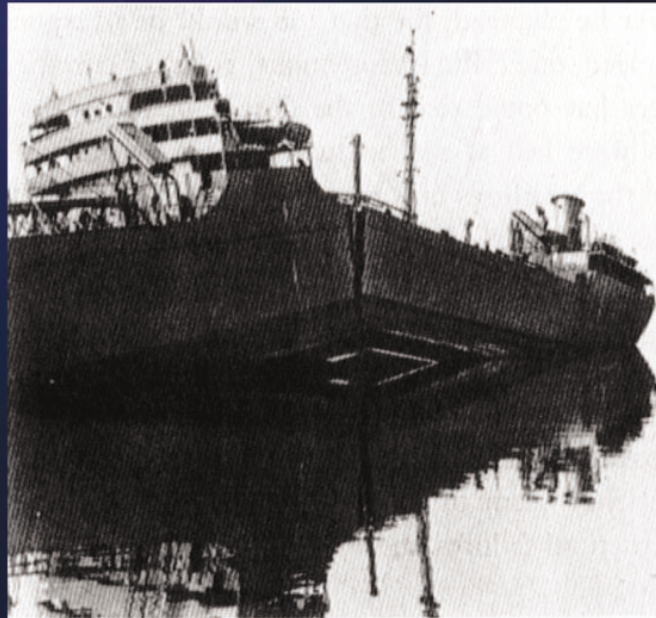


Fig. 5d

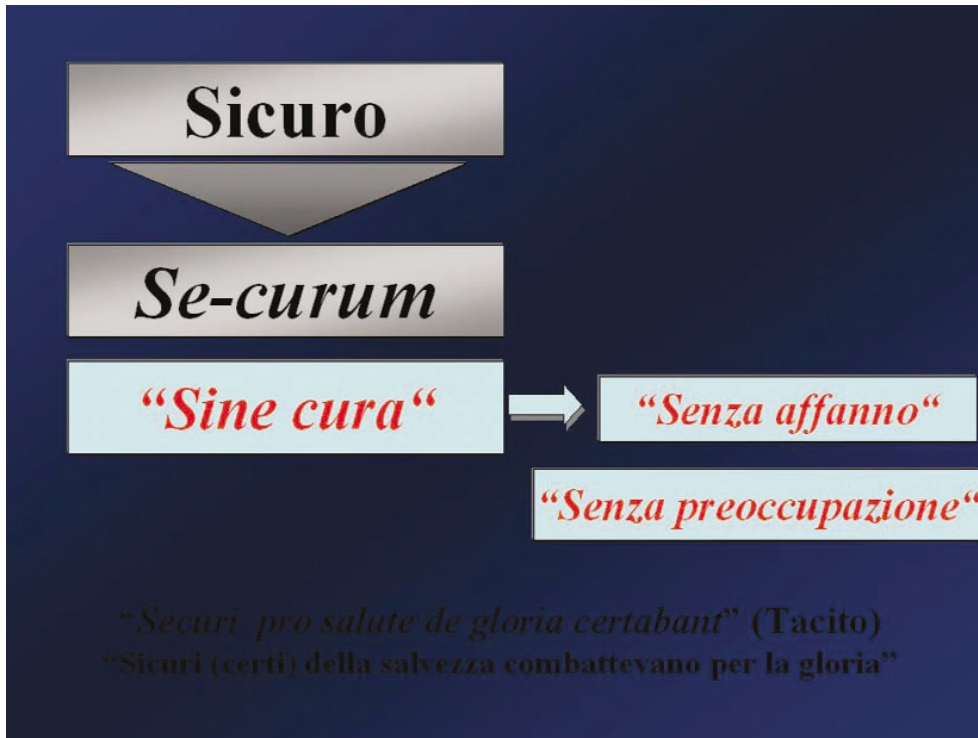


Fig. 6

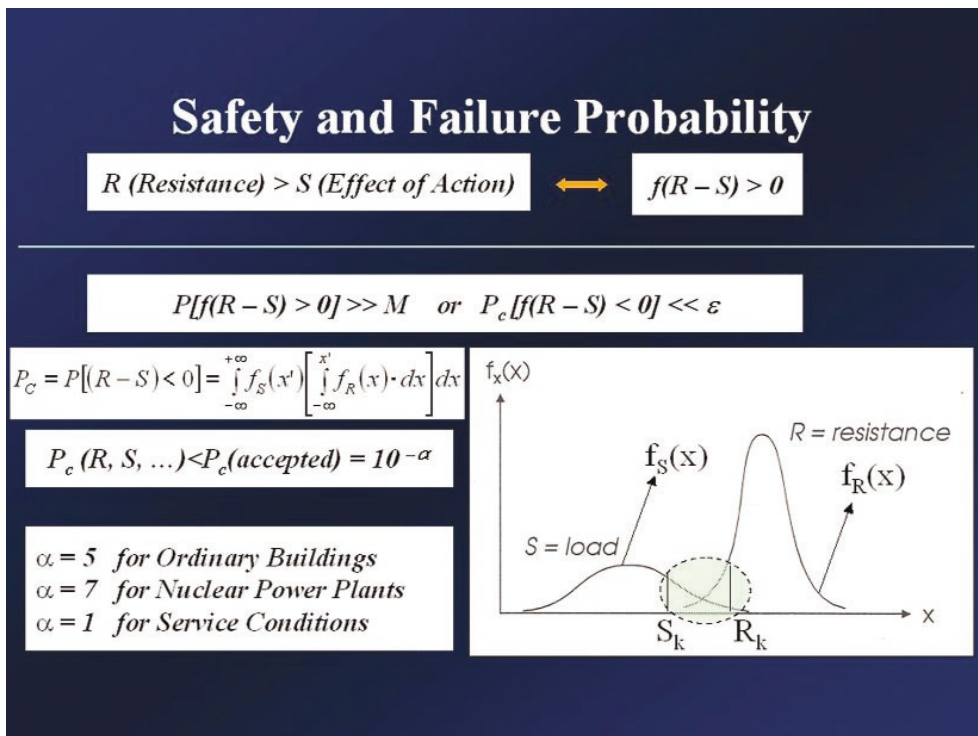


Fig. 7

$$P_C = P(R - S < 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_S(x') \left[ \int_{-\infty}^{x'} f_R(x) \cdot dx \right] dx$$

dove  $f_R(x)$  and  $f_S(x)$  sono le funzioni di densità di probabilità di resistenza e dell'azione (fig. 7).

La verifica della sicurezza (che è l'obiettivo) è rappresentata dalla disuguaglianza

$$P_C(R, S, \dots) < P_C(\text{accepted}) = 10^{-\alpha}$$

Così  $\alpha$  è la misura della sicurezza. I valori ammissibili di  $\alpha$  sono funzione delle conseguenze dell'evento sfavorevole. In Italia, per l'evento sfavorevole corrispondente al collasso di un'opera (stato limite ultimo),  $\alpha = 5$  per le costruzioni ordinarie di ingegneria civile,  $\alpha = 7$  per le centrali nucleari. Per eventi sfavorevoli che non comportino crolli ma limitazioni all'uso  $\alpha$  può anche essere uguale ad 1.

Quanto deve essere  $\alpha$  per il Ponte sullo stretto di Messina?

La misura della sicurezza può essere ottenuta anche usando il tradizionale coefficiente di sicurezza globale  $\gamma$ , derivato da  $P_C$ :

$$\frac{R_k}{\gamma_k} > S_D$$

dove

$$S_D = \gamma_g G_k + \gamma_q \left[ Q_k + \sum_{i=2}^n \psi_{0i} Q_{iK} \right]$$

con

$G_k$  = valore caratteristico dei Carichi Permanenti

$Q_k$  = valore caratteristico dei Carichi Variabili

$\gamma$  = Coefficiente di amplificazione dei carichi

$$\gamma_g = 1.35 \div 1.4 \text{ carichi permanenti} \quad \gamma_q = 1.5 \div 1.8 \text{ carichi variabili}$$

$\psi$  = Coefficiente di combinazione dei carichi

$$\psi = 1 \div 0.2$$

I valori sono adeguati per i ponti ordinari, dove  $G_k$  è circa uguale a  $Q_k$ .

Ma la valutazione della sicurezza per le opere di grandi dimensioni, come il Ponte di Messina, richiede di tenere conto delle conseguenze del cosiddetto «size effect» (Effetto Dimensione).

### 2.1 Effetto Dimensione

Già Galileo nel suo famoso libro «Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla Meccanica e i Movimenti locali» del 1638 (fig. 8), aveva mostrato come aumentando le dimensioni di un elemento strutturale, a parità di materiale, la capacità portante diminuisse; ovvero come per conservare la capacità portante i rapporti dimensionali dovessero modificarsi.

In fig. 8 è mostrato l'esempio utilizzato da Galileo:

«E per un breve esempio di questo che dico, disegnai già la figura di un osso allungato solamente tre volte, ed ingrossato con tal proporzione, che potesse nel suo animale grande far l'ufficio proporzionato a quel dell'osso minore nell'animal più piccolo, e le figure son queste: dove vedete sproporzionata figura che diviene quella dell'osso ingrandito».

Eguualmente, si comporta una fune, come il cavo principale del ponte: se la luce della campata del Ponte aumenta da  $L_0$  a  $nL_0$ , e con la stessa proporzione il

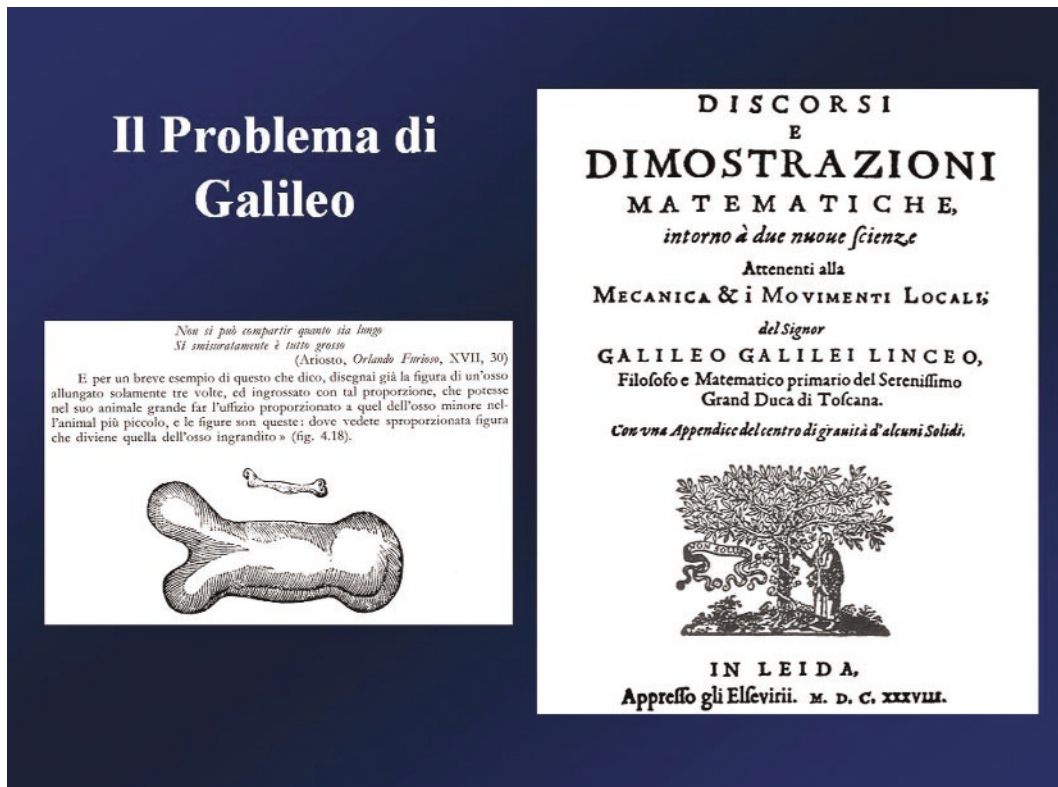


Fig. 8

diametro del cavo  $\Phi_0$  aumenta a  $n\Phi_0$ , la tensione sul cavo, per il peso proprio, non rimane invariata ma aumenta fino a  $n\sigma_0$ .

Al contrario, ciò significa che se il diametro del cavo è solo raddoppiato come la lunghezza della campata, la sicurezza si riduce di metà.

Questo effetto è rappresentato nella fig. 9: incrementando la lunghezza della campata e le dimensioni, lo stato tensionale per i carichi permanenti è incrementato e la disponibilità di resistenza per i carichi variabili e per le altre azioni si riduce, fino alla lunghezza teorica limite

$$L_u = 7.6 \cdot \frac{\sigma_u}{\gamma_m} SN\beta.$$

Ciò significa che incrementando la lunghezza, il cemento statico per i carichi permanenti aumenta, e quindi quello per i carichi portati o variabili deve diminuire fino al valore di  $L_u$ , situazione in cui i carichi variabili devono essere uguali a zero.

Per il Ponte di Messina, con  $L = 3300$  m., le percentuali di tensione per i carichi applicati sono illustrati in fig. 9.

Tali considerazioni dimostrano che a causa del cambiamento della proporzione tra le tensioni dovute ai carichi permanenti e ai carichi variabili, il Coefficiente di Amplificazione dei carichi  $\gamma$  e il Coefficiente di combinazione dei carichi  $\psi$ , non possono essere quelli per i ponti ordinari, ma devono essere calibrati per ogni caso specifico, per ottenere lo stesso o un maggior livello di sicurezza.

La fig. 9 mostra che per aumentare la lunghezza della campata con lo stesso livello di sicurezza e/o carichi variabili, è necessario incrementare la resistenza ultima dell'acciaio o diminuire la densità del cavo.

L'Effetto Dimensione, *size effect*, si manifesta anche in altri insoliti e sofisticati aspetti. Un elemento resistente può essere pensato come costituito da molti elementi resistenti disposti in serie od in parallelo (fig. 10). Quando gli elementi sono in serie (come in una catena), se  $R$  è la resistenza del singolo elemento e  $P_{ci}$  la sua probabilità di collasso, la probabilità di collasso dell'intera struttura aumenta in funzione del numero degli elementi  $i$ : se  $i$  tende all'infinito, la struttura sicuramente collassa: per una fune infinitamente lunga la rottura è certa, anche se l'azione  $S$  è molto piccola.

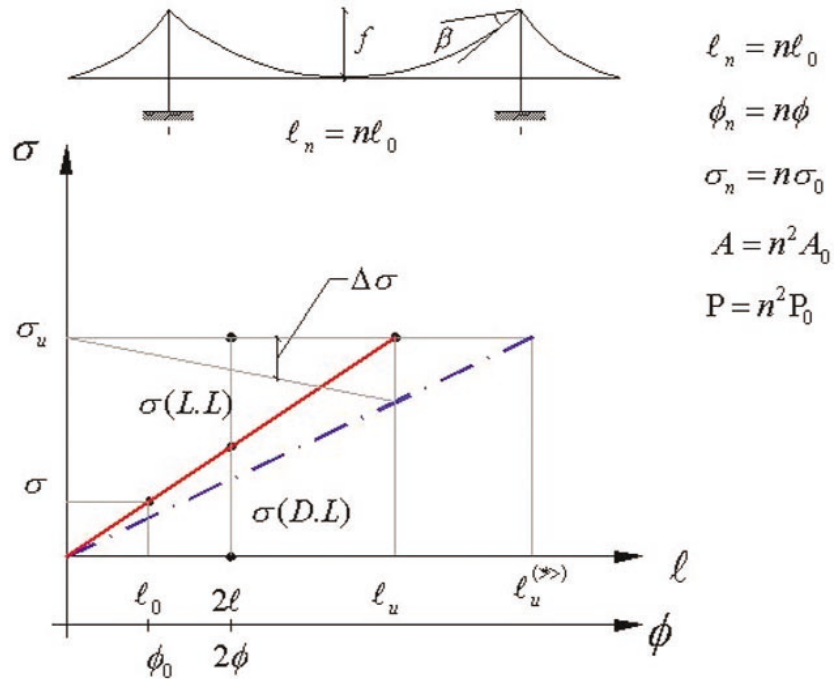
Al contrario, per una struttura composta da tanti elementi in parallelo, la probabilità di collasso diminuisce all'aumentare del numero degli elementi. Se  $i$  tende ad infinito, la probabilità di collasso  $P_{ci}$  tende a zero: vale a dire la sicurezza è certa.

Nel progetto dei grandi sistemi strutturali occorre consapevolmente combinare resistenze in serie e in parallelo. Questo avviene per esempio per cavi di sospensione, con un grande numero di fili molto lunghi, assemblati in parallelo. Ma non avviene per esempio per gli acciai di carpenteria delle torri.

L'esigenza di tener conto di questo fenomeno spiega il significato di  $\sigma$  che riduce il campo di tensione a disposizione dei carichi accidentali.



## Size Effect 2



$$l_u = 7,6 \frac{\sigma_u}{\rho} SN\beta.$$

$l_u$  increase for :  $\sigma_u \gg, \rho \ll$

per:  $\sigma_u = 1800 \text{ N/mm}^2$

$$\sigma_{uk} = 1750 \text{ N/mm}^2$$

$$l_u = 15400 \text{ m}$$

$$\rho = 78500 \text{ N/m}^3$$

$\Delta\sigma$  : Size effect

For the Messina bridge with  $l = 3300 \text{ m}$  the tension percentage for applied loads are (fig.9):

Permanent load:	$\sigma = 6680 \text{ Kg/m}$	82%
Live roadway:	$\sigma = 6881 \text{ Kg/m}$	3%
Live railway:	$\sigma = 8015 \text{ Kg/m}$	15%
		100%

Fig. 9

# Fragilità del Sistema

Elementi in serie e in parallelo

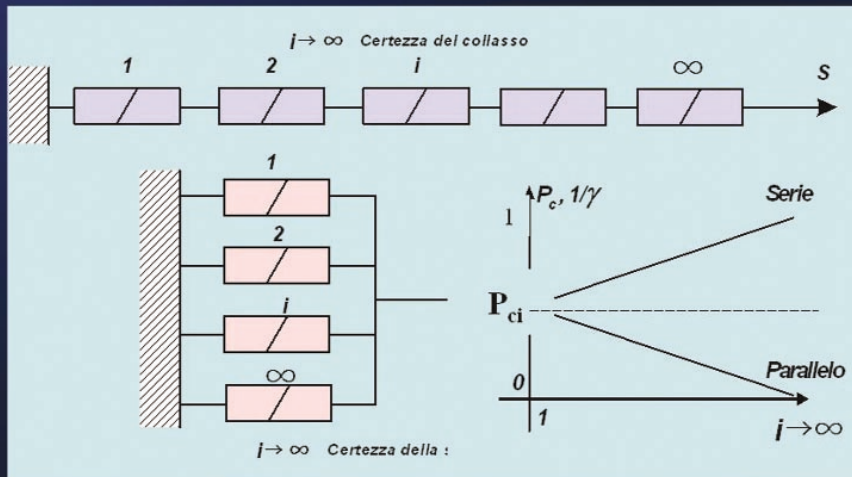
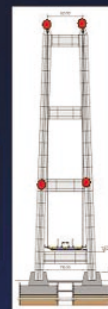


Fig. 10

# Displacement measurements



- GPS receivers (20)
- Data acquisition station (64 channel)
- Biaxial Accelerometers (4)
- Data acquisition station (128 channel)
- Biaxial Accelerometers (14)

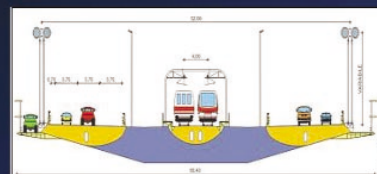


Fig. 11

### 3. Assicurazione di Qualità

Nel campo della ingegneria applicata, alla realizzazione dell'opera concorre il lavoro dell'uomo che è accompagnato dagli «errori umani»: la nostra capacità di prevedere il comportamento futuro e la resistenza delle strutture, oltre alla aleatorietà del mondo fisico, dipende dagli «errori umani», che si manifestano nelle fasi di progettazione e di realizzazione dell'opera. Tale fenomeno è tanto più importante quanto più le attività sono complesse, difficoltose e numerose.

Causa gli «errori umani», la probabilità di collasso reale  $P_c$  (e. u.) è maggiore di quella calcolata con riferimento alla semplice aleatorietà delle grandezze fisiche:

$$P_c \text{ (e. u.)} > P_c \text{ (x)}$$

vale a dire che la sicurezza reale è minore.

Questo aspetto è così importante che Hauser (1979) scrisse: «La più efficiente via per migliorare la sicurezza strutturale è quella di affinare i metodi di verifica dei dati piuttosto che affinare l'analisi dei modelli».

Fortunatamente al giorno d'oggi è possibile gestire l'errore umano mediante la «*Quality Assurance*» e le procedure di «*Quality Control*», che garantiscono che la misura probabilistica della sicurezza è affidabile e che il confronto con la sicurezza prefissata è significativo.

La «*Quality Assurance*» ha evidenziato che la effettiva sicurezza è minore di quella calcolata tenendo conto solo degli aspetti aleatori delle grandezze fisiche in quanto a questi si aggiungono gli errori umani: alla probabilità di rottura delle centrali nucleari assunta pari a  $10^{-7}$  ha corrisposto una frequenza di incidente pari a  $2,5 \times 10^{-3}$ , mentre essendo teoricamente la probabilità il limite della frequenza, i due valori avrebbero dovuto coincidere.

### 4. Monitoraggio Teorema di Bayes

L'incerta conoscenza del mondo fisico, l'incerta modellazione dei materiali e del comportamento strutturale, la complessa gestione degli errori umani riducono l'affidabilità della misura di sicurezza, tanto più quanto il sistema strutturale e la sua interazione con l'ambiente è complessa.

Al giorno d'oggi l'uso dei sistemi di monitoraggio aiuta a crescere l'affidabilità, permettendo la misura continua delle quantità meccaniche e fisiche che riguardano la struttura e l'ambiente.

La fig. 11 mostra un possibile sistema di monitoraggio degli spostamenti del Ponte.

La possibilità di conoscere le azioni esterne e le risposte del ponte incrementa la conoscenza del comportamento e, per il Teorema di Bayes, la valutazione della sicurezza rispetto ai ponti ordinari, che presentano un valore fisso della sicurezza che può essere modificato durante la vita di esercizio solo con grande difficoltà.

Il sistema di monitoraggio del ponte permette anche istantanee modifiche dell'uso dello stesso, per esempio la lettura delle deformazioni del binario permette di modificare istantaneamente la velocità del treno garantendo un passaggio più sicuro.

La fig. 12 mostra come può modificarsi la  $P_c$  per le varie attività ovvero nel tempo per i problemi connessi alla Durabilità.

##### 5. Procedure per la valutazione delle azioni e della resistenza

La valutazione della sicurezza consiste, come già detto, nel controllare che la resistenza strutturale sia maggiore con giusto margine delle sollecitazioni provocate dalle azioni.

$$R > S$$

Il calcolo di ambedue le grandezze, resistenza strutturale e sollecitazione, si sviluppa nella sequenza di identificazione di un modello fisico teorico e di un modello sperimentale.

Il modello fisico descrive i fenomeni fisici e le caratteristiche meccaniche dei materiali mediante insiemi numerici delle misure delle grandezze fisiche, che rappresentano un insieme statistico di informazioni sulla grandezza in esame.

L'insieme statistico permette di prevedere in termini di probabilità i valori futuri delle grandezze aleatorie in gioco.

In tal modo il processo aleatorio permette di accedere in maniera algebrica alla prevedibilità del futuro.

L'affidabilità della previsione probabile del futuro è tanto più alta quanto più accurato è l'insieme statistico degli elementi passati.

Il modello fisico viene trasformato in un modello teorico matematico (fig. 13) sulla base di ipotesi e congetture: il modello teorico è un'astrazione delle azioni del comportamento meccanico dei materiali e delle strutture che, sulla base di ipotesi, frequentemente assiomatiche, esprime i risultati attraverso un processo logico – analitico – sintetico, ossia mediante un processo matematico.

Nella fig. 14 è illustrato il modello globale dell'intero ponte usando elementi lineari *frame* utile per un'analisi numerica dell'intero ponte, e *shell* per specializzare le analisi in dettaglio delle componenti del ponte.

L'analisi è passo passo più approfondita con un processo *zoom*. Usando il modello teorico matematico il risultato è espresso da numeri e il giudizio mediante confronti numerici.

La correttezza dei risultati del modello teorico è affidata pertanto a delle assunzioni statistiche, al rigore delle ipotesi e delle congetture sui materiali e sul comportamento strutturale.

Il problema è ora di giudicare se il risultato è buono o cattivo: la sicurezza calcolata è grande o piccola? Ovvero è affidabile o rischiosa?

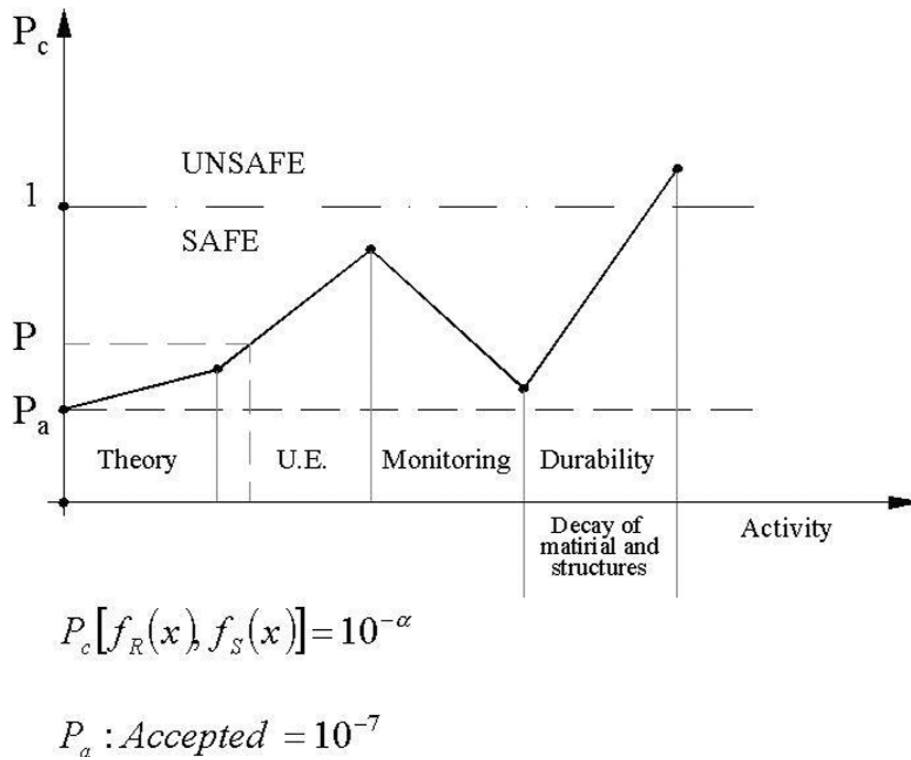


Fig. 12



Fig. 13



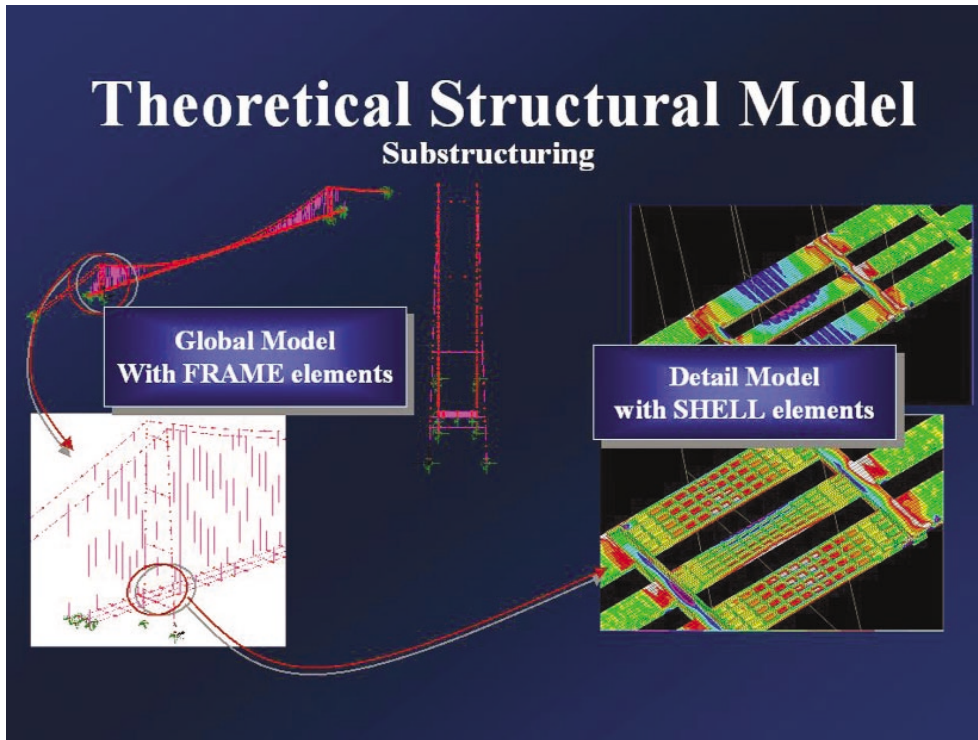


Fig. 14

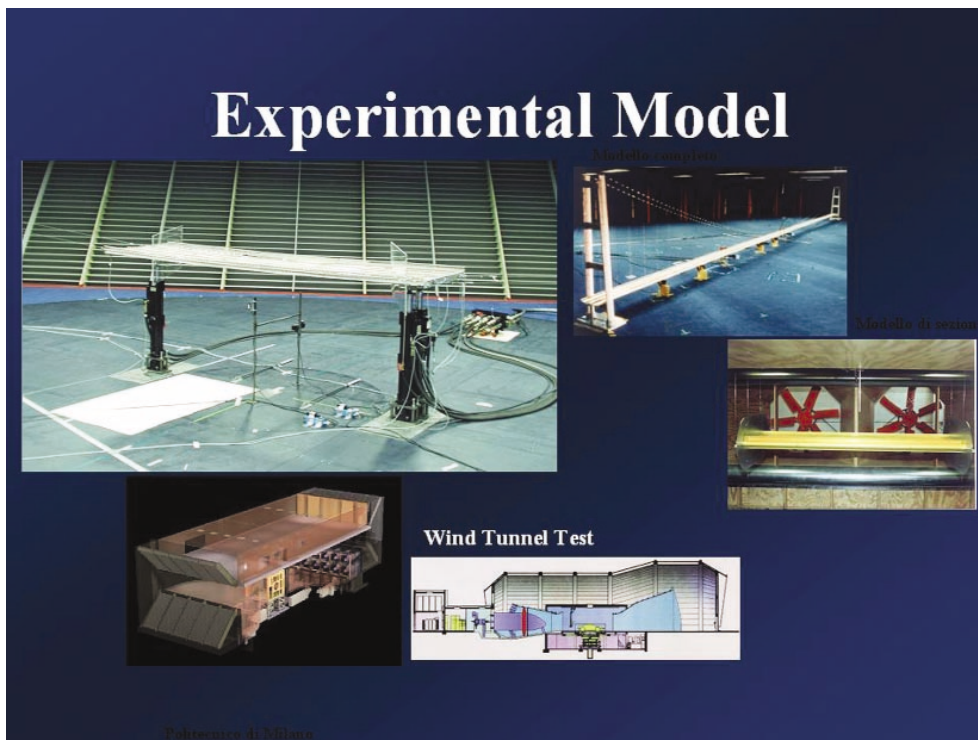


Fig. 15

Nel campo dell'ingegneria applicata le incertezze sui dati fisici e le ipotesi delle teorie impongono che i risultati teorici vengano controllati e confutati per mezzo di un modello sperimentale, che serve anche da validazione del modello teorico.

Nell'ingegneria meccanica il confronto tra teoria e sperimentazione è meno difficoltoso essendo possibile sperimentare su prototipi.

La riproduzione dei fenomeni in laboratorio è più difficile nel campo dell'ingegneria civile, perché ogni opera è di per sé stessa un prototipo; in particolare nel caso di opere innovative, il modello sperimentale di un ponte è solamente il ponte stesso.

Questo fatto aggiunge un altro fattore che rende la richiesta di sicurezza ancora maggiore: la non ripetibilità.

La validazione sperimentale può avvenire allora o attraverso la sperimentazione su modelli ridotti in scala in laboratorio, ovvero attraverso il confronto con il comportamento di opere sufficientemente simili, già costruite ed in esercizio; ovviamente il giudizio è tanto più affidabile quanto più la popolazione delle opere simili è grande e significativa.

Così, per le opere ordinarie i calcoli teorici, i cosiddetti «calcoli statici», si reputano sufficienti per procedere alla costruzione dell'opera in quanto, opere simili già costruite garantiscono l'affidabilità dei calcoli sviluppati, anche se ad opera finita, si richiede una validazione sperimentale attraverso il *collaudo statico*.

Per le opere innovative, questa validazione mediante il confronto con opere già costruite è molto ridotta o nulla; si capisce, allora, la grande importanza dell'ingegneria sviluppata nei laboratori di ricerca mediante i «*modelli sperimentali*».

Nella fig. 15 è mostrato il modello sperimentale per lo studio della risposta del Ponte all'azione del vento.

## 6. *Analisi dei rischi*

L'importanza dell'Opera e della corretta valutazione della sicurezza e delle prestazioni attese richiede che il processo di analisi sia ridondante.

Altro metodo per giudicare la sicurezza di un'opera è l'analisi dei rischi, che è un processo tendente ad esaminare una serie di scenari di rischio che possono mettere fuori servizio l'opera.

Per rischio si intende il prodotto formale della pericolosità dell'accadimento di un evento e della vulnerabilità al danneggiamento dell'elemento strutturale.

$$\text{Rischio} = \text{Pericolosità} \times \text{Vulnerabilità}; P(p) \times P(v)$$

In termini numerici è il prodotto della probabilità che si verifichi un evento esterno (pericolosità) e la probabilità che l'elemento soggetto a tale azione subisca un determinato danneggiamento (vulnerabilità).

Come per la valutazione della sicurezza, la valutazione del rischio è un prodotto di probabilità.

Con riferimento ad un'azione sismica, la pericolosità sismica è la probabilità

che un sisma superi, entro un certo intervallo di tempo (vita di servizio), un prefissato livello sismico.

La vulnerabilità è la probabilità che la struttura subisca un determinato danneggiamento a seguito dell'evento sismico.

L'espressione sintetica permette di mettere ordine nelle valutazioni di sicurezza, ponendo in luce che non basta una alta pericolosità di un evento per avere un rischio elevato, perché se la struttura ha bassa vulnerabilità all'evento, il rischio è praticamente nullo.

I ponti sospesi hanno, per loro conformazione strutturale, l'attitudine ad attenuare l'azione sismica «free field», e di conseguenza una vulnerabilità estremamente bassa, anche senza particolari accorgimenti (ad esempio, smorzatori), alle azioni sismiche naturali, misurate in tutti i siti di alta intensità sismica, cosicché il rischio sismico dei ponti sospesi è molto basso.

Questo fatto trova evidenza nella circostanza che molti tra i grandi ponti sospesi finora costruiti sono ubicati nelle zone di più alta intensità sismica della Terra: il Golden Gate Bridge a San Francisco, l'Akashi in Giappone, i Ponti sul Bosforo in Turchia, ecc.

La fig. 16 mostra tutti i fenomeni per i quali si è impostata la procedura di Analisi del Rischio.

### 7. Prestazioni attese

È ancora un altro modo per trattare la sicurezza, ossia la prevedibilità degli eventi futuri, e giudicare le loro conseguenze.

Una prestazione può essere:

- il valore quantitativo del comportamento dell'opera a seguito dell'azione a cui sarà sottoposta (ad esempio le deformazioni delle sezioni, accelerazioni, ecc.). Il giudizio dell'ottenimento della prestazione viene attraverso il confronto tra il valore calcolato e il valore prefissato (processo deterministico); ovvero tra la probabilità calcolata di superamento di una soglia e la probabilità stabilita, in un tempo prefissato (ad esempio la somma delle chiusure per effetto di vento, nell'anno, non superi 6 ore) (processo probabilistico).
- un giudizio di carattere qualitativo o retorico (ad esempio il giudizio sull'estetica del Ponte).

In fig. 17 è illustrato l'insieme dei «requisiti prestazionali» richiesti e controllati per il Ponte.

### 8. Conclusioni

Le procedure di valutazione della sicurezza mediante:

1. modello teorico che individua le positività e le criticità attraverso modelli matematici-numericci più o meno complessi;

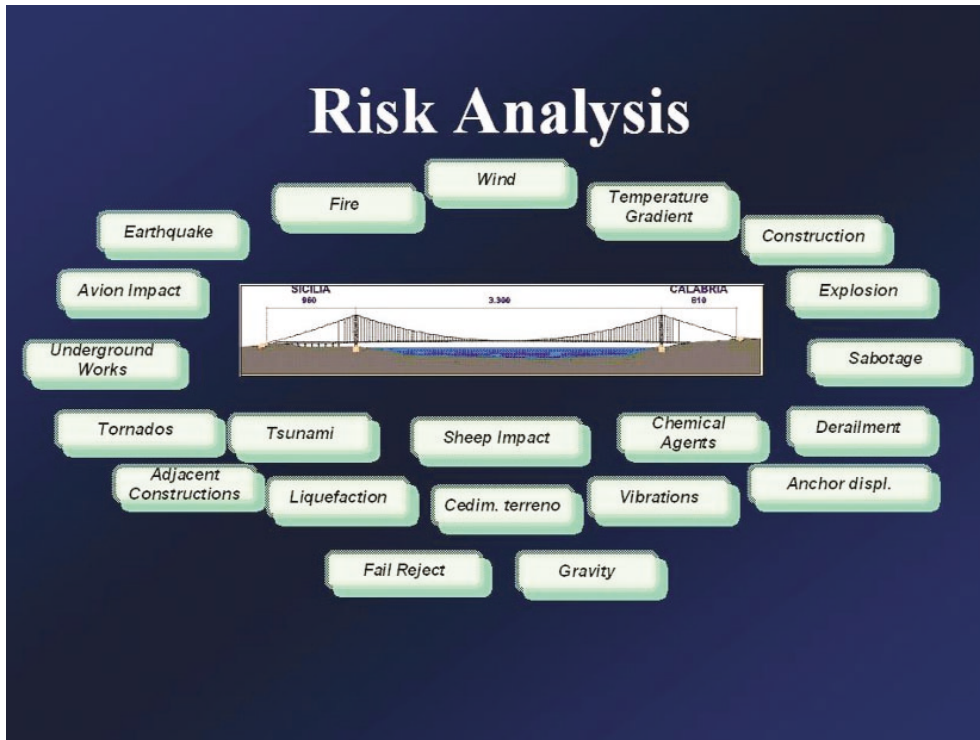


Fig. 16

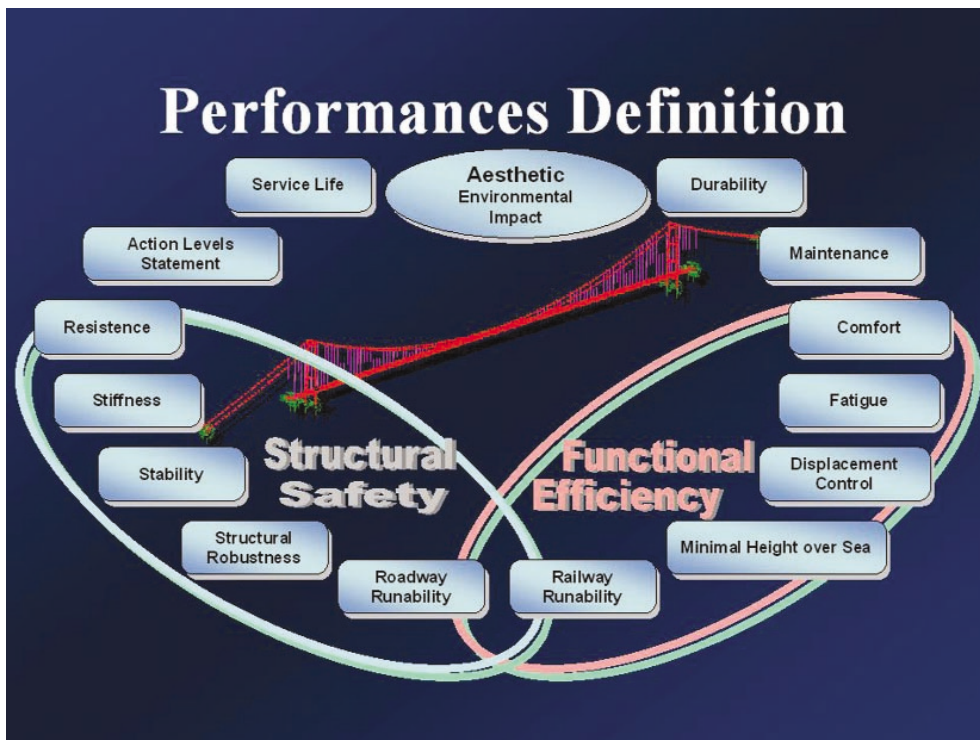


Fig. 17

2. modelli sperimentali sia in laboratorio che di confronto con le opere esistenti;
3. processi di valutazione secondo l'Analisi dei Rischi;
4. processi di valutazione secondo le Prestazioni Attese;

costituiscono quattro vie parallele di analisi e di confronto, che danno la *Ridondanza di Sistema* necessaria a garantire la sicurezza e la affidabilità prestazionale del Ponte.

Per le Grandi Opere Innovative del XXI secolo, di cui il Ponte di Messina per le dimensioni e per il disegno strutturale rappresenta il prototipo di una nuova categoria di opere, è allora la ricerca avanzata che, perseguendo i quattro processi di giudizio, deve assicurare la prevedibilità aleatoria della sicurezza e delle prestazioni attese, avendo presente umilmente che «Nessuno troverà mai segno sicuro degli Dei per le opere future, ciechi sono i pensieri del domani» (Pindaro).