





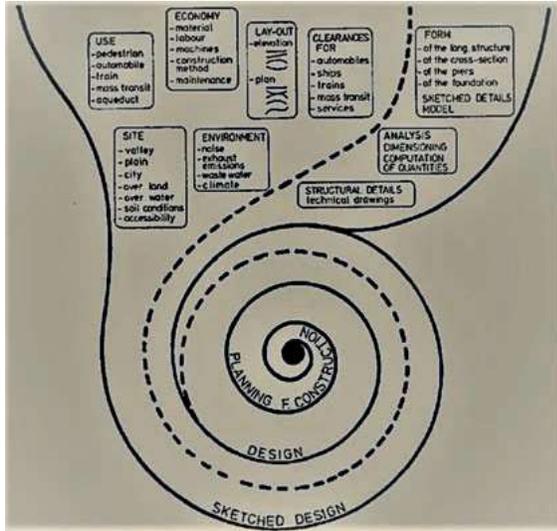
**Dall'Evento**

**La valutazione analitica  
della sicurezza e della robustezza  
di ponti e viadotti**

**Ing. F. Bontempi**

Professore Ordinario di Tecnica delle Costruzioni  
Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale  
Università degli studi di Roma La Sapienza

# 1. Design

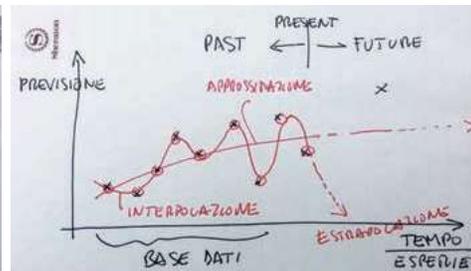
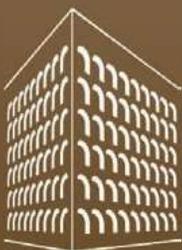


1. Design
2. Structural System
3. Failures
4. Analysis
5. Robustness

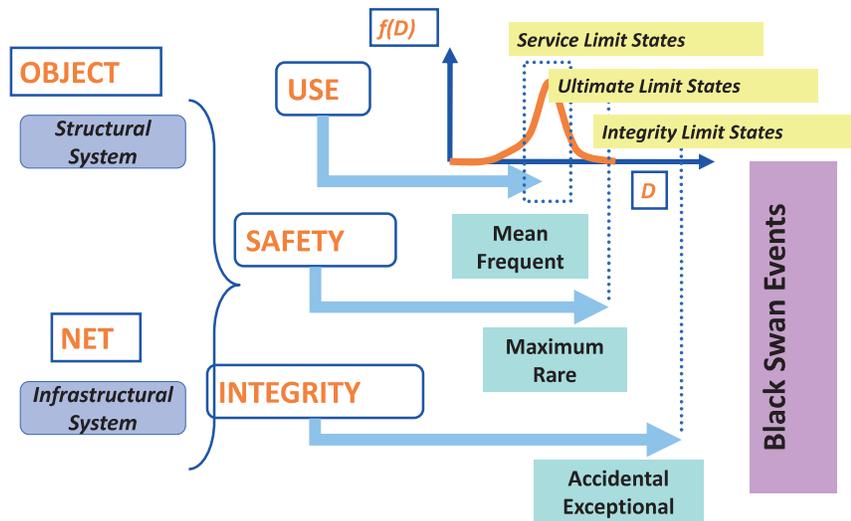
## Note 1

- La progettazione è una attività di sintesi basata sulla previsione di quello che la struttura esperirà nel future. La previsione riguarda situazioni di normale funzionamento, di carico elevato e situazioni accidentali o eccezionali, nel rispetto del principio di precauzione.
- Una struttura lungo la sua vita utile, affronterà:
  - Un degrado continuo, legato all'ambiente in cui è immersa e al suo uso, dovendo dimostrare durabilità;
  - Un danneggiamento in eventi discreti, di natura accidentale o eccezionale, in cui dovrà mostrare un degrado proporzionale alla causa scatenante, mostrando robustezza;
  - Una facilità di essere riparata, ovvero essere riportata ad un grado di sicurezza e prestazione adeguato, mostrando resilienza.
- La valutazione delle qualità di una struttura, può essere quindi sviluppata come «as designed» (nel progetto), «as built» (appena costruita), «as actual» (in un momento qualsiasi nel corso della vita utile), «as failed» (in caso di crisi strutturale).
- E' necessario considerare criticamente il clima culturale in cui è stato sviluppato il progetto e la concezione strutturale alla base del progetto. Inoltre è necessario distinguere fra opere di tipo evolutivo (di casi precedenti) e opere innovative per schema, materiale, utilizzo.

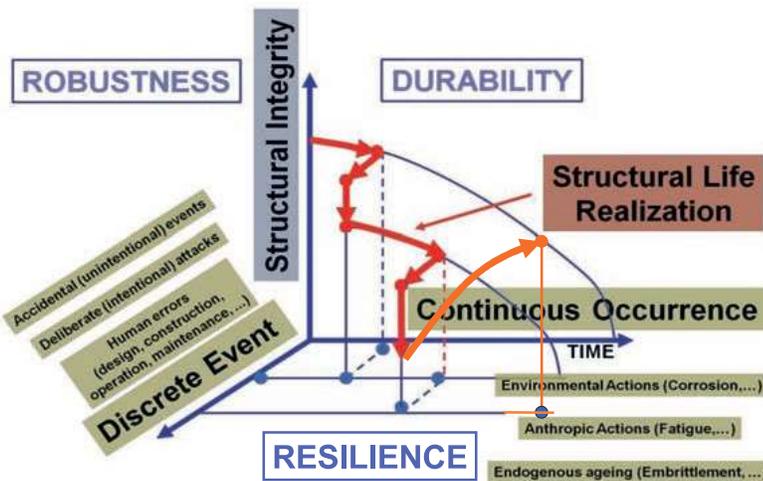
## Design as Foresight



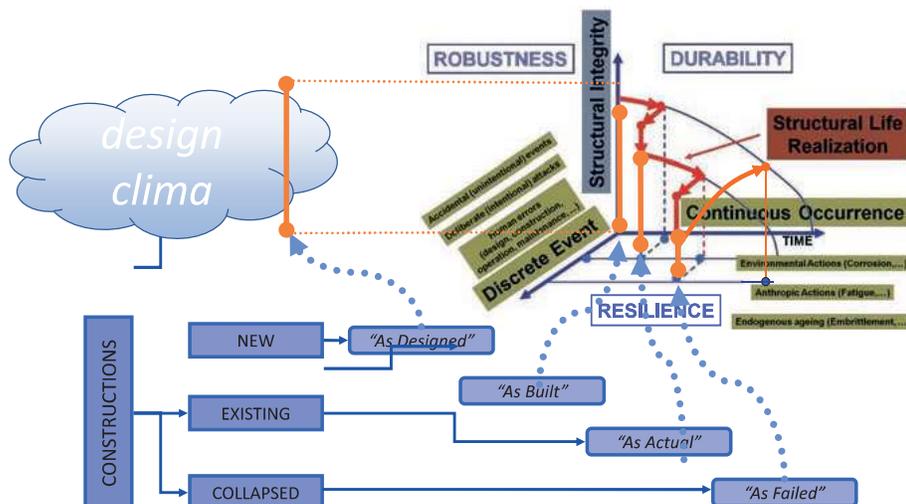
# Performance, Safety and Integrity Levels



## Time Horizon for a Structure

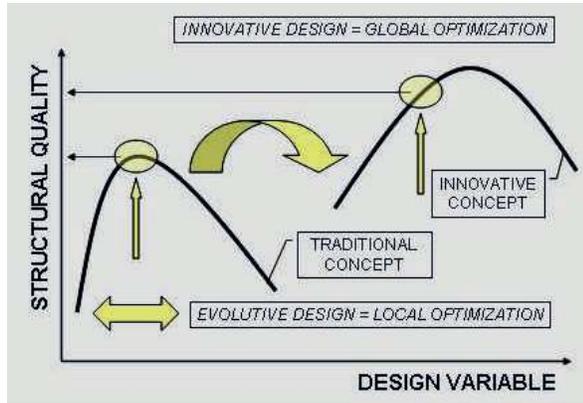


As ...

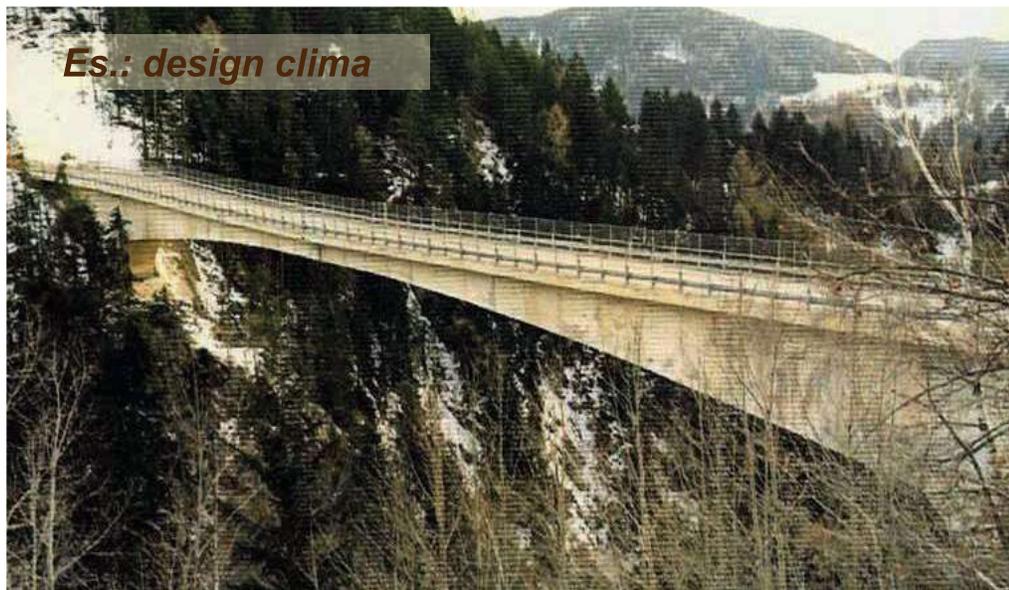


Dall'Evento

"La valutazione analitica della sicurezza e della robustezza di ponti e viadotti"

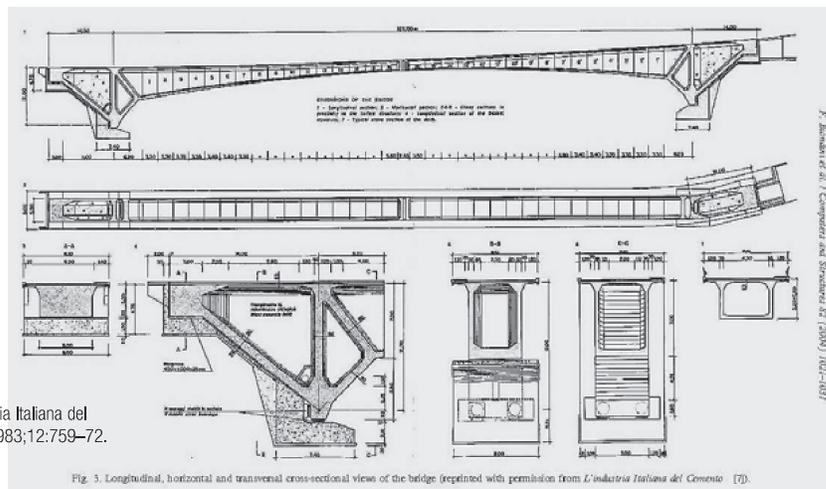


*Il principio di precauzione si applica non a pericoli già identificati, ma a pericoli potenziali, di cui non si ha ancora conoscenza certa.*



**Es.: design clima**

## Ponte sul Rio Sinigo



L'industria Italiana del Cemento 1983;12:759-72.

Fig. 3. Longitudinal, horizontal and transversal cross-sectional view of the bridge (reprinted with permission from L'industria Italiana del Cemento [7]).





L'industria Italiana del  
Cemento 1983;12:759-72.

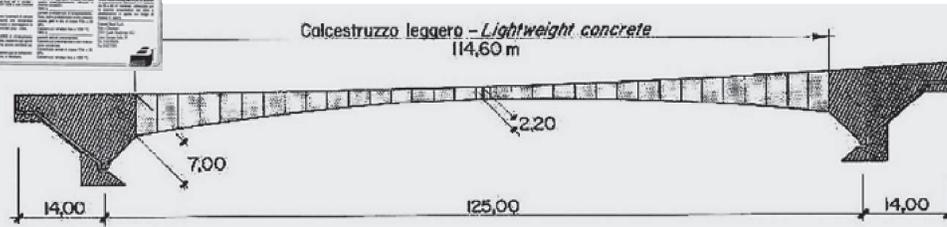


Fig. 2. Schematic view and main geometrical dimensions of the bridge (reprinted with permission from *L'industria Italiana del Cemento*—[7]).

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

SCIENCE @ DIRECT®

Computers & Structures

Computers and Structures 82 (2004) 1021–1031

[www.elsevier.com/locate/computruc](http://www.elsevier.com/locate/computruc)

### Reliability of material and geometrically non-linear reinforced and prestressed concrete structures

Fabio Biondini <sup>a,\*</sup>, Franco Bontempi <sup>b</sup>, Dan M. Frangopol <sup>c</sup>,  
Pier Giorgio Malerba <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Structural Engineering, Technical University of Milan, Piazza L. da Vinci, 32, Milan 20133, Italy  
<sup>b</sup> Department of Structural and Geotechnical Engineering, University of Rome, "La Sapienza", Via Eudossiana, 18-00184 Rome, Italy  
<sup>c</sup> Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder, CO 80309-0428, USA

Accepted 5 March 2004  
 Available online 9 April 2004

**Abstract**

A numerical approach to the reliability analysis of reinforced and prestressed concrete structures is presented. The problem is formulated in terms of the probabilistic safety factor and the structural reliability is evaluated by Monte Carlo simulation. The cumulative distribution of the safety factor associated with each limit state is derived and a reliability index is evaluated. The proposed procedure is applied to reliability analysis of an existing prestressed concrete arch bridge.

© 2004 Elsevier Ltd. All rights reserved.

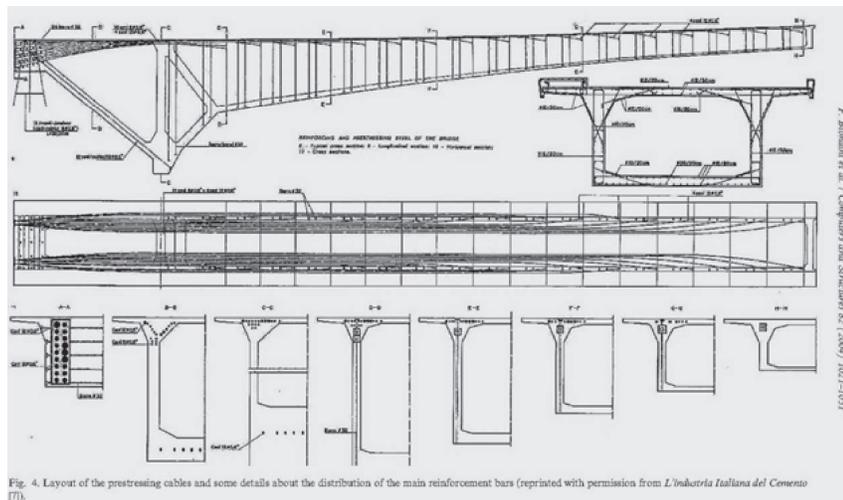


Fig. 4. Layout of the prestressing cables and some details about the distribution of the main reinforcement bars (reprinted with permission from *L'industria Italiana del Cemento* [7]).

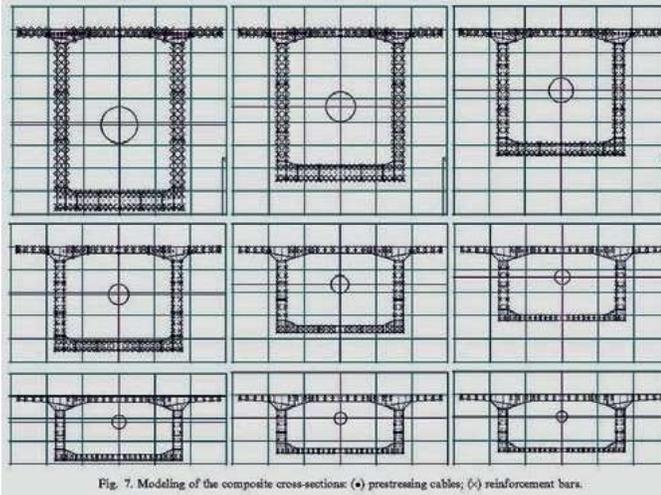


Fig. 7. Modeling of the composite cross-sections: (\*) prestressing cables; (x) reinforcement bars.

Table 1  
Probability distributions and their parameters (mean value  $\mu$  and standard deviation  $\sigma$ )

Random variables	Distribution type	$\mu$	$\sigma$
Concrete strength, $f_c$	Lognormal	$f_{c,mean}$	5 MPa
Reinforcing steel strength, $f_{sp}$	Lognormal	$f_{sp,mean}$	30 MPa
Prestressing steel strength, $f_{ps}$	Lognormal	$f_{ps,mean}$	100 MPa
Coordinates of the nodal points $(x, y)$	Normal	$(x, y)_{mean}$	50 mm
Cross-sectional dimensions, $d$	Normal	$d_{mean}$	5 mm
Depth of steel bars and cables, $y$	Normal	$y_{mean}$	5 mm
Area of steel bars and cables, $A_s$	Normal	$A_{s,mean}$	$0.0254_{mean}$
Dead loads, $G$	Normal	$G_{mean}$	$0.10G_{mean}$
Live loads, $Q$	Normal	$Q_{mean}$	$0.40G_{mean}$

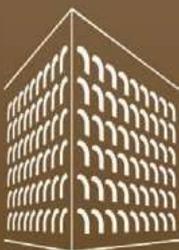
Due to lack of information, prestressing forces  $P$  are assumed to be uniformly distributed between  $P = 0$  and  $P = P_{max}$ .

## 2. Structural System

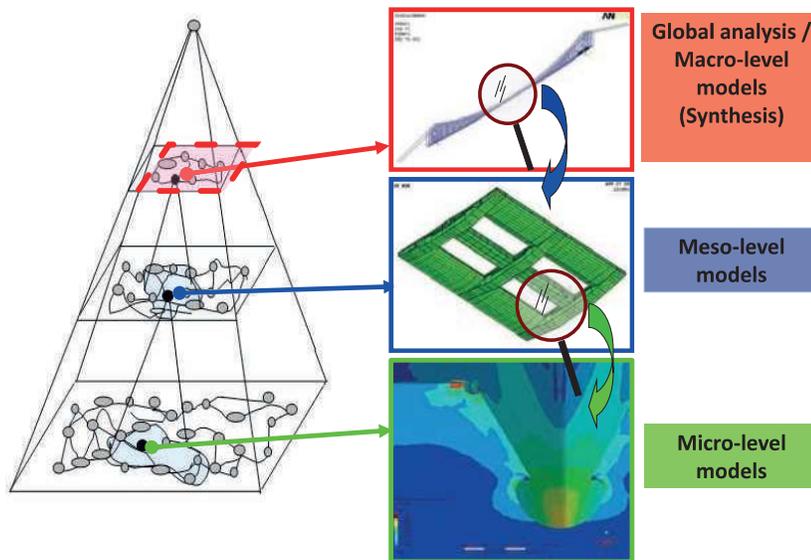
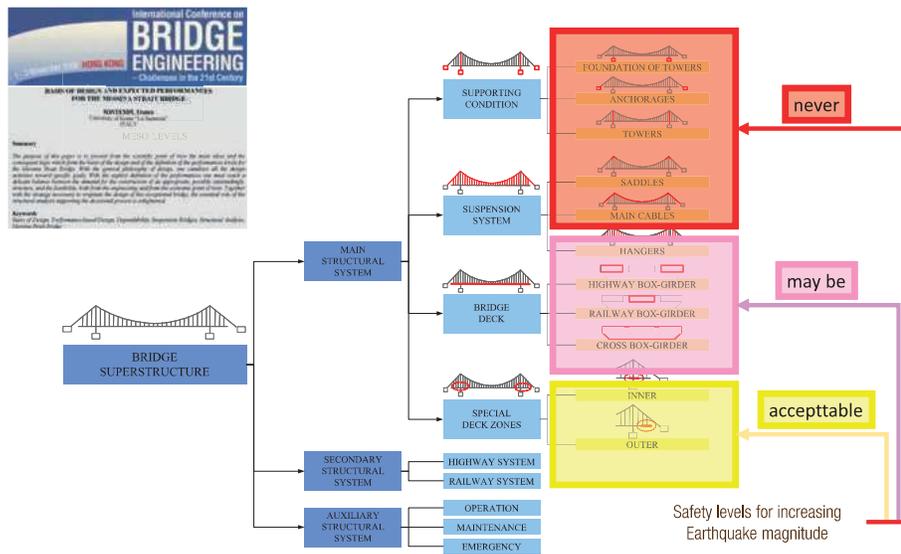
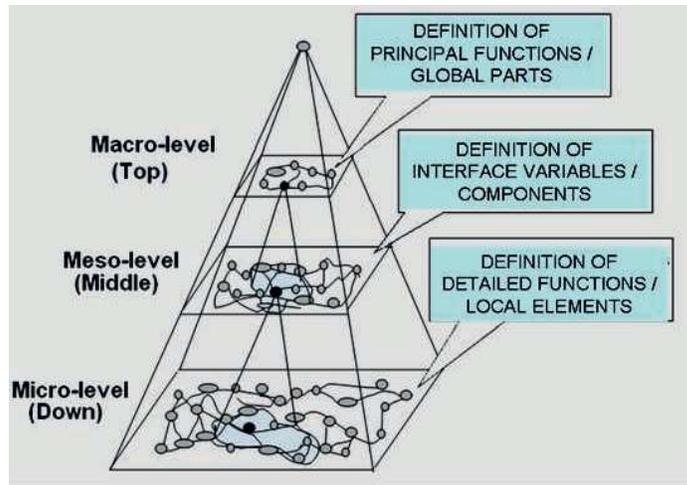
1. Design
2. **Structural System**
3. Failures
4. Analysis
5. Robustness

## Note 2

- La valutazione analitica della sicurezza strutturale è un processo sistematico e gerarchico che parte dalla comprensione dell'organizzazione della struttura (visione sistemica).
- In una struttura di devono distinguere le varie parti strutturali (a macro-livello, meso-livello, micro-livello) al fine di evidenziarne subito la criticità e gli adeguati livelli di protezione.
- In termini generali si hanno in una struttura:
  - Aspetti di dettaglio – livello micro – che riguardano proprietà sezionale come gli spessori;
  - Aspetti a livello di elemento / sottostruttura, che riguardano la forma o la sagoma di queste parti;
  - Aspetti a livello macroscopico che riguardano la topologia ovvero le connessioni fra le varie parti strutturali, influenzando il percorso dei carichi.
- Questa individuazione, è collegata ai livelli di modellazione nel processo complessivo di analisi strutturale, con eventuali oculate strategie di sottostrutturazione o impostazione multi-livello.
- Tutto questo al fine di dare un fondato giudizio sui risultati delle verifiche e sullo stato della struttura in esame, con necessaria confidenza sul significato delle verifiche stesse.

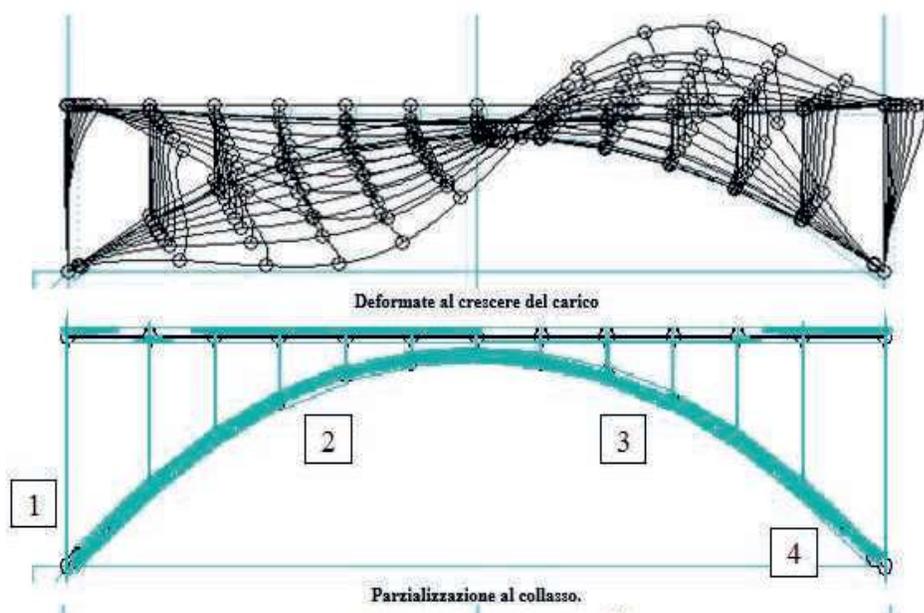
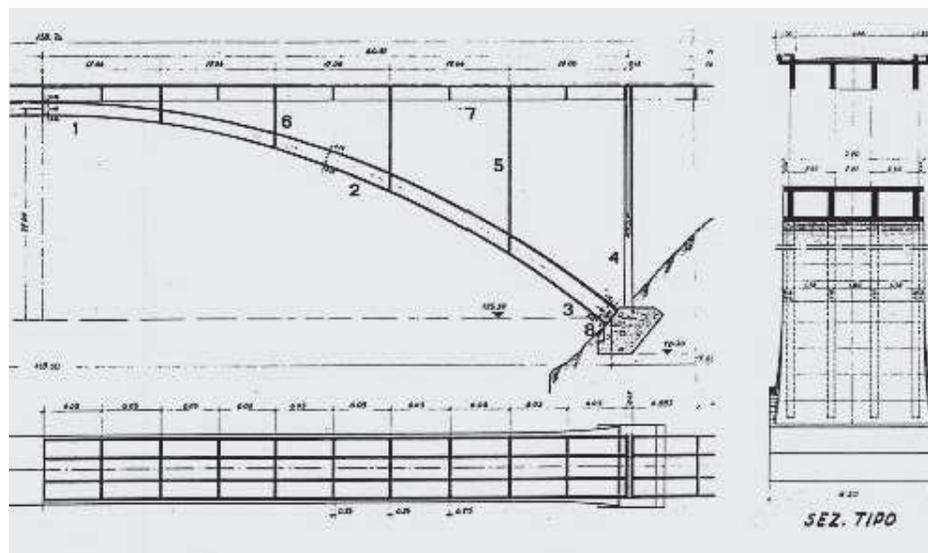


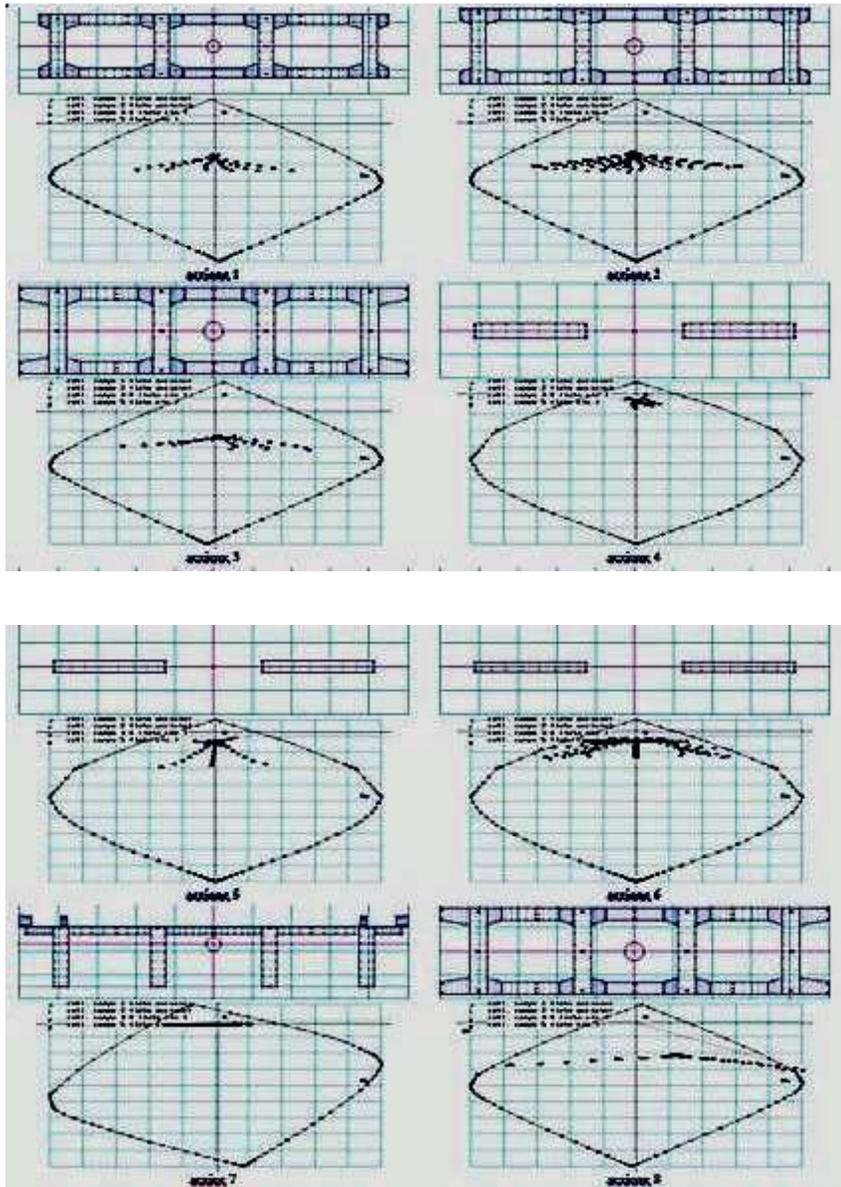
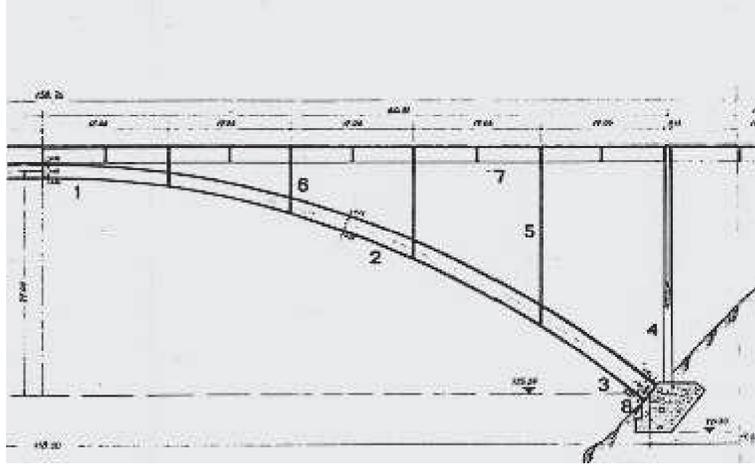
# Structural System





Ponte di Aldino

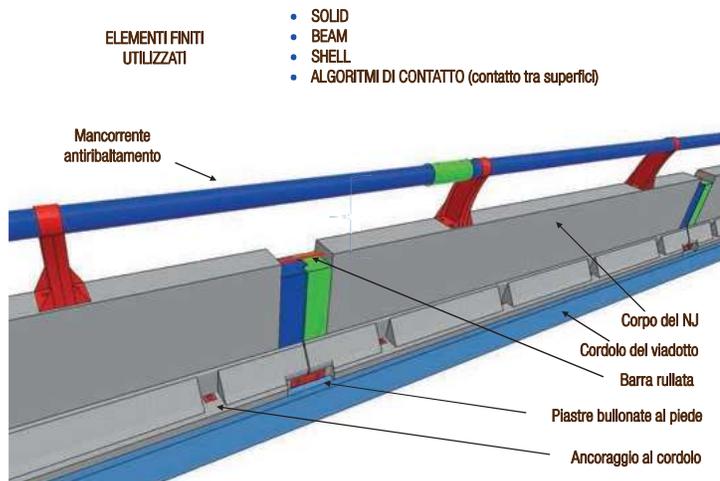




“La valutazione analitica della sicurezza e della robustezza di ponti e viadotti”

## Strutture secondarie: barriere

<https://www.ingenic-web.it/3630-aspetti-delle-caratteristiche-prestazionali-di-barriere-stradali-tipo-new-lensev-descrizione-generale>



<https://www.ingenic-web.it/3720-aspetti-delle-caratteristiche-prestazionali-di-barriere-stradali-tipo-new-lensev-controllo-tra-tipologie-diverse>

### 3. Failures

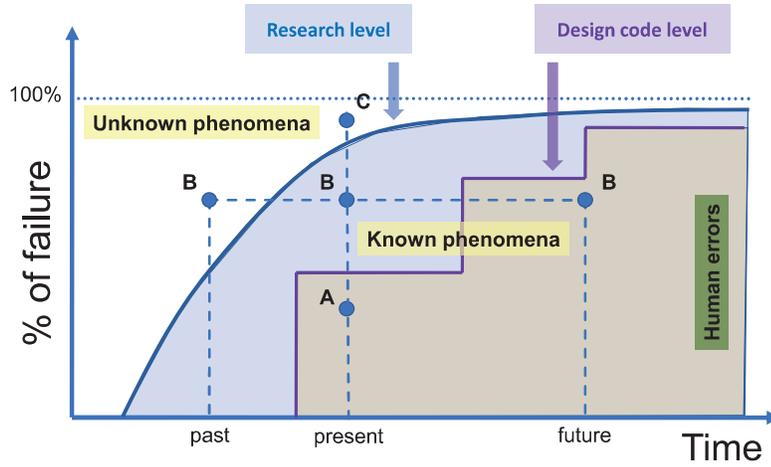
1. Design
2. Structural System
- 3. Failures**
4. Analysis
5. Robustness

### Note 3

- Sviluppando un'analisi storica, all'inizio la totalità, ovvero, la gran parte degli insuccessi è dovuta a non conoscenza di aspetti scientifici e tecnici. Al passare del tempo, crescendo a livello di ricerca le conoscenze scientifiche e tecniche (research level), i fenomeni non noti si riducono. Con un po' di ritardo, anche le normative (design code level) coprono sempre più differenti fenomeni, riducendo così i casi di fenomeni conosciuti e non normati. Con l'evoluzione delle conoscenze scientifiche e tecniche, la maggioranza degli insuccessi risulta essere dovuta a errore umano.
- L'incremento quantitativo del corpus normativo da questo punto di vista risulta inefficiente, peggiorando anzi nei fatti le cose, con conseguente aumento di possibilità di errore: questo è il risultato finale della non ergonomia normativa.
- Un ulteriore, grande, possibilità di generazione di errori umani risulta legata alle modellazioni numeriche. In particolare, la attuale acclarata impossibilità di sviluppare calcolazioni di verifica in forma manuale, senza l'uso di codici di calcolo o fogli di calcolo, aumenta la distanza fra consapevolezza fisica dell'oggetto e sua valutazione razionale.
- In termini generali, un sistema strutturale può essere pensato come composto da uno strato di layer difensivi: ciascuno di questi layer può essere imperfetto e di per sé non è detto che queste singole mancanze portino al collasso del sistema. Questo avviene solo quando più mancanze si coagulano in un fenomeno critico.



# Causes of System Failure



## Scuola Jovine di San Giuliano di Puglia



<http://territorio.regione.emilia-romagna.it/codice-territorio/sismica/dossier-sentenze-della-causa-penale-consequente-al-crollo-delledificio-scolastico-jovine-di-san-giuliano-di-puglia>

Dall'Evento

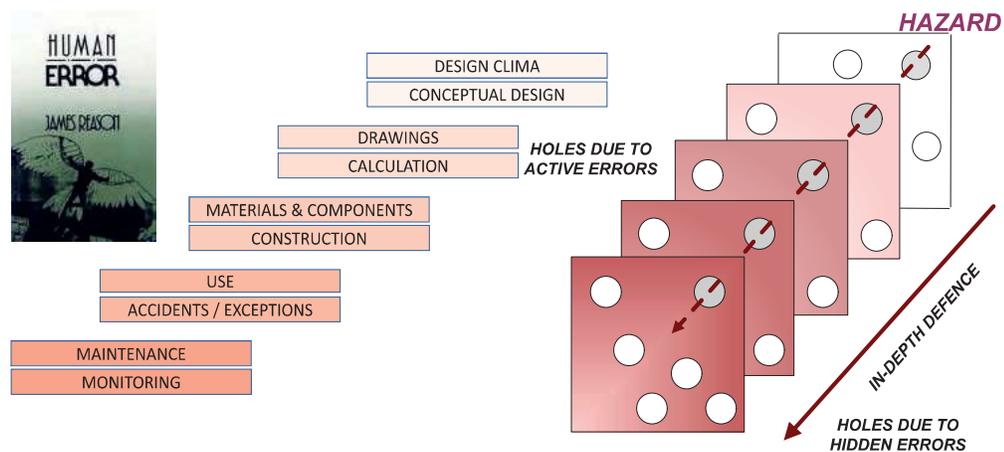
“La valutazione analitica della sicurezza e della robustezza di ponti e viadotti”

## Eccesso di Norme Tecniche

- «Ma un numero di regole eccessivo comporta vari degli inconvenienti dianzi citati e in particolare:
- *l'impovertimento dell'autonomia e della creatività, in quanto l'opera del progettista è irretita dalle norme;*
- *la difficoltà di discernere ciò che veramente conta;*
- *la sensazione di avere, al riparo delle norme, responsabilità assai alleviate;*
- *la difficoltà non infrequente di rendersi conto dei ragionamenti che giustificano certe regole, rischiando di considerare queste alla stregua di algoritmi, ossia di schemi operativi che, una volta appresi, il pensiero non è più chiamato a giustificare.»*

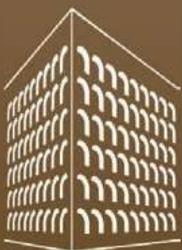
- Proliferazione delle normative e tecnicismo. Ultima lezione ufficiale del corso di Tecnica delle costruzioni tenuta dal prof. Piero Pozzati nell'a.a. 1991-'92, presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna (3 giugno 1992).

## Swiss Cheese Model for Failure



## 4. Analysis

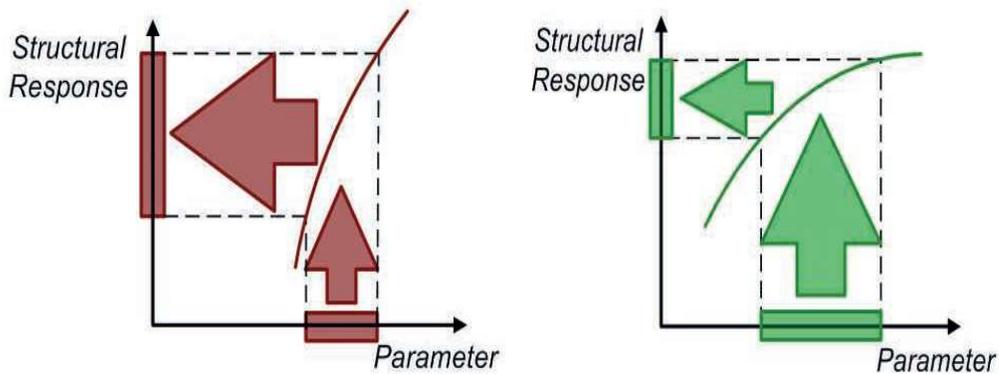
1. Design
2. Structural System
3. Failures
- 4. Analysis**
5. Robustness



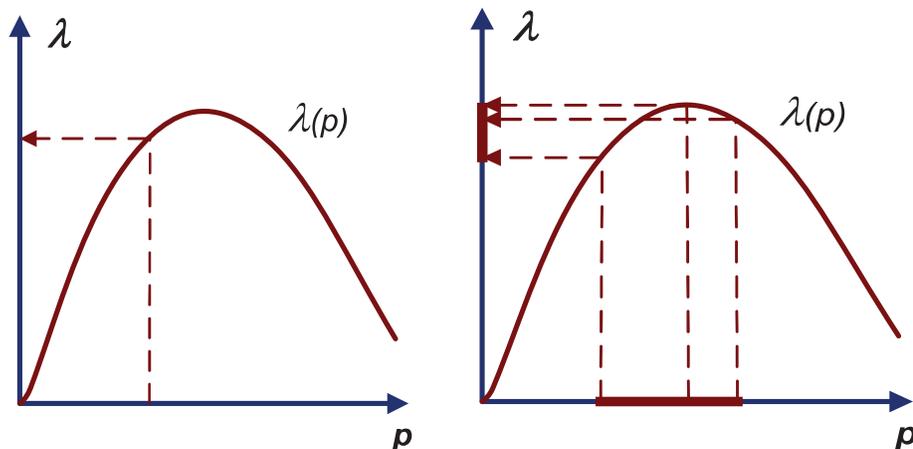
## Note 4

- La visione sistemica permetta in termini generali di organizzare il processo complessivo di analisi strutturale. La scomposizione strutturale, infatti, focalizza l'attenzione del processo di analisi su scale differenti della costruzione, dall'intero sistema al dettaglio minore. In questo modo i risultati delle valutazioni ad una scala servono come punto di partenza per le analisi ad una scala successiva, sia inferiore che superiore.
- L'analisi strutturale deve sviluppare un'indagine della risposta strutturale alle azioni considerate che permetta valutazioni sia qualitative sia quantitative, tenuto conto delle incertezze presenti nelle:
  - a) differenti assunzioni di base (ipotesi di partenza);
  - b) diverse modellazioni e diversi parametri fissati per la modellazione delle azioni pertinenti;
  - c) diverse modellazioni e diversi parametri fissati per la modellazione del sistema strutturale, secondo una strategia che persegua i seguenti due obiettivi generali:
    - individuazione della sensibilità della risposta strutturale;
    - delimitazione degli estremi della risposta strutturale.
- Si può quindi parlare di esplorazione della modellazione strutturale al fine di valutare in modo confidente il comportamento strutturale.

## STRATEGY #1: SENSITIVITY

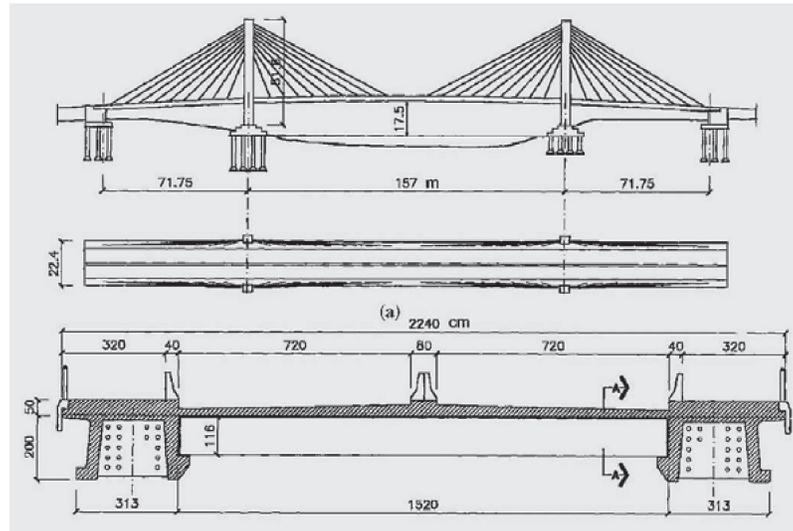


## STRATEGY #2: BOUNDING

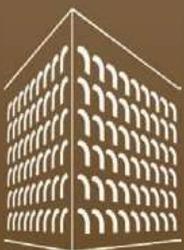
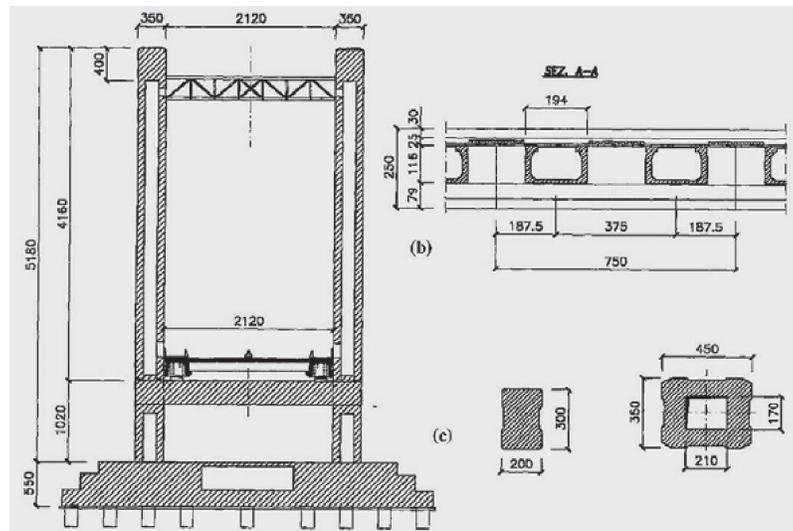




Cujaba River



Cujaba River



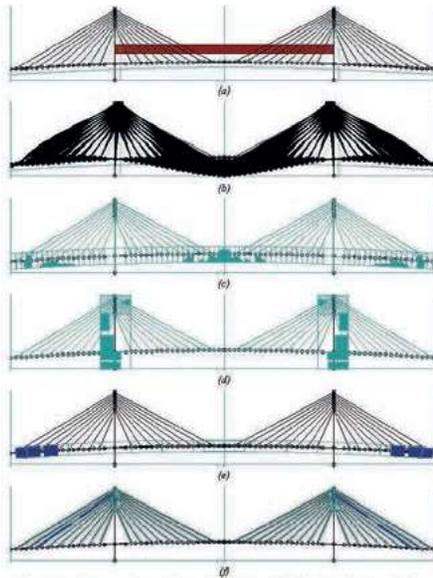


Figure 2. Step-by-step non-linear analysis of the cable-stayed bridge (nominal structure) under a given load condition. (a) Two-dimensional model of the bridge. (b) Evolution of the deformed shape. Distribution of cracking (shaded area) at collapse in both (c) the deck and (d) the pylons. (e) Distribution of cracking in both (e) the segments of the deck and (f) the stays.

LABSE Conference on Cable-Supported Bridges  
June 12–14, 2001, Seoul, Korea

### Reliability Assessment of Cable-Stayed Bridges

**Fabio BIONDINI**  
PhD  
Technical University of Milan  
Milan, Italy

**Franco BONTEMPI**  
Professor  
University of Rome "La Sapienza"  
Rome, Italy

**Pier Giorgio MALERBA**  
Professor  
University of Udine  
Udine, Italy

**Francesco MARTINEZ Y CABRERA**  
Professor  
Technical University of Milan  
Milan, Italy

#### Summary

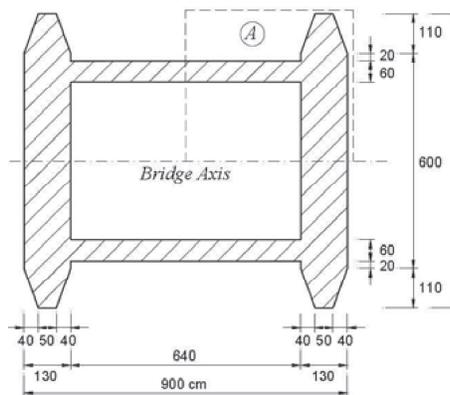
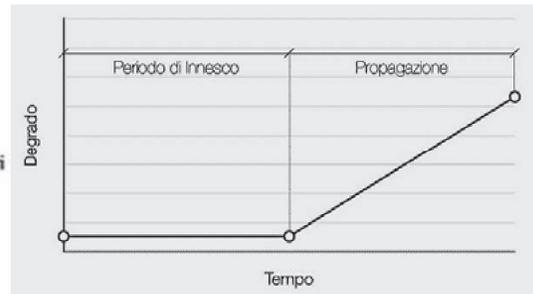
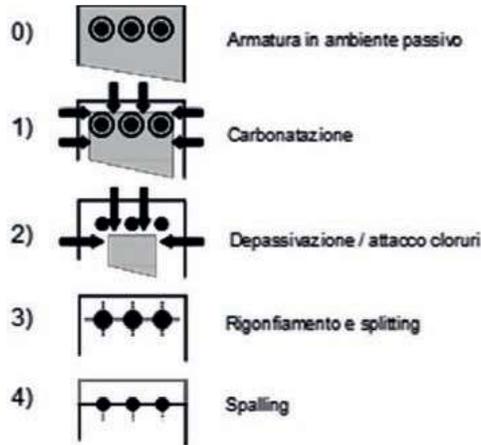
The paper deals with the reliability assessment of P.C. cable-stayed bridges, but it is thought that the presented methodology is generally applicable. Due to several sources of uncertainties, the geometrical and mechanical properties which define the structural problem cannot be considered as deterministic quantities. In this work, such uncertainties are modelled by using a fuzzy criterion which considers the model parameters bounded between minimum and maximum suitable values. The reliability problem is formulated in terms of safety factor and the membership function over the failure interval is derived for several limit states by using a simulation technique. In particular, the strategic planning of the simulation is found by means of a genetic optimisation algorithm and the structural analyses are carried out by taking both material and geometrical non-linearity into account. An application to a cable-stayed bridge shows the effectiveness of the proposed procedure.

**Keywords:** cable-stayed bridges, structural design, structural reliability, uncertainty of the data, fuzzy criteria, non-linear analysis, simulation, genetic optimisation.

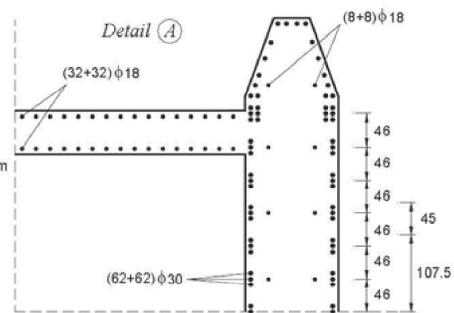
Es.: durability



# Basics of corrosion induced damage

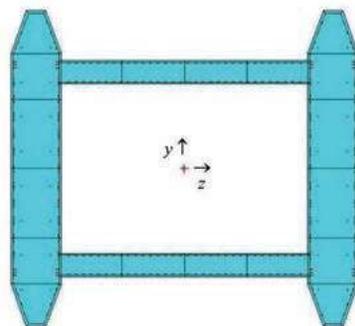


(a)

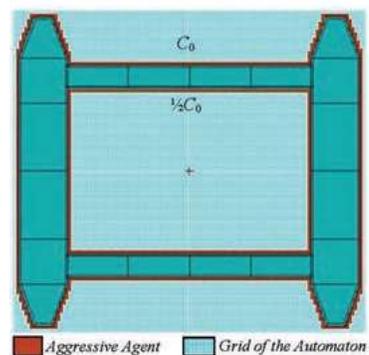


Bridge Pier Reinforced with a Total of  
160 φ 18 + 248 φ 30 = 408 Steel Bars

(b)

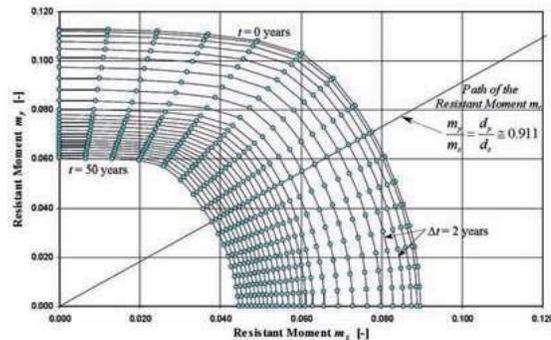
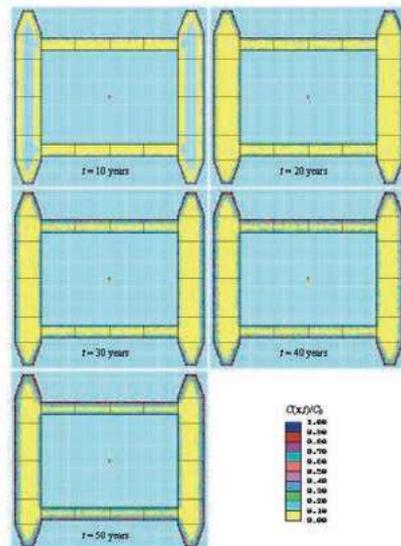


(a)



(b)





## Cellular Automata Approach to Durability Analysis of Concrete Structures in Aggressive Environments

Fabio Biondini<sup>1</sup>; Franco Bontempi<sup>2</sup>; Dan M. Frangopol, F.ASCE<sup>3</sup>; and Pier Giorgio Malerba<sup>4</sup>

**Abstract:** This paper presents a novel approach to the problem of durability analysis and lifetime assessment of concrete structures under the diffusive attack from external aggressive agents. The proposed formulation mainly refers to beams and frames, but it can be easily extended also to other types of structures. The diffusion process is modeled by using cellular automata. The mechanical damage coupled to diffusion is evaluated by introducing suitable material degradation laws. Since the rate of mass diffusion usually depends on the stress state, the interaction between the diffusion process and the mechanical behavior of the damaged structure is also taken into account by a proper modeling of the stochastic effects in the mass transfer. To this aim, the nonlinear structural analyses during time are performed within the framework of the finite element method by means of a deteriorating reinforced concrete beam element. The effectiveness of the proposed methodology in handling complex geometrical and mechanical boundary conditions is demonstrated through some applications. Firstly, a reinforced concrete box girder cross section is considered and the damaging process is described by the corresponding evolution of both bending moment–curvature diagrams and axial force–bending moment resistance domains. Secondly, the durability analysis of a reinforced concrete continuous T-beam is developed. Finally, the proposed approach is applied to the analysis of an existing arch bridge and to the identification of its critical members.

DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:11(1724)

CE Database subject headings: Concrete structures; Concrete deterioration; Corrosion; Damage assessment; Durability; Service life.

1724 / JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING © ASCE / NOVEMBER 2004

## Probabilistic Service Life Assessment and Maintenance Planning of Concrete Structures

Fabio Biondini<sup>1</sup>; Franco Bontempi<sup>2</sup>; Dan M. Frangopol, F.ASCE<sup>3</sup>; and Pier Giorgio Malerba<sup>4</sup>

**Abstract:** This paper presents a general approach to the probabilistic prediction of the structural service life and to the maintenance planning of deteriorating concrete structures. The proposed formulation is based on a novel methodology for the assessment of the time-variant structural performance under the diffusive attack of external aggressive agents. Based on this methodology, Monte Carlo simulation is used to account for the randomness of the main structural parameters, including material properties, geometrical parameters, area and location of the reinforcement, material diffusivity and damage rates. The time-variant reliability is then computed with respect to proper measures of structural performance. The results of the lifetime durability analysis are finally used to select, among different maintenance scenarios, the most economical rehabilitation strategy leading to a prescribed target value of the structural service life. Two numerical applications, a box-girder bridge deck and a pier of an existing bridge, show the effectiveness of the proposed methodology.

DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:5(810)

CE Database subject headings: Concrete structures; Damage; Diffusion; Durability; Nonlinear analysis; Service life; Uncertainty principles; Probability.

810 / JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING © ASCE / MAY 2006

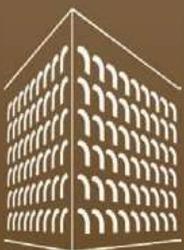
## 5. Robustness

1. Design
2. Structural System
3. Failures
4. Analysis
5. **Robustness**

*Es.: genetics*



[https://en.wikipedia.org/wiki/Alm%C3%B6\\_Bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Alm%C3%B6_Bridge)



## Note 5

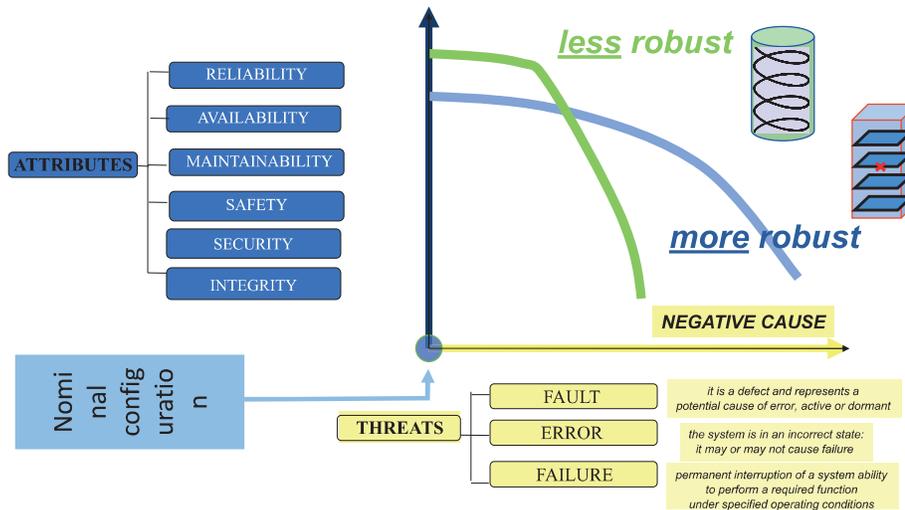
- La robustezza strutturale è la proprietà di una costruzione di mostrare una perdita di qualità proporzionata all'evento negativo originante tale perdita. In tal modo, se la struttura è robusta, esiste una relazione continua e regolare fra la causa innescante il decadimento ed il conseguente effetto.
- Si può illustrare graficamente il concetto di robustezza strutturale considerando in ordinata la misura della qualità in esame: tale grandezza può essere, ad esempio, la capacità portante rispetto ad una condizione di carico, rappresentata dal moltiplicatore di carico; in generale, in ordinata si può riportare una qualsiasi capacità prestazionale o una grandezza rappresentativa la sicurezza strutturale; in ascissa si riporta l'entità dell'evento negativo, che può essere pensato come un danno strutturale o anche un errore nella concezione o nel calcolo della struttura.
- Delle due strutture in esame, si nota come quella indicata col colore verde sia di qualità migliore nelle condizioni integre, o nominali, rispetto a quella indicata col colore blu: la stessa risulta però meno robusta della seconda, come si vede dal maggior degrado di qualità, a parità di danno, che risulta addirittura inferiore al livello minimo previsto. Questo esempio può essere tipico del caso di un pilastro in cemento armato cerchiato con spirale (caso verde) rispetto a quello di un pilastro quadrato staffato (caso blu).

### Structural Robustness (1)

- Capacity of a construction to show regular decrease of its structural quality due to negative causes.
- It implies:
  - a) some smoothness of the decrease of structural performance due to negative events  
(intensive feature);
  - a) some limited spatial spread of the rupture  
(extensive feature).

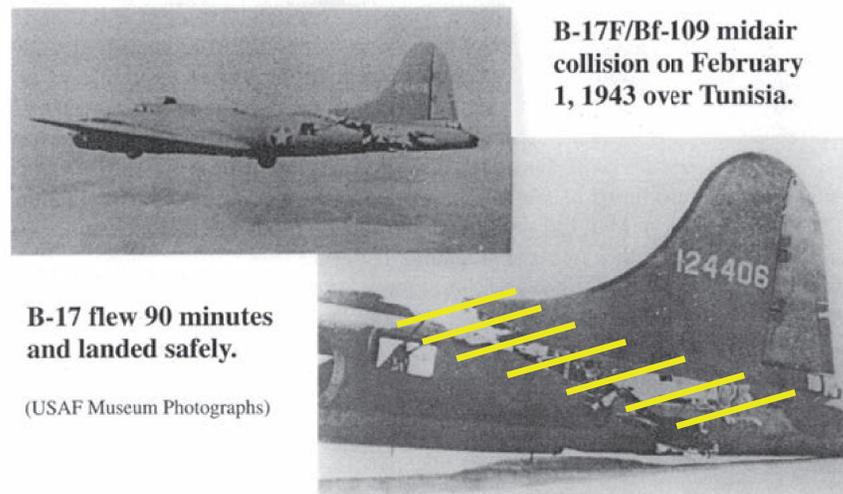


### Structural Robustness (2)



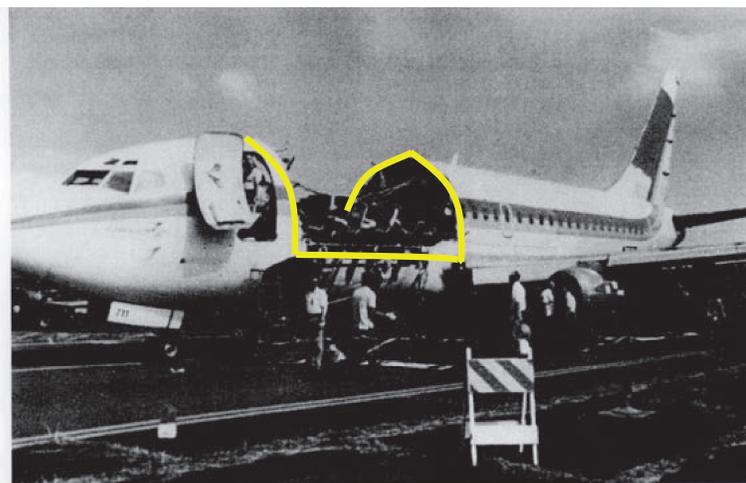
- Le strategie, in un certo senso una duale dell'altra, sono:
  - I. aumentare la connessione delle varie parti strutturali, introducendo un elevato grado di continuità, in modo che le azioni si possano trasferire dalla parte collassata a quelle adiacenti, ovvero la costruzione abbia al suo interno una ridondanza di percorsi atti a trasmettere l'azione;
  - II. suddividere la costruzione in compartimenti, in modo che il collasso di una parte della struttura non si propaghi alle parti adiacenti.
- La robustezza dell'opera deve essere saggiata imponendo, singolarmente, le seguenti cause:
  - a) carichi nominali, arbitrari ma significativi per lo scenario considerato, al fine di saggiare il comportamento complessivo: è necessario considerare comunque disposta secondo una direzione orizzontale, una frazione dei carichi agenti in direzione verticale;
  - b) assenza di elementi strutturali, per valutare le conseguenze della loro perdita a prescindere dalla causa, al fine di individuare quelli critici.
- Queste valutazioni, possono evidenziare anche errori nella concezione dello schema strutturale.

## Design Strategy #1: CONTINUITY

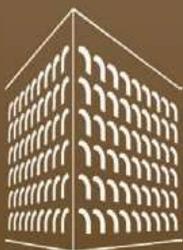


**Figure 1.1.** Example of a damage tolerant aircraft. This Boeing B-17 Flying Fortress collided with another aircraft during World War II and, although sustaining large amounts of structural damage, landed safely (Photographs courtesy of the U.S. Air Force Museum.)

## Design Strategy #2: SEGMENTATION



**Figure 1.6.** April 1988 example of service-induced damage that led to explosive decompression and loss of large portion of fuselage skin when small fatigue cracks suddenly linked together. The subsequent fracture was eventually arrested by fuselage frame structure, and the aircraft landed safely (Photograph courtesy of the National Transportation Safety Board.)



Es.: segmentation in 1846



Invited Lecture, International Symposium on Sea-Crossing Long-Span Bridges, Mokpo, Korea, Feb. 15-17, 2006

### Progressive Collapse of Bridges—Aspects of Analysis and Design

**Uwe STAROSSEK**  
Professor, Dr.-Ing., P.E.  
Hamburg University of Technology  
Hamburg, Germany



Uwe Starossek, born 1956, received his civil engineering degree from RWTH Aachen, Germany in 1982, and his doctoral degree from the Univ. of Stuttgart, Germany in 1991. Since 1999, he is a Professor of Structural Engineering at Hamburg University of Technology.

[https://www.tuhh.de/sdb/starossek/Veroeffentlichungen/Datelen/Progressive%20collapse%20of%20bridges%20\(Uwe%20Starossek\).pdf](https://www.tuhh.de/sdb/starossek/Veroeffentlichungen/Datelen/Progressive%20collapse%20of%20bridges%20(Uwe%20Starossek).pdf)

#### Summary

It is shown that current design methods are inadequate to prevent progressive collapse. Definitions for the terms *collapse resistance* and *robustness* are proposed. An approach for designing against progressive collapse is suggested and a set of corresponding design criteria is presented. These include requirements, design objectives, design strategies, and verification procedures. In addition to the better-known design methods providing *specific local resistance* or *alternate load paths*, an approach based on *isolation by compartmentalization* is presented and discussed. It is found that the terms continuity, redundancy, and robustness should be carefully distinguished. The general concepts and findings presented here are applied to bridges.



Fig. 7 Confederation Bridge, Canada

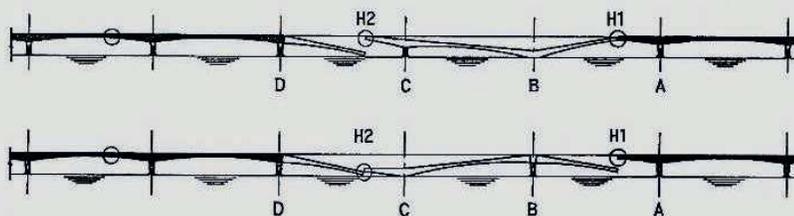
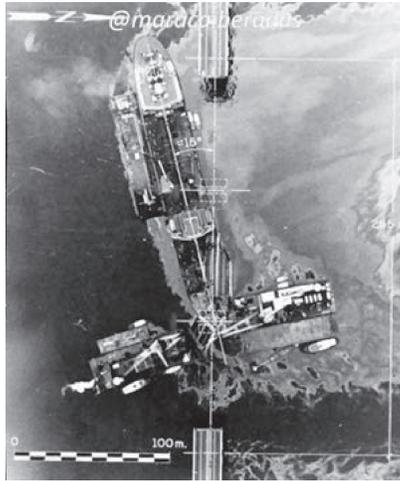


Fig. 8 Limitation of local failure by isolating collapsing sections



<https://www.venezuelatuya.com/occidente/puenterafaelurdanetaeng.htm>



<http://www.aukevisser.nl/others/d1337.htm>

## CONCLUSIONI

1. Design
  - Attenzione al clima e al contesto in cui si è sviluppata la progettazione. La concezione strutturale dai i geni alla struttura.
2. Structural System
  - Attenzione all'organizzazione come sistema della struttura: quali sono le parti più importanti, quelle critiche, elementi secondari ma che possono creare danno.
3. Failures
  - Le crisi strutturali sono conseguenza dell'allineamento di diverse debolezze, da quelle nella concezione, quelle nel calcolo e nel disegno, quelle realizzative, quelle legate all'uso e all'intervento di eventi accidentali / eccezionali, fino alla mancata manutenzione e al monitoraggio inadeguato. L'eccesso delle norme è fonte di crisi.
4. Analysis
  - L'analisi è un processo strutturale, esplorativo, in cui è essenziale valutare la sensibilità della risposta strutturale e la sua delimitazione.
5. Robustness
  - La robustezza garantisce la sopravvivenza della struttura agli eventi e anche agli errori umani.

