

# Crolli e Affidabilità delle Strutture Civili

*Structural Failures  
and Reliability of Civil Structures*

*Atti del Convegno Nazionale CRASC'06  
Università degli Studi di Messina  
Messina, 20-22 Aprile 2006*



A cura di: Piero Colajanni  
Giuseppe Muscolino  
Giuseppe Ricciardi

## **Comitato Scientifico**

Luigi Ascione	Giuliano Augusti
Alessandro Baratta	Francesco Benedettini
Luca Bertolini	Franco Bontempi
Antonio Borri	Remo Calzona
Alberto Carpinteri	Fabio Casciati
Marcello Ciampoli	Ranieri Cigna
Mario Como	Edoardo Cosenza
Mario Di Paola	Angelo Di Tommaso
Bernhard Elsener	Lucia Faravelli
Renato Giannini	Gualtiero Gusmano
Ferdinando Laudiero	Piergiorgio Malerba
Giuseppe Mancini	Gaetano Manfredi
Mauro Mezzina	Franco Mola
Maurizio Papia	Tommaso Pastore
Pietro Pedferri	Salvatore Russo
Giovanni Solari	Renato Sparacio
Erasmus Viola.	

## **Comitato Organizzatore**

Nicola Augenti	Piero Colajanni
Giovanni Falsone	Nicola Impollonia
Giuseppe Muscolino	Edoardo Proverbio
Giuseppe Ricciardi	Enzo Siviero.

## **Segreteria del Convegno**

Ingg. Francesco Giacobbe e Natale Maugeri  
Dipartimento di Ingegneria Civile, Facoltà di Ingegneria , Università di Messina  
Contrada Di Dio – Villaggio S. Agata  
98166 - Messina  
Tel. 090-3977167  
Tel. 090-3977179 – Fax: 090-3977480  
e-mail: [crasc06@ingegneria.unime.it](mailto:crasc06@ingegneria.unime.it)  
sito web: [ww2.unime.it/ingegneria/crasc06](http://ww2.unime.it/ingegneria/crasc06)

## **PREFAZIONE**

L'analisi dei crolli e dei dissesti strutturali è certamente una delle maggiori fonti di conoscenza per un progettista. Nel caso di crolli e dissesti imputabili ad eventi eccezionali, come terremoti, uragani, incendi, o esplosioni, fra le possibili cause dell'evento riveste un ruolo rilevante la modellazione dello scenario di carico; nel caso dei crolli "spontanei", invece, le cause sono più spesso da ricercare fra gli errori progettuali, difetti di esecuzione, insufficiente resistenza o durabilità dei materiali, uso improprio, vetustà. Pertanto l'osservazione di un collasso strutturale "spontaneo" impone la ricerca di fenomeni e comportamenti indebitamente trascurati, l'interpretazione dell'inefficacia del modello, stimola l'esame critico di ipotesi e processi deduttivi e fornisce una moltitudine di informazioni, spesso più affidabili ed accurate di quelle fornite dalla sperimentazione in laboratorio su prototipi in scala, o dal monitoraggio di strutture in condizioni di esercizio.

Nonostante la rilevanza dello studio di questi temi, nel vasto panorama di convegni e simposi nell'ambito dell'Ingegneria Strutturale, soltanto dal 2001 il tema dei crolli e dei dissesti ha trovato una collocazione stabile. Grazie all'iniziativa promossa dai proff. Enzo Siviero, Renato Sparacio e Nicola Augenti, nel Dicembre del 2001 è stato realizzato presso lo IUAV di Venezia, d'intesa con il Prof. Angelo Di Tommaso e con il coordinamento del Prof. Roberto Gori, il primo convegno su "**Crolli ed Affidabilità delle Strutture Civili**". L'originalità delle tematiche trattate con approccio multidisciplinare, unitamente alla grande attualità degli argomenti dibattuti, hanno contribuito al successo dell'iniziativa, tanto da suggerire la organizzazione del convegno con cadenza periodica.

Con l'obiettivo di interessare e promuovere il dibattito lungo l'intero territorio nazionale, dopo il successo della seconda edizione svoltasi presso l'Università di Napoli Federico II nel 2003, dal 20 al 22 Aprile del 2006, in occasione del decennale del crollo della cupola della Cattedrale di Noto, avvenuto il 13 Marzo 1996, si è tenuta presso l'Università degli Studi di Messina la terza edizione del convegno, per la quale è stato coniato l'acronimo CRASC'06.

Durante il convegno sono stati dibattuti numerosi temi di grande attualità; oltre allo studio dei crolli "spontanei", sono stati argomento di comunicazione i criteri, i metodi e i modelli per l'analisi delle modalità di crisi di strutture e elementi strutturali, l'innescò, la propagazione e la valutazione del danno, il degrado e la durabilità dei materiali e le problematiche inerenti la robustezza strutturale.

Sono così stati divulgati e confrontati studi ed esperienze maturate nel campo dei crolli, partendo dall'analisi teorica e pratica dei grandi dissesti, passando attraverso i criteri di affidabilità, fino a giungere ai problemi connessi con la dismissione strutturale, gli aspetti normativi e legali.

L'obiettivo è stato quello di far confluire esperienze professionali e studi scientifici, mettendo a confronto ricercatori di diversa estrazione, professionisti, amministratori pubblici e dirigenti preposti alla tutela e alla salvaguardia di opere architettoniche e monumentali. Si sono così confrontate esperienze di vario genere al fine di dibattere temi il cui studio, almeno sino a oggi, viene più spesso affrontato attraverso approcci fenomenologici, piuttosto che modelli analitici e meccanici in grado di rendere oggettivo il risultato delle analisi.

Il convegno si è articolato in una serie di relazioni su invito, tenute dai Proff. Sergio Lagomarsino, Pietro Pedeferra, e Remo Calzona, in sezioni tecniche in cui sono state presentate e discusse le memorie proposte dai partecipanti, e si è concluso con una tavola rotonda, in cui sono intervenuti anche i Proff. Franco Bontempi, Edoardo Cosenza e Mario Di Paola dove sono stati dibattuti gli aspetti operativi delle

problematiche trattate insieme con i rappresentanti degli enti pubblici preposti alla sicurezza, come vigili del fuoco e la protezione civile.

Piero Colajanni, Giuseppe Muscolino e Giuseppe Ricciardi

## INDICE

<b>PREFAZIONE</b>	<b>VII</b>
<b>RELAZIONI AD INVITO</b>	<b>1</b>
<b>Bontempi F.</b> <i>Robustezza strutturale</i>	<b>3</b>
<b>Calzona R.</b> <i>Aspetti epistemologici della sicurezza strutturale</i>	<b>25</b>
<b>Cosenza E., Manfredi G., Capuozzo S., Fisciano R., Polese M., Verderame G.M.</b> <i>Una metodologia semplificata per la valutazione della vulnerabilità statica di edifici in c.a. esistenti</i>	<b>43</b>
<b>SESSIONE I: INSEGNAMENTI TRATTI DAI COLLASSI STRUTTURALI</b>	<b>55</b>
<b>Augenti N.</b> <i>Il collasso di una volta in muratura in un antico edificio di Ercolano</i>	<b>57</b>
<b>Pasquino M., Modano M., De Majo A.</b> <i>Il dissesto dell'aula magna del policlinico Umberto I dell'Università "La Sapienza" di Roma: diagnosi e cause del crollo</i>	<b>65</b>
<b>Giambanco F.</b> <i>Crolli e ricostruzioni nel centro storico di Palermo. Un caso emblematico: l'ex-conservatorio della SS. Nunziata</i>	<b>77</b>
<b>Cennamo C., Voiello G.</b> <i>Cronaca del crollo, della messa in sicurezza e del consolidamento di un edificio sito nel centro storico di Napoli</i>	<b>85</b>
<b>Jurina L., Mazzoleni M.</b> <i>Analisi del collasso di una copertura metallica sandwich di grande luce</i>	<b>95</b>
<b>Chiaia B., Costanzo D., Barroero M., Cascio D.</b> <i>Analisi post-mortem del collasso di un edificio intelaiato in c.a.</i>	<b>111</b>
<b>Barizza P., Siviero E., Zanchettin A.</b> <i>Patologie progettuali e di comunicazione delle informazioni: un crollo recente mette in luce la criticità del sistema</i>	<b>123</b>
<b>Occhiuzzi A., Caterino N.</b> <i>Il ruolo dei dettagli esecutivi nel crollo di una paratia tirantata</i>	<b>131</b>
<b>Capuozzo S.</b> <i>Cause intrinseche ed estrinseche nei crolli storicamente documentati: attualità' di due casi emblematici: gli edifici di Via Pompeo Magno e di Via Pandolfo Collenuccio</i>	<b>145</b>
<b>Indelicato F.</b> <i>Retro-analisi del crollo di un muro di sostegno ottocentesco e del conseguente collasso di un edificio addossato</i>	<b>149</b>
<b>Carocci C.F.</b> <i>La regola dell'arte come criterio di affidabilità strutturale. Ragionamento su un crollo settecentesco</i>	<b>157</b>
<b>Augenti N.</b> <i>Un crollo nel centro di Napoli durante lavori di consolidamento</i>	<b>169</b>
<b>Pasquino M., Modano M., Fabbrocino F.</b> <i>Il crollo della galleria di Secondigliano: scenari ed ipotesi</i>	<b>177</b>

<b>Muneratti E., Augenti N., Siviero E.</b> <i>Analisi delle cause di crollo e cedimento strutturale delle strutture in calcestruzzo armato</i>	189
<b>Menditto G.</b> <i>Su alcuni casi di collapsi strutturali</i>	201
 <b>SESSIONE II: AFFIDABILITÀ STRUTTURALE</b>	 209
<b>Giuliani L., Wolff M.</b> <i>Strategie per il conseguimento della robustezza strutturale: connessione e compartimentazione</i>	211
<b>Sibilio E., Ciampoli M.</b> <i>Valutazione dell'affidabilità strutturale attraverso tecniche di simulazione Monte Carlo: "Subset simulation" e "Bayesian updating"</i>	223
<b>Garavaglia E., Anzani A., Binda L.</b> <i>Applicazione di un modello probabilistico al comportamento dipendente dal tempo delle murature storiche</i>	239
<b>Baratta A., Corbi O., Di Lorenzo C.</b> <i>Analisi limite probabilistica e prognosi del dissesto strutturale</i>	251
<b>Alibrandi U., D'Arrigo A., Ricciardi G.</b> <i>Affidabilità nei riguardi del collasso plastico o per instabilità di strutture a parametri incerti</i>	263
<b>Russo S., Boscato G., Sciarretta F.</b> <i>Il molino Stucky: Affidabilità delle strutture murarie danneggiate e meccanica del crollo</i>	275
<b>Russo S., Boscato G., Sciarretta F.</b> <i>Il molino Stucky: Interazione fra prove non distruttive e prove microdistruttive</i>	287
 <b>SESSIONE III: MONITORAGGIO E PREVENZIONE</b>	 299
<b>Baratta A., Cennamo C., Corbi I.</b> <i>Manutenzione e sorveglianza programmata per il controllo della affidabilità delle strutture</i>	301
<b>Benedettini F., Gentile C.</b> <i>Un programma di manutenzione programmata per i ponti gestiti da enti pubblici territoriali: 1. Aspetti generali</i>	313
<b>Benedettini F., Gentile C.</b> <i>Un programma di manutenzione programmata per i ponti gestiti da enti pubblici territoriali: 1. Modal Updating e futuri sviluppi</i>	325
<b>Brigante M., D'Urso M.G.</b> <i>Prevenzione e controllo dei dissesti strutturali con tecniche di monitoraggio di sorveglianza</i>	337
<b>Gallotta M., Proietto L., Salvadori N.</b> <i>L'intradosso dei solai: fenomeni critici e sicurezza</i>	349
<b>Lauriano V.</b> <i>Interventi di messa in sicurezza in immobili nel centro storico di Palermo</i>	359
<b>Carpinteri A., Lacidogna G., Niccolini G.</b> <i>Monitoring medieval towers by acoustic emission technique during earthquake activity</i>	369

<b>SESSIONE IV: MODELLI PER L'ANALISI DEI CROLLI</b>	<b>381</b>
<b>Ferro G., Ipperico M., Pignata V.</b> <i>FRP nel consolidamento strutturale di volte in muratura: applicazione del modello bridged crack</i>	383
<b>Pisano A., Fuschi P.</b> <i>Analisi limite di elementi strutturali a comportamento anisotropo</i>	395
<b>Anzani A., Binda L.</b> <i>Il comportamento a lungo termine delle murature storiche: evoluzione del quadro fessurativo come effetto visibile del danno</i>	405
<b>Tertulliani A., Valente G.</b> <i>La meccanica dei geomateriali per l'analisi di vulnerabilità dei monumenti</i>	417
<b>Borino G., Parrinello F., Iemmolo R.</b> <i>Analisi agli elementi finiti di crolli e processi di decostruzione per strutture intelaiate in c.a.</i>	429
<b>Scotta R., Vitaliani R., Sietta A.</b> <i>Utilizzo di esplosivi per il controllo delle demolizioni strutturali: simulazione numerica</i>	441
<b>Lazzari M., Majowiecki M., Sietta A., Vitaliani R.</b> <i>Il comportamento strutturale della copertura dello stadio olimpico di Montreal</i>	453
<b>Mezzina M., Uva G., Porco F.</b> <i>Aspetti teorici, pratici e sperimentali relativi al collasso per punzonamento di piastre in c.a.</i>	465
<b>Tocci C.</b> <i>Valutazione della sicurezza strutturale di aggregazioni complesse di edifici storici</i>	477
<b>Carocci C.F., Neri F.</b> <i>Il ruolo della conoscenza nell'analisi dei meccanismi di collasso dei manufatti storici: la chiesa del Sacro Cuore a Santa Venerina (CT)</i>	489
<b>Cascone S., Occhipinti E.</b> <i>La conoscenza delle tecniche costruttive tradizionali quale momento propedeutico per la salvaguardia sotto il profilo statico delle emergenze architettoniche</i>	501
<b>Siviero E., Brighesella B., Tolaccia P., Zordan T.</b> <i>Problematiche statiche in fase di progettazione ed esecuzione: un caso studio</i>	513
<b>Belli P., Corbi O., Orefice R.</b> <i>Analisi del quadro fessurativo di un sistema voltato tramite FEM: il portico del palazzo Lancellotti di Lucignano</i>	525
<b>Greco R., Mezzina M., Uva G.</b> <i>Valutazioni di sicurezza nelle costruzioni in cemento armato e sistemi esperti</i>	535
 <b>SESSIONE V: TECNICHE SPERIMENTALI</b>	 <b>547</b>
<b>Giuffrè E., Levorato M.</b> <i>Il ponte ciclo-pedonale di S. Giuliano: indagini sperimentali</i>	549
<b>Benfratello S., Giambalvo R., Grammatico S., Navarra G., Priolo S.</b> <i>Il rumore ambientale e l'affidabilità strutturale: il caso della chiesa di N.S. dell'Itria a Castelvetro</i>	561
<b>Zingone G., Cavaleri L., Cucchiara C.</b> <i>Impiego di tecniche di identificazione dinamica per la prevenzione e mitigazione del rischio da "crolli"</i>	573

<b>Zuccaro G., Petrazzuoli S.M., Capuozzo S.</b> <i>Solai SAP e collassi spontanei : un metodo di indagine non distruttiva per le verifiche di stabilità</i>	585
<b>Faella C., Martinelli E., Nigro E., Paciello S.</b> <i>Prove di compressione diagonale su muretti di tufo rinforzati con CFRCM</i>	597
<b>Anzani A., Binda L., Carpinteri A., Lacidogna G.</b> <i>Efficacia di interventi di riparazione su muri in pietra a tre paramenti - Applicazione della tecnica delle emissioni acustiche</i>	609
<b>De Canio G., Giaquinto P., Mongelli M.L., Poggi M., Ranieri N., Zingone G.</b> <i>Verifiche sperimentali dei cinematismi di collasso e della propagazione del danno nei macroelementi strutturali di edifici storico monumentali</i>	621
<b>Pucinotti R.</b> <i>L'utilizzo del metodo Windsor nella valutazione della resistenza meccanica del conglomerato cementizio</i>	641
<b>Coppola L., Pastore T.</b> <i>La resistenza a compressione del calcestruzzo in opera in accordo alle norme tecniche sulle costruzioni</i>	653
<b>De Canio G., Iraci Sareri S., Muscolino G., Palmeri A., Poggi M., Sturiale C.</b> <i>Prove su tavola vibrante di un modello in muratura per la validazione di due interventi di miglioramento sismico</i>	665
<b>Tonietti U., Paglini M.</b> <i>Dissesti atipici in strutture ad arco di grande luce: fenomenologia e rischi indagati per via sperimentale</i>	677
<b>SESSIONE VI: RAFFORZAMENTO STRUTTURALE</b>	689
<b>Spinelli P., Galano L., Barni F.</b> <i>Studio del collasso strutturale: analisi di casi reali e tecniche di progettazione per la limitazione del danno</i>	691
<b>Betti M., Selleri F., Vignoli A.</b> <i>Il consolidamento dei solai tradizionali: valutazione dell'affidabilità delle usuali tecniche di intervento</i>	703
<b>Albanesi T., Nuti C., Vanzi I.</b> <i>Miglioramento strutturale e sicurezza sismica di un ospedale esistente</i>	717
<b>Cilia M., Cultrone R., Occhipinti C.</b> <i>Un metodo per la sicurezza dei centri storici: interventi di miglioramento strutturale</i>	729
<b>Ascione F., Mancusi G.</b> <i>Nuclei antisismici di c.a. placcati con lamine e/o tessuti di FRP</i>	739
<b>Ascione L., Giordano A.</b> <i>Rinforzo sismico di strutture di c.a. mediante FRP</i>	753
<b>Mantegazza G., Recupero A., Sceusa G.</b> <i>Collasso di solette da ponte per punzonamento e utilizzo di SNFRC nel ripristino</i>	769
<b>Caiazza R., Recupero A., Scilipoti C.D.</b> <i>Collasso di travi in c.a. per taglio e utilizzo di FRCM per l'adeguamento</i>	781
<b>Colajanni P., Spinella N.</b> <i>Previsione dell'efficacia del rinforzo di colonne in c.a. mediante fasciatura con FRP</i>	793

<b>SESSIONE VII: DEGRADO E DURABILITA' DEI MATERIALI</b>	<b>805</b>
<b>Migliore M.R., Letizia F.S.</b>	
<i>Disgregazione delle malte antiche</i>	<b>807</b>
<b>Crea F., Frontera P., Marchese S., Antonucci P.L.</b>	
<i>Calcestruzzi ad alte prestazioni (HPC): durabilità e proprietà meccaniche</i>	<b>817</b>
<b>Ormellese M., Lazzari L., Pedferri P.</b>	
<i>Monitoraggio della corrosione nelle strutture in calcestruzzo armato precompresso</i>	<b>827</b>
<b>Epasto G., Campanella G.</b>	
<i>Valutazione della durabilità di calcestruzzi rinforzati con fibre di acciaio</i>	<b>839</b>
<b>Brigante M.</b>	
<i>Eterogeneità e danni nel calcestruzzo: effetti sulla stima della resistenza attuale</i>	<b>849</b>
<b>Occhiuto G.</b>	
<i>Degrado dei materiali e difetti costruttivi: il caso di palazzo Gentile di Sant'Agata Militello. Analisi ed intervento di recupero mediante applicazione di tessuti in FRP</i>	<b>861</b>
<b>SESSIONE VIII: PROBLEMATICHE CONNESSE AI CROLLI</b>	<b>869</b>
<b>D'Aguanno V., Siviero E.</b>	
<i>Architettura strutturale: dal progetto architettonico alla realizzazione in cantiere</i>	<b>871</b>
<b>Viarengi M., Scaini S.</b>	
<i>Demolizioni controllate e tecniche di induzione di crolli nelle strutture</i>	<b>879</b>
<b>Trombetti T., Silvestri S., Gasparini G., Malavolta D.</b>	
<i>Identificazione di input sismici di riferimento per valutazioni di affidabilità strutturale</i>	<b>889</b>
<b>Nudo R., Turazza D., Viti S.</b>	
<i>Valutazione della prestazione sismica di un edificio a struttura intelaiata in c.a. provvista di elementi critici per taglio</i>	<b>903</b>
<b>Faella C., De Santo D., Martinelli E., Nigro E.</b>	
<i>Sulla valutazione del comportamento sismico di edifici esistenti in c.a. secondo le recenti normative</i>	<b>915</b>
<b>Meloni D.</b>	
<i>La cupola della chiesa S. Michele di Alghero</i>	<b>927</b>
<b>Tringali S., De Benedictis R.</b>	
<i>Ricostruzione e restauro della cattedrale di Noto</i>	<b>939</b>
<b>Gallo M., Lo Giudice E., Navarra G., Sacco M.M.</b>	
<i>Valutazione del modulo elastico secante e dinamico del calcestruzzo su strutture esistenti</i>	<b>945</b>
<b>Borri A., Grazini A.</b>	
<i>Il David di Michelangelo: crollo annunciato, crollo evitato?</i>	<b>959</b>
<b>Damiani A.</b>	
<i>Aspetti intrinseci ed estrinseci del crollo di un edificio nel centro storico di Palermo</i>	<b>971</b>

**CRASC'06**  
**Convegno Nazionale**  
**CROLLI E AFFIDABILITA' DELLE STRUTTURE CIVILI**  
**Università degli Studi di Messina**  
**Messina, 20-22 Aprile 2006**



## **ROBUSTEZZA STRUTTURALE**

F. BONTEMPI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica,  
Università degli Studi di Roma "La Sapienza"  
Via Eudossiana 18, 00184 ROMA  
[franco.bontempi@uniroma1.it](mailto:franco.bontempi@uniroma1.it)*

### **SOMMARIO**

Il presente contributo vuole dare un'introduzione al concetto di robustezza strutturale che è definita come l'abilità di una costruzione di mostrare un degrado delle proprie qualità proporzionato all'entità di un'azione o di un evento negativo. A tale scopo, nella parte introduttiva di questo lavoro si considerano, nell'ordine, i concetti di azioni/eventi HPLC e LPHC, la definizione di complessità e la nozione di sincronicità, l'impostazione euristica delle verifiche di sicurezza e prestazionali secondo scenari di contingenza. Nella parte centrale, è data una definizione formale di robustezza strutturale e sono indicate strategie di progetto per ottenerla. Essendo la robustezza una proprietà sistemica della costruzione che richiede una visione olistica dell'intero problema strutturale, nella seconda parte del lavoro è dato spazio alla definizione di sistema strutturale e alle strategie di analisi strutturale. Infine, è sviluppata un'applicazione. Costante riferimento è fatto al quadro normativo italiano del Testo Unitario delle Norme Tecniche per le Costruzioni del D.M. 14/09/05 pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana il 23 Settembre 2005, che ha ritenuto il requisito di robustezza centrale al processo di progettazione strutturale.

### **ABSTRACT**

The present paper concerns the concept of robustness as the ability of a construction to develop a decrease of quality proportionate to the entity of a negative action or event. For this purpose, the concepts of HPLC / LPHC events, the definition of complexity and the notion of synchronicity, the development of safety assessment through the heuristic definition of contingency scenarios are initially reviewed. Then, a formal definition of structural robustness is given besides the design strategies needed to obtain this characteristic. Being robustness a systemic concept that need a holistic vision of the overall structural problem, attention is devoted to the definition of a structural system and to the general strategies needed to develop the structural analysis. A specific example is developed. Constant reference is made to the Italian National Standards represented by the Testo Unitario delle Norme Tecniche per le Costruzioni del D.M. 14/09/05, recently published.

## 1. AZIONI/EVENTI *LCHP* ED AZIONI/EVENTI *HCLP*

Considerando il problema della verifica della sicurezza e delle prestazioni di una costruzione, si affrontano fondamentalmente due categorie di situazioni.

La Fig.1 fa riferimento ad una situazione canonica che si può far ricadere nella prima categoria dove si può sviluppare una caratterizzazione statistica delle azioni, od eventi. Secondo tale procedura, si hanno le seguenti fasi:

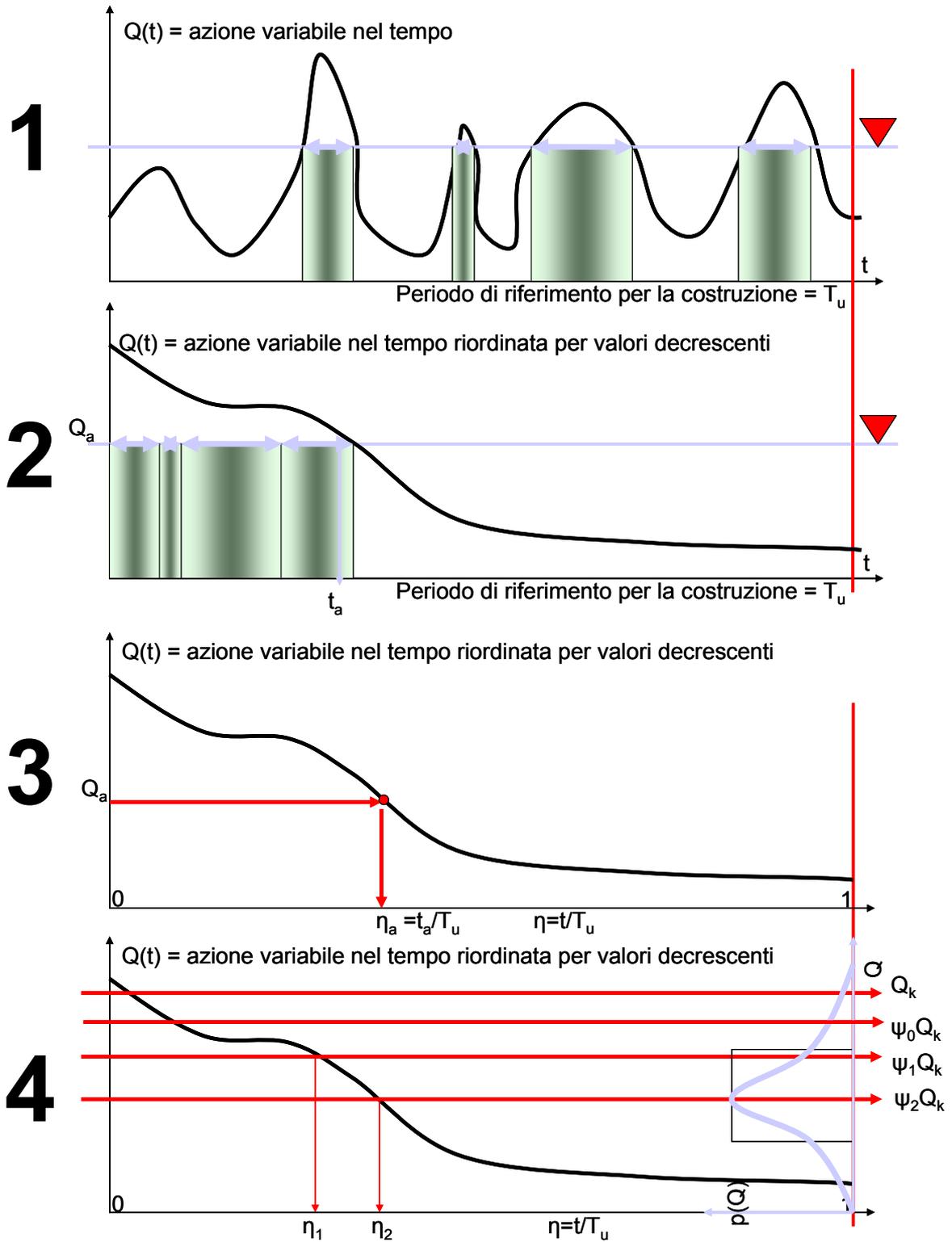
- 1) definito un periodo temporale di riferimento  $T_u$  pertinente alla costruzione in esame, o alla classe di costruzioni che si considera, si misura con opportune cautele l'azione  $Q(t)$ ; in tale processo sia la scelta del periodo  $T_u$  sia le modalità di misura sono convenzionali, ovvero definite da consenso più o meno ampio della comunità scientifica e tecnica; ad esempio nel caso del vento per l'Europa, e' abbastanza usuale fare riferimento ad un arco temporale di 50 anni e a velocità massime mediate su una finestra di misura di 10 minuti: negli Stati Uniti esistono però altri periodi (120 anni) ed altre finestre di misura (*miglio più veloce*) [2];
- 2) sulla base dati così ottenuta, si opera sul grafico che rappresenta l'intensità dell'azione ordinando le misure in modo decrescente: l'azione e' ancora rappresentata lungo l'intervallo che rappresenta la grandezza del periodo di riferimento  $T_u$ , ma presenta un andamento monotono e non più tipicamente periodico; in tal modo, con riferimento all'intensità  $Q_a$  dell'azione, si può quindi risalire al tempo cumulato  $t_a$  in cui l'azione ha un valore maggiore di tale intensità;
- 3) è operata una normalizzazione delle ascisse, introducendo il parametro  $\square = t/T_u$ : in tal modo  $\square_a = t_a/T_u$  rappresenta la frazione di tempo per la quale l'azione assume un'intensità maggiore di  $Q_a$ ;
- 4) si può dunque risalire alla distribuzione di probabilità  $P(Q)$  e alla densità di probabilità  $p(Q)$  del valore dell'azione  $Q$  nel fissato periodo di riferimento  $T_u$ : da questa probabilità, si possono derivare tutti i valori significativi, come valori medi e frattili; si possono infine individuare tutti i coefficienti  $\square_i$  che moltiplicati per il valore caratteristico  $Q_k$  denotano valori di combinazione rara, frequente, semipermanente, e così via.

Anche con tutte le arbitrarietà e le imperfezioni che possono evidenziarsi nel presente procedimento, risalta senz'altro l'importanza della base di informazione sperimentale che e' direttamente fondante la caratterizzazione di questa categoria di azioni [7, 32].

Inoltre, non può essere sfuggito che tale rappresentazione e' quella riportata dal *D.M. 15 Settembre 2005*, ovvero dal *Testo Unitario* delle Norme Tecniche per le Costruzioni, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale del 23 Settembre 2005, per le ovvie considerazioni legate al formalismo di verifica agli stati limite attraverso l'espressione di opportune combinazioni di azioni [31].

La categoria di azioni passibili di un simile trattamento sono note in letteratura con l'acronimo di azioni (od eventi) *LCHP*, che contrae i termini *Low Consequences High Probability (Eventi Frequenti con Basse Conseguenze)*: sono quindi raccolte azioni od eventi che si manifestano ripetutamente, tanto da poterne almeno imbastire una caratterizzazione statistica, e che sono, come regola generale, accompagnati da modeste conseguenze. In particolare, alla loro comparsa sono associati bassi rilasci di energia, minimo numero di crisi strutturali, e coinvolgimento di un numero minimo di persone.

Va rilevato che proprio per la possibilità abbastanza facile, anche se a volta tediosa, di inquadramento e di formalizzazione, questa categoria risulta ampiamente presente in tutti i testi di ingegneria strutturale ed e' largamente insegnata [22, 24].

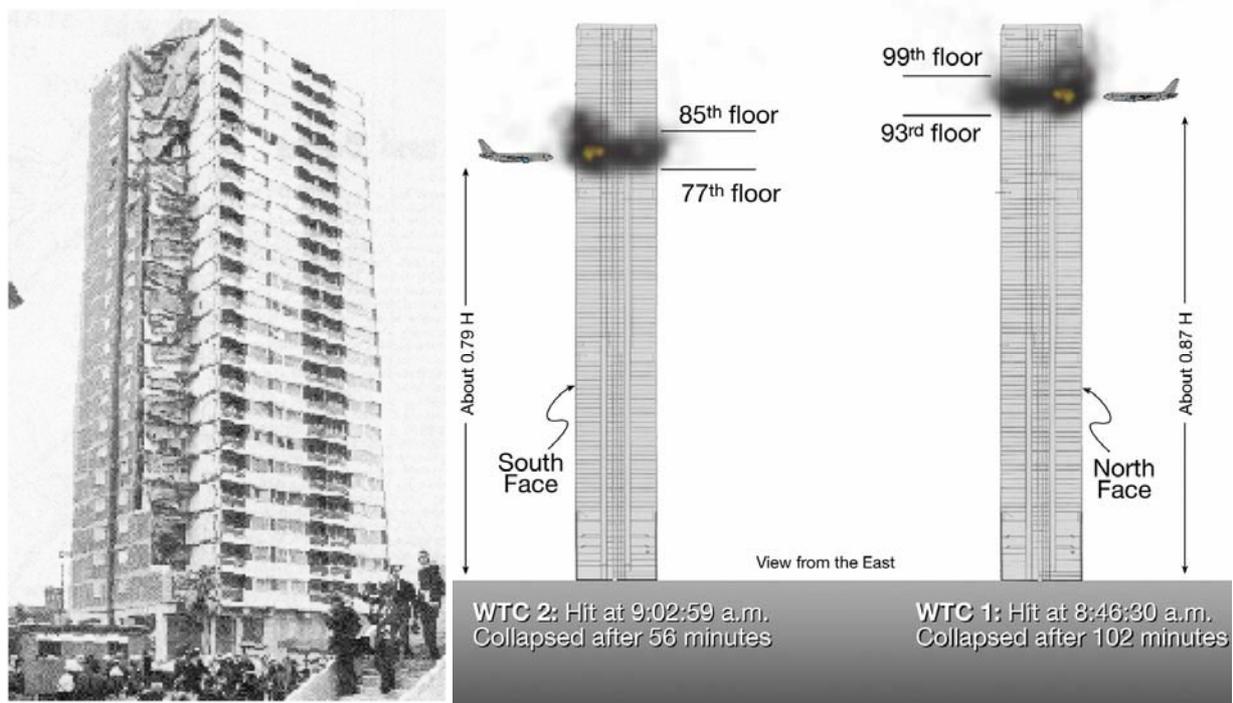


**Figura 1.** Passi per la caratterizzazione statistica di un'azione o di un evento [31].

Quantunque gran parte delle azioni naturali siano inquadrabili nel formalismo descritto dalla Fig.1, esistono altre azioni, ed, in particolare, eventi legati all'utilizzo o all'interazione delle costruzioni con l'Uomo, che non possono essere così semplicemente quantificati [9, 23].

Nella Fig.2 sono riportati due casi di enorme riflessione per l'intero settore dell'Ingegneria Strutturale. Il primo e' il caso di un edificio a pannelli prefabbricati dove lo scoppio accidentale di una bombola di gas in una cucina ha provocato il collasso di una notevole porzione dell'edificio stesso: e' interessante ricordare che in Inghilterra si parla di normative per le costruzioni precedenti e conseguenti il 1968, anno di questo incidente, per evidenziare il cambiamento della filosofia di progettazione e di verifica strutturale.

Sulla destra della Fig.2, e' riportato uno schema che rappresenta i punti di impatto dei due velivoli nell'attentato al World Trade Center a New York l'11 settembre 2001. Delle tantissime immagini relative a questo incidente, questa, forse, serve a materializzare una peculiare caratteristica di questa seconda categoria di eventi: non esiste una descrizione statistica del punto di impatto di velivoli su edifici alti.



**Figura 2.** Eventi legati all'utilizzo o all'interazione della costruzione con l'Uomo: a) effetti colposi dell'esplosione di una bombola di gas in un edificio Ronan Point nel 1968 in Inghilterra; effetti dolosi dell'attentato al World Trade Center nel 2001 negli Stati Uniti.

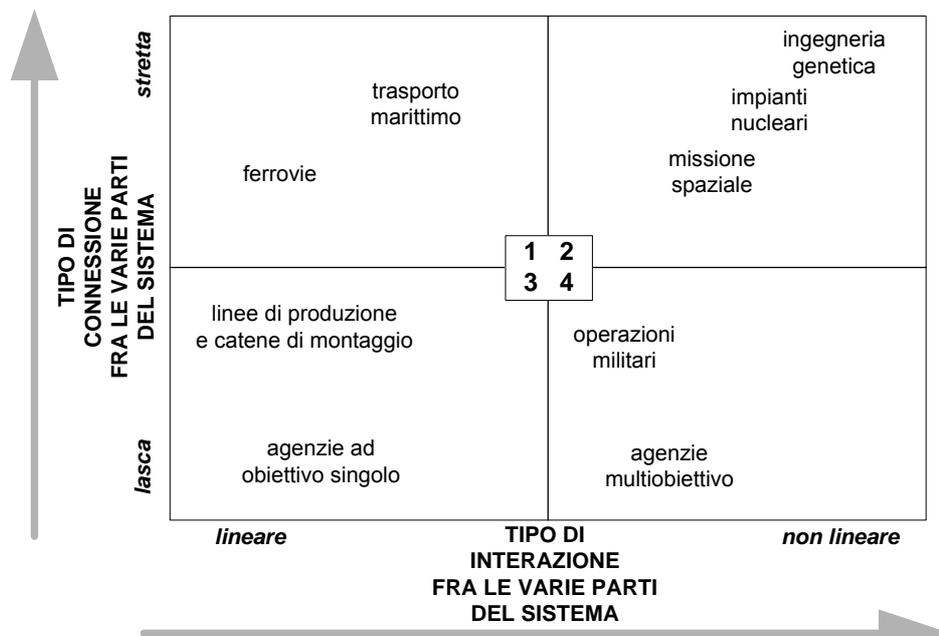
Quest'ultimo caso mette anche in evidenza altre caratteristiche di questi eventi: in questi casi e' coinvolto il rilascio di una grande quantità di energia, si hanno numerose crisi di elementi strutturali, sono coinvolte molte persone. Per questi motivi, tale categoria di eventi e' denotata in letteratura come eventi *LPHC* da *Low Probability High Consequences* (*Eventi Rari con Alte Conseguenze*) e si presentano con caratteristiche duali rispetto agli eventi *HPLC* visti precedentemente: in particolare, costruzioni che possono avere comportamenti soddisfacenti di fronte ad eventi *HPLC* possono non manifestare altrettanto successo in presenza di un evento *LPHC*.

Infine, va segnalata la distinzione dei termini correnti: nella letteratura anglosassone, i problemi relativi ad azioni naturali o eventi colposi sono pertinenti alla *structural safety*, mentre gli eventi colposi sono tema della *structural security* [20].

## 2. COMPLESSITA' E SINCRONICITA'

La distinzione fatta nel precedente paragrafo relativamente a due differenti categorie di azioni/eventi, e' solo il primo passo per una critica costruttiva agli approcci probabilistici alla sicurezza strutturale. Un altro tema pertinente a tale discussione e' relativo alla constatazione del numero di incidenti strutturali, ma anche di altro tipo, avvenuti in quei sistemi che avevano alla base del loro progetto la dichiarazione di una probabilità di crisi dell'ordine di  $1/1000000$  o meno. Il riferimento e' in particolare alle centrali nucleari: effettivamente, nelle migliaia di impianti realizzati, si sono verificati una decina, circa, di incidenti eccezionali, con un'occorrenza di accadimento che quindi e' stata dell'ordine di  $1/1000$ , ovvero di alcuni ordini di grandezza superiore a quanto previsto [17]. In effetti, e' ritenuto che la prima assunzione sia da intendersi come *probabilità nominale* di crisi, ottenuta considerando solo gli aspetti del problema statisticamente regolari, ovvero descrivibili in tale formalismo, come le azioni *HPLC* e le caratterizzazioni materiali desunte da ampia e consolidata sperimentazione, permettendo di arrivare alla valutazione di una *sicurezza nominale* della costruzione in esame. In questa probabilità restano escluse tutte le fonti non statisticamente trattabili, come gli eventi *LPHC*, che invece concorrono a formare la cosiddetta *probabilità sostanziale* di crisi, governando dunque la *sicurezza sostanziale* della costruzione in esame.

Il primo passo per la comprensione del problema della sicurezza sostanziale delle costruzioni, può essere fatto introducendo la nozione di complessità di un qualsiasi sistema. Nella Fig.3 e' proposto uno schema noto in letteratura in diverse forme, che considera lungo due assi ortogonali quelle che possono essere intese come dimensioni della complessità: tali dimensioni sono rappresentate dal *tipo di interazioni* e dal *tipo di connessioni* che le varie parti di un sistema sviluppano fra loro, e permettono di individuare 4 quadranti contenenti configurazioni ricorrenti. La complessità e' ritenuta crescente sia passando da *interazioni lineari* (caratterizzate da proporzionalità e dunque prevedibilità) ad *interazioni non lineari*, sia passando da *connessioni lasche* (ovvero sistemi con parti poco connesse) a *connessioni strette*: i sistemi che possono rappresentarsi nel quadrante 3 sono caratterizzati da (relativa) semplicità, mentre i sistemi del quadrante 4 sono caratterizzati da massima complessità.



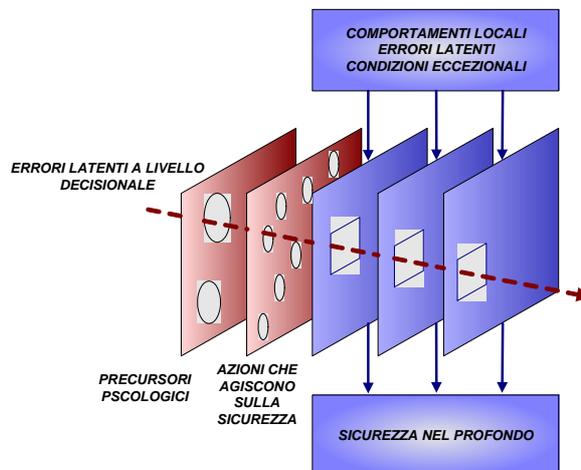
**Figura 3.** Valutazione della complessità di un sistema in base alla natura delle interazioni (*lineari / non lineari*) e delle connessioni (*strette / lasche*) fra le varie parti che compongono il sistema stesso.

Nel contesto dell'Ingegneria Strutturale, il concetto interazione lineare / non lineare può senz'altro essere interpretato come comportamento meccanico o geometrico: in entrambi i casi e' chiara la possibile varietà di comportamenti possibili, spesso non intuitivi. Il termine connessione risulta un po' più sottile: riguarda come le varie parti strutturali convergono nel produrre il comportamento strutturale globale [29]. All'interno di una struttura sono presenti due classi di regioni con comportamenti meccanici qualitativamente differenti; si hanno:

- *B-regions*: regioni dove lo stato di sforzo è conseguente ad un regime deformativo semplice (con andamenti lineari); la lettera *B* deriva da Bernoulli, che individuò insieme a Navier l'ipotesi sul comportamento delle sezioni delle travi, che ruotano restando piane;
- *D-regions*: regioni dove l'assenza di una cinematica semplice, comporta stati di sforzo comunque complicati; si hanno quindi regioni genericamente sedi di stati di sforzo diffusivi, da cui deriva la lettera *D*; le *D-regions* sono tutte quelle zone di singolarità per la struttura, ove si verificano discontinuità geometriche o di materiale, o dove sono applicate forze concentrate, carichi o reazioni vincolari; in particolare, tutti i collegamenti si configurano come *D-regions*.

Il comportamento strutturale complessivo è il risultato dell'integrazione (risultante a livello macroscopico) del comportamento locale di tali *D-regions*. Inoltre, il comportamento locale, in particolare la deformabilità locale, può far emergere comportamenti inaccettabili (ad esempio effetti del secondo ordine). Infine, eventuali crisi locali possono mettere in pericolo l'integrità dell'intero organismo strutturale, fatto che deve essere evitato da un'accurata progettazione. Il possibile emergere di effetti usualmente secondari rappresenta un'indicazione di complessità.

In un contesto più ampio e più ricco, che può fare riferimento all'Ingegneria dei Sistemi, oltre agli aspetti puramente concreti relativi alla costruzione ed alla sua organizzazione (*hardware*), si devono introdurre altri aspetti che corrispondono alla logica di progetto (*software*) ed al comportamento umano (*humanware*). Al primo settore possono farsi risalire errori di concezione, di calcolo o mancanza di conoscenza, mentre nel secondo, sono raccolti tutti gli interventi negativi legati al comportamento umano [25]. Secondo questo punto di vista, che può analizzare compiutamente la *sicurezza sostanziale* delle costruzioni, la crisi di un sistema strutturale emerge dalla coincidenza significativa di aspetti negativi dei tre vari campi (*hardware – software – humanware*). Questa condizione e' denotata con il termine *sincronicità* [19] e può essere concepita come la perforazione contemporanea di tutte le difese di cui può essere considerata composta la realizzazione di una costruzione (Fig.4).

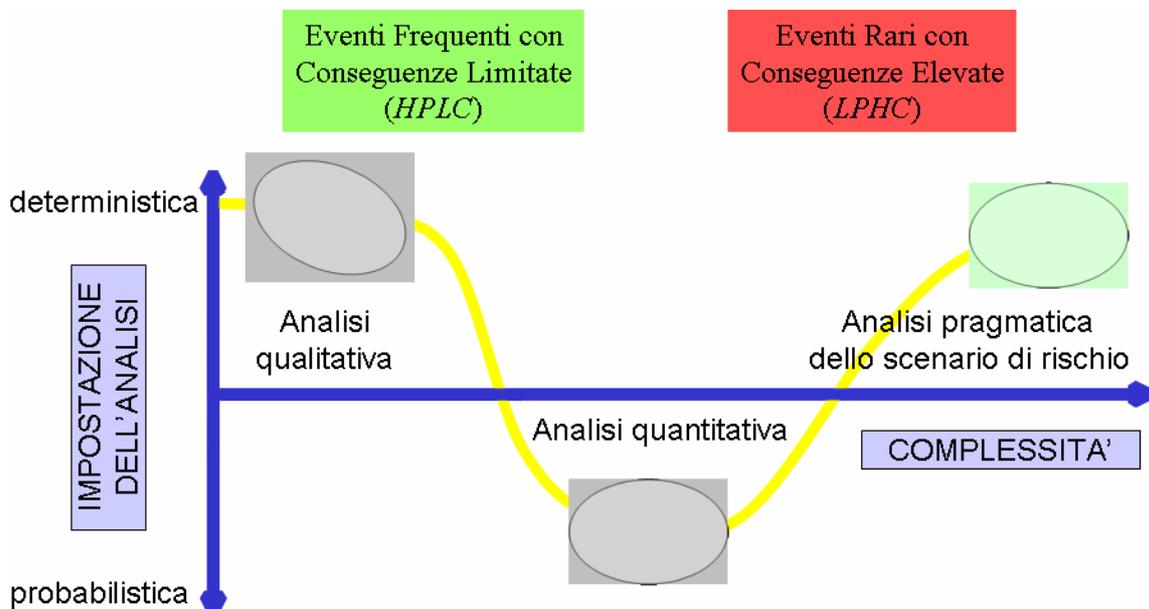


**Figura 4.** Sviluppo di una crisi nel sistema attraverso la concatenazione di meccanismi e coincidenze significative, in parte legate ad aspetti materiali in parte ad aspetti legati alla natura umana, che si coagulano in una situazione che permette l'emergere del fallimento: *sincronicità* [19].

### 3. STRATEGIA DI VERIFICA MEDIANTE SCENARIO DI CONTINGENZA

Nel paragrafo precedente è stata impostata una critica all'approccio puramente probabilistico della sicurezza strutturale: è ovvio che tale impostazione non può trattare azioni o eventi che non sono descrivibili probabilisticamente, non solo in teoria ma anche in pratica. Simili difficoltà sono altrimenti ereditate dai metodi che derivano concettualmente da tale approccio, come l'approccio ai coefficienti di sicurezza parziale della forma semiprobabilistica agli stati limite.

È utile dal punto di vista ingegneristico considerare allora il grafico riportato in Fig.5: qui, in ascissa sono ordinate situazioni di crescente complessità, mentre in ordinata sono indicati approcci deterministici e probabilistici. Si rileva l'alternanza delle impostazioni: la sicurezza di situazioni semplici è valutata con analisi deterministiche qualitative che però, al crescere della complessità del problema strutturale in esame, sono sostituite da analisi più raffinate basate su considerazioni probabilistiche. Questa tendenza si inverte, all'ulteriore crescere della complessità, per tornare ad approcci deterministici: si considerano cioè analisi pragmatiche basate sull'individuazione di scenari di rischio in base a giudizi esperti, che trascendono dunque il quadro delle mere descrizioni statistiche.



**Figura 5** Differenze di impostazione delle verifiche di sicurezza (*approccio deterministica / approccio probabilistico*) al crescere della complessità del problema strutturale.

Può essere utile a questo proposito riportare dal *Testo Unitario* le frasi che introducono nei termini generali l'impostazione della sicurezza e delle capacità prestazionali di una costruzione:

*Il Progettista, a seguito della classificazione e della caratterizzazione delle azioni, deve individuare le possibili situazioni contingenti in cui le azioni possono cimentare l'opera stessa.*

*Con l'espressione scenario di contingenza s'intende, nella maniera più generale, una circostanza plausibile e coerente in cui può realisticamente trovarsi un'opera strutturale, sia durante la sua vita utile, sia nelle fasi di costruzione e dismissione. Tale scenario sarà dunque caratterizzato dalla concomitanza di:*

- a) una determinata configurazione strutturale, usuale o transitoria: in quest'ultimo caso, oltre a considerare le fasi di realizzazione e dismissione dell'opera, devono essere identificate situazioni di danno accidentale realisticamente attendibili per l'opera stessa, ponendo la dovuta attenzione anche ai fenomeni di degrado strutturale connessi a processi chimico-fisici, ed ai riflessi in termini di organizzazione strutturale;
- b) un definito scenario di carico, ovvero un insieme organizzato e realistico di azioni, presenti contemporaneamente sull'opera, la cui configurazione strutturale è stata precedentemente identificata. È compito del Progettista individuare tale insieme di carichi, definendone le rispettive intensità, anche in base alle correlazioni statistiche.

In ogni caso, tenendo conto delle specificità delle singole azioni, si deve adottare una progettazione strutturale orientata all'intero sistema resistente, e non solo al dimensionamento ed alle verifiche dei singoli componenti.

La Fig.6 illustra dal punto di vista operativo come sono individuati gli scenari di contingenza. Da una parte sono elencate nelle righe le differenti situazioni in cui si può trovare una costruzione, a partire dalle sue fasi costruttive fino alle situazioni di funzionamento nominale, considerando anche le operazioni manutentive ed anche la dismissione. In un altro elenco, organizzato per colonne, sono definiti tutti gli scenari di carico, ovvero le possibili combinazioni di carico. L'accoppiamento dei due elenchi, produce una matrice che contiene tutte le possibili contingenze in cui verificare la sicurezza strutturale.

Va notato che:

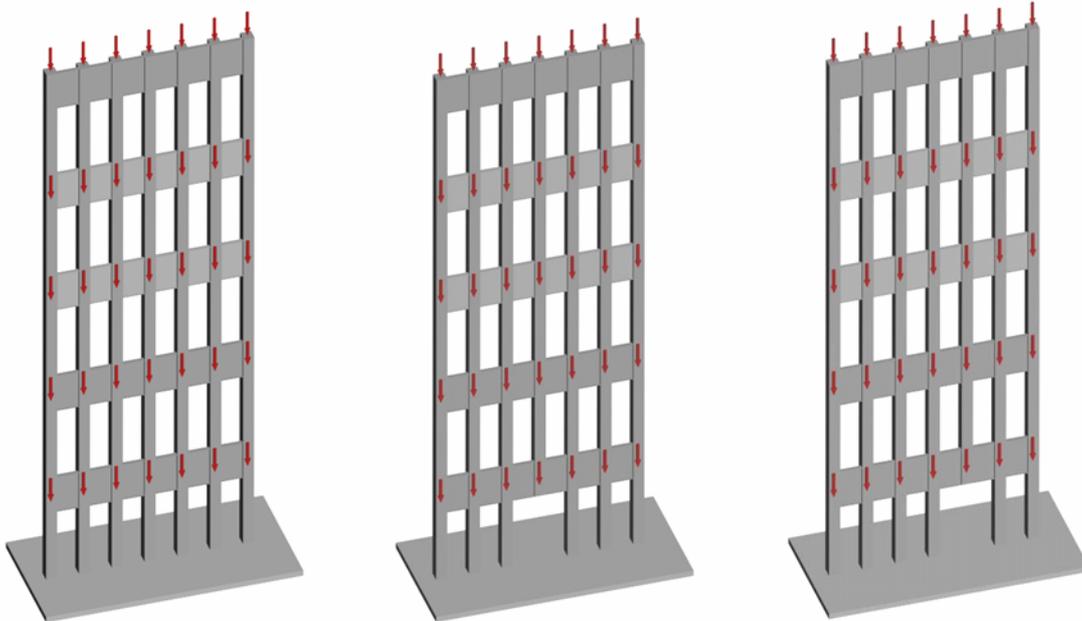
- 1) non tutte le combinazioni possono essere realistiche o pertinenti;
- 2) esiste lo spazio in questo inquadramento per inserire situazioni caratterizzate da azioni o eventi *LPHC*, sulla base di giudizio euristico.

		situazioni:														descrizione		
		fase costruttiva	situazione funzionale	situazione manutentiva	trasformazione d'uso	situazione danneggiata	fase di dismissione											
<b>CONFIGURAZIONE STRUTTURALE</b>	1						○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	2						○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	3						○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	4						○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	1	1					○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	2						○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
			1				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
			3				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
				1			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
				2			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
					1		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
					3		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
						1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
						2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
							I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX			
							.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	
						<b>SCENARIO DI CARICO</b>												

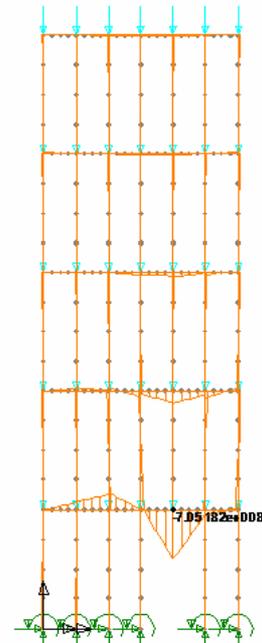
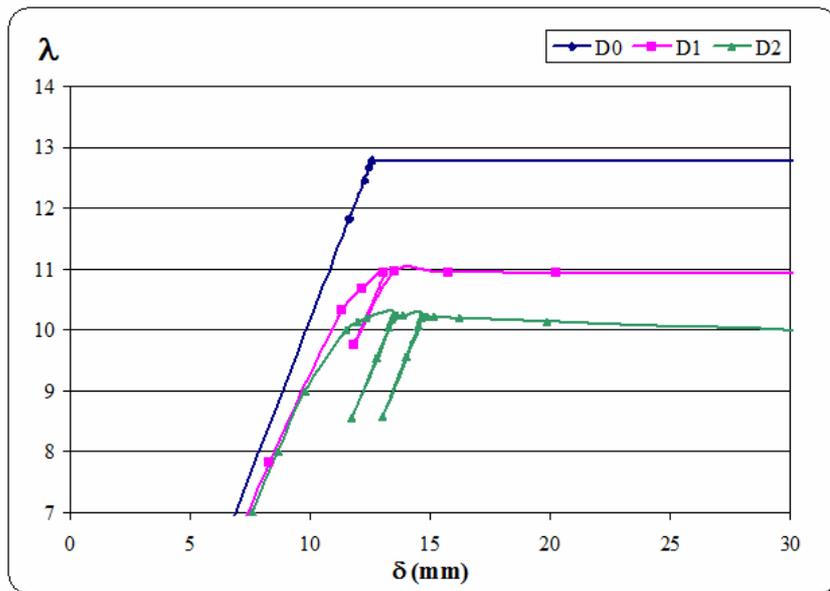
Figura 6 Individuazione degli scenari di contingenza attraverso una matrice che accoppia le differenti possibili configurazioni strutturali ai differenti scenari di carico.



E' opportuno considerare un altro esempio per mettere a fuoco il concetto di robustezza strutturale. Si esamina a questo proposito il telaio altamente iperstatico di Fig.8, di cui si vuole valutare la robustezza rispetto al collasso di uno dei pilastri della zona centrale: in particolare si considerano gli scenari simmetrici (D1) e asimmetrico (D2). I risultati delle tre analisi necessarie, includendo come riferimento di base la situazione integra (D0), riportati in Fig.9, indicano un degrado di qualità (resistenza) nel primo caso sia del 20% circa, mentre conseguente al secondo scenario del 30%: il giudizio di accettabilità di tali valori rientra nel più generale schema di progettazione prestazionale (*Performance-based Design*) [28].



**Figura 8** Esempio di telaio altamente iperstatico, di configurazione integra (D0), di cui si vuole valutare la robustezza rispetto agli scenari (D1) collasso del pilastro centrale, (D2) collasso di un pilastro laterale.



**Figura 9** Diagramma (moltiplicatore dei carichi  $\lambda$  - abbassamento in mezzertina in sommità  $\delta$ ) per il telaio altamente iperstatico in esame, nella configurazione integra (D0) e negli scenari (D1) e (D2); a destra, situazione di collasso peggiore, relativa allo scenario (D2) (comportamento elastico-perfettamente plastico).

Il concetto di robustezza e le relative verifiche sono riportate in più punti nel *Testo Unitario*. All'inizio, ovvero nel Capitolo 2, si esprimono in termini generali i requisiti che tutte le costruzioni devono avere:

*In particolare, secondo quanto stabilito nelle norme specifiche per le varie tipologie strutturali, strutture ed elementi strutturali devono soddisfare i seguenti requisiti:*

- *sicurezza nei confronti di stati limite ultimi (SLU): crolli, perdite di equilibrio e dissesti gravi, totali o parziali, che possono compromettere l'incolumità delle persone ovvero comportare la perdita di beni, ovvero provocare gravi danni ambientali e sociali, ovvero mettere fuori servizio l'opera;*
- *sicurezza nei confronti di stati limite dei esercizio (SLE): tutti i requisiti atti a garantire le prestazioni previste per le condizioni di esercizio;*
- *robustezza nei confronti di azioni accidentali: capacità di evitare danni sproporzionati rispetto all'entità delle cause innescanti quali incendio, esplosioni, urti o conseguenze di errori umani.*

Si nota come accanto agli usuali stati limite, sia ultimi sia di esercizio, è data evidenza al requisito di robustezza, che si può intendere come un ulteriore stato limite: in alcuni codici internazionali o per strutture eccezionali il cui progetto è basato fortemente sulle idee del Performance-based Design [13, 14, 16], la robustezza è proprio verificata attraverso la definizione di un opportuno stato limite denominato come *Stato Limite di Integrità Strutturale (SLIS)*.

Nel *Testo Unitario* va ancora rilevata la possibilità di sopperire, ovviamente in modo commisurato, agli errori umani, di progetto e di realizzazione, con una struttura che è intrinsecamente robusta.

Riguardo alle valutazioni da fare ai fini della robustezza, all'inizio del Capitolo 3, il *Testo Unitario* riporta:

*In fase di progetto, 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; tale frazione, se non altrimenti dichiarato dal Progettista, è assunta pari all'1% per costruzioni con altezza inferiore a 100 metri; allo 0.1% per altezza oltre 200 metri; a percentuale interpolata per altezze intermedie;*
- 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.*

Considerazioni specifiche sono poi introdotte nel Capitolo 6, che riguarda le opere civili. Infatti, si afferma:

*Tra tutte le costruzioni, per gli edifici è particolarmente stringente il requisito della robustezza, essendo tale categoria di strutture soggette ad essere occupate da un alto numero di persone ed essendo sede delle più disparate attività, svolte frequentemente in modo non organizzato e non controllato.*

*Per tale scopo, gli edifici devono essere progettati in modo che il sistema strutturale principale possa sopportare danneggiamenti locali senza subire un collasso totale; gli edifici devono avere un degrado delle prestazioni di resistenza proporzionale alla causa che lo ha provocato.*

*Questo requisito deve essere raggiunto essenzialmente attraverso un'organizzazione degli elementi strutturali che mantenga resistenza e stabilità allo schema principale attraverso un trasferimento dell'azione da qualunque regione strutturale danneggiata a quelle vicine: ciò può essere raggiunto fornendo sufficiente continuità, iperstaticità, duttilità alle parti che compongono l'edificio. In questo modo, si dovrà anche evitare la diffusione del danneggiamento da una regione limitata della struttura ad una parte significativa o addirittura a tutto organismo strutturale, secondo la cosiddetta modalità di collasso progressivo. Tale modalità di collasso, ed in generale la propagazione del danno, sarà raggiunto anche attraverso opportuna compartimentazione dell'organismo strutturale.*

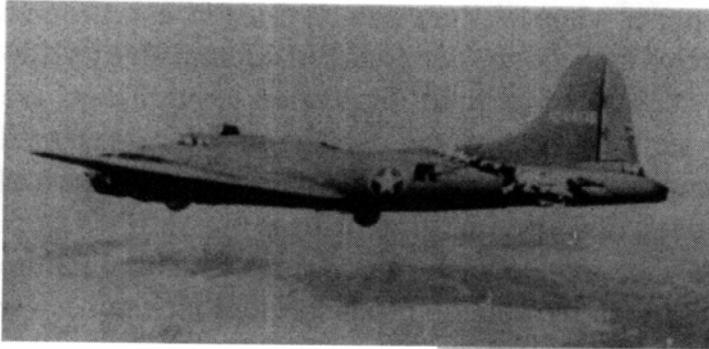
Quest'ultimo paragrafo è significativo perchè indica due strategie per ottenere la robustezza strutturale. Tali strategie, in un certo senso una duale dell'altra, sono:

- 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 [15];
- ii. suddividere la costruzione in compartimenti, in modo che il collasso di una parte della struttura non si propaghi alle parti adiacenti [30].

Va ricordato che queste due strategie sono tradizionalmente utilizzate in settori dell'Ingegneria come quello Aeronautico o Navale. In Fig.10, si riportano, ad esempio, i casi:

- a) in alto, di un bombardiere *B17 Fortezza Volante*, che durante la Seconda Guerra Mondiale dopo aver subito una collisione in volo con un altro velivolo, è riuscito comunque ad atterrare; questa capacità di incassare danno strutturale (*damage tolerant structure*), è legata alla conformazione altamente iperstatica della fusoliera di questo tipo di aereo;
- b) in mezzo, di un aereo di linea che nell'aprile 1988, a seguito della coalescenza di numerose microfrazture nella parte centrale superiore della fusoliera, ha subito un'esplosione per decompressione: la parte di carlinga collassata è stata delimitata dalla presenza di longheroni ed elementi di cerchiatura presenti nella fusoliera;
- c) in basso, è infine riportata un'illustrazione pertinente alla concezione delle navi che presentano compartimenti stagni, per evitare l'eventuale propagarsi dell'allagamento che sia avvenuto in uno di essi [28].

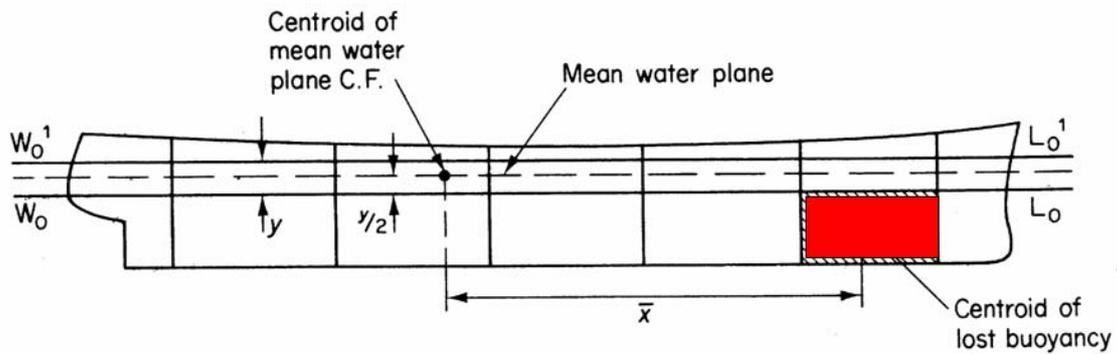
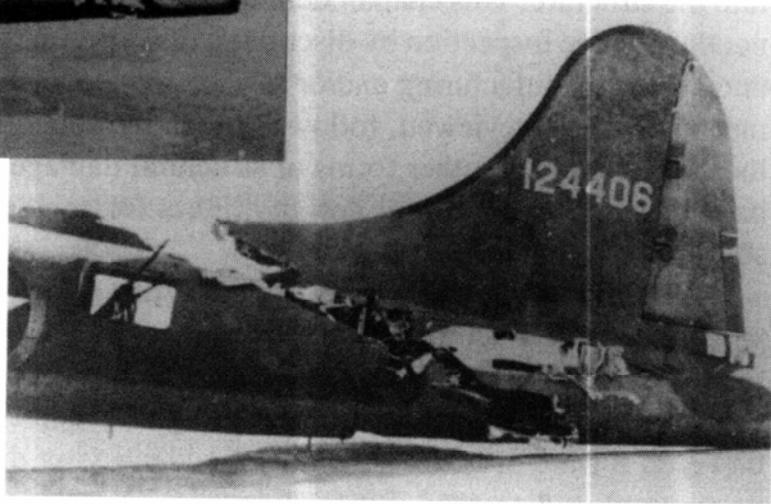
Da questi semplici esempi, risulta evidente come l'ottenimento della robustezza strutturale sia un problema che riguarda la concezione strutturale: le analisi strutturali, non potranno che misurare quantitativamente quello che è già stato inserito nel codice genetico della costruzione [6, 10]. In particolare, la robustezza risulta essere una proprietà sistemica, in quanto emerge da come le varie parti della costruzione sono connesse e da come si comportano mutuamente alla presenza di un danno localizzato[26].



**B-17F/Bf-109 midair collision on February 1, 1943 over Tunisia.**

**B-17 flew 90 minutes and landed safely.**

(USAF Museum Photographs)



**Figura 10** Strategie di progetto per ottenere robustezza strutturale: nel caso di aerei, in alto, robustezza per continuità strutturale, in mezzo, robustezza per compartimentazione; nel caso delle navi, in basso, compartimentazione [28].