

# Il ruolo della robustezza strutturale nella riduzione del rischio verso eventi estremi

---

*Martina Scalvenzi, Dottoranda di Ricerca, Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II*

*Fulvio Parisi, Ricercatore di Tecnica delle Costruzioni, Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II*

## Introduzione

Negli ultimi decenni gli edifici progettati secondo norme convenzionali hanno dimostrato di non essere necessariamente in grado di resistere ad eventi estremi, quali ad esempio gli impatti, le esplosioni o gli incendi. Tali eventi sono caratterizzati da una bassa probabilità di accadimento ma, al contempo, da conseguenze catastrofiche generalmente derivanti dalla propagazione di danni localizzati in uno o più elementi, sino al crollo parziale o totale della struttura. Questo particolare fenomeno di crollo è denominato “collasso progressivo” della struttura. Se vi è sproporzione tra l'entità del danno finale e quella del danno iniziale, come tipicamente accade nel caso in specie, si parla anche di “collasso sproporzionato” e la capacità della struttura di evitarlo si definisce “robustezza”.

In ambito europeo, il concetto di robustezza strutturale è menzionato nell'Eucorodice 1 – Parte 1-7 [1]: questo codice definisce appunto la robustezza come la capacità di una struttura di resistere ad eventi quali incendi, esplosioni, urti o conseguenze di errori umani, senza essere danneggiata in maniera sproporzionata rispetto alla causa di origine. Al riguardo, l'Eurocodice 1 indica vari approcci per garantire che la struttura posseda tale proprietà: 1) progettare alcuni “componenti chiave” per aumentare la probabilità di sopravvivenza della struttura dopo un evento eccezionale; 2) progettare adeguati dettagli costruttivi e con materiali ed elementi strutturali duttili, capaci di assorbire una significativa energia di deformazione senza giungere a rottura; 3) realizzare una sufficiente iperstaticità nella struttura per facilitare il trasferimento delle azioni sfruttando percorsi di carico alternativi, in seguito ad un evento eccezionale.

In Italia, le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) del 2008 [2], al § 2.1 inquadravano la robustezza nei confronti di azioni eccezionali come requisito prestazionale aggiuntivo che una struttura deve possedere, oltre la sicurezza nei confronti degli stati limite di esercizio e degli stati limite ultimi. Le stesse NTC 2008 fornivano anche prime indicazioni progettuali secondo cui la robustezza dell'opera poteva essere verificata attraverso un'analisi globale della struttura applicandovi, in aggiunta alle altre azioni (non sismiche e da vento), azioni nominali convenzionali orientate secondo due direzioni orizzontali e mutuamente ortogonali e con intensità pari all'1% dei carichi gravitazionali.

Le nuove NTC [3], in vigore dal 22 marzo 2018, al § 2.2.5 suggeriscono diverse strategie di progettazione cui fare riferimento per garantire un adeguato livello di robustezza, in funzione

dell'uso previsto dalla costruzione, ovvero: 1) progettare la struttura in grado di resistere ad azioni eccezionali di carattere convenzionale, combinando valori nominali delle azioni eccezionali alle altre azioni esplicite di progetto; 2) prevenire gli effetti indotti dalle azioni eccezionali alle quali la struttura può essere soggetta o ridurre la loro intensità; 3) adottare una forma e tipologia strutturale poco sensibile alle azioni eccezionali considerate; 4) adottare una forma ed una tipologia strutturale tale da tollerare il danneggiamento localizzato causato da un'azione di carattere eccezionale; 5) realizzare strutture quanto più ridondanti, resistenti e/o duttili è possibile; 6) adottare sistemi di controllo, passivi o attivi, adatti alle azioni e ai fenomeni ai quali l'opera può essere sottoposta. Al § 3.6 classifica le azioni eccezionali come quelle che si presentano in occasione di eventi quali incendi, esplosioni ed urti ed afferma che è opportuno che le costruzioni possiedano un grado adeguato di robustezza, in funzione dell'uso previsto della costruzione, individuando gli scenari di rischio e le azioni eccezionali rilevanti ai fini della sua progettazione, secondo quanto indicato al § 2.2.5. Azioni eccezionali, quali incendi ed esplosioni, possono essere meritevoli di insegnamenti trasversali tra l'ingegneria civile e l'ingegneria industriale, che amplificano sensibilmente il campo d'azione di un ingegnere. E' proprio questa considerazione che, nell'ambito del Master di secondo livello in Ingegneria Forense presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II (ormai giunto alla decima edizione consecutiva in fase di completamento), ha portato ad istituire l'insegnamento di "Incendi ed Esplosioni" che fornisce le basi per la comprensione di tali fenomeni e la modellazione delle azioni che essi producono sulle strutture [4].

Secondo la circolare esplicativa [5] delle NTC 2018, al §C2.2.5, l'effettivo livello di robustezza di una costruzione dipende anche, ed in modo non trascurabile, dalle peculiarità del progetto, ed è estremamente complesso da quantificare attraverso prescrizioni progettuali, unicamente riconducibili a verifiche numeriche; esso attiene, più in generale, alla corretta concezione dell'organismo strutturale e dei suoi dettagli costruttivi.

In via generale, la progettazione delle costruzioni condotta secondo le prescrizioni contenute nelle NTC, tenuto conto dei criteri di progettazione per le azioni sismiche, garantisce il conseguimento di livelli di robustezza che possono essere ritenuti tipicamente soddisfacenti.

Le verifiche per le azioni eccezionali, riferite a scenari di rischio prevedibili in sede di progetto, fanno parte del complesso delle misure da adottare per il conseguimento della robustezza.

L'Eurocodice 1 – Parte 1-7 [1] definisce anche due stati limite di integrità strutturale:

- collasso parziale o totale di tipo sproporzionato e causato da un'azione accidentale o dalla crisi di un componente strutturale (che segue un criterio di accettabilità del collasso di singoli componenti);
- collasso di un singolo componente strutturale capace di porre a rischio l'incolumità delle persone (che, al contrario, un criterio di inammissibilità del collasso di singoli componenti).

Per le strutture di nuova costruzione la robustezza può essere verificata valutando che l'estensione del danno sia limitata per molteplici scenari di azioni o di danno localizzato, mentre per quelle esistenti valutando l'efficacia delle misure strutturali e non strutturali

applicate per ridurre il rischio e, quindi, la probabilità di che si raggiunga o si superi uno stato limite.

## **Valutazione della robustezza strutturale**

Gli approcci da utilizzare per la valutazione della robustezza dipendono innanzitutto dalla conoscenza della tipologia e dell'intensità dell'evento.

Nel caso di eventi di tipologia nota e la cui occorrenza ed intensità sono modellabili probabilisticamente grazie alla disponibilità di statistiche degli eventi passati, è possibile eseguire un'analisi quantitativa del rischio di collasso progressivo, in cui si considerano sia le incertezze legate all'azione che quelle associate alla struttura. Si ottiene, dunque, la probabilità di collasso che, sostanzialmente, moltiplicata per un valore esposto fornisce il valore atteso della conseguenza di un evento estremo, ovvero il rischio quantificato in termini di perdita economica o, ad esempio, di vite umane.

Spesso accade, però, che non vi siano statistiche sufficienti per caratterizzare una particolare tipologia di evento estremo, per cui non è possibile modellarlo probabilisticamente ed è necessario ricorrere ad un'analisi di scenario. Quest'ultima può essere basata sull'assunzione di uno scenario definito in termini di azioni (ad esempio un'esplosione che avviene ad una distanza  $R$  dalla struttura e con intensità  $A$ ) o di danno iniziale (ad esempio il collasso di un elemento strutturale verticale in una prefissata posizione). Il primo approccio si dice dipendente dalla minaccia, mentre il secondo si dice indipendente da essa. In entrambi i casi è comunque possibile valutare se e quanto si possa propagare il danno iniziale, eventualmente degenerando in un collasso progressivo. E' così possibile quantificare la robustezza attraverso un'opportuna misura della capacità portante della struttura pre-danneggiata. Quando la robustezza viene valutata per eventi sconosciuti e imprevedibili, si dice anche che si procede con un approccio alle conseguenze, deterministico o probabilistico che sia.

## **Azioni estreme**

### ***Modellazione strutturale in condizioni estreme***

Il tema della robustezza è collegato alle azioni estreme, per cui è necessario focalizzare l'attenzione su alcuni aspetti che distinguono queste ultime da quelle convenzionali. Il primo punto da affrontare è relativo alla loro modellazione; infatti, si deve tener conto di fattori quali le non linearità meccaniche, le non linearità geometriche ed l'amplificazione dinamica dei carichi gravitazionali.

Il primo aspetto include la sensibilità delle proprietà meccaniche dei materiali alla velocità di deformazione (fenomeno noto in letteratura come "strain rate sensitivity"); infatti, è possibile definire una relazione tra il valore della resistenza meccanica dinamica e la velocità con cui si deforma il materiale. Considerando un'azione applicata dinamicamente alla struttura, la resistenza del materiale sarà amplificata per un fattore di incremento dinamico, che varia al variare del materiale in esame e della velocità con cui si deformerà. Ovviamente, nella modellazione meccanica si dovrà tenere conto anche della fessurazione e della plasticità dei materiali.

Le non linearità geometriche, invece, sono relative alla modellazione dei meccanismi resistenti nel campo dei grandi spostamenti; infatti, rispetto al campo dei piccoli spostamenti, entrano in gioco delle riserve aggiuntive di resistenza, dovute a meccanismi ad arco e a meccanismi a fune (o catenaria). Grazie a tali riserve si ottiene una capacità di spostamento verticale di gran lunga superiore rispetto al campo dei piccoli spostamenti e, soprattutto, la possibilità di fronteggiare azioni gravitazionali ben maggiori, come illustrato in fig. 1 dove  $P$  indica il carico applicato all'elemento strutturale e  $V$  lo spostamento verticale dovuto a tale carico.

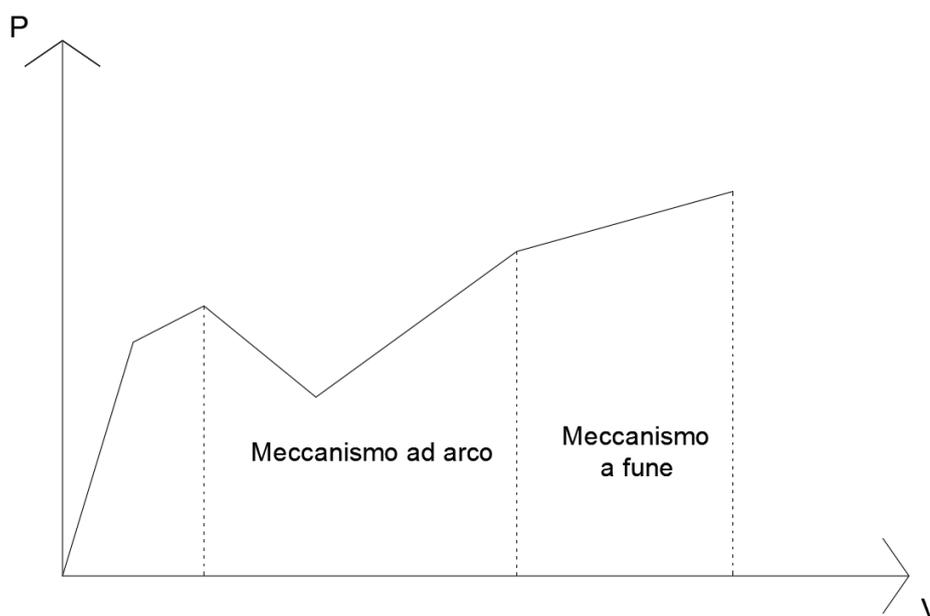
Il terzo ed ultimo effetto non è gradito dalla struttura; esso comporta l'amplificazione dei carichi gravitazionali a seguito della perdita di un elemento strutturale. In particolare, ne risentono maggiormente i carichi in prossimità dell'elemento che viene rimosso a seguito dell'evento. A tale proposito, viene utilizzato un fattore di amplificazione dinamica  $\Omega_N$  dipendente da un parametro che fornisce indicazioni sulla plasticizzazione o meno degli elementi strutturali e varia in funzione della tipologia di edificio considerato (in cemento armato, acciaio, muratura, etc.).

La combinazione eccezionale dei carichi è fornita dall'Unified Facilities Criteria [6] ed è data dalla equazione (1):

$$G_N = \Omega_N (1.2DL + 0.5LL) \quad (1)$$

in cui  $DL$  è indicativo dei carichi permanenti ed  $LL$  di quelli variabili.

Il fattore di amplificazione dinamica dei carichi risulta essere massimo in fase elastica, quindi andrebbe considerato tale per strutture critiche il cui danno diffuso non è ammesso, e tende a decrescere all'aumentare dell'escursione plastica, per le strutture ordinarie. Questo perché al diminuire dell'importanza della struttura si può ammettere un danno progressivamente crescente.



**Figura 1** – Modellazione dei meccanismi resistenti nel campo dei grandi spostamenti

### **Tipologie di analisi strutturale in condizioni estreme**

In condizioni estreme, per eseguire un'analisi della struttura, è possibile utilizzare due approcci in funzione della dipendenza dell'evento o meno dalla minaccia. Entrambi prevedono una prima fase di analisi locale, quindi relativa al singolo elemento, e successivamente una analisi alla scala globale, cioè relativa all'intera struttura.

L'approccio dipendente dalla minaccia (threat-dependent method) si sviluppa in due fasi: dapprima si effettua un'analisi locale del singolo elemento sottoposto all'azione estrema, in modo da valutare se esso raggiunge o meno la crisi; il conseguimento della crisi permette di procedere con la seconda fase, in cui viene effettuata un'analisi globale della struttura, per stimare le conseguenze dell'evento, facendo riferimento ad i carichi gravitazionali agenti in quel momento sulla struttura.

L'approccio indipendente dalla minaccia (threat-independent method o alternate load path method) consta anch'esso di due fasi: durante la prima si effettua la rimozione di uno o più elementi critici (come ad esempio pilastri o pareti) in modo da valutare, in una seconda fase, la capacità della struttura nel redistribuire i carichi gravitazionali ad essa applicati.

L'analisi globale della struttura può essere effettuata, in genere, secondo due metodologie di analisi alternative:

- analisi statica non lineare, in cui i carichi verticali vengono applicati alla struttura attraverso l'utilizzo di un moltiplicatore  $\alpha$ , secondo la combinazione:

$$\alpha(G_1 + G_2 + 0.3Q_k) \quad (2)$$

per cui la struttura si considera robusta se il valore massimo di  $\alpha$  è maggiore dell'unità (fig. 2);

- analisi dinamica non lineare riproduce esattamente il fenomeno fisico, per cui l'elemento strutturale viene istantaneamente rimosso e vengono monitorate le oscillazioni prevalentemente verticali della struttura, valutando il verificarsi o meno del collasso.

Considerando, ad esempio, la rimozione di un pilastro in una struttura intelaiata e monitorando lo spostamento verticale del nodo della trave, al di sopra dell'elemento rimosso, la fig. 3 mostra uno dei possibili risultati di un'analisi dinamica non lineare. Il numero di cicli compiuti dall'oscillazione delle travi sarà tanto maggiore quanto minore è il danno. Una volta raggiunto lo spostamento verticale massimo, la struttura tende a stabilizzarsi fino ad uno spostamento residuo  $\delta_r$ , cui si associa la riparabilità della struttura. I cicli, poi, tendono ad amplificarsi fino ad una variazione della curva, coincidente con il collasso, che si può verificare per rottura di una delle travi, per una incapacità della struttura di trovare un nuovo equilibrio o a causa di perdita di convergenza del programma.

Dati sperimentali, in fig. 4, evidenziano che l'analisi statica non lineare, condotta senza amplificare i carichi, conduce ad una forte sovrastima della resistenza al collasso progressivo.

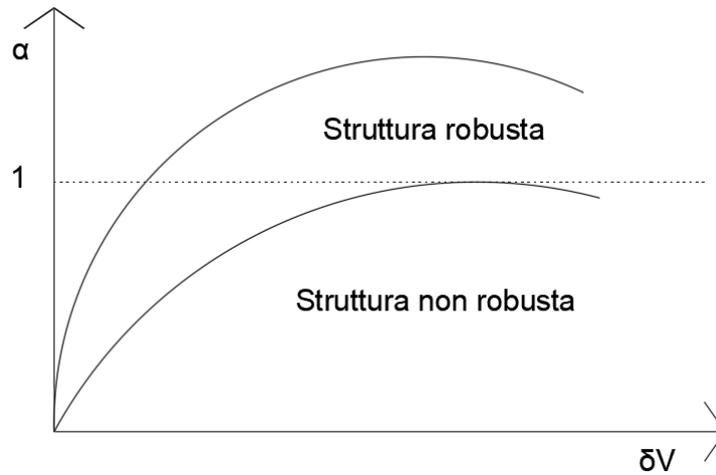


Figura 2 – Andamento del moltiplicatore dei carichi al variare del parametro di spostamento.

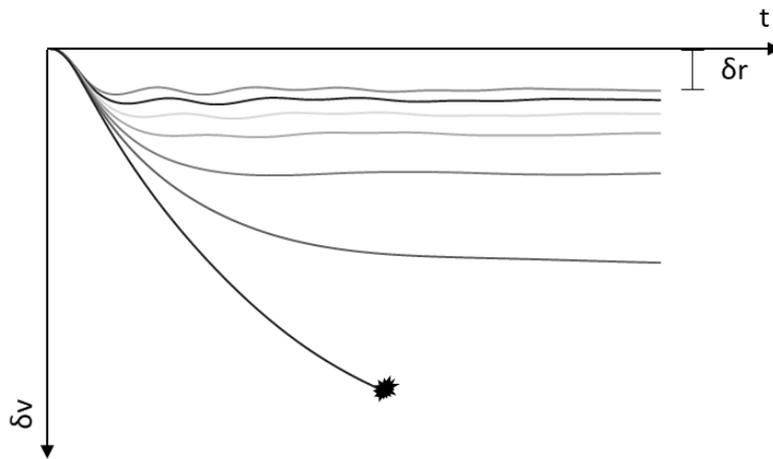


Figura 3 – Storia temporale dello spostamento al variare dei carichi gravitazionali applicati alla struttura.

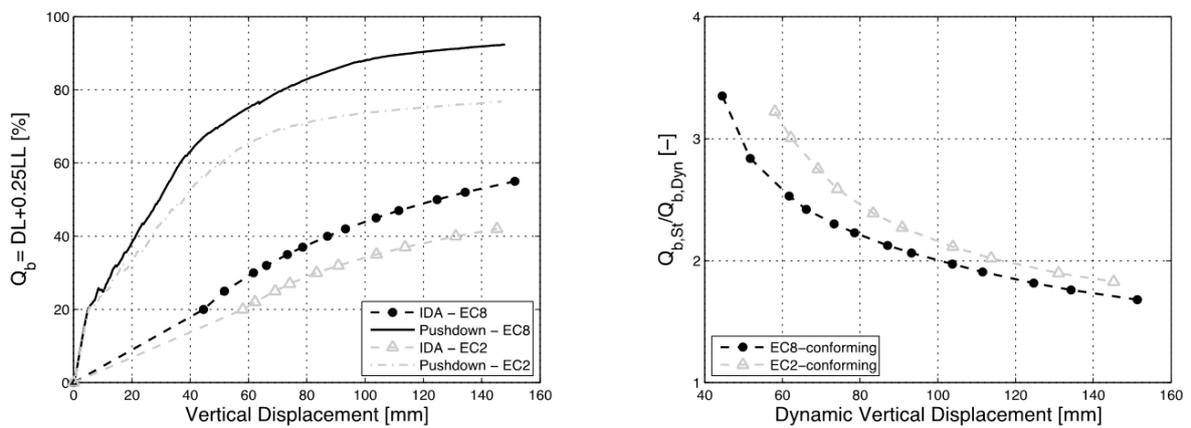


Figura 4 – Confronto tra i risultati di analisi dinamiche incrementali e analisi statiche non lineari.

## Analisi di singoli elementi strutturali soggetti ad azioni estreme

Per la valutazione della capacità di un elemento soggetto ad azioni dinamiche impulsive si fa riferimento ai diagrammi pressione–impulso, indicando con  $P$  la pressione e con  $I$  l'impulso (fig. 5). Infatti, mentre per il generico elemento sollecitato da azioni pseudo-statiche è sufficiente modellare l'azione e la capacità di fronteggiarla mediante un parametro statico come la pressione orizzontale applicata all'elemento, in presenza di azioni impulsive il parametro tempo diviene estremamente importante e, a tal fine, è possibile utilizzare una modellazione con i diagrammi pressione–impulso. Questi ultimi forniscono una migliore previsione della capacità a taglio e flessione dell'elemento, per qualsiasi tipo di carico, e lo stato limite associato ad un dato livello di danno è espresso in termini di perdita di capacità portante assiale. All'interno del diagramma vengono definite tre regioni limite, ciascuna caratterizzata da un differente livello di danno: basso, medio e grave. Ogni regione di sicurezza rispetto ad un dato livello di danno è delimitata superiormente da una curva  $P-I$  con andamento pressoché iperbolico. La frontiera della regione di sicurezza è anche caratterizzata da due asintoti: uno orizzontale, che definisce il minimo livello di pressione critica ( $P_{cr}$ ) per il quale si può conseguire un dato livello di danno; uno verticale, che individua il minimo livello di impulso critico ( $I_{cr}$ ) che può determinare lo stesso livello di danno. La frontiera definita nella condizione di danno grave rappresenta il limite oltre il quale le coppie  $P-I$  provocano il collasso dell'elemento strutturale, mentre le altre due condizioni di danno (basso e medio) non producono il collasso ma soltanto perdite economiche legate alla riparazione dell'elemento e all'inagibilità della porzione di struttura coinvolta per un certo periodo di tempo.

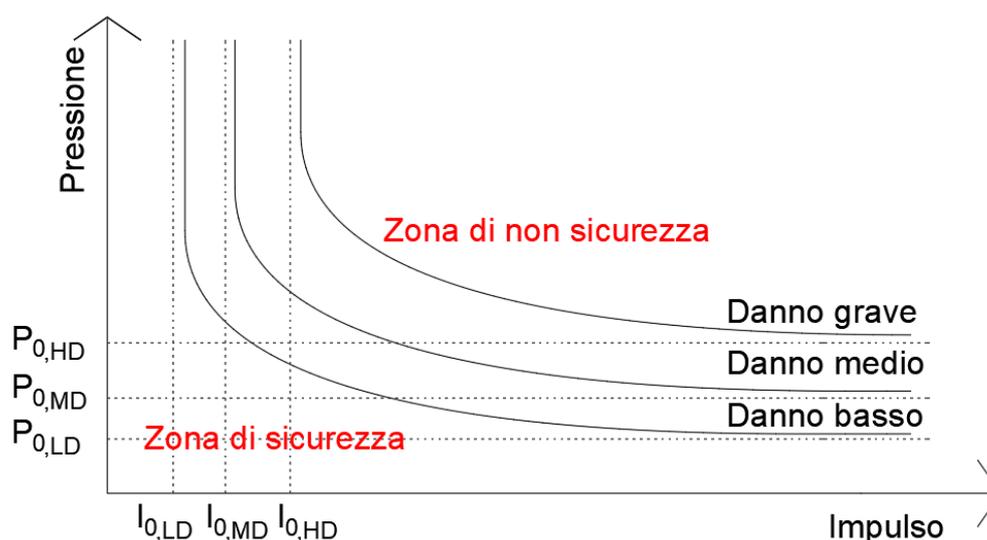


Figura 5 – Diagrammi pressione–impulso associati a differenti livelli di danno.

## Analisi della struttura pre-danneggiata

Considerata l'importanza e l'attualità del tema, numerosi studi di ricerca hanno focalizzato l'attenzione su di esso, con l'obiettivo di elaborare linee guida per la progettazione di strutture

robuste. Nel seguito verrà trattato brevemente un caso studio relativo a un edificio intelaiato in cemento armato [7], in modo da evidenziarne gli aspetti più significativi in relazione al tema discusso.

L'approccio utilizzato per la valutazione della robustezza rientra nelle analisi indipendenti dalla minaccia, per cui sono stati identificati diversi scenari di rimozione di singole colonne, in modo da valutare, poi, la capacità della struttura di redistribuire i carichi gravitazionali ad essa applicati.

La non linearità della struttura è stata tenuta in conto con una modellazione a plasticità diffusa basata su di un approccio a fibre. Tale modellazione, nel programma di calcolo utilizzato, consiste nell'impiego di elementi finiti con formulazione basata sulle forze. Per questo tipo di analisi questa modellazione comporta molti vantaggi, tra cui: nessun obbligo di svolgere, per gli elementi, un'analisi propedeutica momento-curvatura; alcun bisogno di introdurre un comportamento isteretico associato agli elementi; modellazione diretta dell'interazione carico assiale-momento; rappresentazione diretta del carico biassiale; interazione tra le resistenze flessionali nelle direzioni ortogonali. Inoltre, l'uso di elementi discretizzati in fibre consente una simulazione accurata dei comportamenti flessionali, ad arco e a catenaria, di cui è stato discusso in precedenza. Nello specifico, ogni sezione trasversale dell'elemento è stato suddiviso in 200 fibre.

La non linearità geometrica è stata tenuta in conto attraverso una formulazione co-rotazionale alla base del programma di calcolo, che tiene in considerazione sia i grandi spostamenti/rotazioni che le grandi deformazioni, indipendenti rispetto alla corda dell'elemento. Questo tipo di formulazione si basa su una precisa descrizione delle trasformazioni cinematiche associate ai grandi spostamenti e alle rotazioni tridimensionali dell'elemento trave-colonna. Ciò porta, da un lato, a una corretta definizione delle deformazioni e delle sollecitazioni nell'elemento e, dall'altro lato, alla naturale definizione degli effetti delle non linearità geometriche sulla matrice di rigidità.

La valutazione della risposta strutturale al collasso progressivo è avvenuta attraverso analisi dinamiche non lineari o attraverso analisi dinamiche incrementalì (IDA), ovvero una serie di analisi dinamiche non lineari eseguite, ognuna, con un incremento di intensità dei carichi gravitazionali applicati. Ogni analisi è eseguita con lo scopo di valutare la risposta o la capacità della struttura in seguito alla rimozione istantanea di una colonna dal modello strutturale, anche considerando la variazione di deformazione ultima dell'acciaio. Una volta rimossa la generica colonna, imponendo un tempo di disattivazione ad essa, è stato monitorato lo spostamento verticale  $D_v$  subito dal nodo trave-colonna in prossimità della colonna rimossa, fino al raggiungimento della condizione di collasso. A tale scopo, la combinazione di carico gravitazionale utilizzata per la simulazione del collasso progressivo è quella definita dall'eq. (1).

Da tali analisi è stato ricavato, per ogni scenario, la capacità ultima della struttura, in termini di carico e di spostamento. I risultati di tale studio sono stati riportati, così come detto in precedenza, in diagrammi che forniscono l'oscillazione della trave al variare della percentuale del carico di progetto applicata sulla struttura. In luogo dello spostamento verticale, in fig. 6 è stato considerato il suo rapporto con la luce della trave, generalmente definito come drift  $\theta$ .

Una visione più complessiva sulla sensibilità della capacità strutturale di evitare il collasso progressivo rispetto alla posizione della colonna rimossa e della deformazione ultima dell'acciaio è illustrata in fig. 7 attraverso una curva IDA.

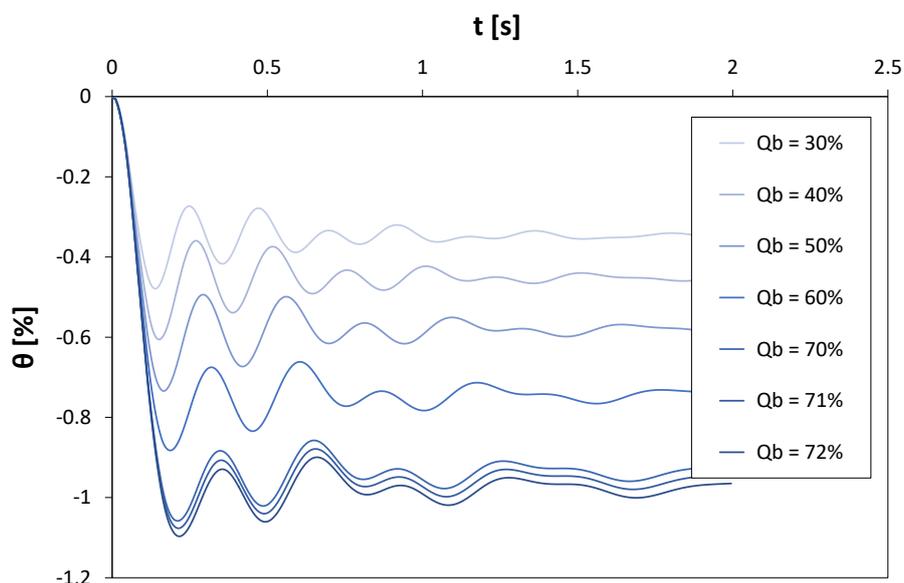


Figura 6 – Storia temporale del drift verticale per uno scenario di rimozione di una colonna.

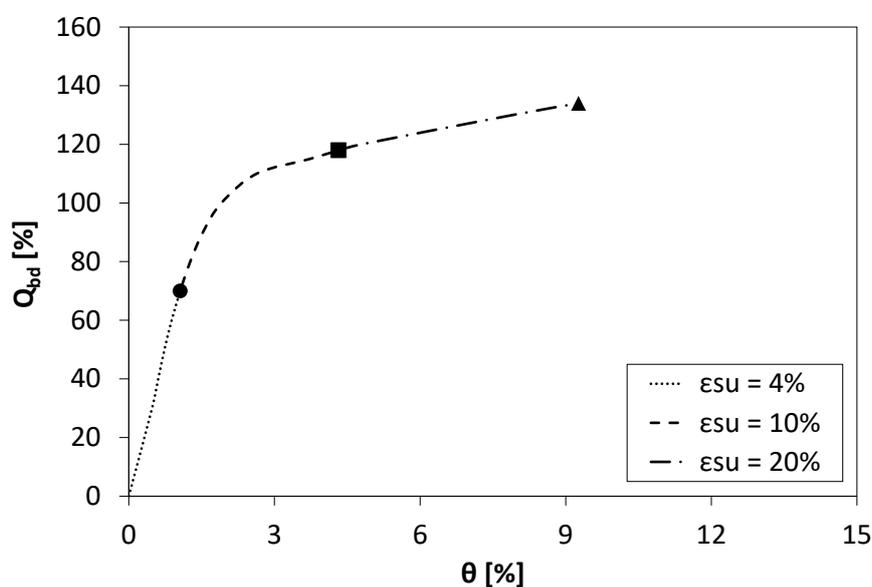


Figura 7 – Curve IDA relative ad uno scenario di rimozione di una colonna.

## Conclusioni

Il tema trattato in quest'articolo riveste un ruolo importante nell'ambito dell'ingegneria civile, in quanto legato ad azioni che comportano ingenti perdite, sia da un punto di vista economico che umano. È quindi un problema particolarmente sentito in ambito nazionale e internazionale e, come detto in precedenza, assume una certa rilevanza nella gestione del

rischio di infrastrutture critiche o rilevanti per la risposta alle emergenze. Sono ancora tanti i problemi aperti sulla robustezza e ulteriori ricerche sono necessarie per migliorare le indicazioni fornite dai codici normativi più evoluti. Ciononostante, gli autori del presente articolo hanno cercato di fornire alcuni elementi essenziali per valutare la sicurezza strutturale in presenza di eventi estremi, che sempre meno possono considerarsi rari anche a causa dei cambiamenti climatici e dell'evoluzione subita dall'assetto geopolitico mondiale.

## Riferimenti bibliografici

- [1] Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-7: General actions – Accidental actions. Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 2006.
- [2] DM 14.01.2008: Norme tecniche per le costruzioni. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Roma, 2008.
- [3] DM 17.01.2018: Norme tecniche per le costruzioni. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Roma, 2018.
- [4] N. Augenti, R. Romano, F. Parisi. Il Master di II livello in Ingegneria Forense presso l'Università di Napoli Federico II – Una realtà formativa con caratteristiche di unicità. Ingenio, 2019.
- [5] Circolare 21 gennaio 2019 n.7 " Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018"
- [6] DoD. Unified facilities criteria (UFC): Design of structures to resist progressive collapse. Washington, DC: Department of Defence, 2013.
- [7] F. Parisi, M. Scalvenzi, E. Brunesi. Performance limit states for progressive collapse analysis of reinforced concrete framed buildings. Structural Concrete, 20(1), 68-84, 2019.