

Giornate AICAP 2014

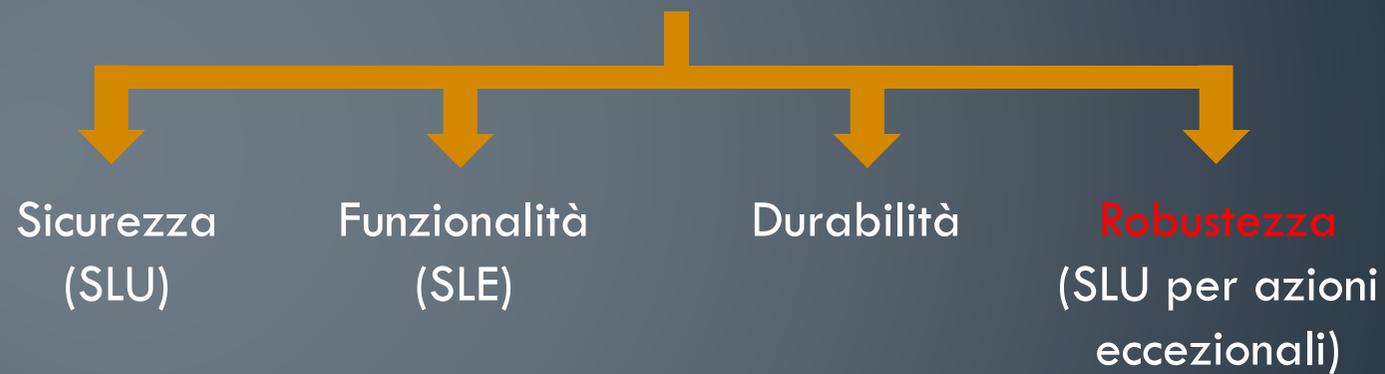
22-23 marzo

Progettazione con riguardo
alle azioni eccezionali

Prof. Ing. G. Mancini
Politecnico di Torino



Requisiti prestazionali da rispettare nel progetto delle costruzioni



fib Model Code 2010 (1)

La robustezza misura la capacità di un sistema strutturale nel mobilitare percorsi alternativi dei carichi nell'intorno di un'area di danno localizzato



È relativa sia alla resistenza che alla geometria del sistema strutturale ed in particolare al grado di iperstaticità del sistema strutturale (numero di potenziali percorsi alternativi dei carichi)

fib Model Code 2010 (2)

La robustezza svolge un ruolo fondamentale nel mantenere la capacità di un sistema strutturale di svolgere la sua funzione durante eventi quali la presenza di azioni eccezionali oppure in conseguenza di errori umani



EN1990 (1)

Basis of structural design (2002)

Requisito prestazionale robustezza

Una struttura deve essere progettata ed eseguita in modo tale da non essere danneggiata, in misura iperproporzionale rispetto alla causa, da eventi quali:

- Esplosioni
- Impatto
- Conseguenze di errori umani

EN1990 (2)

Il danno potenziale provocato da tali eventi può essere evitato o contenuto con l'impiego di una o più delle seguenti strategie:

- Evitando o eliminando o riducendo i rischi cui la struttura può essere soggetta
- Scegliendo una forma strutturale poco sensibile alle azioni considerate

EN1990 (3)

- Scegliendo una forma strutturale che possa sopravvivere adeguatamente alla rimozione accidentale di alcune membrature o parti limitate della struttura, a prezzo di danni localizzati
- Evitando sistemi strutturali che possano collassare senza preavviso
- Incatenando mutuamente le varie parti strutturali

EN1990 (4)

Combinazione eccezionale

$$E_d = E\{G_{k,j}; P; A_d; (\psi_{1,1} \text{ or } \psi_{2,1})Q_{k,1}; \psi_{2,i}Q_{k,i}\} \quad j \geq 1; i > 1$$



Azione eccezionale di progetto

La combinazione per situazioni eccezionali di progetto può



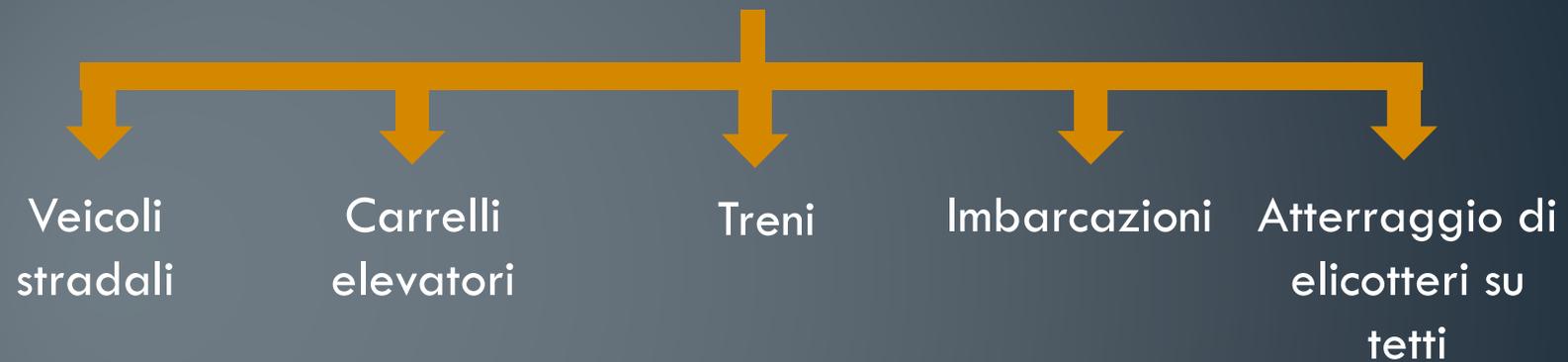
coinvolgere direttamente una azione eccezionale $A_d \neq 0$ (fuoco o impatto)



riguardare il comportamento strutturale dopo l'evento ($A_d=0$)

EN1991-1-7 Accidental actions

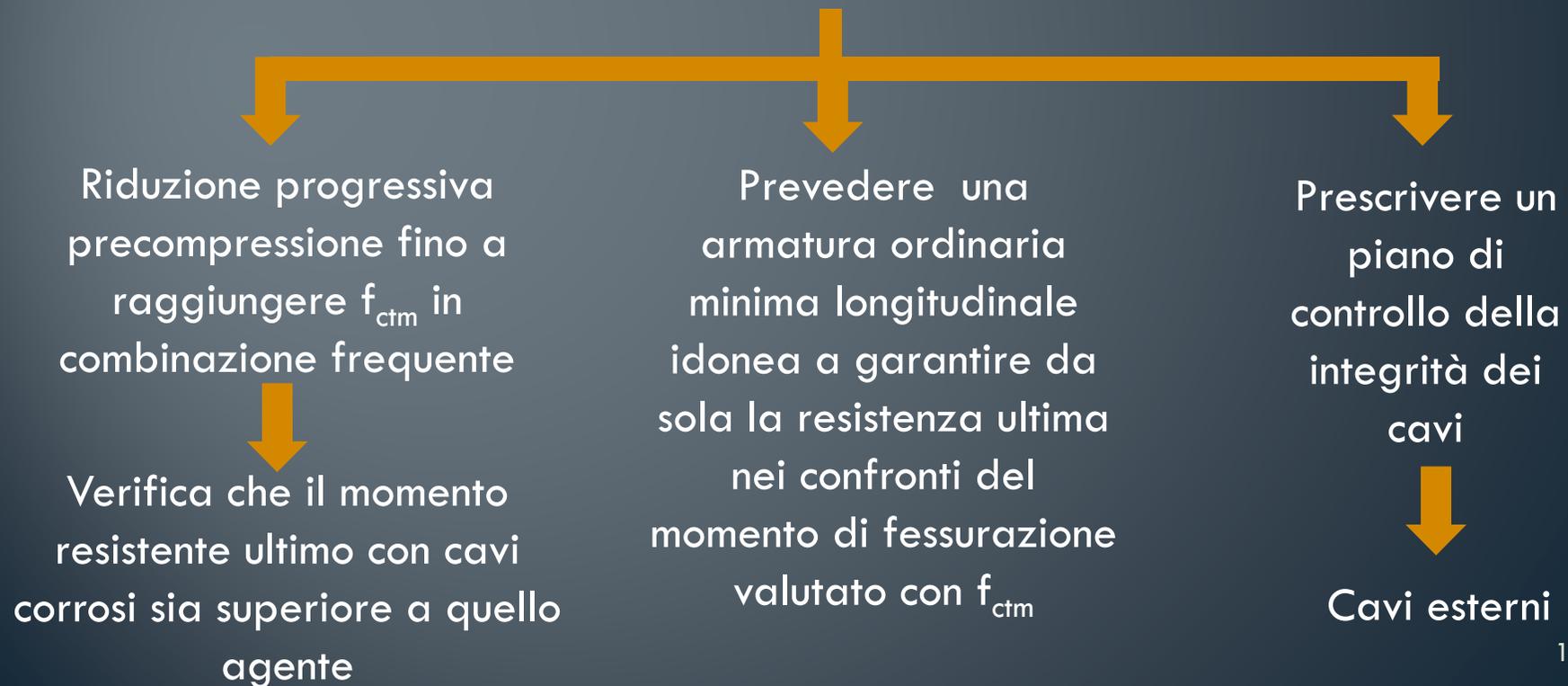
(1) Impatto



(2) Esplosioni interne alle strutture

EN1992-2 (2002)
Concrete bridges
5.10.1 (106) e 6.1 (109)

Robustezza in caso di corrosione dei cavi / trefoli di
precompressione



NTC 2008

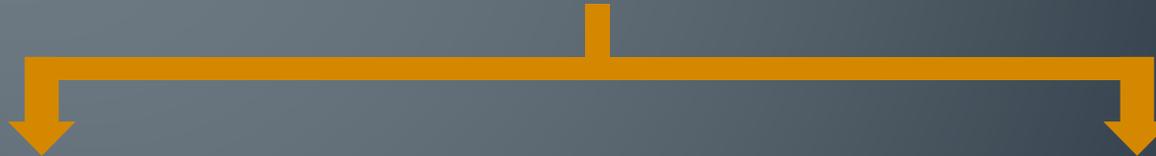
Essenzialmente allineato con gli Eurocodici, ovviamente
con minore dettaglio

Scenario di rischio

Gli eventi da considerare sono definiti per il singolo progetto delle autorità competenti e dal proprietario dell'opera



Natura delle azioni



Di origine interna

Di origine esterna

Cause di origine interna

- Grandi variazioni delle resistenze attese (meno rare di quanto ci si possa aspettare)
- Grandi variazioni delle proprietà di un prodotto, in conseguenza di errori umani
- Errori umani nella concezione e nel progetto, non rilevati durante tutto il processo

Cause di origine esterna

- Esplosioni di gas
- Impatto di veicoli
- Tsunami
- Azioni terroristiche

Grande variabilità di
tali cause



Massimo evento credibile (max massa
attesa di un camion, max velocità, max
angolo di impatto...)

Le cause esterne possono agire in termini di forze o deformazioni a cui la struttura sarà soggetta



Importante per la valutazione della robustezza è stabilire se sono dominanti le forze o le deformazioni

Strutture robuste



Strutture che manifestano rotture non catastrofiche che spesso portano ad una limitazione degli effetti dell'evento

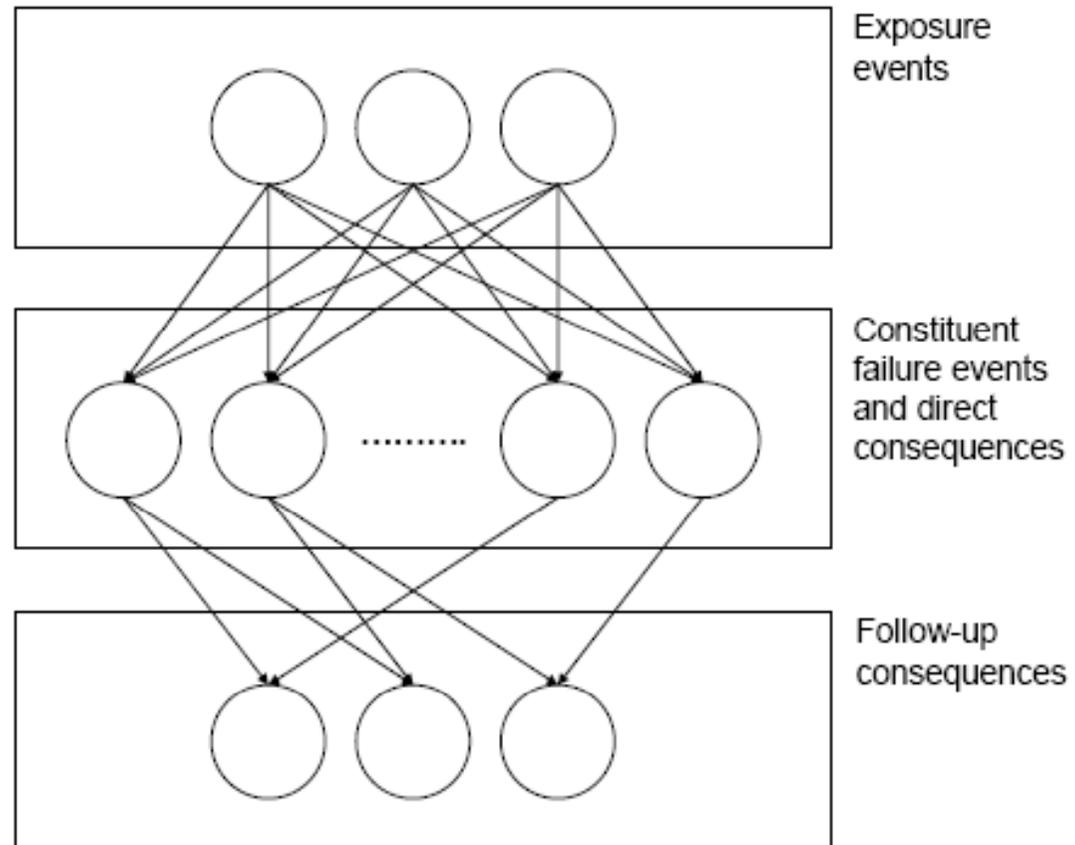


Progetto con gerarchie delle resistenze



Rotture non catastrofiche previste a livelli bassi dell'azione

Rappresentazione del sistema



- Prima difesa: elementi strutturali del sistema direttamente esposti;
- Conseguenze dirette: danni e collassi degli elementi di prima difesa;
- Conseguenze indirette: danni e collassi delle rimanenti parti strutturali del sistema;



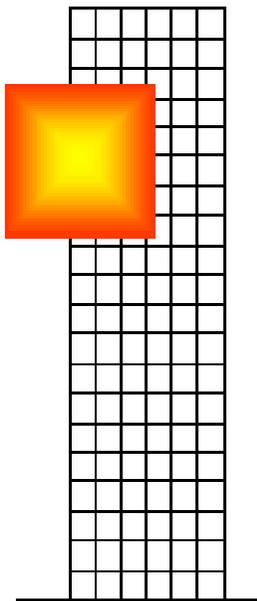
strutture robuste



danni limitati

Step 1

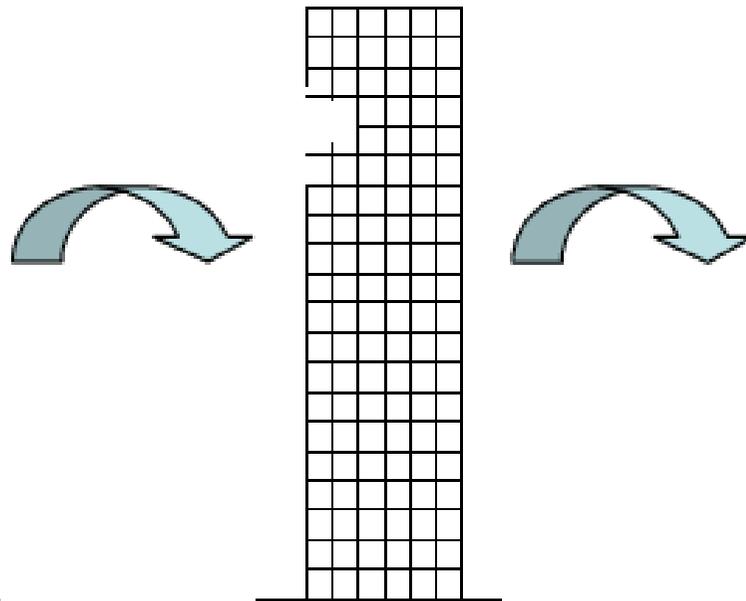
Identical and modelling
of relevant accidental
hazards



Assessment of the probability of
occurrence of different hazards
with different intensities

Step 2

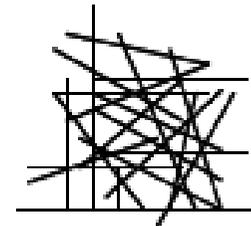
Assessment of damage
states to structure from
different hazards



Assessment of the probability of
different states of damage and
corresponding consequences
for given hazards

Step 3

Assessment of the
performance of the
damaged structure



Assessment of the probability of inadequate
performance(s) of the damaged structure
together with the corresponding consequence(s)

Scenario formale di approccio

Step 1: modellazione dei rischi H_i e delle relative esposizioni;

Step 2: valutazione dei danni diretti D_i ;

Step 3: valutazione del conseguente comportamento globale della struttura S_k e delle corrispondenti conseguenze globali $C(S_k)$

Definizione del rischio

$$R = \sum_{i=1}^{N_H} p(H_i) \sum_{j=1}^{N_D} \sum_{k=1}^{N_S} p\left(\frac{D_j}{H_i}\right) p\left(\frac{S_k}{D_j}\right) C(S_k)$$

N_H = Numero di rischi

N_D = Numero dei danni locali D_j

N_S = Numero dei tipi di comportamento conseguenti S_k

$p(H_i)$ = Probabilità di intervento del rischio H_i

$p(D_i/H_i)$ = Probabilità di intervento di danno locale D_i
dovuto da H_i

$p(S_k/D_i)$ = Probabilità di intervento della risposta
strutturale S_k per effetto del danno locale D_i

$C(S_k)$ = Le conseguenze (monetizzate) del comportamento
strutturale S_k

- I metodi che tendono a ridurre il termine $p(H_i)$ sono classificati come “event control” (EC)
- I metodi che riducono il termine $p(D_i/H_i)$ sono noti come “specific load resistance method” (SLR)

- I metodi che minimizzano la possibilità di collasso progressivo dovuto a danno locale $p(S_k/D_i)$ sono noti come “alternate load path method” (AP)
- I metodi che minimizzano il termine $C(S_k)$ sono noti come “Reduction of consequences method” (RC)

Base teorica per la quantificazione della
robustezza



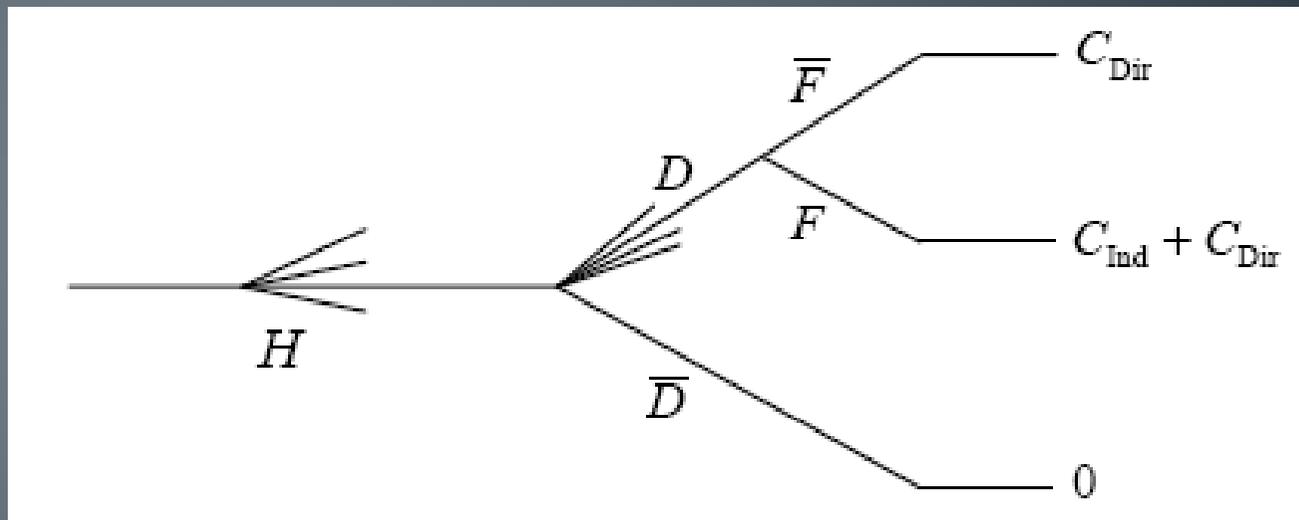
Valutazione di un
indice di robustezza



3 differenti livelli

1. indice di robustezza basato su una completa analisi di rischio, in cui le conseguenze siano separate in dirette e indirette;
2. indice probabilistico di robustezza basato sulle probabilità di collasso del sistema strutturale per struttura danneggiata ed integra;
3. indice deterministico di robustezza basato su valutazioni di resistenza (ad es. alle azioni orizzontali) per struttura danneggiata ed integra.

Albero degli eventi per la quantificazione della robustezza



H = valore estremo dell'azione / azione accidentale / processo di deterioramento

= elementi che restano integri;

D = elementi danneggiati;

F = collasso parziale o globale della struttura;

= sopravvivenza della struttura senza ulteriori danni;

C_{dir} = conseguenze dirette;

$C_{dir} + C_{ind}$ = conseguenze dirette ed indirette

Espressione generalizzata della robustezza

$$R = \sum_i \sum_j C_{\text{dir},ij} P(D_j | H_i) P(H_i) + \sum_k \sum_i \sum_j C_{\text{ind},ijk} P(S_k | D_j \cap H_i) P(D_j | H_i) P(H_i)$$

$C_{\text{dir},ij}$ = conseguenze attese del danno locale D_j a seguito di H_i ;

$C_{\text{ind},ijk}$ = conseguenze attese del danno globale S_k dato il danno locale D_j ;

Indice di robustezza

a) indice basato sulle conseguenze (dirette / indirette)

$$I_{rob} = \frac{R_{Dir}}{R_{Dir} + R_{Ind}}$$

R_{dir} / R_{ind} : rischi diretto / indiretto espressi dal 1° / 2° termine dell'equazione precedente

b) indice di robustezza probabilistico

$$RI = \frac{P_{f(\text{damaged})} - P_{f(\text{intact})}}{P_{f(\text{intact})}}$$

$P_{f(\text{damaged})} / P_{f(\text{intact})}$: probabilità di collasso per un sistema strutturale danneggiato / intatto

c) indice di robustezza deterministico

RSR = rapporto di riserva di resistenza

$$RSR = \frac{R_c}{S_c}$$

valore caratteristico della resistenza
di taglio alla base

valore di calcolo del taglio alla base
allo SLU

$$RIF_i = \frac{RSR_{fail,i}}{RSR_{intact}}$$

effetto del danno all'elemento *i*
sulla resistenza globale

Elementi per la robustezza

- Resistenza
- Monoliticità e solidarizzazione
- Seconda linea di difesa
- Iperstaticità
- Duttilità rispetto a rottura fragile
- Collasso progressivo rispetto a "zipper stopper"
- Capacity design ed elementi fusibili
- Dispositivi sacrificali e protettivi
- Scenario di knock-out
- Rigidezza
- Incrudimento
- Resistenza post-buckling
- Attenzione ed intervento attivo
- Prove
- Monitoraggio / controllo qualità
- Dispositivi meccanici

L'impiego degli elementi dipende dal tipo di evento e di risposta

Evento ripetitivo?

Evento controllato
da carico o da
deformazione?

Limiti fisici di forza,
energia, impatto,
deformazione ...?

Condizioni della
struttura dopo
l'evento?

Resistenza

- Fornire resistenza al di là del minimo richiesto dalle condizioni di progetto non accidentali
- Graduazione delle resistenze, incrementando quella delle zone o degli elementi critici

Monoliticità e solidarizzazione

- Preferire strutture monolitiche o rese tali tramite la solidarizzazione dei singoli elementi
- Ridurre al minimo necessario il numero dei giunti strutturali

Seconda linea di difesa

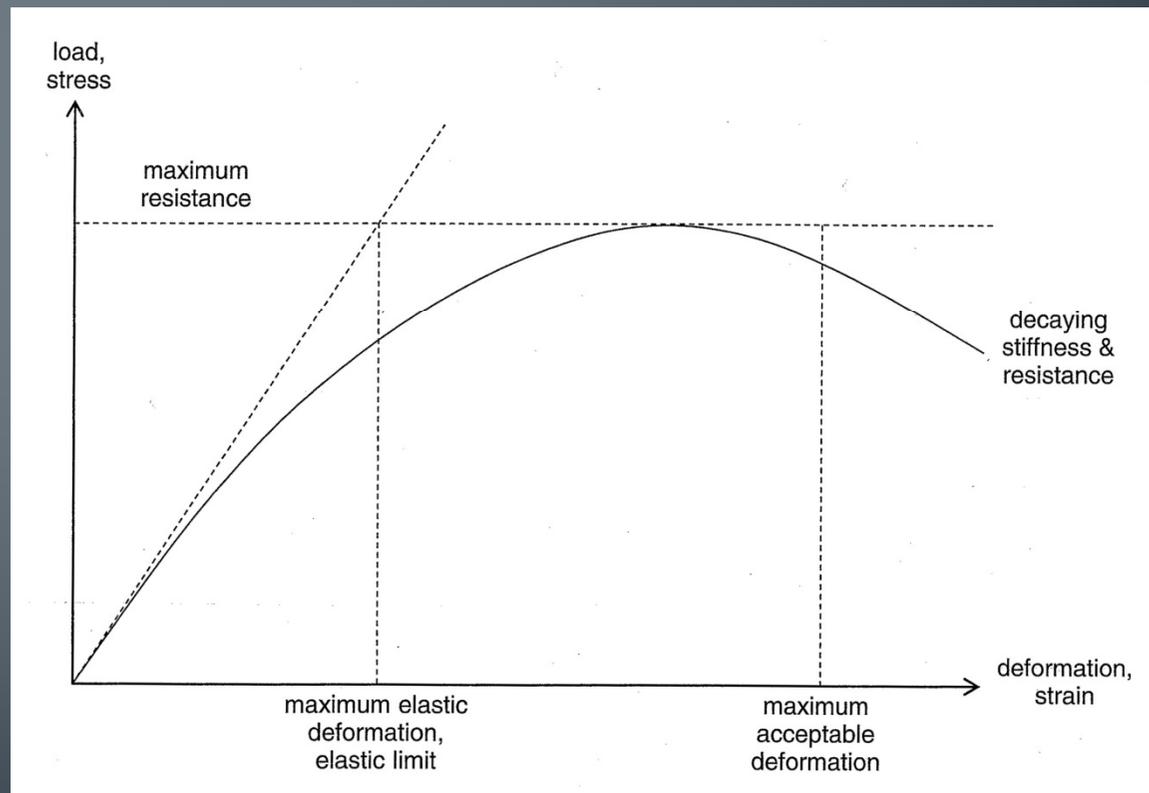
- Prevedere la possibilità di mobilitare più meccanismi di resistenti sequenziali, verificando la reale possibilità che possano esplicarsi attraverso le mutue connessioni

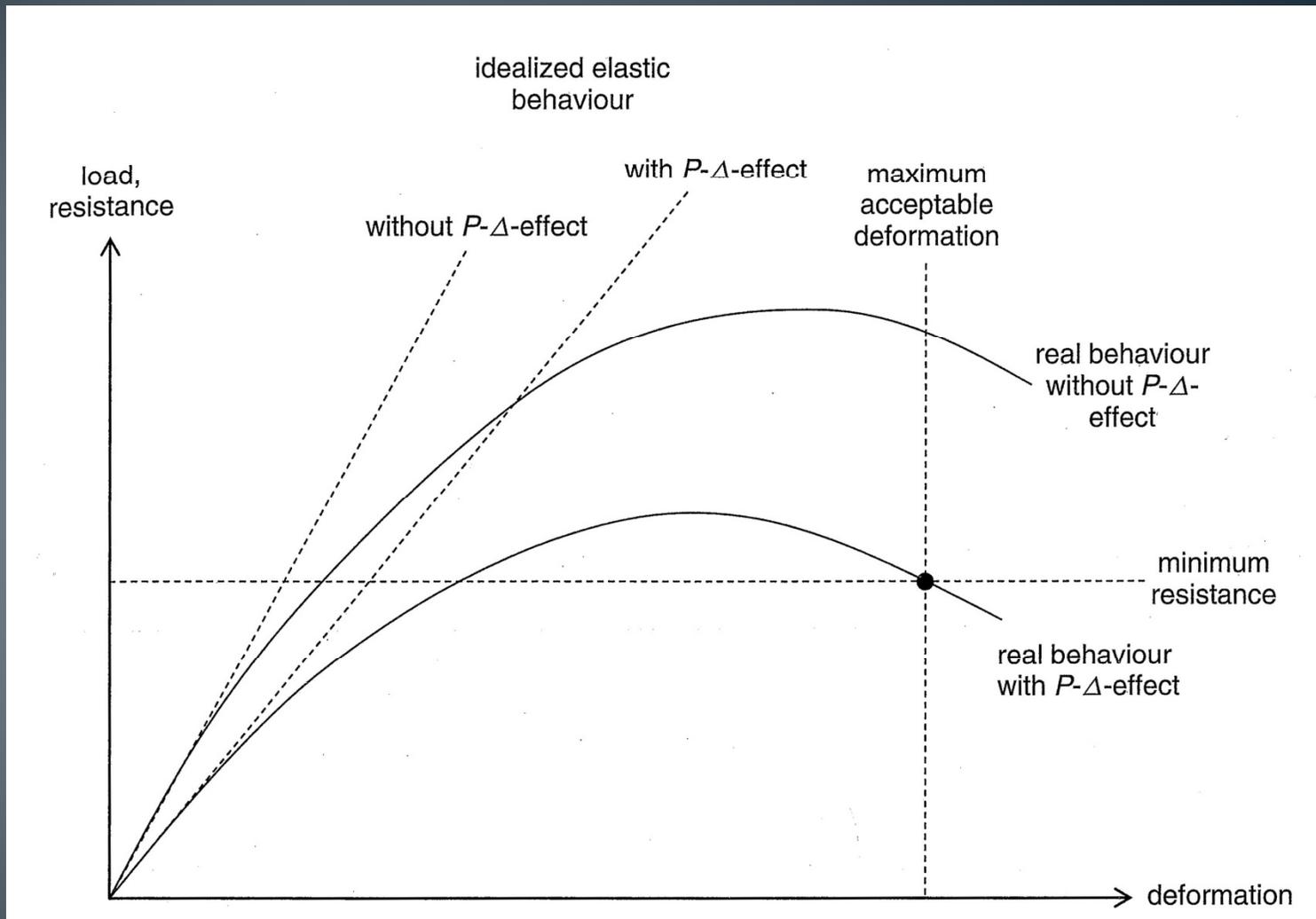
Iperstaticità

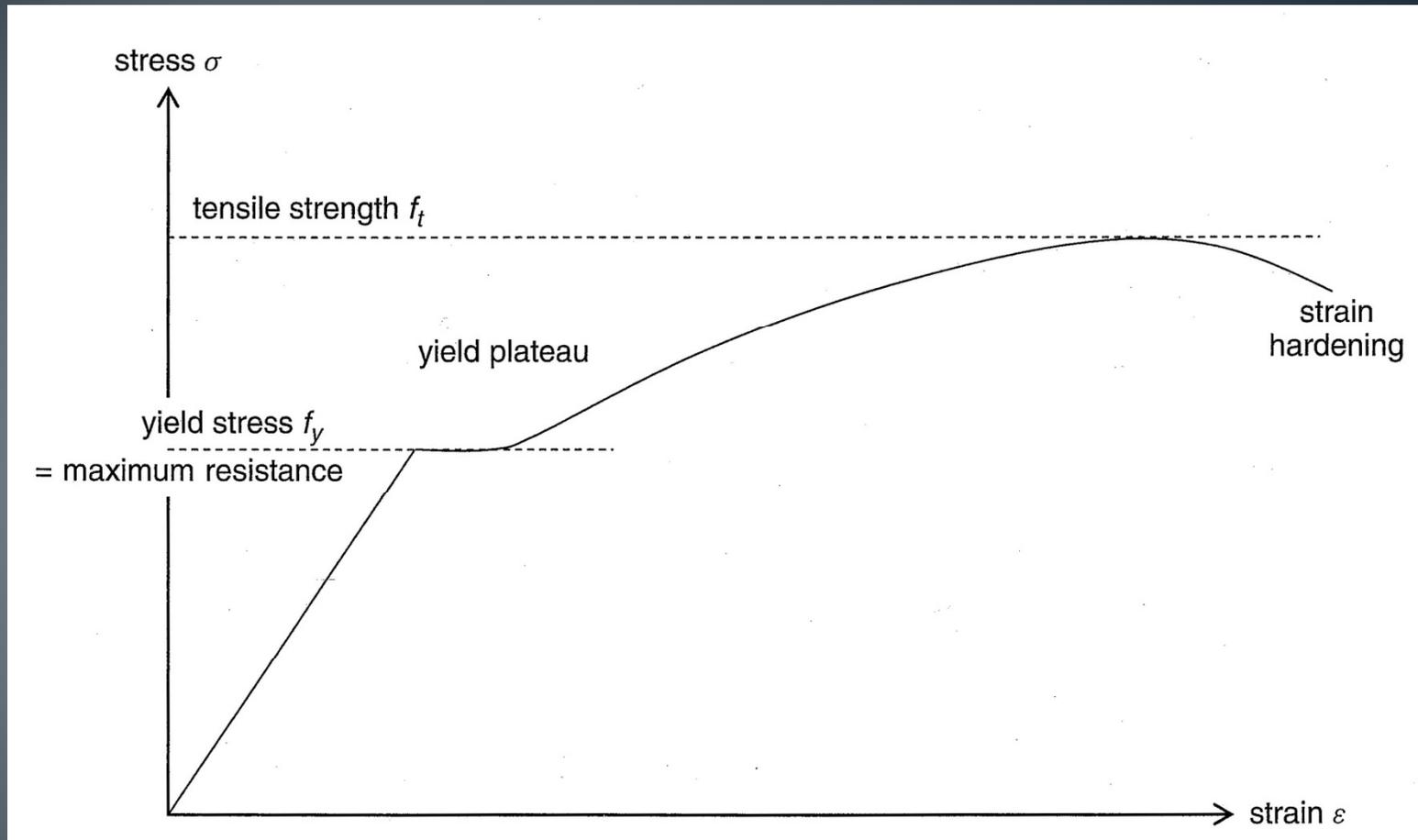
- Fornire ridondanza strutturale associata a comportamento duttile onde mobilitare tutte le possibili ridistribuzioni delle sollecitazioni

Duttilità rispetto a rottura fragile

$$\text{Duttilità} = \frac{\text{massima deformazione a rottura}}{\text{massima deformazione elastica}}$$







Collasso progressivo rispetto a zipper stopper

- Creare una serie di elementi di maggiore resistenza localizzati lungo la catena strutturale, tali da impedire il collasso a catena (effetto domino)

Capacity design ed elementi fusibili

- Utilizzare un criterio di gerarchia delle resistenze accoppiato alla presenza di zone indebolite (fusibili) idonee a limitare la trasmissione delle sollecitazioni tra parti adiacenti



Molto utile per scenari di deformazioni impresse (cedimenti fondali o sisma)

- Mantenere capacità resistente fino alle deformazioni ultime (minori di quelle impresse)
- Produrre dissipazione energetica

Dispositivi sacrificali e protettivi

- Utilizzare dispositivi sacrificali idonei a proteggere le strutture dagli eventi accidentali (fenders)

Scenario di knock-out

- Occorre progettare la struttura in modo tale che ogni singolo elemento strutturale possa essere eliminato senza provocare pesanti conseguenze

Rigidezza

- La struttura deve mantenere dopo l'evento sufficiente rigidezza alle azioni orizzontali onde limitare gli effetti di 2° ordine



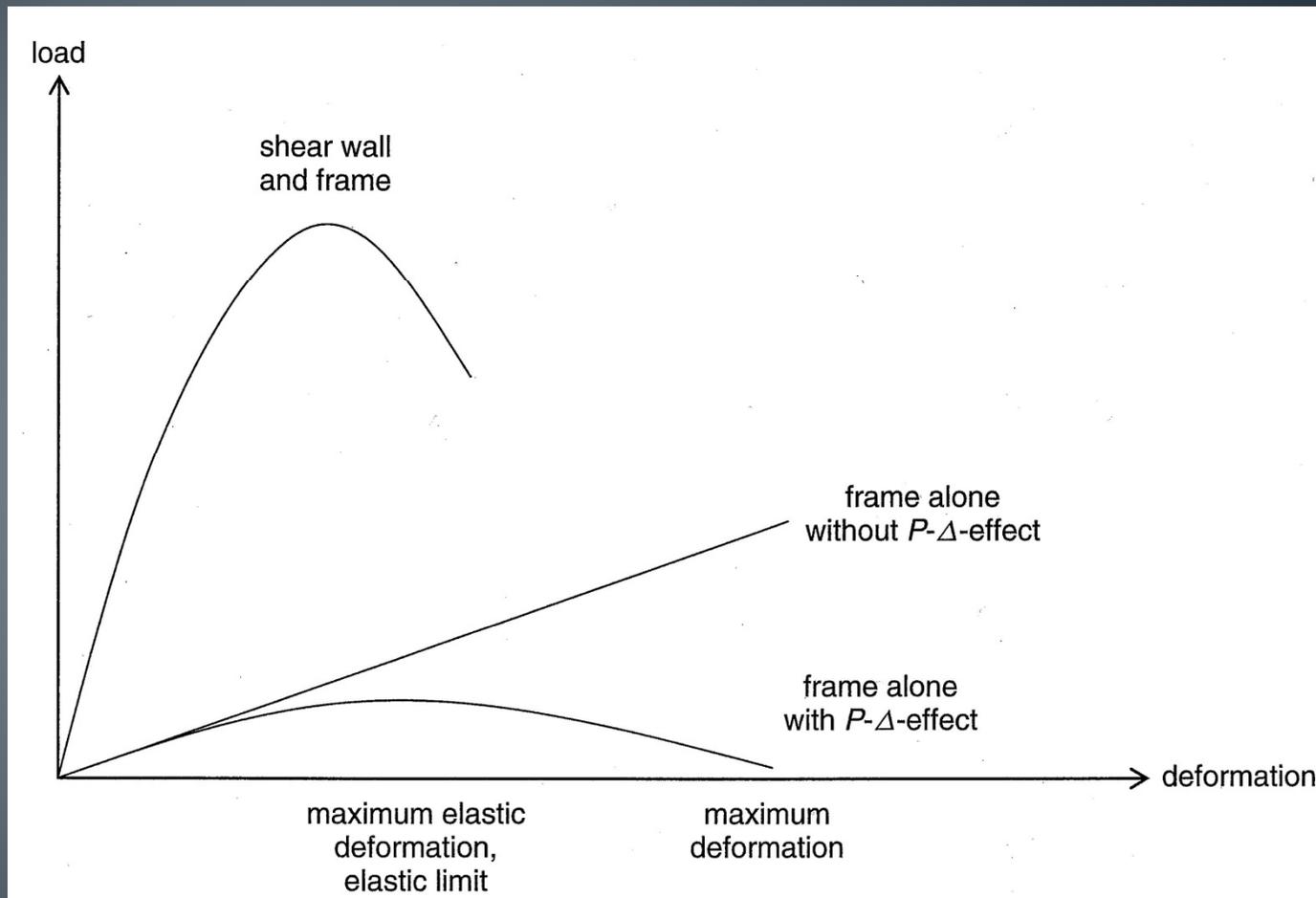
Shear walls combinati con telai



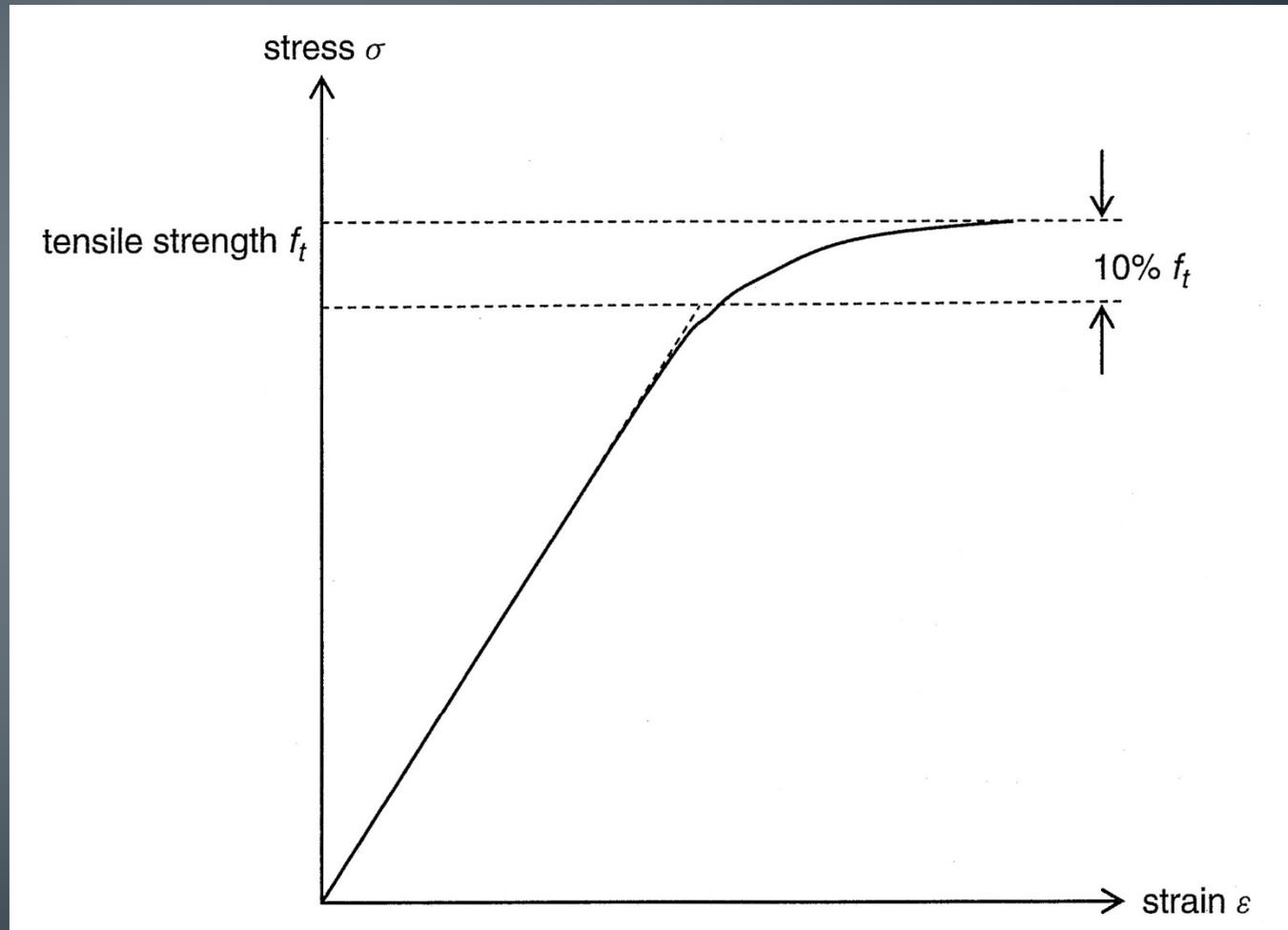
Rigidezza a
taglio shear
walls



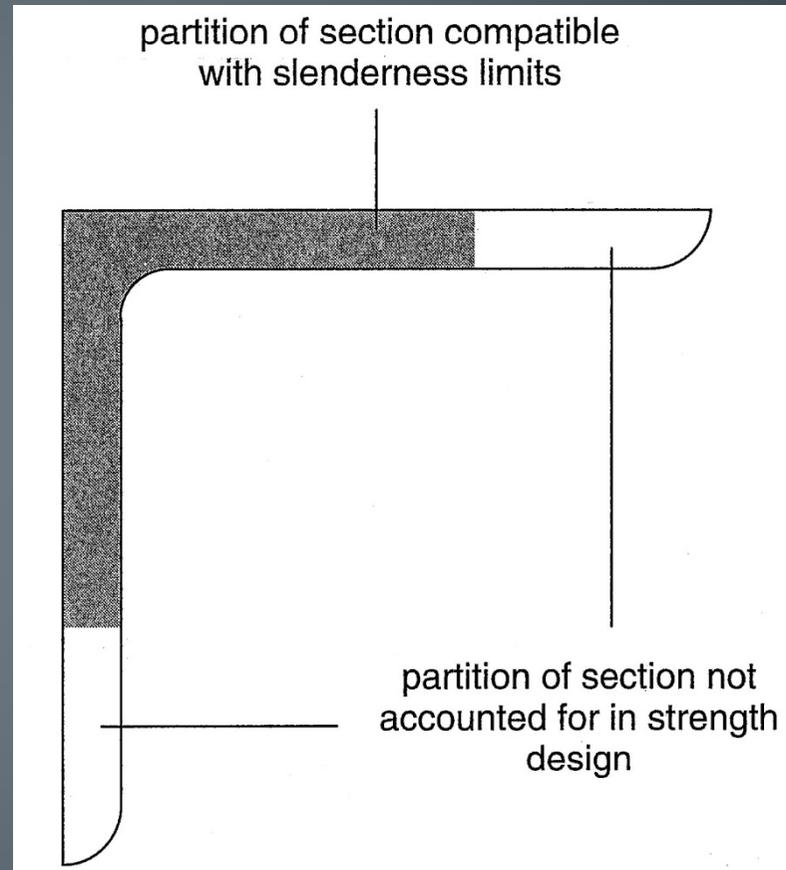
Rigidezza a
taglio
telai



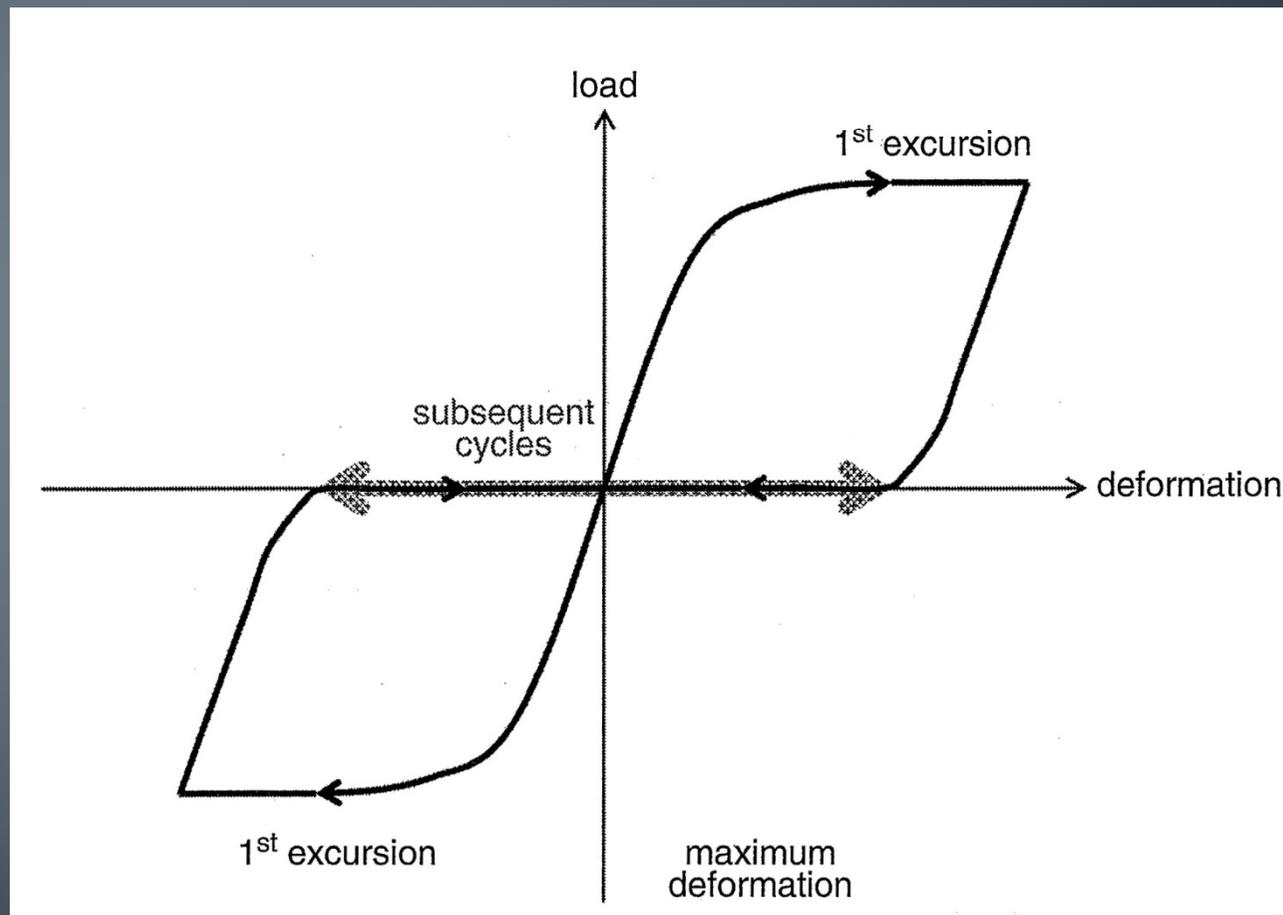
Incrudimento



Resistenza Post-buckling



Prestare attenzione alla caduta di rigidità associata al buckling locale



Attenzione ed intervento attivo

-Prestare attenzione ai segni premonitori



Prove

- Utilizzo di prove sperimentali a rottura quando la modellazione matematica e fisica risulta incerta

Monitoraggio

/

controllo qualità



Model updating



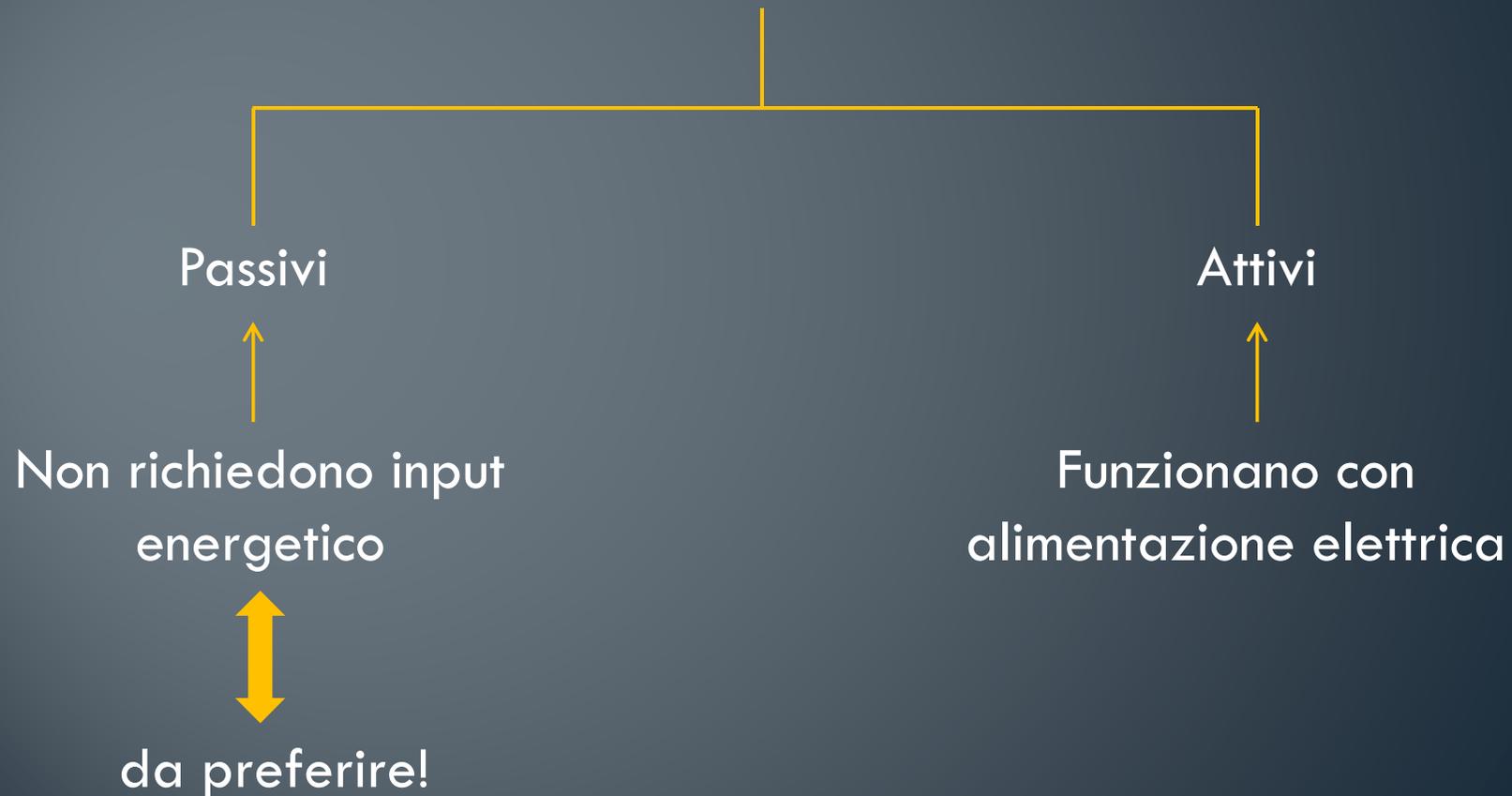
Riduzione rischi esecutivi



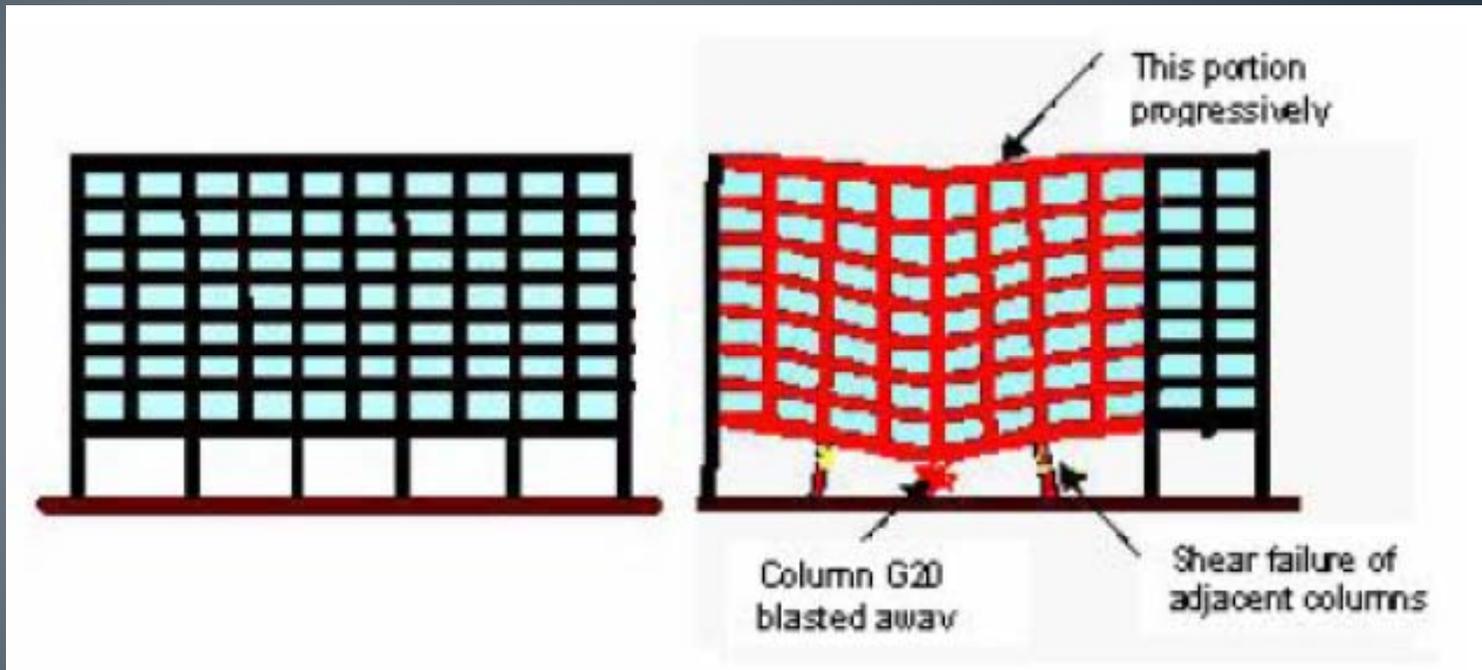
Controllo parametri
statici e dinamici nel
tempo

Dispositivi meccanici

- Controllo di movimenti / forze
- Dissipazione energetica



Esempio: MURRAH BUILDING, Oklahoma City

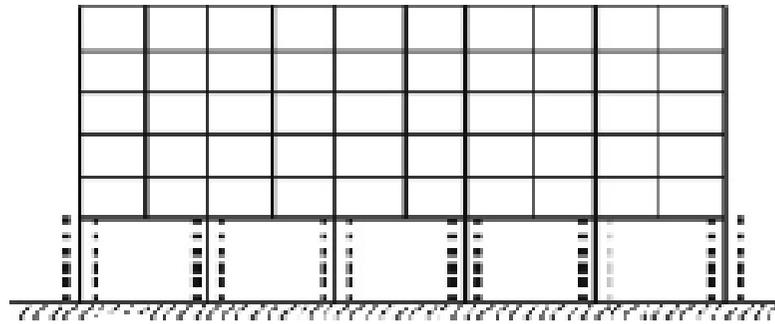


Prima del collasso

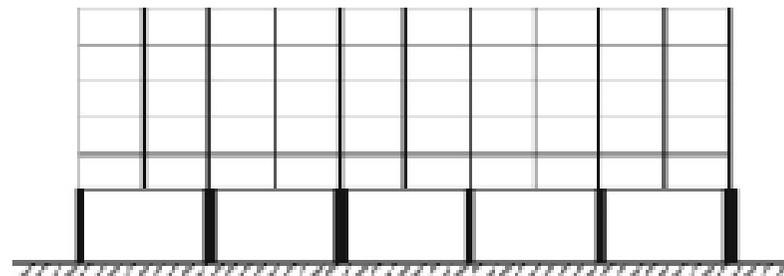
Dopo il collasso



Misure correttive (1)

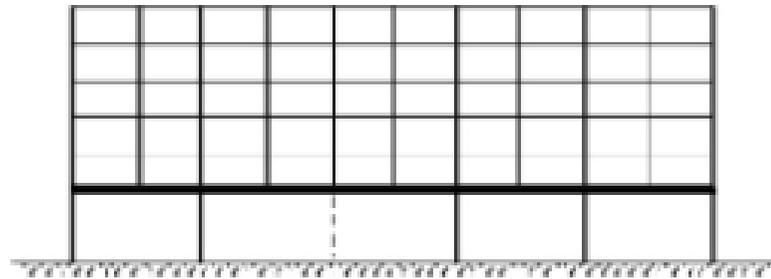


Protecting the columns in the ground floor

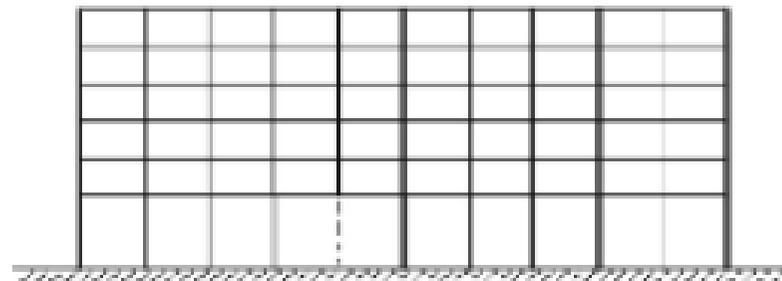


Strengthening of the columns in the ground floor

Misure correttive (2)



Strengthening the transfer girder



Strengthening the ground floor with more columns (but, this would have conflicted with architectural requirements)

Grazie per l'attenzione