

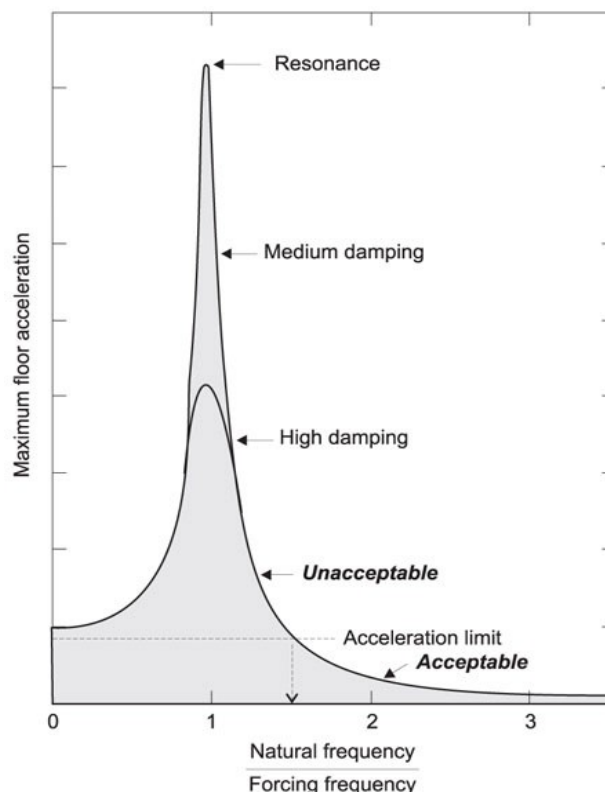
# 1 Teoria.

## 1.1 Frequenze di risonanza e risonanza accoppiata.

Le onde di taglio (S) sono le principali responsabili delle lesioni che subiscono gli edifici durante un evento sismico. Infatti, mentre le onde di compressione (P) agiscono sulle sovrastrutture in direzione prevalentemente verticale, le onde S sollecitano le stesse con forze di taglio lungo il piano orizzontale, dove gli elementi strutturali sono più vulnerabili. Sollecitate dalle azioni di taglio del sisma le strutture vengono indotte a oscillare secondo frequenze che sono tipiche della struttura stessa. Gli edifici possiedono una frequenza fondamentale di vibrazione che è funzione della rigidità della struttura e della loro massa.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Maggiore è la rigidità, maggiore è la frequenza fondamentale dell'edificio. Maggiore è la massa, minore è la frequenza fondamentale dell'edificio.

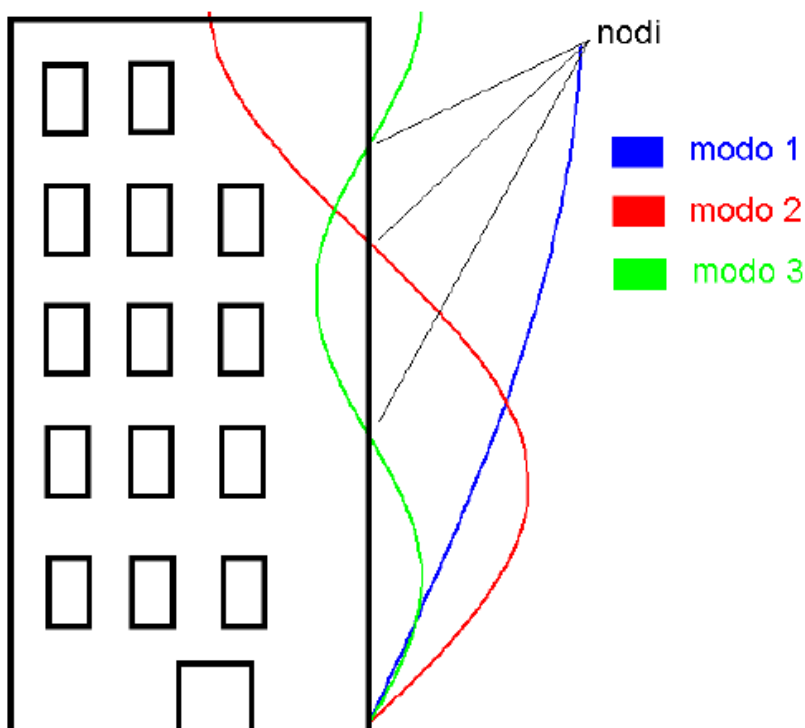


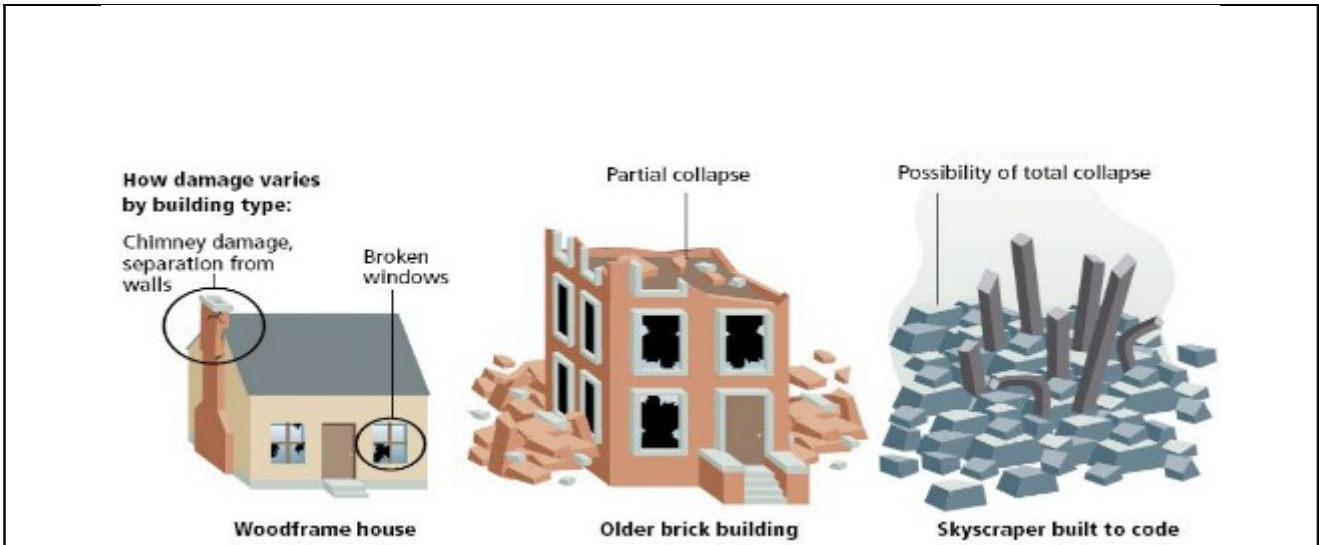
Per rischio sismico s'intende la suscettibilità di un opera ingegneristica a subire lesioni in seguito alle sollecitazioni indotte da un terremoto. E' stato dimostrato che il rischio sismico di un edificio di costruzione relativamente recente è solo marginalmente collegabile alle modalità realizzative dello stesso. Più gravoso è l'effetto dell'amplificazione sismica locale,

che tende a aumentare in maniera importante l'intensità delle forze sismiche agenti sulla struttura. L'amplificazione sismica dipende essenzialmente dal rapporto fra le frequenze con cui oscillano il terreno di fondazione e l'edificio durante il terremoto. In particolare se la frequenza di oscillazione dell'edificio è confrontabile con quella del terreno di fondazione si verifica il fenomeno della risonanza accoppiata che comporta una disastrosa amplificazione delle sollecitazioni sismiche sull'opera. Quindi più il rapporto fra frequenza fondamentale dell'edificio e frequenza fondamentale del terreno si avvicina all'unità, maggiori sono le forze risentite dalla struttura e quindi maggiori i danni prevedibili. Indicativamente gli effetti della risonanza accoppiata diventano inaccettabili per la sicurezza della struttura quando il rapporto frequenza edificio / frequenza terreno ricade nell'intervallo 0,67 - 1,50.

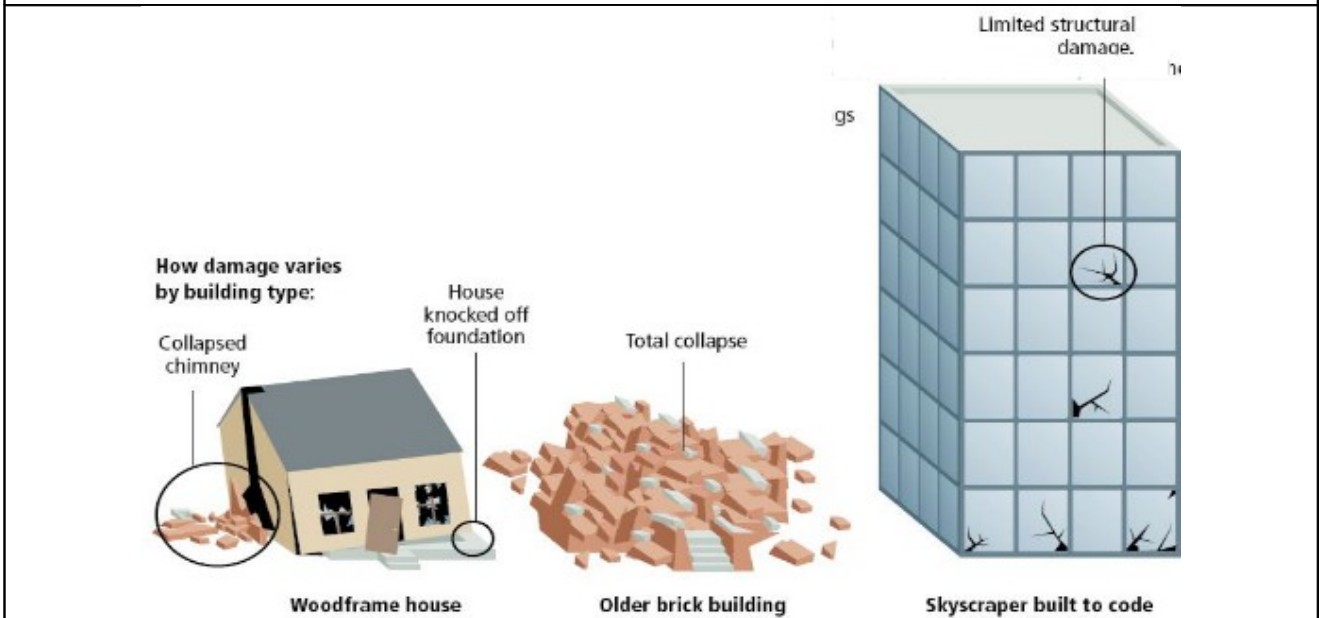
Il fenomeno della risonanza accoppiata consente di spiegare il danneggiamento selettivo che si osserva quasi sempre nelle aree colpite da un sisma. Variando le condizioni geologiche locali, varia la frequenza di risonanza fondamentale del terreno. Edifici con simile frequenza fondamentale possono subire livelli di danno molto differenti fra loro, perché posti in siti dove cambia la situazione geologica.

Oltre al modo fondamentale, l'edificio può vibrare in maniera più complessa, secondo i modi cosiddetti superiori.





Città del Messico 1985: i maggiori danni sono stati subiti dagli edifici più alti. La frequenza di risonanza del terreno è di circa 1 Hz.



Haiti 2010: i maggiori danni sono stati subiti dagli edifici più bassi. La frequenza di risonanza del terreno è di circa 10 Hz.

## 1.2 Misura diretta delle frequenze di risonanza

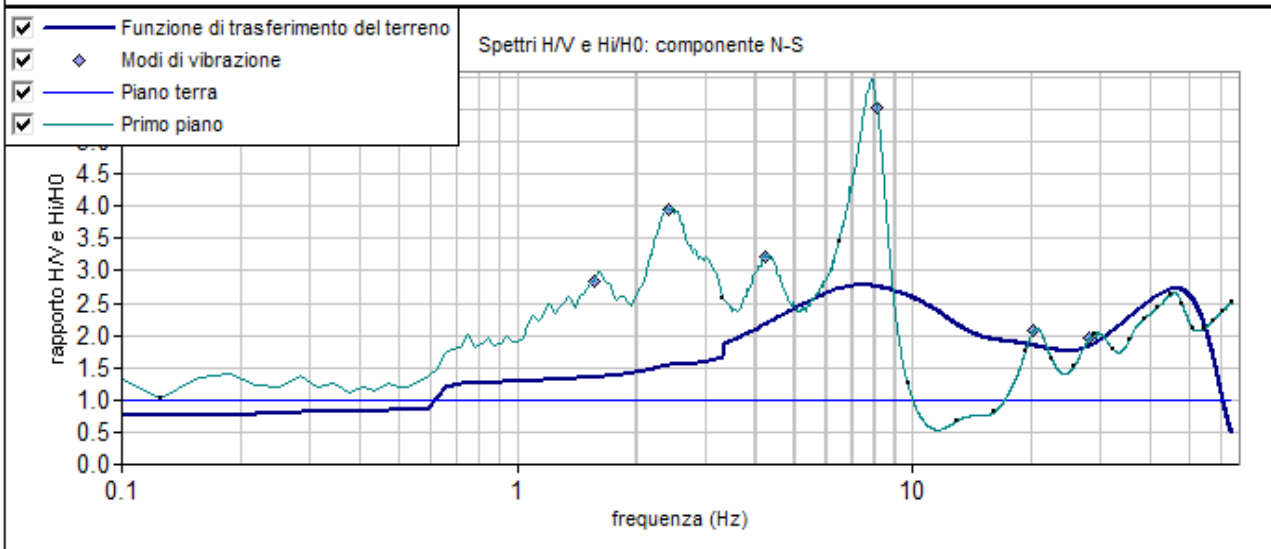
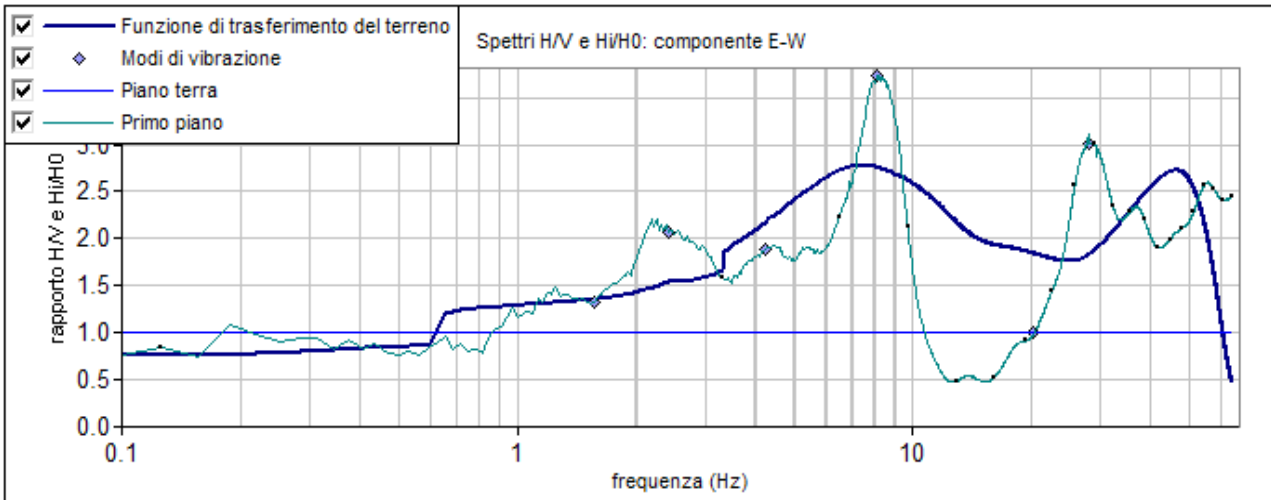
In letteratura esistono numerose formule empiriche per la stima della frequenza fondamentale di risonanza di un edificio. La più semplice è la seguente:

$$F_z = 10 / n.\text{piani}$$

Queste formule presentano numerose limitazioni. Sono solitamente applicabili a edifici con pianta regolare, con una distribuzione omogenea delle masse, di altezza compresa entro certi intervalli e isolati. Dove non sono rispettate queste condizioni tendono a fornire valori completamente errati. Queste relazioni sono utili in generale solo per fornire un'indicazione di massima della frequenza di risonanza, in quanto spesso possono condurre a errori anche superiori al 20% rispetto al valore reale, anche nelle condizioni ideali di applicazione.

Le frequenze di risonanza dell'opera e del terreno di fondazione possono essere, in alternativa, misurate direttamente con l'impiego di stazioni accelerometriche o velocimetriche. E' necessario eseguire almeno due misure all'interno dell'edificio, una al piano più basso (piano terra o piano interrato) e una all'ultimo piano (o sul tetto se accessibile), ubicando le misure lungo la stessa verticale. Il confronto fra le misure eseguite ai diversi piani fornisce direttamente la frequenza fondamentale di risonanza dell'edificio ed, eventualmente, anche quelle superiori.

Avendo come dato di input un terremoto, anche se di bassa magnitudo, la risposta dell'edificio è sicuramente più prossima a quella reale in condizioni estreme. L'uso dei microtremori, costituiti dalle vibrazioni ambientali prodotte soprattutto dall'azione antropica, fornisce un dato che rappresenta un'approssimazione della frequenza di risonanza fondamentale in condizioni sismiche. Si tenga presente che durante un terremoto di magnitudo elevata la frequenza fondamentale tende a spostarsi verso le frequenze più basse, anche se lo spostamento è contenuto generalmente in pochi punti percentuali.



### 1.3 Tecnica di misurazione e strumentazione.

Le tecniche HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) e FSR (Floor Spectral Ratio) si basano sulla misura diretta, sfruttando il rumore di fondo ambientale (microtremori), delle frequenze di risonanza degli edifici e dei terreni costituenti il sottosuolo di fondazione, allo scopo di stimare gli effetti di sito e la vulnerabilità sismica dell'opera. Per rumore ambientale di fondo s'intende l'insieme delle vibrazioni che si propagano nel terreno dovute sia a fenomeni naturali, moto ondoso, perturbazioni atmosferiche, ecc., sia all'azione antropica, traffico veicolare, macchinari, ecc.. Si è riconosciuto, a partire dagli anni settanta, che i microtremori tendono a eccitare le frequenze naturali di oscillazione dei terreni e degli edifici, permettendone l'individuazione. In pratica ciò che viene misurato, in certo intervallo di frequenze, solitamente 0.1-100 Hz, sono le velocità di propagazione dei microtremori lungo il piano orizzontale e verticale (H e V), tenendo presente che tali oscillazioni sono costituite essenzialmente da onde di superficie.

Le tecniche HVSR e FSR richiedono l'utilizzo di un velocimetro triassiale, cioè di un sismometro a stazione singola in grado di registrare i microtremori lungo le due direzioni orizzontali (X, Y) e lungo quella verticale (Z), in un ampio intervallo di frequenze (0.1-100 Hz) e per una durata sufficientemente lunga (mediamente 10-20 minuti). Il moto indotto nel terreno e nell'edificio viene misurato in termini di velocità attraverso tre velocimetri, uno per ogni direzione di misura (X, Y e Z), secondo il passo di campionamento impostato dall'operatore. Le misure registrate vengono poi elaborate e restituite graficamente in forma di spettri H/V (rapporto H/V in funzione della frequenza, dove H è la media dell'ampiezza misurata lungo X e Y) per la tecnica HVSR e  $H_j/H_0$  (in cui  $H_j$  e  $H_0$  si riferiscono rispettivamente alle componenti orizzontali della misura eseguita al piano j-esimo e nel punto più basso dell'opera) per la tecnica FSR.

Nella pratica, in presenza di edifici a pianta regolare e caratterizzati da una distribuzione omogenea di masse e di rigidità, si eseguono tre misure, due all'interno dell'edificio e una esternamente sul terreno naturale. Le misure all'interno dell'opera vengono ubicate lungo la stessa verticale, una al piano terra e una all'ultimo piano dell'edificio. Il picco positivo massimo dello spettro  $H_j/H_0$  registrato, elaborato con la tecnica FSR, indica direttamente la frequenza di risonanza fondamentale della struttura. La misura sul terreno naturale, elaborata con la tecnica HVSR, consente invece di individuare la frequenza di oscillazione fondamentale del sottosuolo di fondazione. La registrazione effettuata nel punto più basso dell'opera ha funzione di controllo, per escludere la presenza di anomalie nei dati relativi ai microtremori misurati. Lo strumento viene posizionato all'interno dell'edificio in modo tale

che i due velocimetri orizzontali, disposti perpendicolarmente uno rispetto all'altro, siano paralleli alle due direzioni principali di sviluppo dell'edificio. Di fatto quindi le registrazioni all'interno dell'opera consentono di ricavare due spettri  $H_j/H_0$  relativi, rispettivamente, alla direzione orizzontale di massima (N-S) e di minima larghezza (E-W) dell'edificio.

Nel caso di edifici con pianta irregolare e/o con distribuzione non omogenea di masse e di rigidità è necessario operare lungo più verticali di misura, eseguendo registrazioni anche in corrispondenza dei piani intermedi.

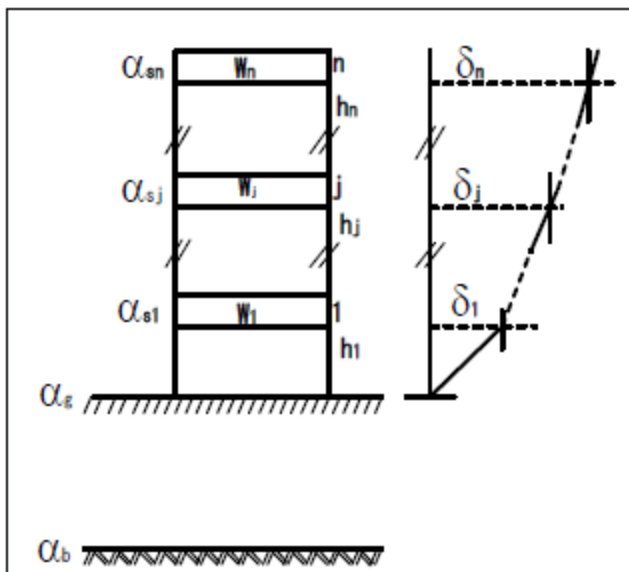
## 1.4 Valutazione del rischio sismico.

La valutazione del rischio sismico dell'edificio, partendo dai dati acquisiti con il velocimetro triassiale, può essere eseguita secondo la procedura ideata da Nakamura Y. (1997). Lo spostamento orizzontale indotto dal sisma al piano j-esimo della struttura può essere espresso con la seguente relazione:

$$\delta_j = \frac{\alpha_{sj}}{(2\pi F_s)^2} \quad (1)$$

in cui  $\alpha_{sj}$  è dato da:  $\alpha_{sj} = A_{sj} A_g \alpha_b$

dove  $A_{sj}$  e  $A_g$  sono le amplificazioni spettrali della struttura e del sottosuolo, relative alla frequenza  $F_s$ , e  $\alpha_b$  è il prodotto dell'accelerazione sismica al livello rigido di riferimento ( $a_{bedrock}$ ), valutata in funzione del tempo di ritorno del terremoto, per un coefficiente di efficienza del sisma e:  $\alpha_b = a_{bedrock} e$



Il parametro  $e$  assume normalmente valori compresi fra 0,65 e 1,00.

La distorsione angolare massima che l'edificio risente in corrispondenza del piano j-esimo ( $IDS_{max\%}$  Interstorey Drift Ratio massimo) per una determinata frequenza di vibrazione, è fornita dalla relazione:

$$\gamma_j = \frac{\delta_j - \delta_{j-1}}{h_j} = \frac{\alpha_{sj} - \alpha_{s,j-1}}{4\pi^2 F_s^2 h_j} \quad (2)$$

in cui  $h_j$  è l'altezza interpiano.

Il parametro  $IDS_{max\%}$  è riconosciuto in letteratura come uno dei parametri più indicativi per la valutazione quantitativa della vulnerabilità sismica di un edificio ed è quello che meglio si correla con i danni osservati.



The equivalence between existing damage scales and HRC-Scale for general RC structures

DI <sub>HRC</sub>	HRC	HAZUS 1999 [17]	VISION 2000 [18]	FEMA 273 [19]	EMS98 [20]	MSK [2]	AIJ [5]	ATC-13 [7]	ATC-21 [21]	EPPO [22]
0	None	No damage limit state								
10	Slight	Slight damage	Fully operational	Immediate occupancy	Grade 1	D1	Light	Slight	Green Tag	Green Tag
20	Light		Operational		Damage control	Grade 2		D2		
30				Moderate						
40				Heavy						
50	Moderate	Moderate damage	Life safe	Life safe	Grade 3	D3	Moderate	Heavy	Yellow Tag	Yellow Tag
60										
70										
80	Extensive	Extensive damage	Near collapse	Limited safety	Grade 4	D4	Major	Major	Red Tag	Red Tag
90				Collapse prevention						
100			Partial Collapse	Collapse						
	Collapse	Collapse limit state								

Da Rossetto e Elnashai (2003)

Le correlazioni fra il parametro  $IDS_{max\%}$  e il grado di danno sono state sviluppate da diversi Autori [Rossetto e Elnashai (2003), Calvi (1999)] e consentono di individuare i valori di  $IDS_{max\%}$  di soglia fra un livello di danno e il successivo in funzione della tipologia dell'edificio. In particolare Rossetto e Elnashai (2003) suggeriscono le seguenti correlazioni fra  $DS_{max\%}$  e la grandezza  $DI_{HRC}$  (HRC damage index) per edifici in cemento armato:

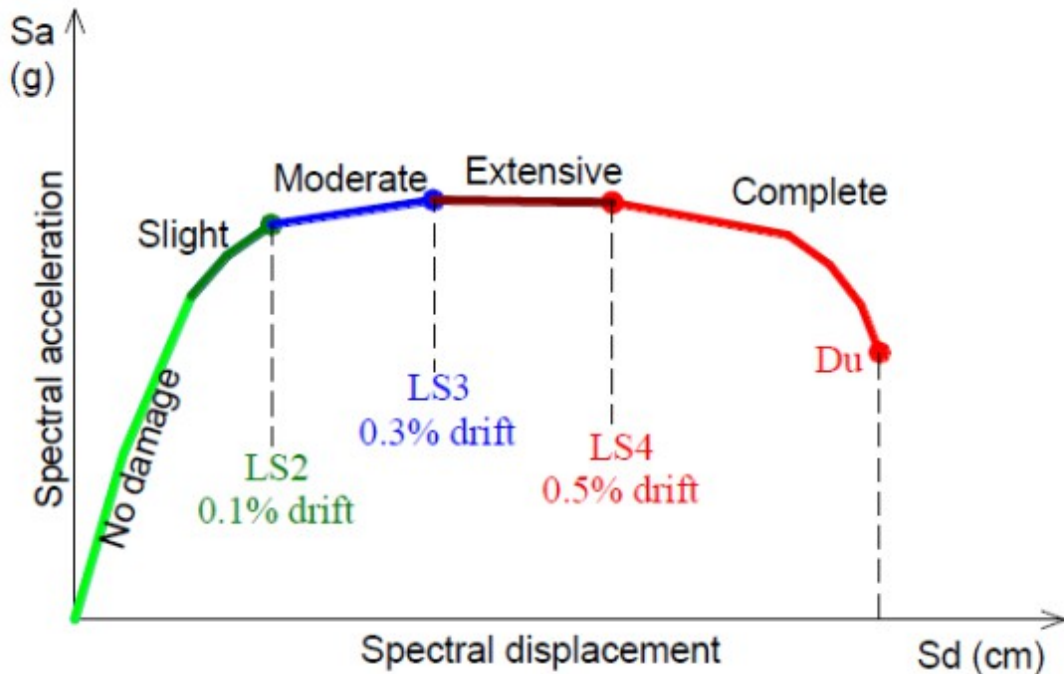
$$DI_{HRC} = 34.89Ln(IDS_{max\%}) + 39.39, R^2 = 0.991 \text{ for non-ductile MRF}$$

$$DI_{HRC} = 22.49Ln(IDS_{max\%}) + 66.88, R^2 = 0.822 \text{ for infilled frames}$$

$$DI_{HRC} = 39.31Ln(IDS_{max\%}) + 52.98, R^2 = 0.985 \text{ for shear-wall systems}$$

$$DI_{HRC} = 27.89Ln(IDS_{max\%}) + 56.36, R^2 = 0.760 \text{ for general structures}$$

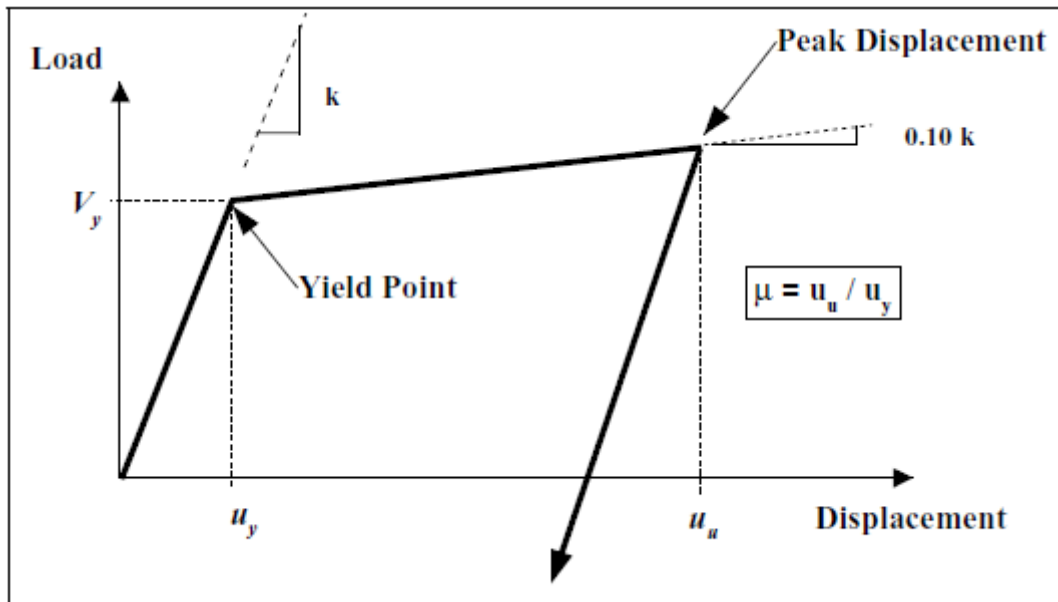
Nel caso di edifici in muratura non rinforzata Calvi (1999) propone il seguente schema:



La tecnica di Nakamura consente in pratica di stimare il punto di snervamento della curva di capacità dell'edificio, cioè il punto oltre il quale la struttura passa dal campo elastico a quello post-elastico, individuato dal valore di spostamento corrispondente a un grado di danno compreso fra leggero e moderato ( $DI_{HRC}=20$ ). Adottando un modello empirico bilineare della curva di capacità, in cui si ipotizza che il coefficiente angolare della curva nella fase post-elastica  $K'$  corrisponda al 10% del coefficiente angolare della curva nella fase elastica  $K$ , cioè:

$$K' = 0.10 K$$

è possibile estrapolare il comportamento dell'edificio anche in presenza di eventi sismici di magnitudo medio-alta.



Numericamente il rischio sismico della struttura può essere espresso da un Indice di Rischio, dato dal rapporto fra l'accelerazione sismica orizzontale necessaria per produrre un certo grado di danno e la accelerazione sismica in funzione di un determinato tempo di ritorno fornita dalla Normativa. L'Indice di Rischio è dato dal rapporto fra l'accelerazione sismica per produrre un grado di danno intermedio fra il 3 e il 4 (Life Safe) e l'accelerazione sismica di riferimento, per esempio quella prevista dalla Normativa. Valori di IR superiori a 1 indicano che l'edificio è da considerarsi a basso rischio sismico. Valori inferiori all'unità segnalano un'inadeguatezza dell'opera crescente con il diminuire del valore di IR. Indicativamente si può fare riferimento alla seguente tabella:

Rischio molto alto	Rischio alto	Rischio moderato	Rischio basso
$0 < IR \leq 0.2$	$0.2 < IR \leq 0.6$	$0.6 < IR \leq 1.0$	$IR > 1.0$