Un Metodo per la Analisi di Rischio Sismico a Scala Territoriale

Iunio Iervolino, Giovanni Fabbrocino e Gaetano Manfredi
Dipartimento di Analisi e Progettazione Strutturale, Università di Napoli, Italia

SOMMARIO: L'analisi di rischio sismico a scala territoriale necessita dello sviluppo di metodi e modelli semplificati in grado di legare misure della capacità e della domanda sismica. A tale scopo ci si riferisce non alla singola struttura, ma a classi di edifici per cui la vulnerabilità è funzione di parametri strutturali misurabili in comparti urbani o ipotizzabili a priori e la cui caratterizzazione probabilistica dipende dalle incertezze sulle variabili coinvolte. La metodologia proposta è dedicata ad applicazioni su grande scala, perciò la valutazione passa attraverso analisi spettrali, mentre per la analisi capacità ci si riferisce a metodi tipo superficie di risposta in grado di legare, seppur in modo approssimato, i parametri strutturali alle grandezze di interesse. Si discute, quindi, la formulazione del rischio sismico attraverso una funzione limite sviluppata ad hoc per il caso territoriale e descritta probabilisticamente in modo adeguato. Viene altresì analizzata la fattibilità di una quantificazione del rischio in questi termini analizzando, le incertezze considerate nel metodo, la sua applicabilità ed i necessari sviluppi futuri.

ABSTRACT: Territorial seismic risk assessment requires development of simplified models allowing to relate seismic demand and capacity measuring uncertainties involved. The goal is the definition of vulnerability classes for buildings which can be seismically described by the same vector of structural parameters which probabilistic distribution is measured on the area of interest (by observational campaign) or assumed if not measurable (i.e. material properties). For this purpose is not recommended to assess the seismic risk accounting for an approximated seismic demand by a refined method (i.e. incremental dynamic analysis) while may be possible to consider a spectral demand analysis. The objective is the definition of a limit-state function for the seismic risk assessment developed specifically for the territorial case, and completely described probabilistically for quantitative computation. The study herein presented is a contribution to the formulation of a seismic risk assessment using capacity function applicable to whole classes of buildings and a spectral probabilistic demand analysis. Response surface methods are suggested for capacity analysis. The feasibility of such method is evaluated and uncertainties involved are quantified.

1 INTRODUZIONE

La valutazione quantitativa del rischio sismico degli edifici a scala territoriale è stata sviluppata tradizionalmente utilizzando, da un lato la valutazione della pericolosità sismica basata su di una stima tipo di Probabilistic Seismic Hazard Analysis (Cornell, 1968; McGuire, 1995), dall'altro approcci alla vulnerabilità di tipo puramente osservazionale. In quest'ambito ricadono, ad esempio i metodi di I e II livello del GNDT (Benedetti e Petrini, 1984; CNR-GNDT, 1994; Di Pasquale et al., 2001). Questo tipo di approccio presenta diversi aspetti che ne limitano l'efficienza.

La quantificazione dell'hazard spesso non considera in maniera dettagliata l'influenza dell'amplificazione spettrale; mentre la stima della vulnerabilità è legata alla disponibilità di estesi database che raccolgono le osservazioni di danno sofferti dalle costruzioni durante i terremoti passati. Tali database sono legati alle caratteristiche del patrimonio edilizio delle aree investite dagli eventi sismici, perciò la loro estensione ad altre situazioni costruttive determina spesso una drastica riduzione dell'affidabilità del risultato e la necessità di considerare categorie di edifici molto ampie e disomogenee.

Un notevole avanzamento è rappresentato dal metodo HAZUS (1999) messo a punto dal FEMA in cui vengono individuate famiglie più circoscritte di strutture cui si associa un curva di capacità ed una deviazione standard. La valutazione della domanda sismica viene effettuata utilizzando il metodo dello spettro, mentre i valori di spostamento d'interpiano, soglia di stato limite, sono desunti da considerazioni ingegneristiche. Si tratta di un metodo che può essere considerato quantitativo, sebbene vi sia una componente basata sul giudizio di esperti e su dati euristici.

Nel caso di edifici singoli il metodo SAC FEMA (Cornell et al., 2002) propone un approccio puramente quantitativo della stima del rischio, basato su analisi dinamiche non-lineari. Il livello di informazione richiesto è di conseguenza molto dettagliato e non è estendibile ad analisi su scala più ampia, in cui il reperimento di sufficienti dati strutturali rappresenta il fattore critico.

Per questo motivo sono stati proposti recentemente metodi semi-quantitativi (Calvi, 1999) (Manfredi et al., 2003) che valutano la vulnerabilità utilizzando modelli meccanici semplificati caratterizzati da limitati dati di input compatibili con la scala territoriale. In particolare in Cosenza et al. (2003) si introduce il concetto di vulnerabilità di classe; volendo con questa definizione intendere un insieme omogeneo di strutture per cui la vulnerabilità è descritta dalla stessa funzione approssimata di parametri strutturali semplicemente misurabili in comparti urbani, ad esempio attraverso campagne di rilevamento.

Nel seguito viene presentata la formulazione di un metodo per l'analisi di rischio intermedio tra le due categorie di approcci sopraccitate, che faccia uso di funzioni di capacità applicabili a classi di edifici e di domanda inelastica spettrale.

L'avanzamento principale è costituito dalla stima della capacità e della domanda con metodi analitici che consentono di tenere conto esplicitamente delle incertezze legate ai fenomeni di risposta e di danno strutturale, affiancandosi dalle limitazioni che la vulnerabilità osservazionale impone. D'altra parte l'utilizzo di modelli semplificati, garantisce un onere computazionale commisurato alla scala dell'approccio ed al livello di informazione normalmente disponibile.

Per la analisi di capacità ci si riferisce a metodi tipo superficie di risposta al fine di legare i parametri strutturali di interesse alla capacità, mentre la domanda è ricavata da spettri ad hazard controllato ridotti con fattori inelastici a cui è associata un'incertezza di regressione.

2 MODELLAZIONE DEL RISCHIO SISMICO

2.1 *Analisi quantitativa del rischio sismico*

Il rischio sismico è una misura di probabilità, la quale non è altro che la quantificazione dello stato di conoscenza di un fenomeno e la sua prevedibilità, del danno conseguente un evento potenzialmente catastrofico come il terremoto. In questa accezione ci si riferisce alla probabilità soggettiva, volendo così intendere, che essa non è invariabile ma, al contrario, riflette l'incertezza dell'osservatore nella comprensione e/o nel controllo dell'evento.

Nel caso delle strutture, il rischio sismico è la probabilità di collasso del sistema in un dato periodo di tempo in un certo luogo con assegnate proprietà sismo-genetiche. Tale definizione è la trasposizione, all'ambito dell'ingegneria sismica, del più generale concetto di affidabilità di un sistema che rappresenta la probabilità che lo stesso porti a termine la propria missione nell'intervallo di tempo assegnato, o più esplicitamente, la probabilità che il sistema sia sopravvissuto al tempo t, avendo assunto 0 come istante iniziale.

Da questo punto di vista il rischio sismico è null'altro che il complemento ad uno della affidabilità del sistema strutturale nel periodo di osservazione, considerando come missione la sopravvivenza all'evento sismico.

L'utilizzo di metodi probabilistici per l'analisi quantitativa di rischio sismico è ormai principio stabilito vista l'incertezza connessa al fenomeno dei terremoti. La variabilità del segnale sismico, e quindi della richiesta strutturale è spesso considerata predominante rispetto a quella legata alla capacità ed alla domanda fissata l'intensità. Questo è vero specialmente per le strutture di nuova progettazione come i telai in acciaio per i quali è possibile dimostrare, in forma chiusa, la predominanza dell'hazard nella probabilità di collasso.

A scala territoriale, e per le strutture di cui è costituito il patrimonio edilizio italiano, questo risultato è mitigato dalla forte variabilità imposta dal considerare contemporaneamente un'intera categoria di strutture; a questo punto l'analisi di capacità sismica di classi di edifici può essere significativa. Coerentemente, nel caso di classe, l'analisi della domanda effettuata con analisi dinamiche non-lineari può diventare dal punto di vista computazionali assai onerosa e fornire risultati di difficile parametrizzazione rispetto alle variabili strutturali che la governano.

Appare dunque interessante investigare la possibilità di utilizzare la analisi della domanda attraverso con spettri elastici e coefficienti di riduzione.

Le criticità nella fattibilità di un siffatto approccio, risiedono principalmente nella definizione delle classi, nello sviluppo di metodi di analisi ad applicabilità territoriale e nella valutazione delle incertezze associate ai termini che compongono la funzione limite.

2.2 *Formulazione tempo invariante del rischio*

Nell'affidabilità strutturale, in relazione ad un qualsiasi stato limite convenzionale, si definisce una funzione che descriva lo stato del sistema ed in particolare, se è positiva il sistema è in uno stato di sopravvivenza mentre l'uguaglianza a zero rappresenta il limite del collasso.

$$Z : \begin{cases} > 0 \Rightarrow Sopravvivenza \\ = 0 \Rightarrow Limite \\ < 0 \Rightarrow Collasso \end{cases} \tag{1}$$

La funzione limite dipende da un vettore di variabili aleatorie tipicamente strutturali. Essa può essere tanto relativa ad una sola struttura, tanto ad un insieme, purché la forma della funzione sia la stessa nei due casi. La rappresentazione più comune della funzione limite, nel caso del rischio sismico, è indicata nella Equazione 2 e si riferisce alla relazione tra capacità strutturale C e richiesta di prestazione sismica D.

$$Z\left(\overline{X}_C, \overline{X}_D, t\right) = C\left(\overline{X}_C, t\right) - D\left(\overline{X}_D, t\right) \tag{2}$$

In cui $\left(\overline{X}_C, \overline{X}_D\right)$ sono i parametri governano la capacità e la domanda, mentre t è un paramentro continuo. Calcolare la probabilità che la funzione di stato limite sia negativa equivale a calcolare la probabilità di collasso del sistema. Nel caso in cui i numeri aleatori da cui dipende la funzione siano dipendenti dal tempo essi vanno descritti come processi stocastici; nel caso contrario, saranno variabili aleatorie ed il problema si definisce tempo-invariante. Valutare la probabilità di collasso in questo caso dipende dalla disponibilità della funzione di massa di probabilità congiunta del vettore di parametri da cui dipende la funzione limite.

$$P_f = \int_{\Omega} f_Z\left(\overline{X}\right) d\Omega \tag{3}$$

L'Equazione 3 rappresenta il calcolo di un integrale n-dimensionale, dove n è la dimensione del vettore di variabili aleatorie da cui dipende la funzione di stato limite ed Ω è il dominio nello spazio delle variabili $\overline{X}_C, \overline{X}_D$ in cui la funzione limite è minore o eguale a zero.

La computazione esatta della (3) è spesso non agevole; infatti, non è sempre disponibile in forma chiusa la congiunta $f_Z\left(\overline{X}\right)$ ed inoltre anche la definizione del dominio di collasso ed il calcolo dell'integrale stesso può essere difficile.

2.3 *Il metodo HAZUS*

Il metodo HAZUS (1999) sviluppato dalla U.S. Federal Emergency Management Agency (FEMA) rappresenta la pratica corrente della analisi di rischio sismico su scala territoriale. Anche in questo caso l'approccio fa riferimento al confronto di capacità e domanda.

L'obiettivo è calcolare la probabilità che una classe di strutture subisca danno di livello *ds* (*leggero, moderato, esteso* o *totale*). Le definizioni di danno sono funzione qualitative delle conseguenze che questi possono provocare in termini economici e sociali.

Le funzioni di fragilità (o funzioni di danno) sono di tipo lognormale condizionate di una intensità spettrale, tipicamente lo spostamento.

$$P\left[ds \mid S_d\right] = \Phi\left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln\left[\frac{S_d}{\overline{S}_{d,ds}}\right]\right] \tag{4}$$

La funzione nella (4) esprime la probabilità che si riscontri un certo danno *ds* a seguito del realizzarsi dello spostamento spettrale S_d, ancora: β_{ds} è la dispersione della variabile lognormale ε_{ds} (Equazione 5) relativa alla soglia di spostamento spettrale che fornisce il livello di danno *ds*.

$$S_d = \overline{S}_{d,ds}\varepsilon_{ds}\ ; \tag{5}$$

La mediana $\overline{S}_{d,ds}$ deriva da considerazioni strutturali, in particolare:

$$\overline{S}_{d,ds} = \delta_{R,Sds}\alpha_2 h \tag{6}$$

in cui $\delta_{R,Sds}$ è il drift che determina il livello di danno considerato; $\alpha_2 h$ è l'altezza dell'edificio a cui si trova lo spostamento della analisi di push-over per la classe di strutture in esame.

La variabilità delle funzioni di danno deriva dalle incertezze sulla capacità, sulla domanda e sulla soglia di danno, ciascuna di queste incertezze è assunta lognormale.

$$\beta_{Sds} = \sqrt{\left(CONVOLUZIONE\left[\beta_C, \beta_D, \overline{S}_{D,Sds}\right]\right)^2 + \beta^2_{M(Sds)}} \tag{7}$$

Nella Equazione 7: β_C è la dispersione della curva di capacità; β_D è la variabilità dello spettro di domanda, e $\beta_{M(Sds)}$ è l'incertezza sulla stima della mediana della soglia che porta allo stato di danno, considerata indipendente da capacità e domanda. La convoluzione produce una superficie che descrive la probabilità di ciascun punto d'intersezione capacità/domanda.

Per ottenere il parametro di intensità spettrale che definisce la soglia per il livello di collasso si considera l'intersezione della curva di capacità di una certa classe strutturale con lo spettro a forma fissata, derivata dalla mappatura sismica probabilistica del territorio, opportunamente ridotto per tenere conto del comportamento non lineare della struttura.

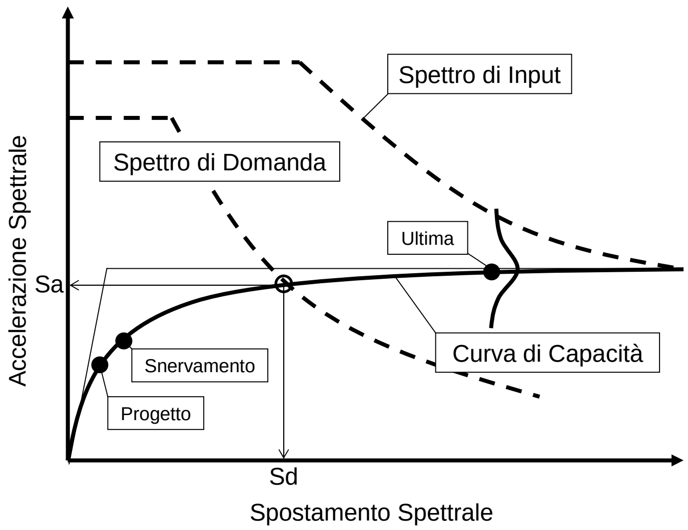

Figura 1. Domanda e capacità nel metodo HAZUS.

Le classi di edifici, di cui alla Equazione 4, sono definite in base alla tipologia strutturale (materiali, sistema resistente, etc.); in particolare si fa riferimento a 36 categorie tipologiche, suddivise ulteriormente in base alla altezza ed in funzione dei codici sismici con cui sono state, presumibilmente progettate. In questo ambito esistono 4 classi (*High-Code, Moderate-Code, Low-Code, Pre-Code*) che esprimono la qualità della struttura in relazione alla performance sismica necessaria. Per quanto riguarda ospedali ed altri edifici strategici si considerano funzioni di danno specifiche che tengono conto che tali strutture sono state costruite con codici di livello superiore rispetto a quelli medi delle altre strutture.

A ciascuna area geografica si associa un livello di progettazione secondo il criterio per cui: nelle zone a più alta sismicità c'è l'applicazione dei codici più avanzati per la progettazione sismica per quelle strutture di più recente costruzione (ad esempio, per la California dopo il 1973 le strutture si considerano High-Code), più si va indietro nel tempo più la qualità della progettazione scende (1940-1973 per la California si parla di Moderate-Code). Le strutture costruite prima del 1940 sono considerate come “Pre-Code” e cioè progettate senza alcun criterio anti-sismico.

La capacità di classe, alla base del calcolo delle curve di fragilità, è descritta con curve di push-over bilinearizzate. I tre punti fondamentali sono la capacità di snervamento (che si ottiene prolungando il tratto lineare definito dalla capacità di progetto) e quella ultima. Le curve di capacità sono definite dalla stima dei parametri che influenzano la progettazione come il periodo fondamentale di oscillazione, le sovra-resistenze e la duttilità. Alcuni di questi parametri si ricavano dai codici, una volta stabilito il livello di riferimento per la progettazione, altri si considerano indipendenti e assegnati a priori in base alla tipologia strutturale.

Alla curva di capacità, costruita con valori di classe tabellati, si associa una incertezza lognormale. La dispersione sulla curva di capacità è anch’essa tabellata e dipendente dal livello del codice con cui quella classe strutturale si considera progettata. Per stabilire la risposta si interseca la curva di capacità mediana con lo spettro come descritto in Figura 1.

2.4 *Il metodo SAC FEMA 2000*

Questo metodo (Cornell et al., 2002; Jalayer, 2003; Lupoi et al., 2002; FEMA 350, 2000) rappresenta lo stato dell’arte per quanto riguarda la analisi di rischio sismico di singole strutture per via analitica. Esso tratta il rischio sismico attraverso una formulazione tipica dei metodi tempo-invarianti. Ciò è possibile attraverso la saturazione della variabile temporale per mezzo di analisi dinamiche che legano il parametro di hazard sismico alla domanda strutturale (Figura 2) attraverso regressioni a cui è associata una incertezza lognormale.

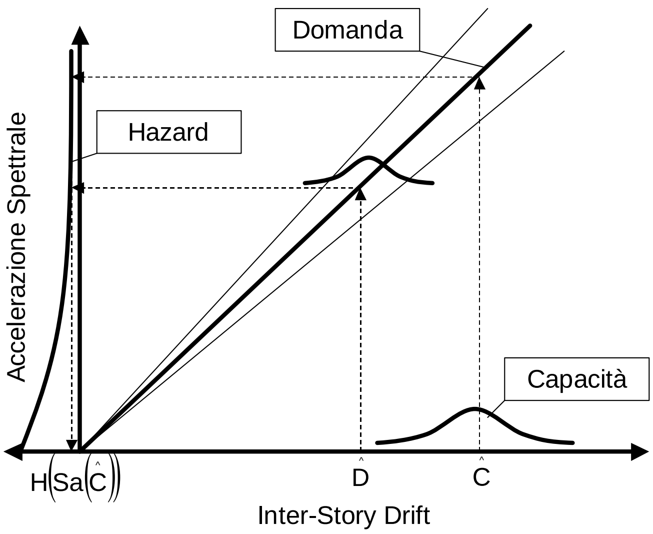

Figura 2. Il metodo SAC – FEMA 2000.

In pratica il metodo fa uso del teorema delle probabilità totali per esplicitare la probabilità di collasso in funzione di parametri di intensità sismica in cui è espressa la pericolosità di sito. In forma discreta questo concetto si può esprimere attraverso la Equazione (8).

$$P_f = P[Z] = P[C - D \le 0] = P[C \le D \mid D = d]P[D = d(IM) \mid IM = im]P[IM = im] \tag{8}$$

L’ipotesi alla base della (8) è che la capacità sia indipendente dalla misura dell’intensità sismica. Per cui:

$$P[C \le D \mid D = d \mid IM = im] = P[C \le D \mid D = d] \tag{9}$$

In tal modo passando al caso continuo è possibile esprimere il problema del rischio in forma integrale. Assumendo capacità e domanda distribuite in modo lognormale il risultato è esprimibile in forma chiusa secondo la (10).

$$P_f = \int_0^{+\infty} \left[1 - F_D(a)\right] f_C(a)da = H\left(IM\left(\hat{C}\right)\right) e^{\frac{1}{2}k^2\left(\beta_D^2 + \beta_C^2\right)} \tag{10}$$

In cui *H(IM)* è l'espressione della probabilità di superamento della misura di intensità sismica da cui si assume dipendente la domanda; $\hat{C}$ è la capacità mediana; i β sono le dispersioni di capacità e domanda; k è una costante dipendente dal legame tra domanda ed hazard ottenibile da regressioni di analisi dinamiche incrementali (Vamvatsikos e Cornell, 2002). Questa formulazione è particolarmente valida nel caso di strutture per cui il criterio di collasso è governato da un unico parametro spettrale come lo spostamento.

Il metodo SAC, operando per la singola struttura, non considera direttamente le incertezze legate ai parametri geometrici e meccanici, mentre è in grado di portare in conto la variabilità dei materiali. Tale limitazione è meno forte per le strutture che rispecchiano i requisiti menzionati in precedenza e godono di una maggiore standardizzazione e semplicità rispetto alle strutture in cemento armato, come quelle italiane realizzate negli anni cinquanta e sessanta.

L'applicazione di tale metodo alle strutture nel rischio a scala territoriale può non essere agevole per il maggior grado di incertezza sulla configurazione, ma anche per il numero di possibili modi di collasso. Inoltre, per quelle strutture in cui il legame con la domanda non è univoco, cioè non si ha la dipendenza da una sola misura d'intensità sismica o, magari, una di cui non è facile ricavare l'hazard, l'estensione della procedura puà essere particolarmente complessa.

3 FORMULAZIONE DEL RISCHIO A SCALA TERRITORIALE

3.1 *Funzione limite nel caso territoriale*

I limiti intrinseci del metodo SAC, che rappresenta lo stato dell'arte per un approccio completamente probabilistico al rischio sismico, si aggiungono alla difficile estendibilità al caso territoriale di qualunque metodo analitico per la analisi di vulnerabilità delle strutture, anche in relazione agli oneri computazionali.

A scala di classe, il rischio sismico, ossia la probabilità di collasso, va inteso come la frazione attesa di strutture che non sopravvivranno al periodo di osservazione.

Per questo vale la pena esplorare una formulazione del problema che si basi sulla valutazione del rischio come probabilità che la domanda ecceda la capacità, ma in cui la attenzione è riequilibrata alla valutazione più accurata della capacità aleatoria per la classe di edifici in esame. Lato domanda, la Probabilistic Seismic Demand Analysis (PSDA) è semplificata attraverso la analisi spettrale inelastica. Lo spettro elastico di riferimento tiene in conto l'incertezza del segnale sismico associando a ciascuna ordinata una distribuzione di probabilità. Si passa dallo spettro di riferimento per la regione in esame, alla domanda in-elastica attraverso fattori di riduzione.

In tale ipotesi la funzione limite Z è definibile come:

$$Z = C\left(\overline{X}, \mu, T\right) - \frac{D(T)}{R(\mu, T)} \tag{11}$$

nella (11) C rappresenta la capacità di classe mentre D è una misura di intensità spettrale elastica ed R rappresenta un fattore di riduzione dello spettro.

In un approccio completamente probabilistico al problema del rischio sismico, ciascuno dei termini di Z va considerato come un numero aleatorio distribuito attorno al singolo valore di ordinata del funzionale corrispondente. Se è possibile ottenere siffatte caratterizzazioni probabilistiche il problema rimane formulabile in modo tempo-invariante, per cui, la altrimenti necessaria, complicazione della trattazione, di tipo processo stocastico, delle variabili di base è evitabile.

Se la domanda è di tipo spettrale allora la capacità di classe va valutata nella stessa misura di intensità; perciò si giunge alla definizione di una capacità di intensità sismica parallela alla intensità domandata; la (11) si scrive come:

$$Z = IM_C\left(\overline{X},\mu,T\right) - \frac{\hat{IM}_D(T)\varepsilon_{IM}}{\hat{R}(\mu,T)\varepsilon_R} \tag{12}$$

I termini nella (12) esprimono il legame della capacità dai parametri strutturali locali e/o globali, mentre la misura di intensità spettrale elastica è funzione del periodo di oscillazione; il fattore di riduzione è funzione della duttilità disponibile e del periodo, ma anche di altri parametri, quali le condizioni di sito (Miranda e Bertero, 1994), che sono stati tralasciati in questa sede per semplicità.

I termini ε rappresentano convenzionalmente la distribuzione, assunta lognormale, di probabilità del fattore attorno al valore di riferimento. In particolare ε_{IM} è l'incertezza sull'ordinata spettrale legata alla valutazione probabilistica dell'hazard sismico, mentre ε_R è l'incertezza legata ai fattori di riduzione delle ordinate elastiche degli spettri, i quali sono ricavati attraverso regressioni di molte analisi dinamiche non-lineari su oscillatori semplici, con evidenti vantaggi computazionali.

Quindi, sebbene il legame funzionale con il periodo e la duttilità possa ritenersi deterministico, ad esso è associata una incertezza valutabile attraverso la dispersione dei fattori di riduzione attorno al loro valore mediano.

E' necessario esplicitare il legame tra le variabili aleatorie di base che definiscono il rischio. E' evidente come gli stessi fattori strutturali da cui dipende la capacità determinino il periodo e la duttilità. Se è possibile ad esempio suddividere il vettore $\overline{X}$ partizionandolo in due vettori $\{\overline{Y},\overline{W}\}$, di cui l'ultimo raggruppa le variabili che definiscono la duttilità ed il periodo, è possibile passare ad una rappresentazione della capacità consistente con la formulazione dello stato limite fatta in precedenza. La capacità dipenderà, allora, da parametri parzialmente sovrapposti a quelli della domanda.

$$\overline{X} = \{\overline{Y},\overline{W}\}: \mu,T = f\left(\overline{W}\right) \Rightarrow C = C\left(\overline{Y},\mu,T\right) \tag{13}$$

Si assume che sia possibile ottenere le distribuzioni dei termini di $\overline{X}$ e che sia possibile ritenerli non correlati tra di loro, almeno al termine della scomposizione in $\overline{Y}$, μ, T

A questo punto, se sono disponibili le distribuzioni di probabilità congiunte dei parametri di base, il rischio è formulabile in forma chiusa con un integrale multi-dimensionale tempo-invariante.

$$P_f = \int_{\Omega} f_{\mu,T}(\mu,t) f_{\overline{Y}}\left(\overline{y}\right) f_{\varepsilon_R}(\varepsilon_R) f_{\varepsilon_{IM}}(\varepsilon_{IM}) d\Omega \tag{14}$$

Noti tutti i termini della Equazione 14 essa si può calcolare in forma approssimata con i metodi quali quelli di approssimazione della funzione limite o di simulazione. In tal caso, la (14) si tramuta nell'integrale (15), in cui *I(z)* è la funzione indicatrice che assume valore unitari nel dominio di collasso e nulli altrimenti.

$$P_f = \int_{\overline{y}}\int_{\mu}\int_{T}\int_{\varepsilon_R}\int_{\varepsilon_{IM}} I\left[im_C\left(\overline{y},\mu,t\right) - \frac{im_D(t)}{r(\mu,t)}\right] f_{\mu,T}(\mu,t) f_{\overline{Y}}\left(\overline{y}\right) f_{\varepsilon_R}(\varepsilon_R) f_{\varepsilon_{IM}}(\varepsilon_{IM}) d\mu dt d\overline{y} d\varepsilon_R d\varepsilon_{IM} \tag{15}$$

Come si vede, la formulazione del problema è la conseguenza di applicazioni di concetti di base della affidabilità strutturale. L'applicabilità del metodo è legata alla valutazione delle distribuzioni territoriali dei parametri che governano la capacità e la domanda oltre che del legame funzionale, assunto deterministico, tra tali variabili e la capacità di categorie di edifici, ciascuno dei quali definito da una realizzazione del vettore $\overline{X}$.

A questo punto la definizione di classe va ottimizzata anche in funzione della calcolabilità esplicita della (15), la quale ad esempio diventa assai più agevole nel caso in cui vengano considerati edifici caratterizzati tra l'altro dallo stesso valore del periodo.

Nel caso territoriale le distribuzioni dei termini sono da ottenersi dall'area in esame. I parametri di base devono cioè avere una caratterizzazione probabilistica che segue l'andamento delle osservazioni sulla popolazione. Nondimeno la capacità deve essere valida non più per la singola struttura ma per un insieme esteso tanto da giustificare lo sforzo legato ad una complessa analisi di vulnerabilità.

3.2 *Capacità di classe*

Nel caso territoriale la vulnerabilità di classe si può definire come un funzionale che, ad un vettore di variabili aleatorie che definiscono sismicamente l’edificio, associ una funzione che esprima la fragilità sismica.

Nel caso della singola struttura si può immaginare come la caratterizzazione probabilistica della capacità sia legata alla incertezza su quei parametri di sezione o al più di elemento che non è facile conoscere a priori come ad esempio le caratteristiche dei materiali o le quantità di rinforzo nel cemento armato.

Se si definisce la capacità di classe come una funzione che considera anche i parametri globali, come le dimensioni geometriche o la configurazione strutturale, è possibile trasporre il concetto di vulnerabilità non limitandolo alla singola struttura. Se poi è disponibile una descrizione probabilistica dei suddetti parametri è possibile associare alla capacità l’incertezza che rende il problema consistente con la formulazione proposta per il calcolo del rischio sismico. Secondo questa definizione due edifici distinti appartengono alla stessa classe se e solo se la loro capacità è descritta dallo stesso funzionale ma differisce per una realizzazione del vettore di variabili di ingresso.

Posto in questo modo il problema, lo strumento più adatto per risolverlo, appare quello del Metodo della Superficie di Risposta (Khuri e Cornell, 1996). L’obiettivo sostanziale è di rappresentare la parte relativa alla capacità di una funzione di stato limite come parametro di input in un analisi di tipo FORM o Monte Carlo. La tecnica della Response Surface è usata per sostituire l’algoritmo che determina il legame tra i parametri strutturali misurabili sul territorio alla capacità con una relazione funzionale esplicita, derivante dalla regressione di un certo numero di “osservazioni” determinate utilizzando modelli non-lineari di push-over. I modelli di analisi devono essere in grado di descrivere i fenomeni peculiari delle strutture esistenti sul territorio in esame. In relazione al caso italiano, si parla di strutture esistenti in cemento armato underdesigned, nel senso che esse sono state progettate e realizzate in assenza di normativa sismica, oppure alla luce di normative sismiche obsolete.

In particolare, la Superficie di Risposta è una tecnica statistica attraverso la quale si stabilisce una relazione funzionale semplificata tra una variabile scalare di interesse (risposta o variabile di output) e un numero di variabili (variabili di input) che si assume abbiano un’influenza significativa sulla risposta.

La stima dei parametri del modello richiede un numero di esperimenti in cui le variabili X_i hanno un valore preciso e la risposta corrispondente è misurata. Il minimo numero di esperimenti per stimare i parametri β_i è proprio pari al loro numero ma si tende sempre ad avere un numero di esperimenti largamente superiore per ottenere una migliore interpolazione dei punti sperimentali. A questo proposito, immaginiamo che siano state ottenute N osservazioni della risposta, in questo caso la capacità si approssima secondo un modello tipo quello espresso nella Equazione 16.

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X^2{}_1 + \ldots \tag{16}$$

Tale modello è lineare nelle incognite β_0, β_i, β_{ij}. Per la stima dei coefficienti β si applica il metodo dei minimi quadrati molto frequentemente; esso consiste nel trovare il valore dei parametri β che minimizza la somma dei quadrati delle differenze tra valori osservati e valori calcolati con il modello polinomiale.

Il passaggio critico dell’applicazione del metodo della superficie di risposta al caso in esame risiede nella definizione del piano degli esperimenti, cioè delle analisi da eseguire per ricavare i coefficienti della (16). Infatti, sebbene sia stato investigato a fondo il problema della ottimizzazione del piano degli esperimenti e cioè delle analisi da eseguire (Design of Experiments) anche nel caso della vulnerabilità sismica delle strutture (Franchin et. al., 2003; Iervolino et al., 2003) non si è ancora fatto i conti con le analisi di vulnerabilità che fanno uso di push-over. Tale problema fa riferimento, infatti, alla categoria dei Computer Experiments (Koehler e Owen, 1996) in cui non esiste errore sperimentale da associare alle osservazioni, per cui i tradizionali metodi per la regressione di superfici di risposta potrebbero essere non ottimali.

3.3 *Domanda spettrale inelastica*

Assunto che la domanda sia principalmente correlabile ad un modo di oscillazione, essa si può ottenere da uno spettro elastico opportunamente scalato in funzione della duttilità. In tal caso la variabilità della domanda, se si assume fissata (deterministica) la forma dello spettro, dipende solo dalla incertezza in ascissa legata alla variabilità del periodo e della ordinata spettrale attorno al valore mediano.

Definita la forma mediana dello spettro e quindi il legame col periodo, il problema si riduce alla caratterizzazione dello scostamento da tale valore indicato in precedenza come ε. La probabilità della ordinata spettrale non è altro che il termine di hazard che entra nella valutazione del rischio; per cui questa informazione è ottenibile con la procedura di PSHA tradizionale; la variabilità in ascissa va valutata opportunamente sul territorio.

Per quanto riguarda i fattori di riduzione della domanda elastica, il discorso è analogo a quanto descritto per gli spettri. Si assume una forma di dipendenza funzionale del fattore da parametri di duttilità e periodo o anche da altri fattori tipo le condizioni di sito (Figura 3).

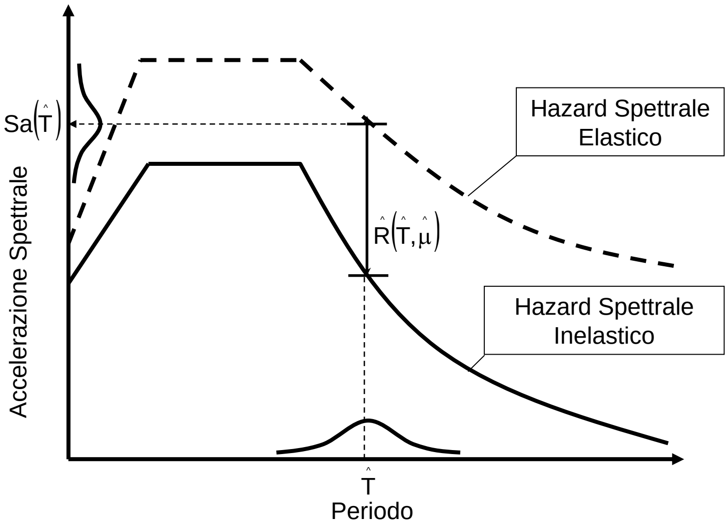

Figura 3. Domanda spettrale inelastica.

Se si considerano aleatorie le distribuzioni di probabilità che esprimono le frequenze territoriali della duttilità e del periodo, il fattore di riduzione sarà anch'esso variabile aleatoria perché combinazione di variabili aleatorie, inoltre ad esso sarà possibile associare una distribuzione in ordinata legata al residuo delle analisi dinamiche con cui tale legame è stato generato. Le formule che esprimono i fattori di riduzione degli spettri spesso sono ricavate con regressioni multi-variate di analisi dinamiche non-lineari con accelerogrammi registrati; perciò anche questo termine è ottenibile senza particolari complicazioni.

4 CONCLUSIONI

La valutazione del rischio sismico delle strutture a scala territoriale rappresenta uno degli argomenti di maggior interesse nella ricerca sismica. Dal punto di vista scientifico, ad un sempre maggiore avanzamento per quanto riguarda la caratterizzazione probabilistica dell'hazard sismico e del comportamento della singola struttura, non ha fatto seguito negli ultimi anni una parallela progressione dei metodi di assessment a larga scala. Ne sono un esempio i metodi fondati su matrici di probabilità ancora in uso in Italia, ma anche alcuni aspetti euristici presenti nel metodo Hazus.

La formulazione proposta esplora la possibilità di un approccio intermedio tra il metodo HAZUS e quello SAC-FEMA. Si fa riferimento ad un approccio quantitativo-probabilistico completo, ma con modelli di capacità e domanda semplificati per adattarsi alla scala ed all'onere computazionale richiesto dal problema territoriale.

Per quanto la analisi della domanda spettrale essa risulta semplificata rispetto ai metodi dinamici e fa uso di procedure consolidate ed universalmente accettate anche dai codici, quali l’analisi spettrale.

La capacità probabilistica di classe necessita di uno studio dettagliato di fattibilità. Metodi di regressione che leghino i parametri globali, che definiscono le strutture, agli output di analisi di push-over sembrano i più adatti per affrontare il problema, tuttavia, bisogna tener conto che ci si trova nel caso di Computer Experiments ed è, quindi, necessaria una progettazione ottima del piano sperimentale.

Dal punto di vista dell’incertezza è evidente che per garantire l’efficacia del metodo le distribuzioni dei fattori di ingresso devono essere misurabili, per esempio utilizzando rilievi d’area. Inoltre per ciascuna classe di edifici considerata è richiesta la stima delle distribuzioni di probabilità anche congiunte dei parametri aggregati ottenibili attraverso una analisi strutturale, quali la duttilità e/o il periodo di oscillazione. Pertanto, definendo la classe come l’insieme delle strutture la cui capacità è rappresentata da un funzionale che dipenda dagli stessi fattori, il calcolo del rischio ad essa correlato è complesso se le classi non vengono definite in modo da rendere semplice il calcolo dell’integrale proposto.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Benedetti D., Petrini V., 1984. *On Seismic Vulnerability of Masonry Buildings: Proposal of an evaluation Procedure*, L'industria delle costruzioni, Milano.

Calvi G.M., 1999. *A Displacement-Based Approach for Vulnerability Evaluation of Classes of Buildings*, Journal of Earthquake Engineering, Vol.3., N.3. pp 411-438.

CNR-GNDT, 1994. Seismic *Risk for Public Buildings, Part I, Methodological aspects*, Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma (in Italian).

Cornell C.A., 1968. *Engineering Seismic Risk Analysis*, Bull. Seism. Soc. Am., 58, pp.1583-1606.

Cornell C.A., Jalayer F., Hamburger R.O., Foutch D.A., 2002. *The Probabilistic Basis for the 2000 SAC/FEMA Steel Moment Frame Guidelines*, Journal of Structural Engineering, Vol. 128, No. 4.

Cosenza, E. Manfredi, G. Polese, M. Verderame, G.M., 2003. *A Multilevel Approach to the Capacity Assessment of Existing R.C. Buildings*, Journal of earthquake engineering, submitted.

FEMA 1999, HAZUS 1999. *HAZUS Earthquake Loss Estimation Methodology*. Technical Manual. Federal Emergency Management Agency U.S.A.

FEMA-350, 2000. *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*.

Franchin P., Lupoi A.,Pinto P. E., 2003. *Seismic Fragility of Reinforced Concrete Structures Using A Response Surface Approach*, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 7, Special Issue 1 45-77.

Di Pasquale G., Goretti A., Dolce M., Martinelli A., 2001 *Confronto fra differenti modelli di vulnerabilità degli edifici*. X Congresso Nazionale “L’ingegneria Sismica in Italia”, Potenza-Matera.

Iervolino I., Fabbrocino G., Manfredi G. 2003. *A Contribution to Risk Assessment of Industrial Facilities: The Case of Oil Storage Tanks in Seismic Regions*, Journal of Earthquake Engineering (Submitted).

Iervolino I., Fabbrocino G., Manfredi G. 2003. *Vulnerabilità Sismica di Componenti Industriali Standard: I Serbatoi in Acciaio per Combustibili,* XI Congresso Nazionale “L’ingegneria Sismica in Italia”, Genova.

Jalayer F., 2003. Direct *Probabilistic Seismic Analysis: Implementing Non-Linear Dynamic Assessments.* Ph. D. Thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, CA.

Khuri A.I., Cornell J.A., 1996. *Response Surfaces: Designs and Analyses*, Marcel Dekker, New York.

Koehler J., Owen A., 1996. *Computer Experiments, Handbook of Statistics, 13: Design and Analysis of Experiments*, pp 261-308, Olanda.

Lupoi G., Lupoi A., Pinto P. E., 2002. *Seismic Risk Assessment of RC Structures With The "2000 Sac/Fema" Method*, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 6, No. 4 499-512.

Manfredi G., Polese M., Verderame G.M., 2004. *Modelli Semplificati per le Analisi di Vulnerabilità a Larga Scala di Edifici in C.A.,* XI Congresso Nazionale “L’ingegneria Sismica in Italia”, Genova.

McGuire, R. K., McGuire, RK., 1995. *Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquakes: Closing the Loop*. BSSA, Vol. 85, No. 5.

Miranda, E., Bertero, V.V., 1994. *Evaluation of Strength Reduction Factors*, Earthquake Spectra, Earthquake Engineering Research Institute, Vol. 10, No. 2, pp 357-379.

Vamvatsikos D., Cornell C. A., 2002. *Incremental Dynamic Analysis*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics; 31(3):491-514.