

RUOLO DEI CRITERI DI SICUREZZA

Prof. Ing. Pierfranco Ventura

Associazione Idrotecnica Italiana - L' Acquaonline 2017

Sommario

Si ripercorre sinteticamente il passaggio dai criteri di sicurezza deterministici a criteri di norma semiprobabilistici che hanno le radici in quelli statistico-probabilistici o stocastici.

Si evidenziano gli aspetti salienti dei criteri deterministici in cui la distanza di sicurezza si prendeva dai modelli di calcolo rigido, elastico e plastici “perfetti” tarati su sperimentazione in scala opportuna: laboratorio, sito, vera grandezza.

Si delineano poi i punti vantaggiosi dei criteri semiprobabilistici e si criticano gli aspetti “estremali” delle massime azioni e minime resistenze specie nel campo “imperfetto” geotecnico, idraulico e sismico interagenti con le strutture in particolare da consolidare.

Si delineano infine i limiti delle norme prestazionali rispetto a quelle prescrittive, soprattutto per le verifiche di sicurezza dell'esistente con un sano rapporto responsabilità/controlli/costi.

Parole chiave: sicurezza, deterministica, semiprobabilistica, responsabilità, costi

1 - I criteri deterministici

Il più antico criterio è, come noto, quello *Statico basato sul modello rigido e su azioni indipendenti dal tempo* con fattori di sicurezza “esterni” applicati a ciascuna delle 6 equazioni scalari di equilibrio che verificano la distanza fra le sollecitazioni e le resistenze e sono indicate con la sigla EQU nella nuova normativa tecnica NTC 2008.

Si è passati poi con la *Scienza delle Costruzioni al modello elastico* per primo usato da Cauchy per estenderlo al mezzo continuo e il criterio di sicurezza è diventato “interno” prendendo anzitutto la distanza fra le tensioni di esercizio sollecitanti e le tensioni ammissibili dei materiali in campo lineare, rivisitato nello stato limite di esercizio SLE nella nuova normativa.

Con la nascita della *Geotecnica e Tecnica delle Costruzioni* si sono valorizzate dalla S.d.C. le verifiche basate sul *modello plastico e il calcolo a rottura* riferite alla coincidenza del moltiplicatore statico con quello cinematico.

La sicurezza si basa pertanto sulla distanza fra la realtà “imperfetta” e i 3 modelli “perfetti” predetti come sintetizzato in tabella 1.

Si noti che prioritario è sempre il rilievo geometrico della struttura-terreno simboleggiato nelle verifiche piane dall'area A, ovvero nel caso tridimensionale dal volume V e, introducendo la densità dei materiali, dalla massa M.

Ciò evidenzia l'importanza della *Geometria delle Masse* e ancor oggi della Statica Grafica dei pesi per verificare anzitutto la regolarità inerziale I come illustrato nella tabella 2, senza inizialmente contemperare le leggi costitutive elasto-plastiche, a volte incognite.

La valutazione classica poi delle rigidezze K elastiche, per evitare i difetti del modello rigido, privo di adattabilità e interazione deformative, e delle resistenze plastiche, specie per evitare i fenomeni d'instabilità soprattutto ciclica smorzata duttilmente D, consente di svolgere le storiche verifiche di sicurezza riferendosi ai predetti modelli costitutivi “perfetti” dei materiali: più sono vicini alla realtà più è chiara analisi di calcolo e la sicurezza è certa o con probabilità verso il 100%.

Tabella 1
TEORIE “PERFETTE” PER IL DIMENSIONAMENTO DI UNA STRUTTURA.

Carichi	Sollecitazione prevalente	Statica	S. d. C.	T. d. C.
	N	A	EA / L	$f_{mk} A / \gamma_m \gamma_q$
G, Q, Q _s , Q _E		$E = f_{mk} \rightarrow \infty$	$\lambda_{amm} = \pi \sqrt{\frac{E}{f_{mk}}} > l_0 \sqrt{\frac{A}{I_{min}}}$	
	M	I	EI / L	$f_{mk} I / \gamma_m \gamma_q$
Modelli costitutivi classici dei materiali		Massa rigida perfetta $\delta / l = 0$	Rigidezza elastica perfetta $\delta / l \approx 1/500$	Resistenza plastica perfetta $\delta / l \approx 1/100$

Tabella 2.
PRICIPALI CONTRIBUTI E LIMITI DEI MODELLI ALLA SICUREZZA

Modelli	Grandezze	Contributi	Limiti
Rigido	$M = F/a$ Massa	Regolarità inerziale	Assenza adattabilità
Elastico	$K = F/\delta$ Rigidezza	Ridondanza iperstatica	Disomogenea interazione
Plastico	$D = L_{diss}/L_{scamb}$ Duttilità	Resilienza incrudente	Instabilità vulnerabile

Il gioco M, K, D, meglio precisato dal calcolo agli stati limite richiamato nel paragrafo successivo, in campo lineare ovvero della classica analisi modale cerca di ottenere un periodo proprio struttura-terreno che sia più lontano possibile da quello dominante dello spettro sismico: per tale prevenzione è importante anzitutto proprio la predetta regolarità inerziale delle masse specie riguardanti la muratura o la geologia.

Le verifiche dei momenti d’inerzia centrifughi nulli, specie d’imbardata a torsione, vengono prima delle richieste di resistenza duttile, coinvolta fortemente solo se la differenza fra il periodo proprio e quello dominante è nulla.

Come nella progettazione navale si cerca prima di sfuggire alle onde alte e frequenti anziché resistere, ovvero con la tempesta non si gettano le ancore, così con il sisma intenso non si gettano i pali ma fondazioni compensate.

2 – I criteri semiprobabilistici

I criteri deterministici come noto adottano dei fattori di sicurezza “forfettari” che non tengono conto soprattutto *dell’aleatorietà delle azioni, specie sismiche, dei materiali, specie terreni non drenati*, che si cerca invece di valutare tramite criteri statistico-probabilistici per dedurre nel miglior modo possibile i dati “veri” secondo il teorema dell’inferenza (*in -ferre = portare dentro*) del presbitero britannico Bayes (pubblicato nel 1763) per avvicinare le interpretazioni soggettive alle oggettive.

Nella vastità degli studi stocastici si richiamano quelli tipo Poisson o di Rayleigh attualizzati nelle norme per ricercare le azioni sismiche più intense in funzione dei tempi di ritorno di un evento o tipo Gumbel per valutare la massima portata di piena in Costruzioni Idrauliche o la massima altezza d’onda in Costruzioni Marittime.

In compromesso fra i criteri deterministici e quelli stocastici le nuove normative hanno adottato il criterio semiprobabilistico agli stati limite basato, come noto, sui fattori parziali di sicurezza

anzitutto γ_F per le azioni e γ_M per i materiali, proprio per analizzare e contenere le predette aleatorietà.

Si evidenzia che più la sperimentazione sui dati è significativa e nella scala giusta, fra laboratorio- sito- vera grandezza, e più si dispone di dati statistici e pertanto i fattori parziali di sicurezza sono attendibili.

Viceversa più la sperimentazione è carente e la statistica dei dati “reali imperfetti” è povera e si cerca di supplirla con considerazioni probabilistiche “virtuali perfette”, più l’uso dei fattori parziali di sicurezza diventa illusorio e più si verificano le delicatissime implicazioni di seguito evidenziate.

I criteri semiprobabilistici si basano poi sulle verifiche ai vari stati limite di esercizio SLE-SLO, di danno SLD, ultimo e di salvaguardia della vita SLV-SLU, che come delineato nella tabella 3, presentano il prevalere dei rispettivi ruoli di K, M, D al crescere dell’intensità del terremoto.

Tabella 3
RUOLO DI M, K, D NEI VARI STATI LIMITE IN ZONA SISMICA

Caratteristica	Terremoto	Controllo stato limite	Commento
Rigidezza K (<i>stiffness</i>)	Bassa intensità Magnitudo < 5,5	Esercizio S.L.E Operativo S.L.O.	Mantenimento in esercizio $F < F_d; \delta < \delta_d$
Massa M (<i>mass</i>)	Media intensità Magnitudo < 6,5	Danno S.L.D.	Convenienza a riparare $F = F_d; \delta \div \delta_d$
Smorzamento D (<i>ductility</i>)	Elevata intensità Magnitudo < 7,5	Ultimo S.L.U. Salvaguardia Vita SLV	Prevenzione vite $F = F_d; \delta > \delta_d$

Dato che i terremoti italiani lungo le faglie dell’Appennino generate dagli scorrimenti della sottostante placca africana sono stati tutti di magnitudo dell’ordine $M_w = 6,5$, è ulteriormente evidente l’importanza di valide rigidzze K e regolari masse M struttura-terreno per prevenire i danni da terremoti, come testimoniato da costruzioni in muratura ben ammortate e incatenate fondate su roccia, che resistono da secoli.

La figura 1 illustra poi l’incidenza della distribuzione statistica sui fattori parziali di sicurezza: più i dati seguono la distribuzione normale gaussiana (curva 1) molto ristretta intorno al valore medio o di asse di simmetria, più significa che le azioni sono ben note e i materiali e il cantiere sono di buona qualità per cui la sicurezza di progetto è elevata e i costi ottimali.

Viceversa più la distribuzione è dispersa (curva 2) o a media spostata (curva 3) o estrema asimmetrica (curva 4), più la valutazione semiprobabilistica evidenzia la perdita di sicurezza sino al crollo, o viceversa può estremizzare la sicurezza fino a costi strabilianti come di seguito precisato.

In particolare se la distribuzione dei dati fosse “perfettamente” gaussiana con varianze di 1,64 volte dalla media si avrebbe una probabilità di dati certi del 90% (tolte le code dei 2 frattili 5%) mentre per avere la probabilità del 99% (frattili 0,5%) bisogna conoscere con certezza i dati entro 2,58 volte la media: è evidente quanto siano prima necessari *rilievi e indagini e controlli significativi e in scala idonea*.

Ciò ha portato nei casi di valutazione più severa della sicurezza a introdurre anche il fattore parziale di sicurezza $\gamma_R = 1,4$ per un coefficiente di variazione $v = 0,2$ rapporto fra la varianza (ampiezza della gaussiana) e la media dei dati (massima frequenza) che sintetizza la dispersione dei dati, ovvero una maggiore richiesta di qualità con incremento della distanza di sicurezza oltre quella già richiesta con γ_F e γ_M .

Nella valutazione del confronto fra sollecitazioni e resistenze di progetto (S_d, R_d design rispetto alle *caratteristiche* S_k, R_k) la normativa evidenzia l’importanza, già sopra ribadita, della Geometria delle masse simboleggiandola, in modo peraltro ermetico, con a_d in :

$$S_k (\gamma_F F, X_k/\gamma_M, a_d) ; R_k, (\gamma_F F, X_k/\gamma_M, a_d) ; S_d = \gamma_S S_k \equiv R_d = R_k / \gamma_R$$

3 – Incidenza della modellazione

Il continuo miglioramento dei modelli, specie sotto la spinta dell'enorme capacità di calcolo dei computer, incide anch'esso molto sui criteri di sicurezza.

La nuova normativa *Sismica* prevede modelli di spettri macrosismici e microsismici sistematicamente fissati in tutta Italia e non più diversificati anche nei criteri per ogni Regione e molto più realistici di quelli generici passati che consideravano accelerazioni orizzontali (0,07÷0,1g) da verificare con il metodo delle tensioni ammissibili, inadatte in campo plastico ciclico e che finivano per sovradimensionare le armature nel c.a. non rendendolo duttile.

A titolo esemplificativo la figura 2 mostra poi la differente incidenza dei periodi propri struttura-terreno se valutati sullo spettro delle accelerazioni sismiche o sugli spettri di spostamento di norma, con la conseguenza che i criteri per sfuggire dalla risonanza e il conseguente controllo degli spostamenti orizzontali (*drift*) vengono contemperati con maggiori margini nello spettro di spostamento, specie per gli edifici in muratura.

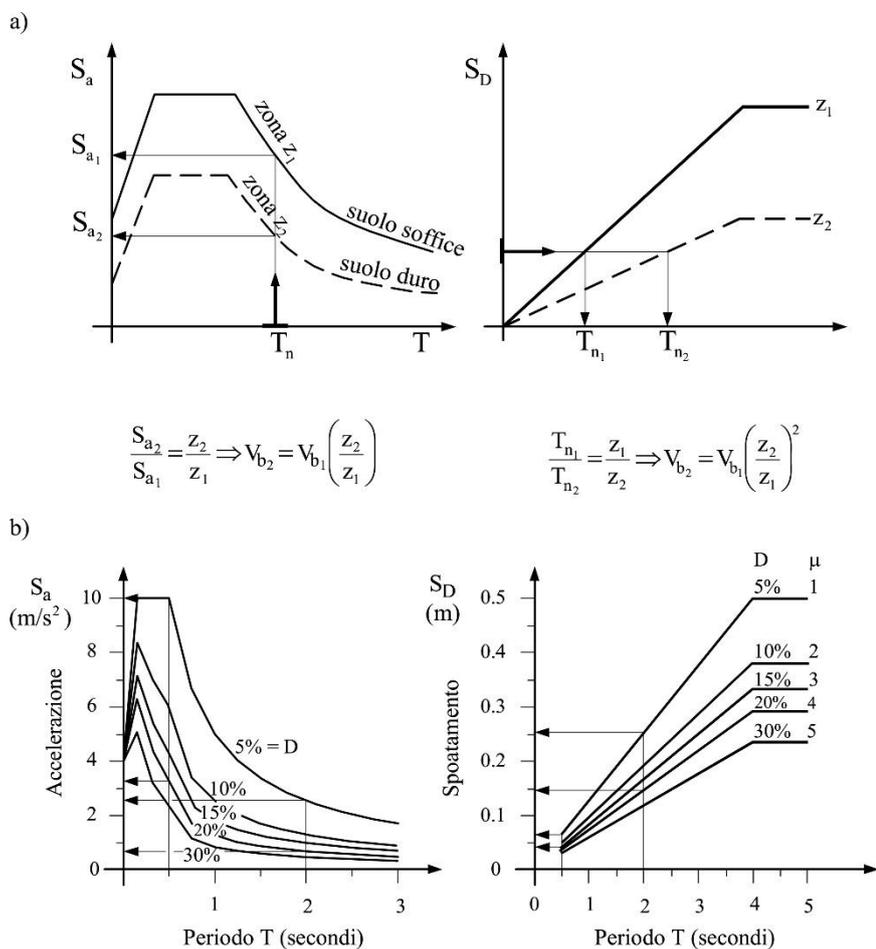


Figura 2 a) Spettri di spostamento in 2 zone sismiche diversificate posti a confronto con gli spettri di accelerazione (Priestely 2004); b) idem confronto fra gli spettri dell'Eurocodice EC8.

Altro esempio invece nel campo della *Geotecnica* è dato dalla modellazione di Meyerhof del fattore di portanza di base dei pali incentrato su la più attendibile superficie di scorrimento a bulbo, ridotto però da Berenztezev per tener conto dei reali contenuti cedimenti che impegnano cinematicamente la punta allo stato critico o di inizio della plasticizzazione.

Analogamente la figura 3 mostra la dispersione delle verifiche di portanza che è migliorabile adottando i modelli di Cambridge che correlano le leggi costitutive drenate con quelle non drenate, in funzione del grado di sovraconsolidazione, dei reali percorsi delle tensioni efficaci specie se in estensione e dei decorsi nel tempo, quanto più è definita la stratigrafia.

Il miglioramento della stima della sicurezza passando da verifiche bidimensionale (2D) a tridimensionale (3D) globali una volta impensabili è evidente.

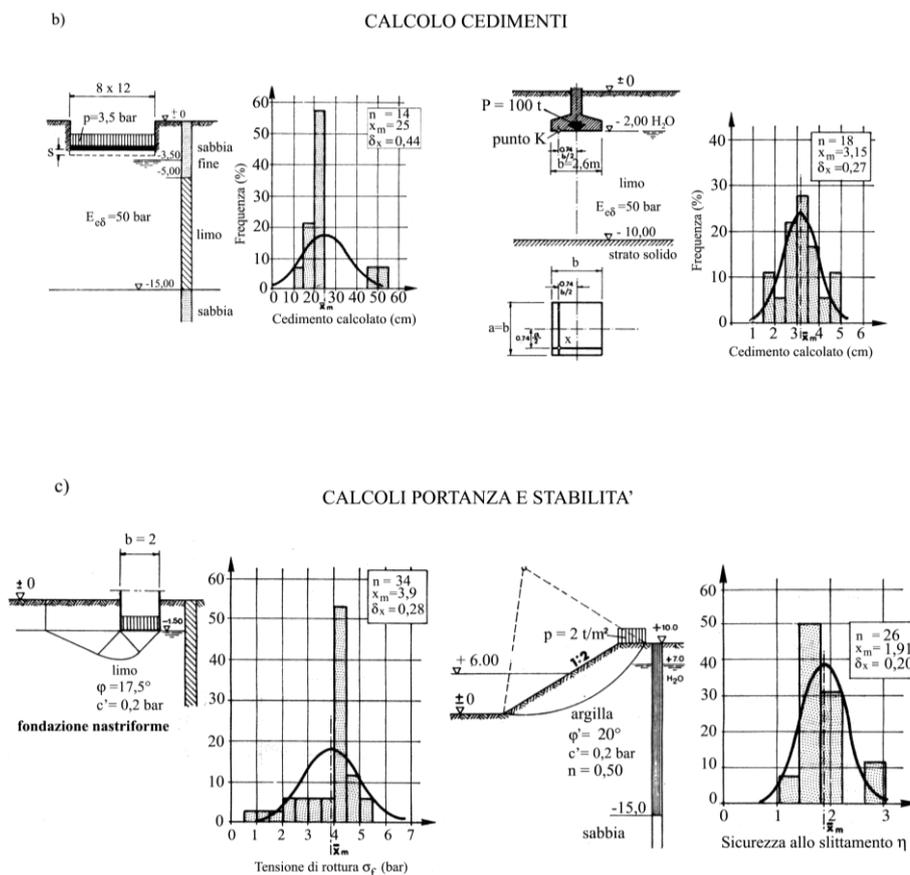


Figura 3 Distribuzione della frequenza probabile dei dati geotecnici: a) grandezze indice del terreno; b) calcoli dei cedimenti di fondazioni; c) calcoli di stabilità di una scarpata (Schültze); differenze attenuabili con i modelli di Cambridge

4 – Distanza d'ignoranza o dal cigno nero

Nel criterio di sicurezza deterministico i fattori di sicurezza variabili anche con *margini discrezionali* tenevano eminentemente conto della distanza dai predetti modelli “perfetti” e Maestri come Timoshenko, Danusso o Cestelli Guidi, Nervi e Oberti, per citarne solo alcuni, chiamavano umilmente distanza “d'ignoranza” riconoscendo l'impossibilità di far diventare certo l'opinabile aleatorio, ma basandosi su dati misurati e verifiche chiare da discernere.

I predetti sforzi stocastici per avvicinare i dati soggettivi virtuali a quelli oggettivi sperimentali presentano notevoli problematiche quando si vogliono contemporaneamente tutti i casi estremali come quelli cosiddetti del “cigno nero” tanto da rendere i criteri di sicurezza rapidamente passanti dal pericolo di crollo “certo” a interventi dal costo esorbitante “giustificato” soprattutto dal rispetto delle attuali norme prestazionali anziché prescrittive più adattabili caso per caso.

Si evidenzia che essendo i dati estremali massimi delle sollecitazioni e minimi delle resistenze variabili esponenzialmente bastano piccole variazioni “probabili virtuali” o “soggettive opinabili” per rendere il rapporto sicurezza/costi aleatorio e distorto verso costi esorbitanti per contemporaneamente anche i casi estremi.

Considerazioni del tutto analoghe valgono per le massime piogge e i minimi tempi di corrivazione per valutare le massime piene di un fiume e la sicurezza idraulica dagli allagamenti, ciò soprattutto in mancanza di misure idrologiche reali e presunte invece solo stocasticamente.

Si evidenzia infine l'importanza di valorizzare le norme NTC con le radici culturali del 1895 riguardanti il “Regolamento per la direzione, la contabilità e la collaudazione dei lavori dello Stato che sono nelle attribuzioni del Ministero dei Lavori Pubblici” che si fondava su precisi articoli iniziali incentrati sui ruoli dei responsabili del *Genio Civile*, sulla manutenzione e sulle modalità contabili dei lavori e controlli; solo dopo erano dati gli articoli sulle regole per i progetti, comunque prescrittive, attualmente le uniche indicate nelle NTC con ogni dettaglio cogente e prestazionale.

Decidere coefficienti di sicurezza deterministici con margini discrezionali, come nelle norme prescrittive, non era considerata “imprudenza, imperizia, negligenza” ma anzi “onestà intellettuale” mentre con le norme prestazionali non prevedere il “cigno nero” diventa “non osservanza di leggi e regolamenti” con la conseguente fragilizzazione nelle assunzioni di responsabilità e aumento elevatissimo della spesa specie pubblica.

Tali problematiche sono ancora più importanti da rivedere per gli interventi di consolidamento riguardanti l'esistente che facilmente diventa tutto da demolire e ricostruire nuovo, gettando sul lastrico e nell'ansia oltremisura gran parte della popolazione italiana, specie a basso reddito.

Cercare di prevedere tutti i casi peggiori senza lasciare margini d'impossibile valutazione della sicurezza almeno entro il 10 %, per parafrasare le definizioni gaussiane di figura 1, oltretutto è certo che squilibra rapidamente il rapporto costi/benefici e apre le porte a riserve e contenziosi basati solo sull'opinabile, fino ad arrivare all'Ingegneria difensiva con costi assicurativi esorbitanti, come in Medicina.

Si propone di lasciare tutte le modellazioni della nuova normativa rendendo però *prescrittive* le verifiche per i dati estremali che ricadono oltre il “90%” di probabilità che possano accadere: rilegalizzando un prezioso margine di discrezionalità tecnica, proprio per evitare di monetizzare ciò che è impossibile valutare in termini *prestazionali estremi*, specie per gli interventi sull'esistente.

Bibliografia

Chopra A.K. (1995) *Dynamics of Structures*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall International Inc.

Commissione Geotecnica (1988) *Norme Tecniche e per le Costruzioni in zona sismica*, D.M. 11 marzo.

Ventura: Ruolo dei Criteri di Sicurezza

ICASP (2015) *International Conference on Applications in Statistics and Probability in Civil Engineering.*, 12° Conf. Vancouver .

Nova R. (2002) *Fondamenti di meccanica delle terre*, MacGraw-Hill, Milano.

NTC 2008 *Nuova Normativa Tecnica*, S.O. n. 30 alla Gazzetta Ufficiale n. 29 e Circolare 2 febbraio 2009 n. 617.

Timoshenko S., Goodier J.N. (1951) *Theory of Elasticity*, MacGraw Hill, New York.

Ventura P.(2011) *Fondazioni*, in aggiornamento 2017, Editrice Hoepli Milano.

