

I.5 IL RUOLO DELLA MODELLAZIONE NEI CRITERI DI SICUREZZA

In corrispondenza all'ipotesi "di base" di rigidità perfetta della Statica e di elasticità perfetta della Scienza delle Costruzioni, sono stati formulati i primi classici criteri di sicurezza. Così a ciascuna equazione di equilibrio scalare, ovvero a ciascun spostamento da impedire con l'insorgere delle varie sollecitazioni come mostrato in figura 2, corrispondono le antiche verifiche di sicurezza "esterne" deterministiche: di portanza ($\Sigma Z = 0$), a compressione ($\eta \geq 3$) a trazione ($\eta \geq 5$), di scorrimento ($\Sigma X = 0; \Sigma Y = 0$) ($\eta \geq 1,3$) ed a ribaltamento ($\Sigma M_x = 0; \Sigma M_y = 0$) ($\eta = 1,5$) ed a torsione ($\Sigma M_z = 0$) ($\eta \geq 3$).

Il fattore di sicurezza deterministico (v. figura 12) η è il rapporto fra i valori di esercizio delle sollecitazioni scaturenti dalle azioni "esterne" alla struttura e le sollecitazioni di rottura scisse però ambedue nelle varie 6 componenti spaziali (v. figura 2) anziché combinandone gli effetti. Tale criterio è rimasto di fatto ancora in uso per le verifiche di stabilità d'insieme delle opere di sostegno o dei pendii specie in campo pseudostatico, ovvero ipotizzando che le forze d'inerzia dovute ad un sisma siano staticamente applicate nei baricentri delle masse oscillanti.

E' emblematico come al crescere dell'aleatorietà geotecnica e sismica si sia mantenuto ancora oggi tale antico criterio di sicurezza deterministico anziché quello probabilistico di seguito delineato a causa dell'elevata dispersione dei dati (v. figura 3).

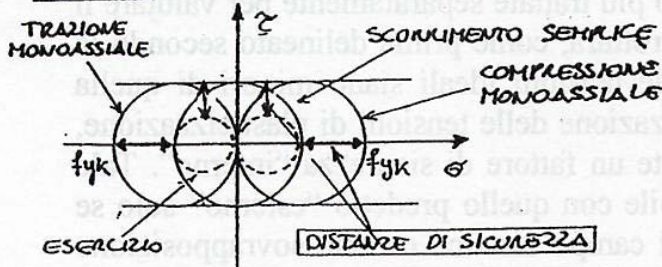
I vecchi carpentieri del resto saggiavano con dei colpi secchi per ciascuna delle direzioni cartesiane l'efficacia dei vincoli appena finiti di montare. Analogamente il collaudo del tubo prototipo di una partita di acciaio posta sotto elevata pressione idraulica, veniva collaudato auscultando il tipo di riverbero di un colpo di martelletto sul tubo, prima dell'impiego dei raggi X.

La Scienza delle Costruzioni ha sviluppato poi l'analisi delle tensioni e delle deformazioni, introducendo il concetto di tensioni principali $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ (sui piani degli elementi infinitesimi privi di tensioni tangenziali $\tau = 0$) o più in generale, in presenza di sollecitazioni composte, introducendo il concetto di tensioni ideali combinazioni di quelle principali, per evidenziarne gli effetti

CRITERI DI SICUREZZA

DETERMINISTICI

ACCIAIO: TRESKA, VON MISES, HENCKY



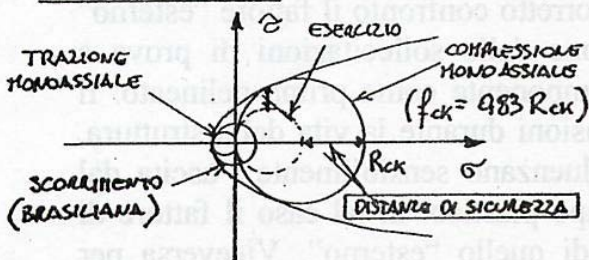
TENSIONE IDEALE

$$\sigma_{id} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1} < \sigma_{amm}$$

$$\sigma_{amm} = f_{yk} / \eta \text{ TENS. AMMISSIBILE}$$

FATTORE DI SICUREZZA $\eta \geq 2,0$

CONGLOMERATO: MOHR, COULOMB



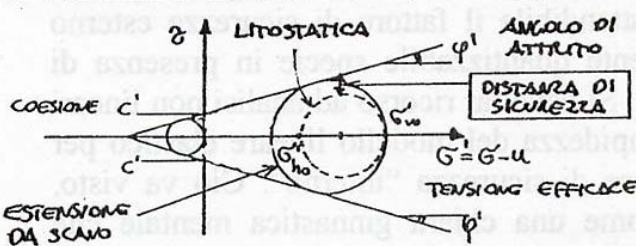
$\sigma_{id} < \sigma_{amm}$. DALLA CURVA INVILUPPO DEI VARI CIRCOLI DI ROTTURA

$$\sigma_{amm} = 60 + \frac{R_{ck} - 150}{4} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

METODO DELLE TENSIONI AMMISSIBILI

FATTORE DI SICUREZZA $\eta \geq 3,0$

TERRENO DRENATO: MOHR, COULOMB, TERRAGHI



$$\sigma = \frac{\sigma'_{vo} - \sigma'_{ho}}{2} < \sigma_{amm} = \frac{\sigma'_{vf} - \sigma'_{hf}}{2} \cdot \frac{\tan \phi'}{\eta}$$

FATTORE DI SICUREZZA $\eta \geq 1,3$

DISTANZA DI SICUREZZA PIU' PICCOLA

SOLO PERCHE' RIFERITA A σ' ANZICHE' σ

SEMI-PROBABILISTICI

CONGLOMERATO ARMATO

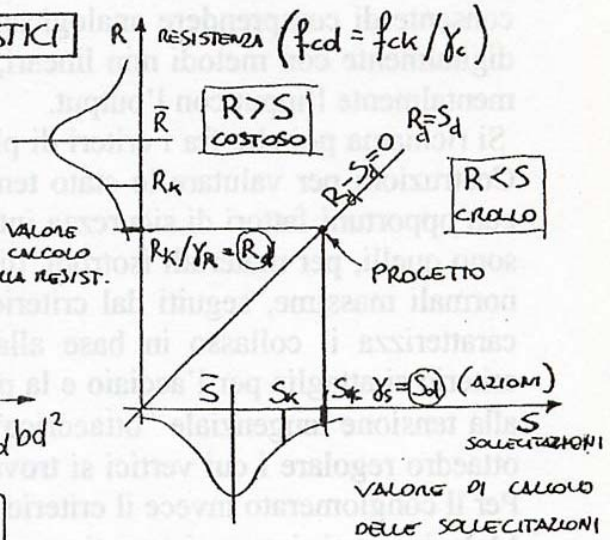
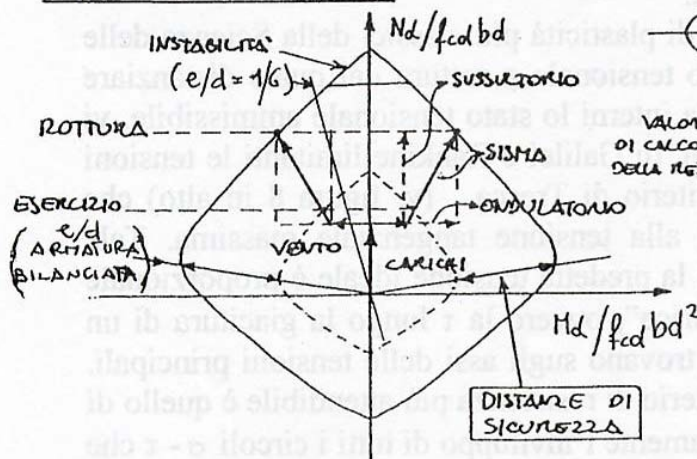


Fig12 Percorsi delle tensioni ammissibili e distanza di sicurezza interna deterministica. Percorsi delle sollecitazioni di calcolo e distanza di sicurezza esterna semiprobabilistica.

distorcenti e di variazione volumetrica della materia. La tensione ideale (v. figura 8) consente di ricondurre uno stato tensionale qualsiasi (triassiale o biassiale) ad uno equivalente monoassiale più usuale per misurare la resistenza sui provini in laboratorio, in modo da contemperare il fatto che uno stato di compressione laterale migliora la resistenza monoassiale e viceversa di trazione laterale lo peggiora.

Così le sollecitazioni non vengono più trattate separatamente per valutare il margine di sicurezza rispetto alla rottura, come prima delineato secondo la Statica. Si verifica pertanto che le tensioni ideali siano minori di quella ammissibile ricavata dalla penalizzazione delle tensioni di plasticizzazione, sino a rottura del materiale, tramite un fattore di sicurezza "interno". Tale fattore è perfettamente confrontabile con quello predetto "esterno" solo se lo stato di esercizio non supera il campo elastico o della sovrapposizione degli effetti e si rimane nel pieno ambito delle ipotesi prima ricordate poste alla base delle S.d.C.. Peraltro per un corretto confronto il fattore "esterno" deve essere applicato alla combinazione delle sollecitazioni di prova a rottura, senza scinderle per ciascun componente come prima delineato. Il percorso delle sollecitazioni o delle tensioni durante la vita della struttura, nonché il loro decorso nel tempo, influenzano sensibilmente l'uscita dal campo elastico ovvero l'entrata in campo plastico: in tal caso il fattore di sicurezza "interno" è più cautelativo di quello "esterno". Viceversa per valutare sperimentalmente rispetto alla rottura di un prototipo le sollecitazioni di esercizio è più attendibile il fattore di sicurezza esterno rispetto all'interno, più difficilmente quantizzabile specie in presenza di fenomeni d'instabilità (v. figura 5). Si deve far ricorso ad analisi non lineari perdendo la prima evidenziata limpidezza del modello lineare elastico per cui è stato proprio ideato il fattore di sicurezza "interno". Ciò va visto, come tutti i modelli descritti, come una chiara ginnastica mentale che consente di comprendere analogicamente le realtà, prima che quantizzarla digitalmente con metodi non lineari, in cui pericolosamente non si collega mentalmente l'input con l'output.

Si richiama poi che fra i criteri di plasticità più classici della Scienza delle Costruzioni per valutare lo stato tensionale a rottura dal quale distanziare con opportuni fattori di sicurezza interni lo stato tensionale ammissibile, vi sono quelli, per materiali isotropi, di Galilei e Rankine limitanti le tensioni

normali massime, seguiti dal criterio di Tresca (v. figura 12 in alto) che caratterizza il collasso in base alla tensione tangenziale massima. Tale criterio si attaglia per l'acciaio e la predetta tensione ideale è proporzionale alla tensione tangenziale "ottaedrica", ovvero la τ lungo la giacitura di un ottaedro regolare i cui vertici si trovano sugli assi delle tensioni principali. Per il conglomerato invece il criterio di resistenza più attendibile è quello di Mohr in cui si ricerca sistematicamente l'involuppo di tutti i circoli σ - τ che innescano la rottura del materiale, tale involuppo è detto anche curva intrinseca di resistenza del materiale caratterizzato da ridotta resistenza a trazione. In quest'ultimo modello la distanza del circolo di Mohr di esercizio della curva intrinseca di resistenza, definisce proprio il fattore di sicurezza "interno" come mostrato in figura 12. Tale criterio è molto simile a quello di Coulomb attritivo, adatto a descrivere la rottura dei terreni nei quali le curve si approssimano ad una retta di pendenza pari all'angolo d'attrito ϕ' e con intercetta all'origine pari alla coesione c' . Altri criteri sono quelli legati all'energia potenziale elastica di Beltrami-Ritz da confrontare con l'energia di plasticizzazione ultima, criterio che sviluppa quelli iniziali proposti da Von Mises-Hencky e da Huber. Questi ultimi attribuiscono la rottura eminentemente a combinazioni del deviatore delle tensioni principali (differenza media delle tensioni principali o raggio del circolo di Mohr) trascurando il contributo dello stato tensionale idrostatico (media delle tre tensioni principali, nel caso piano è l'ascissa del centro del circolo di Mohr) che è stabilizzante se di compressione e provoca invece accelerazione della crisi se di trazione (ad esempio surriscaldamento interno al materiale o prevalere dell'estensione).

Per la valutazione dello stato limite ultimo o rottura, come prima detto, è più utile svolgere le verifiche in termini di sollecitazioni e di spostamenti anziché di tensioni e deformazioni. Ciò specie per il confronto con i dati sperimentali che in campo non lineare o in presenza di forti imperfezioni, come nel legno con i nodi, si presentano in termini $F - s$ anziché $\sigma - \varepsilon$ (gli strain gauge del resto sono sostituiti con trasduttori di spostamento alle prime lesioni). Per valutare la sicurezza, con i criteri predetti, si deve allora analizzare il percorso delle sollecitazioni nel dominio di rottura ad es. $M - N$ di una sezione in conglomerato armato (v. figura 12 in basso), anziché il percorso delle tensioni ideali rispetto al dominio delle curve intrinseche (v. figura 12 in alto).

La sollecitazione di pressoflessione in un pilastro ad esempio di "spina" di un edificio passa da uno sforzo normale quasi centrato ad uno anche inflesso per effetto del vento e sino a rottura per effetto del sisma, lungo i percorsi delle rette $e/d = M/Nd$, essendo d l'altezza della sezione cementizia senza copriferro caratterizzante la posizione dell'armatura tesa.

I criteri di sicurezza rispetto ai descritti vari stati limite di comportamento della struttura prima delineati, peraltro personalizzati a seconda del tipo di materiale in progetto, sono stati tutti inizialmente usati con caratteristiche deterministiche anche nei riguardi delle azioni, ricercando un fattore di sicurezza unico sia "interno" che "esterno" come prima specificato.

Tali criteri non tengono conto dell'aleatorietà delle variabili in gioco soprattutto riguardanti le resistenze e le azioni. Come anticipato rispettivamente nelle figure 3, 4 e 6a,b per cercare di superare la problematica è stato introdotto nel modello matematico che individua il comportamento meccanico della struttura il calcolo *semiprobabilistico*. Si determina, in base alle leggi probabilistiche che governano le variabili del problema, la probabilità che queste raggiungano uno stato limite caratterizzato anch'esso da una funzione le cui variabili al limite raggiungono i valori estremi che non si devono superare. Ciascun parametro del modello di calcolo è caratterizzato allora da un valore medio $\bar{X} = \sum X_i/n$, con n numero delle misure, e da una varianza o scarto quadratico medio $\sigma_x^2 = \sum (X_i - \bar{X})^2 / (n-1)$ e da un coefficiente di variazione $V_x = \sigma_x / \bar{X}$.

Ciascuna variabile presenta allora una funzione di densità della probabilità $f(x)$ nella quale si può indicare il valore caratteristico X_k tramite il frattile ad esempio al 5%, ovvero con probabilità tale che il valore non venga superato nel 90% dei casi, come delineato nelle figure 3 e 12.

Se la funzione di densità è ad esempio gaussiana risulta per il predetto frattile per cui $X_k = \bar{X} + 1,64 \sigma_x = \bar{X} (1 + 1,64 V_x)$ mentre, se la distribuzione è esponenziale cosiddetta estrema di tipo I risulta invece $X_k = \bar{X} (1 + 1,86 V_x)$ e così via per altri tipi di distribuzione aleatoria dei dati o addensamento intorno ai valori medi sintetizzato proprio dal coeff. di variazione $V_x = \sigma_x / \bar{X}$

La distanza fra X_k ed il valore di progetto X_d (design) rappresenta pertanto un fattore parziale di sicurezza γ_x nel metodo semiprobabilistico a livello I dello studio della sicurezza in termini probabilistici. Il moderno criterio

semiprobabilistico della sicurezza cerca di superare i criteri deterministici proprio introducendo i predetti fattori parziali di sicurezza γ . A fianco al dominio di rottura $M - N$ di figura 8 è riportata la dispersione delle sollecitazioni di calcolo scaturenti dalla maggiorazione delle azioni di γ_p e γ_q e la dispersione della sollecitazione resistente scaturente dalla penalizzazione della resistenza dal conglomerato di γ_c secondo il delineato criterio semiprobabilistico per valutare la sicurezza su dati caratteristici (v. fig 6 e §III.1.1.)

L'aleatorietà dell'incremento delle sollecitazioni quale quella indotta dagli spostamenti del terreno o dagli eventi sismici, come la duale aleatorietà della riduzione della resistenza dovuta alla carenza di qualità e al degrado o indotta dall'instabilità e fatica ciclica, mettono in evidenza le differenze fra la virtuale perfezione dei modelli predetti (figura 3 o figura 5a sulle teorie riguardanti il dimensionamento), rigido ed elastico e plastico perfetti, e la caducità della realtà.

Tale aspetto non deve però creare sfiducia o rendere ipercritici verso la modellazione, cogliendone anzitutto le linee guida.

Il criterio di sicurezza semiprobabilistico agli stati limite basato sostanzialmente sulla maggiorazione del 50% delle azioni con particolare riguardo a quelle accidentali specie sismiche e sulla riduzione del 50% della resistenza rispetto a quella certa del materiale modello omogeneo ed isotropo o di qualità privo di imperfezioni, è soddisfacente. In pratica le opere in cui oltretutto prevalgono le azioni gravitative rispetto a quelle aleatorie sono più sicure e durabili come le costruzioni romane. Nelle macchine specie aeree in cui è necessario ridurre il peso, la vita delle strutture è invece molto corta e necessita di una continua manutenzione specie dopo forti tempeste, ovvero per forte prevalere del carico aleatorio rispetto a quello permanente. Così le opere in cui si "progetta" l'omogeneità della resistenza dei materiali nella costruzione suscitano una maggiore drabilità, qui intesa più come lunghezza di vita dell'opera più che solo resistenza maggiore agli agenti chimici aggressivi. Ciò persino se i moduli elastici non sono elevati come nelle murature con le bibliche pietre angolari che tuttora sfidano l'acciaio.

Il moderno criterio semiprobabilistico della sicurezza cerca di superare i criteri deterministici proprio introducendo i predetti fattori parziali di sicurezza γ_p , $\gamma_q=1,5$ ovvero, si ribadisce, che maggiorano del 50% i carichi specie accidentali e $\gamma_m=1,5$ ovvero che penalizzano del 50% le resistenze dei materiali. Ciò consente di allontanare della distanza di sicurezza la curva di dispersione dei carichi da quella della resistenza dei materiali, che normalmente sono di tipo gaussiano (v. figura 12).

Se il valore della Resistenza R supera quello della Sollecitazione S il progetto è costoso, viceversa si ha il crollo, per cui il progetto ottimale è per $R_d = S_d$. Il valore caratteristico dei carichi non deve superare ad esempio il 90% delle probabilità il valore medio, mentre il valore caratteristico della resistenza non deve essere inferiore ad esempio del 90% delle probabilità del valore medio. I fattori parziali di sicurezza per le resistenze, corrispondono allora al fattore $\gamma_R = R_k / R_d \equiv (1 - 1,64V_R) \bar{R} / R_d$, funzione della densità di probabilità accertata di dispersione dei dati R e del frattile assunto per definire il valore caratteristico. Al crescere del tipo di dispersione o del coefficiente di variazione V_R caratterizzante la densità di probabilità, e dell frattile da 0,05 a 0,20, cresce pertanto il fattore parziale di sicurezza γ_R ; inversamente risulta: $\gamma_S = S_d / S_k = S_d / (1 + 1,64V_S) \bar{S}$ per le azioni.

A sua volta l'antico criterio di sicurezza deterministico si basa su un coefficiente di sicurezza unico che può considerarsi, in base al predetto concetto di distanza di sicurezza, la somma $\eta = \gamma_q + \gamma_m$ dei fattori parziali o in base alla probabilità composta meno conservativamente il prodotto $\eta = \gamma_q \times \gamma_m$. Si noti che la distanza di sicurezza ad esempio (v. fig.12) fra la retta di rottura per attrito ed il circolo di Mohr d'esercizio dell'elemento più sollecitato, rispecchia proprio il modello di distanza in termini deterministici.

Gli studi interamente probabilistici si basano poi sull'analisi della variabile aleatoria Δx_1 caratterizzata dalla differenza fra la grandezza in esame e quella limite x_1 , per cui, allorquando si raggiunge tale stato, risulta $\Delta x_1 = 0$. L'indice di sicurezza viene definito allora tramite $\beta = \Delta x_1 / \sigma_{\Delta x_1}$ rapporto fra il valore medio di Δx_1 e la sua varianza (studio probab. di livello II di Lind).

Al ridursi pertanto dell'aleatorietà dei parametri che governano il di calcolo il valore di β ovvero della sicurezza cresce ed il progetto è più affidabile.

I moderni criteri di sicurezza su basi interamente statistiche probabilistiche o stocastiche (Safety Reliability) si spingono, sul basare la sicurezza direttamente sulla valutazione della probabilità (livello III) che dati eventi non vengano superati (ad es. $p = 10^{-6}$ che un caso insicuro si verifica su un milione di eventi) abbandonando i fattori γ . L'attrazione di tale criterio è però fortemente condizionata dalla carenza di misura delle funzioni di distribuzione della densità di probabilità, delle deviazioni standard, riguardanti la dispersione dei dati. Ciò richiede di solito un numero di prove usualmente non immaginabili nei lavori ordinari, con un eccessivo rapporto costi – benefici. Già con un numero di prove inferiori a 10 per ogni dato, il criterio può essere di fatto illusorio, per un interpretazione gaussiana ci vogliono almeno 12 misure, ovvero si vuole quantizzare "l'incertezza della misura dell'incertezza". Anatole France ricordava in proposito che il "Caso è lo pseudomino con cui si firma il Padre eterno".

Peraltro un'analisi di "sensibilità" degli effetti sul progetto indotti del variare sistematico di V , indipendentemente anche dalle misure dei parametri in gioco, evidenziano quelli che più influenzano la sicurezza, indicando ove concentrare le misure o migliorare i dati ,specie nei casi più delicati , come per il progetto di una centrale nucleare ove è richiesta la massima sicurezza. Al crescere della complessità dei criteri di calcolo, per cercare di descrivere meglio la realtà, il legame tra input ed output per contro si perde, lasciando il senso di incertezza di usare i risultati ciecamente o di fatto validandoli paradossalmente solo se sono dello stesso ordine di grandezza di quelle desumibili con i criteri deterministici specie basati drasticamente sui modelli rigido e elastico perfetti prima descritti.

Peraltro la sicurezza sarebbe totale se la realtà fosse ben rappresentata da modelli perfetti, rimanere fittiziamente in tale "certezza" spostando gli "stati limite" dei modelli (figura 3) diviene allora un criterio che è meglio accettare convenzionalmente, anche nello spirito della ginnastica mentale basata sui modelli chiari in cui almeno il modello di calcolo è perfetto, e che oltretutto consentono di dare spazio alle tante altre discipline che contribuiscono al progetto, fondandoli sugli studi classici di Statica e di Scienza delle Costruzioni.

Tabella 1

BATESON

Epistemologia è un interrogativo su "quanto sia possibile" conoscere e su "quanto di fatto" si conosce

VON FÖRSTER

Epistemologia è parola formata da "epi" e "histanai": mettersi sopra, quindi pensare su

MORIN

Pensare insieme il certo e l'incerto, il logico ed il contraddittorio, mettersi tra conosciuto ed ignoto, chiaro ed oscuro, dove razionalità non è sinonimo di razionalizzazione, anzi ne è l'opposto.

Tabella 2
Buona disposizione nei confronti degli errori

- La *produzione* (inevitabile) degli errori
- La *tolleranza* (necessaria ed utile) per gli errori
- L'*idoneità* come modelli di azione precostituiti (i nostri protocolli) che si mantengono (sono utilizzabili) in situazioni e condizioni stabili
- La sfida del non prevedibile e la creatività che nasce dalla cooperazione tra produzione e tolleranza per il pronto cambiamento dei modelli di azione

von Weizsäcker

Confronto fra due teorie di valutazione della verità in campo scientifico

GALILEI	POPPER
Verificazionismo	Refutazionismo
La certezza è possibile.	La certezza è impossibile.
La scienza è basata sulla prova.	La scienza è basata sulla confutazione.
L'osservazione rivela la verità.	L'osservazione implica l'interpretazione.
Il rilevamento dei fatti precede la formulazione delle teorie	La formulazione delle teorie precede il rilevamento dei fatti
Una buona teoria predice molte cose.	Una buona teoria esclude molte cose.
Una predizione è tanto più informativa quanto più è conforme all'esperienza.	Una predizione è tanto più informativa quanto è più rischiosa o deviante dalle attese.
L'induzione è la fondazione logica della scienza.	La deduzione è la fondazione logica della scienza.
L'inferenza induttiva è logica.	L'induzione è illogica.
Una teoria può essere validata indipendentemente e assolutamente.	Una teoria può essere corroborata solo relativamente ad altre teorie.
Fra teorie in competizione è preferibile quella che è stata più spesso verificata.	Fra teorie in competizione di uguale confutabilità è preferibile quella che ha resistito a più test di tipo diverso.
Le teorie diventano tanto più scientifiche quanto più sono state provate vere con osservazioni obiettive.	Le teorie diventano tanto più scientifiche quanto più sono rese confutabili, sia attraverso riformulazioni, sia con il miglioramento metodologico.

Fig.13 Aspetti epistemologici della sicurezza

La *sicurezza* e la *vita dell'opera* scaturenti come detto al paragrafo precedente, dal valutare preventivamente nel progetto il rapporto peso – azioni accidentali, le distribuzioni delle masse e delle rigidità e la loro omogeneizzazione specie in termini di resistenza, fornisce allora pratica certezza. Inoltre il rapporto costi – sicurezza – manutenzione viene equilibrato sino al punto che nei moderni criteri di appalto europei, oltre all'importo lavoro iniziale viene richiesto di valutare i costi di manutenzione per la durata di vita dell'opera. Si pensi in proposito ai ponti romani ancora in esercizio con carichi maggiorati e senza manutenzione quantomeno secolare se non millenaria, e al vecchio detto abruzzese “chi più spende meno spende” a cominciare dai costi dei progettisti, come si ribadirà nel paragrafo finale, se si vogliono accrescere posti di lavoro ai laureati.

Quantizzare tutto ciò solo in base al valore aggiunto è immiserire la cultura del progetto che necessita di una preventiva sussidiarietà pubblica, programmata con congrui anticipi e non solo in emergenza.

Allontanandosi poi dai due modelli costitutivi classici, rigido per la Statica ed elastico per la Scienza delle Costruzioni, didatticamente chiari, sottoponendoli a continue variazioni di normative che tutto vorrebbero prevedere probabilisticamente o formulare modelli per qualsiasi realtà, è un'altra perdita della limpidezza delle radici dei modelli classici a guidare la ragione. Normative che non possono comprendere tutti i casi della realtà costituiscono una fittizia limitazione di fatto alle responsabilità, proprio quelle che paradossalmente si vuole far rispettare, come evidenziava Nervi nel suo bel volumetto “Scienza o Arte del Costruire” in cui avrei preferito un “e Arte” non per diplomazia ma per armonia (pur se utopistica) fra Ingegneri ed Architetti, almeno per le radici culturali.

La complessità della realtà può indurre in diversi tipi di errore nel valutare la sicurezza di un progetto. Il pensiero quantitativo prevale su quello riflessivo qualitativo senza equilibrare il contributo dell'emisfero cerebrale destro “digitale” con quello sinistro “analogico”, scadendo nel *riduzionismo* illuminista o neopositivista o più estensivamente *nell'errore epistemologico* indicato nelle tabelle 1 e 2 di figura 13. Il calcolo digitale, dall'etimologico “numerare con le dita” (digit = cifra) valori finiti, al complicarsi dell'algoritmo costringe a fidarsi degli output destando, come già detto, insicurezza a chi “vuol toccar con mano”. Il calcolo analogico (valori infiniti) trasferendo

aspetti e forme bene studiate, per similitudine, a quelle in esame, specie usando la grafica per descrivere la Statica, è naturalmente più valido per la mentalità degli Architetti. La tecnologia inoltre se non è vista come riflessione sulle metodiche tecniche, fa eccedere nell'uso per cercare di interpretare la complessità, cadendo nel tecnicismo e dimenticando magari metodi ampiamente comprovati in passato. Nell'indagine per gli studi di consolidamento statico si vede ad esempio fare la termografia, prima del rilievo storico della consistenza muraria e del quadro fessurativo. Oppure si svolgono poche raffinate prove geotecniche triassiali erratiche in terreni alluvionali eterogenei che, come prima detto (v. figura 4), vanno invece provati in sito sistematicamente con il penetrometro statico. Situazioni analoghe si verificano in campo sismico. Le procedure inoltre ed i "protocolli" interpretativi delle cause, in particolare con criteri statistici – probabilistici sono usati per incasellare la complessità, cadendo negli eccessi del *previsionismo* desunto da pochi dati, dimenticando di ascoltare la realtà.

La stessa Ricerca "pura" sui modelli deve essere al servizio della realtà come ad es. il triassiale sui campioni ricostitutivi per valutare la variazione della resistenza al variare del grado di sovraconsolidazione o gli studi degli spettri sismici di progetto agli stati limite.

La comprensione eccessiva poi della realtà economico – imprenditoriale, può distorcere il rapporto ottimale costi – benefici in termini di sicurezza, cadendo nel *permissivismo*.

Davanti alle vite umane, non quantizzabili in denaro, è opportuno peraltro svolgere l'analisi rischio – benefici con spirito di prevenzione, anziché costi – benefici con *relativismo etico* o continua emergenza a disastri avvenuti.

Per rimanere solo nel merito stretto dell'impiego della modellazione meccanica per valutare la sicurezza di un progetto è opportuno percorrere parallelamente, sia la via *verificazionista* galileiana o della certezza ammissibile, sia la via *confutazionista* popperiana o del rischio, quindi dell'errore accettabile.

Questi due percorsi per ricercare la certezza se seguiti sino al limite estremo portano rispettivamente o ad un falso determinismo progettuale o all'impossibilità di decidere. E' evidente che il giusto è fra le due vie, convivendo con una buona disposizione verso gli errori opinabili, nella

speranza che ciò con il massimo discernimento sia compreso dagli assicuratori costretti a quantizzare il male e temperato dai magistrati in parte costretti a separare il bene dal male.

Il moderno criterio probabilistico sulla sicurezza tenta, come prima delineato, di recuperare i difetti dei criteri di sicurezza deterministici, con il nobile scopo di ricercare come meglio contemperare la complessità della realtà e della dispersione dei dati. Come tutte le ideologie si può cadere però nell'integralismo. La presenza infatti delle coazioni indotte specie dai cedimenti fondali o peggio da terremoti appena pregressi (after shock), oppure i fenomeni di fatica o di usura del tempo agenti sulla resistenza dei materiali o la sensibile eterogeneità delle strutture o dei terreni, può scardinare la predetta ricerca probabilistica di certezza. Ciò specie nel campo del consolidamento, della geotecnica e delle costruzioni sismiche o resistenti al vento a raffica ed alle mareggiate, oppure all'incendio o addirittura all'esplosione come richiesto dai militari con costi elevatissimi.

Le normative si rimettono di fatto peraltro ai criteri deterministici proprio nei predetti campi ove l'aleatorietà è maggiore solo per la carenza di misure della dispersione dei dati.

Si riprendono allora le considerazioni sopraddette dettagliatamente svolte dal Prof. Nordio Ordinario di Pediatria a Trieste, sulla necessità di "convivenza" con gli errori, pur minimizzati, nella cure dei neonati patologici che richiedono una "sicurezza" massima per evitare sofferenze e lutti. Dal suo articolo comparso su "Medicina e Morale" sono tratte le tabelle di fig. 13 in cui si pongono a confronto le due classiche vie, verificazionista di Galilei e confutazionista di Popper per risolvere problemi e fare previsioni.

Il criterio di basare le decisioni sulla falsificazione del modello, per prevedere la familiarizzazione con gli errori e quindi la scoperta del risultato desiderato, rovescia il criterio verificazionista in cui il modello decisionale serve per prevedere il risultato e quindi verificare l'errore possibile.

Tanti sforzi peraltro protesi a prevenire errori e contenere dispersioni tramite una ciclica aggregazione e disaggregazione dei dati e dei trend noti, non può certo cadere nella "negligenza", "imperizia" ed "imprudenza", cause per cui un errore deve giustamente essere incriminato dal Pubblico Ministero. I progettisti non possiedono dogmi come i teologi e sono costretti, ma anche stimolati, dal cercare di superare le difficoltà reali, accettando i margini di

rischio da errori accettabili non capziosi né vessatori, che corre solo chi fa con coraggioso spirito d'iniziativa ,del tipo imprenditoriale sano.

I limiti di separare le variabili per analizzarle in modelli mentre sono un valido sussidio didattico, possono opacizzare o cristallizzare la conoscenza della realtà vera, percorribile in ogni caso anche per via qualitativa specie etica.

A tal proposito inoltre il Nobel per la Medicina Jacob afferma "...ciò che è vero è che la bellezza e la verità cambiano con le culture e in una stessa cultura con i tempi" senza aprioristici dogmatismi, né facili sincretismi.

Per ritornare ancora verso il quantitativo meccanicistico oltre ad incrementare la sperimentazione reologica sino al monitoraggio in vera grandezza per consentirne la ricostruzione "a posteriori" delle caratteristiche meccaniche dei materiali, come descritto nel precedente paragrafo, per meglio propagare i dati di progetti complessi, e trasmettere l'esperienza fra generazioni, è importante introdurre il concetto di *stati limite: di esercizio ed a rottura od ultimo*.

Per lo stato limite di esercizio si può far riferimento ai criteri di sicurezza classici delle Scienze delle Costruzioni all'inizio richiamati, basati sulla limitazione della distanza del deviatore delle tensioni principali ovvero del circolo di Mohr o percorso delle tensioni più sfavorevoli, dalla curva intrinseca di resistenza del materiale in particolare attrittiva coulombiana. Più direttamente si possono limitare gli spostamenti e le rotazioni delle strutture in rapporto alle luci ($\delta/l \leq 1/500$), o porre l'attenzione che non si inneschino fessurazioni per eccesso di trazioni, come delineato in figura 5 sul predimensionamento.

Fra i detti criteri quello anche tradizionalmente più impiegato in passato viene definito metodo delle *tensioni ammissibili* nel quale la tensione di esercizio $\sigma_{ideale} \leq \sigma_{amm} = \sigma_f / \eta$ essendo η il fattore di sicurezza "interno" deterministico rispetto alla tensione di rottura del materiale σ_f . I vantaggi di tale metodo, generalizzato nell'analisi allo stato *limite di esercizio* oltre a quelli detti di controllare le frecce elastiche e quindi le rigidzze e di predimensionare il calcolo specie iperstatico, nel caso del cemento armato consente di usufruire della semplificazione, di omogeneizzare il ferro con il cemento tramite il rapporto dei moduli e soprattutto di controllare l'aderenza dei ferri nei nodi vincolandoli idoneamente.

Il metodo però presenta diverse critiche specie per il c.a. ove il calcestruzzo si fessura già in campo d'esercizio, pur elastico in compressione, per cui è più realistico esaminare lo stato *limite a rottura* specie al taglio per esaminare i margini di sicurezza reali. I vantaggi di tale analisi sono quelli di tener conto più realisticamente dell'aleatorietà dei carichi (che esasperano le rigidzze nell'analisi puntuale elastica ovvero priva di qualsiasi punto plasticizzato) e di basarsi su fattori di sicurezza "esterni" contemperanti le plasticizzazioni. E' consentito poi di valutare il ruolo della duttilità (v. figura 9) e rapportando la sicurezza a sollecitazioni resistenti ben quantizzabili sperimentalmente. Per tale ragione le moderne normative richiedono di svolgere i calcoli in base allo stato limite di rottura da affiancare a quelli dello stato limite di esercizio per usufruire anche dei vantaggi di quest'ultimo.

Per ambedue gli stati limite sono state descritte le corrispondenti combinazioni delle azioni e dei relativi fattori parziali di sicurezza (v. fig. 6a,b) da accoppiare a quelli penalizzanti le resistenze (v. figura 3).

La Didattica e l'uso del Calcolo nella progettazione ha subito una forte modificazione con l'avvento del calcolatore.

La manualistica che prima si basava su analisi parametriche riassunte in "carte universali" o in "nomogrammi" o in pazienti tabulazioni, oggi sono solubili caso per caso evidenziando con l'analisi di sensibilità i parametri che più influenzano il progetto.

I fogli elettronici e i data base non pongono limiti all'entità dei dati manipolabili e ciò consente di tener conto di un numero elevatissimo di equazioni per ciascuna condizione di carico, o legge costitutiva, o aleatorietà varie.

E' evidente però quanto siano dapprima necessari gli insegnamenti classici ad iniziare da quelli di Statica grafica, e la valutazione degli ordini di grandezza dei fenomeni da valutare con calcoli in "forma chiusa" in modo da effettuare un sano predimensionamento.

La cultura acquisita dal passato si combina così con l'evoluzione presente, senza nostalgie o eccessi di avanguardia, rimanendo soprattutto al servizio dell'uomo.

