sismica italiana del '96 le azioni sismiche sono maggiorate del fattore parziale di sicurezza γ_E = 1,5 secondo i canoni dell'analisi allo stato limite ultimo.

La fig.7 evidenzia le caratteristiche e i simboli principali degli spettri di progetto sia indicati nell'Eurocodice 8, sia in quelle italiane per i vari stati limite. Lo spettro poi viene caratterizzato dal fattore q di comportamento delle strutture.

Se si confrontano le risposte di strutture di diversa resistenza e regolarità costruttiva, a parità d'intensità del terremoto in un abitato, si vede che quelle non crollate sono quelle duttili e peraltro non ricadenti in zone di faglia o di rilevanti mutamenti stratigrafici o rilevanti pendii.

In presenza di stratigrafie regolari e di strutture regolari, ovvero non vulnerabili come quelle di figura 1, è di valida prevenzione progettare in modo che l'uscita dal campo elastico sia prodotta dall'intensità di progetto $\ddot{s}_d$ = $\ddot{s}_{max}$ /q, essendo q il fattore che tiene conto della duttilità e regolarità della struttura. Lo spettro si può ridurre di q divenendo a_g, per la duttilità controllata, tornando come ordine di grandezza al coefficiente d'intensità sismico C÷0,1 che mantiene lo spettro in campo elastico.

Il fattore q consente di fare tale valutazione anziché in maniera forfetaria, valutando i benefici di progettare le nuove strutture duttilmente. Quanto maggiori sono le possibilità di plasticizzazione della struttura, tanto minori quindi possono essere le forze di progetto, pur mantenendo la stessa sicurezza nei confronti del terremoto che produce il collasso senza arrivare al crollo in modo da salvaguardare le vite umane.

Si deve all'Architetto Wright aver in tale ottica, impiegato degli smorzatori plastici sotto le fondazioni del grattacielo progettate in Giappone,in modo da assecondare il terremoto, precorrendo gli studi di ingegneria sismica.

Per le strutture esistenti, specie in muratura nelle quali tutta è affidato alla plasticizaazione delle malte di qualità, unita ad una valida consistenza muraria (v. figura 2) ed al contenimento di variazioni geologiche di pendio (geo-morfologia), tali validi criteri basati sulla duttilità contribuiscono solo in parte alla sicurezza, che deve pertanto essere affidata ad incrementi della resistenza, ad esempio tramite il placcaggio-giuntato dello scrivente.

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 8) 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 σ_1, σ_2, σ_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

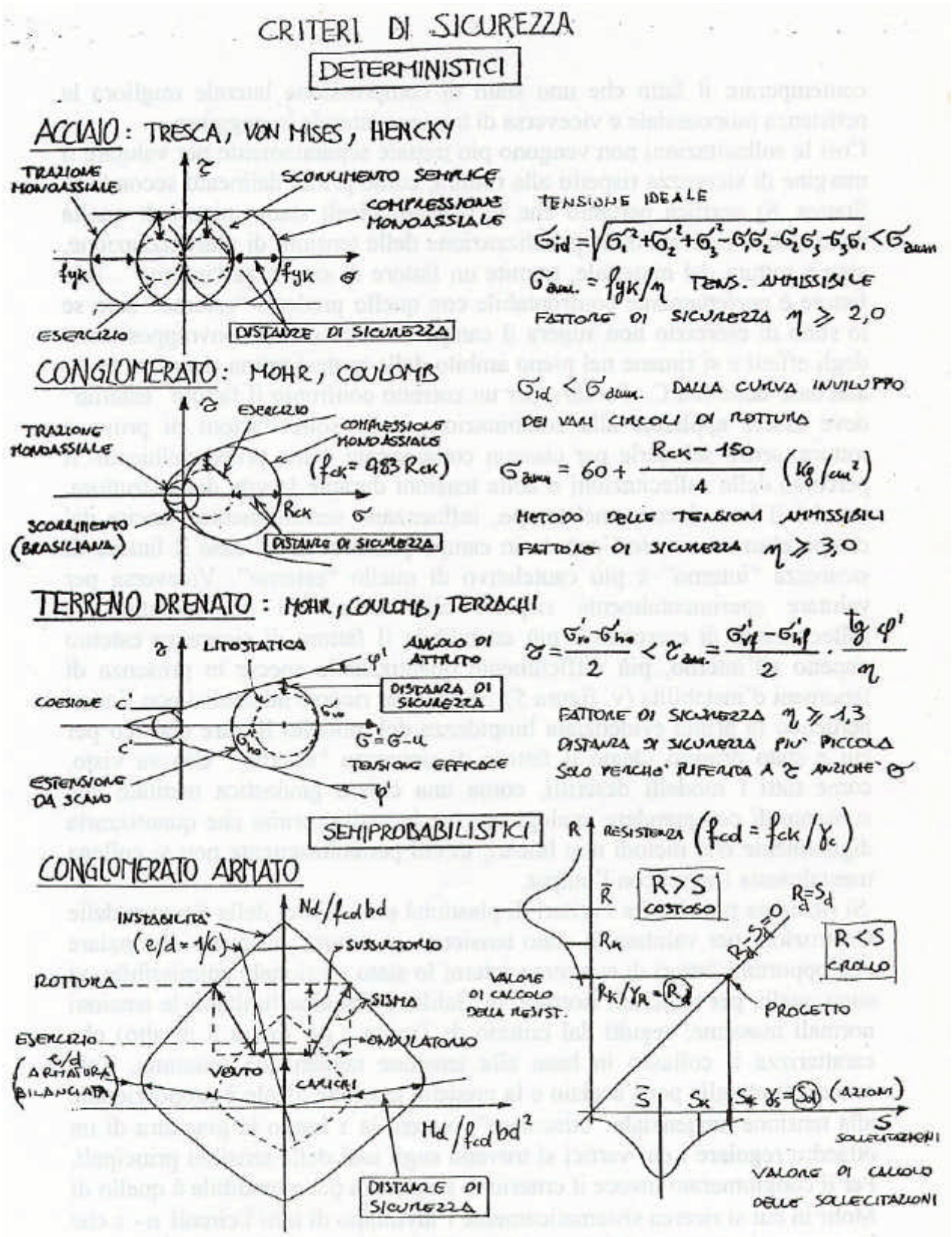

Fig.8 Percorsi delle tensioni ammissibili e distanza di sicurezza interna deterministica. Percorsi delle sollecitazioni di calcolo e distanza di sicurezza esterna semiprobabilistica.

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 8 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'inviluppo di tutti i circoli σ- τ che innescano la rottura del materiale, tale inviluppo 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 8. 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'atrito 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 attribuivano 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 σ - ε (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 8 in basso), anziché il percorso delle tensioni ideali rispetto al dominio delle curve intrinseche (v. figura 8 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 6, 7 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 $\overline{X}$, da una varianza o scarto quadratico medio σ^2_x e da un coefficiente di variazione $V_x = \sigma_x / \overline{X}$.

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 8.

Se la funzione di densità è ad esempio gaussiana risulta per il predetto frattile $X_k = \overline{X}(1+1{,}65\ V_x)$ mentre, se la distribuzione è esponenziale cosiddetta estrema di tipo I risulta invece $X_k = \overline{X}(1+1{,}86\ V_x)$ e così via per altri tipi di distribuzione aleatoria dei dati o addensamento intorno ai valori medi sintetizzato proprio dal coefficiente di variazione V_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.

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 tabella sulle teorie sul 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.

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 durabilità, 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, γ_q=1,5 ovvero, si ribadisce, che maggiorano del 50% i carichi specie

accidentali e γ_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 8).

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 se $X_d \equiv \overline{X}$ corrispondono allora al fattore $\gamma_x = X_k / X_d \equiv (1+1{,}65V_x)$, funzione della densità di probabilità accertata di dispersione dei dati X e del frattile assunto per definire il valore caratteristico.

Al crescere del coefficiente di variazione $V_x = 0{,}05 \div 0{,}20$ cresce pertanto γ_x.

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. figura 8) 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_l caratterizzata dalla differenza fra la grandezza in esame e quella limite x_l, per cui, allorquando si raggiunge tale stato, risulta $\Delta x_l = 0$. L'indice di sicurezza viene definito allora tramite $\beta = \Delta x_l / \sigma_{\Delta x_l}$ rapporto fra il valore medio di Δx_l e la sua varianza (studio probabilistico di livello II di Lind).

Al ridursi pertanto dell'aleatorietà dei parametri che governano il modello 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, 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 nei casi ad esempio del 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. 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.

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. Una teoria può essere validata indipendentemente e assolutamente.	L'induzione è illogica. 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.9 Aspetti epistemologici della sicurezza

La *sicurezza* e la *durabilità* scaturenti come detto al paragrafo precedente, dal valutare preventivamente nel progetto il rapporto peso – azioni accidentali, le distribuzioni delle masse e delle rigidezze 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 a guidare la ragione. Normative che non possono comprendere tutti i casi della realtà costituiscono una limitazione di fatto alle responsabilità, proprio quelle che paradossalmente si vuole far rispettare, come dichiarava Nervi nel suo bel volumetto "Scienza o Arte del Costruire" in cui avrei preferito un "e Arte" non per diplomazia ma per armonia (pur a volte utopistica) fra Ingegneri ed Architetti.

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 9. 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 raffinate prove geotecniche triassiali 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 figura 9 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 che corre solo chi fa con coraggioso spirito d'iniziativa del tipo imprenditoriale.

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.

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*.

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 attritiva coulombiana. Più direttamente si possono limitare gli spostamenti e le rotazioni delle strutture in rapporto alle luci ($\delta/l \div 1/500$), 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 rigidezze 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 rigidezze 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 7) 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. figura 6 e 7) 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.

I.6 IL RUOLO DEGLI ASPETTI TECNOLOGICI, ORGANIZZATIVI ED ECONOMICI

I criteri di sicurezza dati nel precedente paragrafo in termine di "stati limite" e di vaglio dell'aleatorietà dei parametri in gioco nella pratica realizzativa sono influenzati dal comportamento di una vasta gamma di operatori.

E' evidente l'importanza delle modalità e dei tempi di finanziamento di un'opera a cominciare dagli incarichi per la progettazione esecutiva prevedendo il coordinamento della gestione dei lavori divenuta sempre più articolata con il fiorire delle specializzazioni. La progettazione *preliminare,* incentrata sullo studio di fattibilità, e seguita da quella *definitiva,* articolante le scelte generali e dalla progettazione *esecutiva* incentrata sui particolari costruttivi, deve pertanto essere effettuata con congruo anticipo. Il conseguente computo metrico estimativo sui quali si valutano i margini di profitto, deve svolgersi nei casi più complessi, quali quelli nel campo della geotecnica, del consolidamento o di opere stradali, ferroviarie o marittime, introducendo anche interventi prototipo – pilota strumentati, in sintonia con realistici finanziamenti per stralci successivi. Ciò consente di affrontare studi sperimentali con l'ausilio del monitoraggio, in cui tutte le capacità dei partecipanti sono esaltate per estrapolare dati da esperienze ed analisi dei costi di opere consimili già realizzate, in modo da trovare il giusto equilibrio fra costi e sicurezza.

Solo al ridursi della complessità le previsioni di progetto "al computer" ed "a tavolino" come già evidenziava Coulomb sono possibili in termini strettamente tecnici.

La figura 10 mostra in merito, a titolo esemplificativo, la scelta del tipo di opere di sostegno in funzione dei vari tipi di meccanismo di collasso e di stato limite ammesso per la struttura e per il terreno specie in presenza di edifici a ridosso del sostegno.

Si può passare da una scarpata con h/b = 2/3÷1 con terreni di basso costo, a muri con h/b÷3 sino a costose paratie con h/b÷7 a secondo del centro di

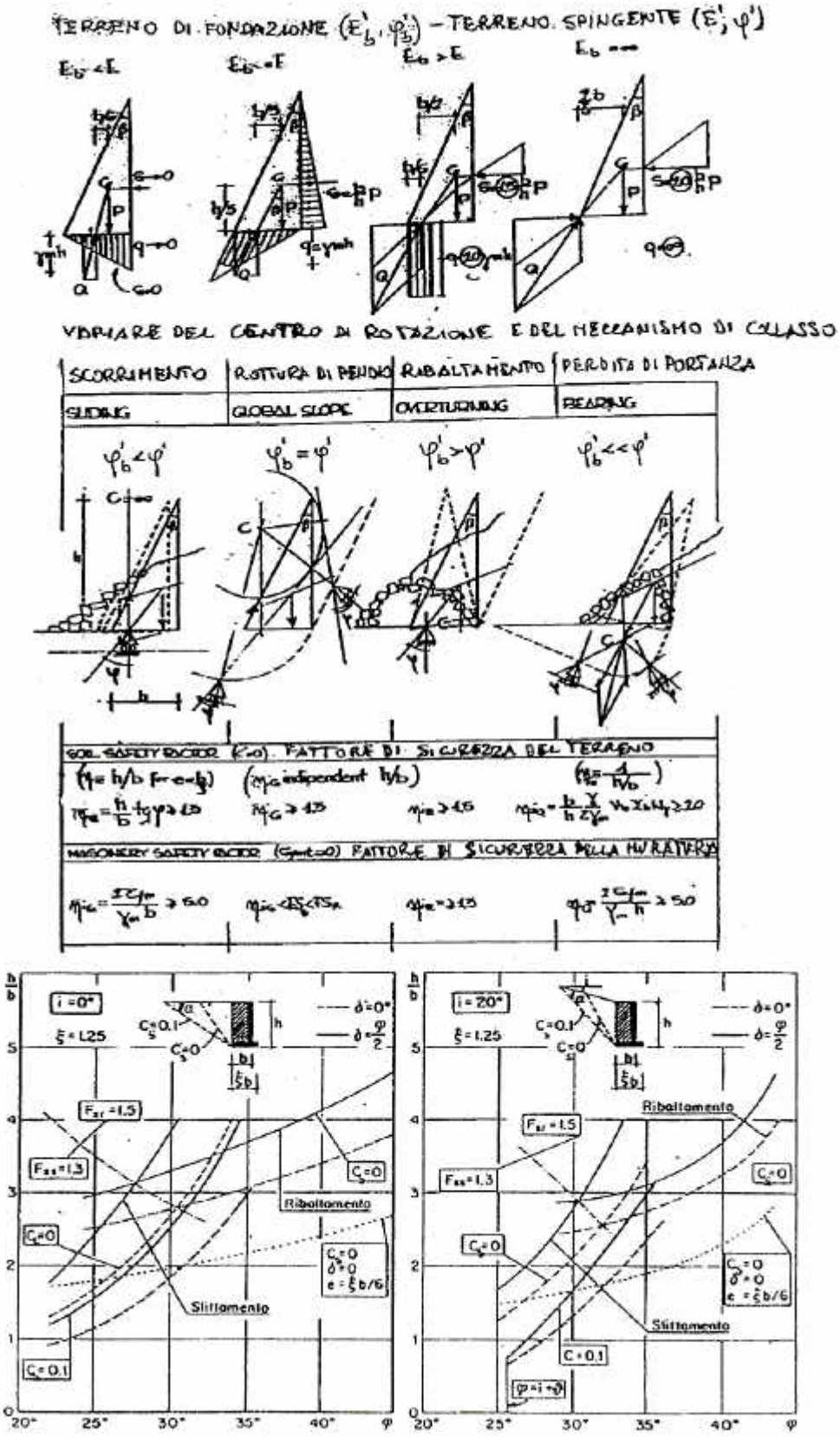

Fig.10 Incremento delle dimensioni h/b e dei costi di un muro a gravità al ridursi delle varia caratteristiche meccaniche dei terreni e al crescere delle azioni sismiche ovvero del coefficiente di intensità $C_S = 0.1$ d'esercizio rispetto $C_S = 0$ delle spinte statiche.

rotazione del meccanismo di collasso (stato limite ultimo) e degli spostamenti ammessi (stato limite di esercizio).

Tener conto di tali criteri è importante per la valutazione dei costi specie nel campo del consolidamento di vecchi abitati in zone geologicamente tormentate anche per effetto del sisma o delle alluvioni.

La "performance bond" con gli operatori economici pubblici e privati è inoltre fondamentale, specie in fase di studio, progetto e preventivo estimativo (indice dei prezzi unitari, analisi dei costi, computo metrico).

Questo deve portare anche a formulazioni delle normative da parte degli estensori pubblici dei codici, che non possono cambiare ed amplificarsi con frequenza troppo elevata, specie se a carattere cogente come è in Italia a differenza degli altri paesi Europei. Ancora una volta la "rigidezza" al posto della perfetta rigidità, in modo da prevenire il male.

La miriade di codici, come del resto di leggi, finisce per non creare qualità o giustizia, meglio meno norme "imperfette" ma che siano rispettate basandosi sulla tradizione dell'Arte del costruire con responsabilità prescritte, senza continue capziose varianti.

L'impiego poi di tecnologie sempre più limitanti il costo della manodopera, sino alla produzione delle macchine "usa e getta" per evitare la manutenzione, ha snaturato la qualità delle costruzioni edili degradando l'ambiente. Si è andato dimenticando l'importanza dell'artigianalità delle maestranze e dei materiali naturali che sono durati secoli con costi non drogati dal valore aggiunto degli ultimi ritrovati della chimica.

La cooperazione tecnica e la "configuration management", per usare il pragmatismo anglosassone, fra committente, progettista, direttore dei lavori, fornitori, produttori di officina o prefabbricatori, collaudatori in corso d'opera , è fondamentale per la qualità e la sicurezza dell'opera in modo che al suo completamento si disponga degli elaborati *"come costruito"* (as built) per il saldo.

Gli utenti dell'opera devono poi rispettare i limiti di esercizio (*serviceability*) dell'opera e curarne la manutenzione per allungarne la vita, come quella umana, ammettendo anche la fine per demolizione, anche per una riqualificazione urbanistica.

In tale ottica l'importo lavori deve essere tarato anche sul costo della manutenzione per la vita dell'opera, in modo che questo non sia scaricato

totalmente alla generazione successiva che già deve pagare i danni per carenze occupazionali ed eccessi assistenziali pensionistici.

La ricostruzione, specie su terreni centrali di valore, può creare nuovo lavoro oltre che ridare qualità alle città evitando espansioni "dormitorio" e riducendo il traffico, l'impiantistica stradale e soprattutto la lontananza dalla bellezza dei centri storici.

Il "controllo di qualità" previsto dalle normative per le varie tecnologie e la gestione ben coordinata di cantiere hanno un costo che è oltremodo contemperato dal risparmio sulla spesa pubblica e privata, e crea lavoro a tanti tecnici preparati che meritano un'attività adeguata e dignitosa a qualsiasi età.

L'attuale proposta del *project financing* per promuovere il coinvolgimento di soggetti privati rispetto alle pubbliche amministrazioni al fine di realizzare l'intero ciclo di progettazione, realizzazione e gestione con fornitura di servizi a tariffa per rifarsi degli investimenti, può finire per far acquisire al mondo della finanza solo i settori pubblici redditizi, come sta accadendo nel campo sanitario. Urge allora che il gettito fiscale sia mirato preventivamente solo ai settori veramente deboli con principio di sussidiarietà rispetto all'iniziativa privata che ha invece l'enorme valore di creare posti di lavoro non assistenzialisti o precari sotto la spinta dell'emergenza mai prevenuta.