

MODELLAZIONE STRUTTURALE E SOFTWARE DI CALCOLO

(NTC 2008 - art. 10.2)

antonio perretti, ph.d.

spoletto, 12-14 febbraio 2009

aperretti@dica.unict.it

(corso breve di alfabetizzazione strutturale)

1

La validazione del calcolo strutturale eseguito con il computer

Ovvero come attestare la qualità di calcoli consapevolmente approssimati (e non 'errati' con grande esattezza')

(Seguono le diapositive costituenti solo il filo conduttore delle lezioni tenute in aula)

2

Norme tecniche D.M.14.01.08

Redazione dei progetti strutturali esecutivi e delle relazioni di calcolo.

10.2 ANALISI E VERIFICHE SVOLTE CON L'AUSILIO DI CODICI DI CALCOLO

Qualora l'analisi strutturale e le relative verifiche siano condotte con l'ausilio di codici di calcolo automatico, il progettista dovrà controllare l'affidabilità dei codici utilizzati e verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti, curando nel contempo che la presentazione dei risultati stessi sia tale da garantire la leggibilità, la corretta interpretazione e la riproducibilità. In particolare nella Relazione di calcolo si devono fornire le seguenti indicazioni:

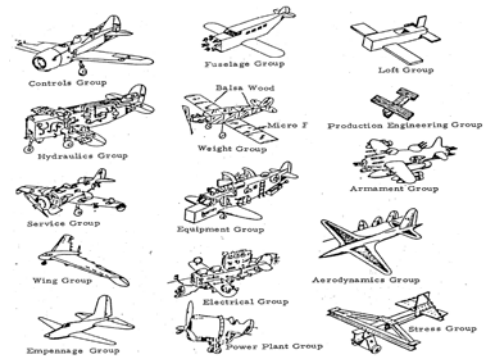
• Tipo di analisi svolta

Occorre preliminarmente:

- dichiarare il tipo di analisi strutturale condotta (di tipo statico o dinamico, lineare o non lineare) e le sue motivazioni;
- indicare il metodo adottato per la risoluzione del problema strutturale e le metodologie seguite per la verifica o per il progetto-verifica delle sezioni;
- indicare chiaramente le combinazioni di carico adottate e, nel caso di calcoli non lineari, i percorsi di carico seguiti. In ogni caso va motivato l'impiego delle combinazioni o dei percorsi di carico adottati, in specie con riguardo alla effettiva esaustività delle configurazioni studiate per la struttura in esame.

3

Il pericolo degli squilibri nella specializzazione nella progettazione



4

Macro Obiettivi – La 'composizione' strutturale

1. Riconoscimento strutturale
2. Previsione di massima del comportamento globale
3. Scelta degli elementi finiti in funzione delle rigidzze fondamentali
4. Progettazione della struttura
5. Validazione delle scelte strutturali

5

Filo conduttore

1. esame della progettazione strutturale di un edificio complesso, a struttura mista in zona sismica;
2. come impiegare correttamente più elementi strutturali, mono e bidimensionali, in cemento armato ed acciaio;
3. adozione di un sistema non convenzionale di protezione sismica (base isolation)
4. verifiche da effettuare per evitare di produrre 'raffinatissimi calcoli, 'errati' con grande esattezza'

6

Come Validare il calcolo strutturale?

- a- attraverso il modello numerico?
 - Elementi finiti – qualità della formulazione?
- b- con l'esattezza della soluzione numerica?
 - Benchmark – soluzioni in forma chiusa?
- c- con la verifica attraverso la *vulnerabilità*?
 - Secondo una gerarchia?
- d- verifica della realtà fisica?
 - Condizioni al contorno – terreno – sisma?
- e- utilizzando un altro software?
 - Risultati entrambi *errati* con la stessa approssimazione!

7

Il riconoscimento dell'oggetto architettonico e composizione strutturale

1. L'oggetto architettonico e il suo contorno
2. Morfologia sito: - planovolumetria – geologia – geotecnica – sondaggi in situ - relazioni
3. Schema macroscopico di funzionamento

8

Le fonti di errore nella progettazione strutturale

Fattori quasi 'esogeni' alla modellazione (ad esempio)

- Caratterizzazione dei suoli – prove in situ – trincee trivellazioni – affidabilità dei risultati (deduzioni) in funzione delle caratteristiche del suolo, della fondazione e della sovrastruttura
- Storia tensionale e deformativo del sito – grado di antropizzazione del sito – reti e sottoservizi – stratificazioni -

Fattori quasi 'endogeni' alla modellazione

- Conoscenza basi teoriche
- Conoscenza dei limiti della modellazione numerica
- Conoscenza dei limiti della modellazione numerica

Indice:

1. esame complessivo del progetto architettonico
2. esame plano-altimetrico del sito
3. studio della geologia del sito e connessioni geotecniche-sismiche
4. discussione del problema strutturale globale - carichi
5. comportamento sismico globale (*q-factor*)
6. scelta delle fondazioni e delle opere di sostegno
7. sequenza costruttiva - montaggio e modelli statici variabili
8. previsione di comportamento 'a freddo'
9. scelta degli elementi finiti
10. modelli numerici preliminari
11. protezione sismica - sistema a base fissa e a base isolata
12. verifica dei risultati - sistema di isolamento
13. verifica della risposta statica e dinamica
14. verifica dei risultati - elementi mono dimensionali
15. verifica dei risultati - lastre / piastre
16. riflessione critica finale sulla *realtà e il modello numerico*.

10

Parte 0

Aspetti filosofici della verifica

I concetti fisici sono creazioni dell'intelletto umano e non vengono, come potrebbe credersi, determinati dal mondo esterno.

Nello sforzo che facciamo per intendere il mondo rassomigliamo molto all'individuo che cerca di capire il meccanismo di un orologio chiuso.

Egli vede il quadrante e le sfere in moto, ode il tic-tac, ma non ha modo di aprire la cassa.

Se è ingegnoso, potrà farsi una qualche immagine del meccanismo che considera responsabile di tutto quanto osserva, ma non sarà mai certo che tale immagine sia la sola suscettibile di spiegare le sue osservazioni.

Egli non sarà mai in grado di confrontare la sua immagine con il meccanismo reale e non potrà neanche rappresentarsi la possibilità ed il significato di simile confronto.

Da: A. Einstein, *Pensieri degli anni difficili* (1935), Boringhieri, 1969

Esattezza e Rigore

[...] La conoscenza matematica non è più rigorosa di quella storico-filologica.

Essa ha solo il carattere dell'ESATTEZZA, che non coincide con il RIGORE. [...]

Da: M. Heidegger, *Cos'è la metafisica?* (1929), Adelphi, 2001

12

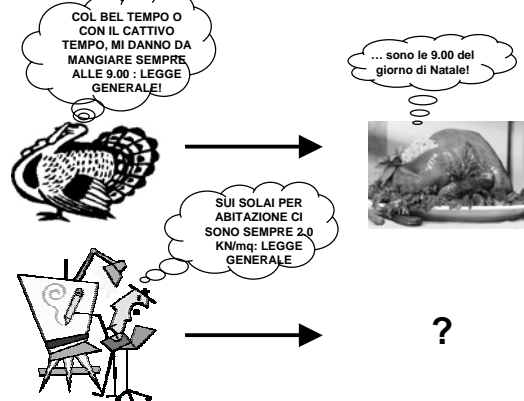
Filosofia (o necessità) del controllo dei risultati Alcuni elementi epistemologici della sicurezza

La valutazione della "verità" in campo scientifico, da
Galilei a Popper

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

13

Critica all'APPROCCIO INDUTTIVO (Popper)



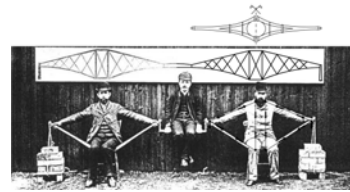
14

Parte II L'universo Strutturale



15

Corso breve di Alfabetizzazione Strutturale



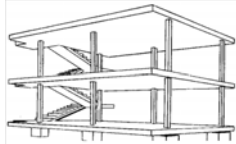
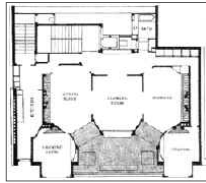
16



ENDOSCHELETRO



ENDOSCHELETRO



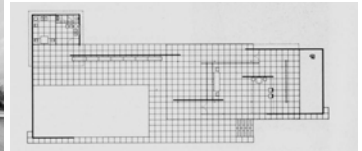
ESOSCHELETRO



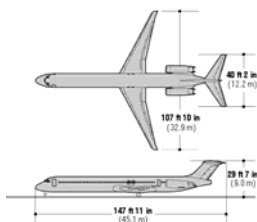
ESOSCHELETRO



ESOSCHELETRO

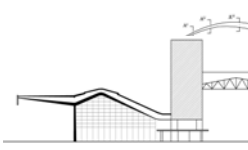
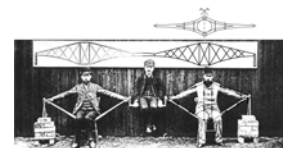
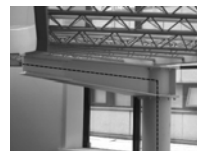


Esoscheletro artificiale: MD80



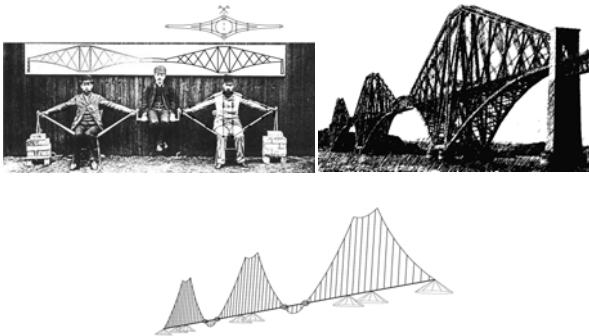
23

Visione Globale dei Problemi Strutturali



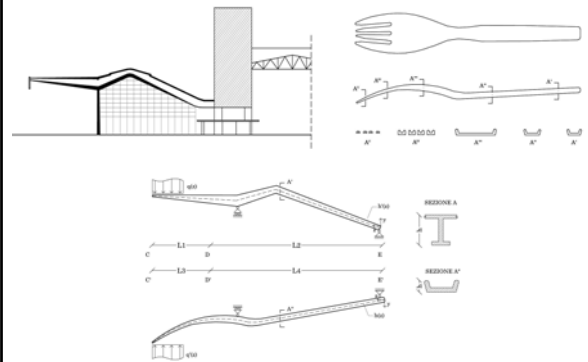
24

L'intuizione strutturale



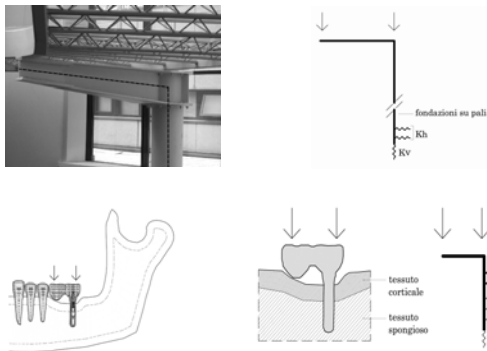
25

Il fattore dimensionale



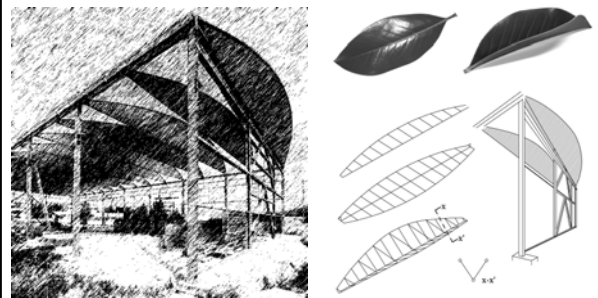
26

Le condizioni le contorno



27

L'efficienza strutturale



28

Struttura		Materiali principali	Luce in metri										
			0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	100
3.1		Legno	5	8	12								
		Metallo (acciaio)	5	7	20	25							
		Calcestruzzo armato	5	10	15								
		Legno lamellare	7	10	20	35							
		Metallo (acciaio)	5	7	25	30							
		Calcestruzzo precompresso	7	10	25	30							
3.2		Legno	5	8	12								
		Metallo (acciaio)	5	7	20	25							
		Calcestruzzo armato	4	8	12								
		Legno lamellare	10	15	40	50							
		Metallo (acciaio)	10	15	50	60							
		Calcestruzzo armato	7	10	25	30							
3.3		Legno lamellare	10	15	40	50							
		Metallo (acciaio)	10	15	50	60							
		Calcestruzzo armato	7	10	25	30							
		Legno lamellare	10	15	40	50							
		Metallo (acciaio)	10	15	50	60							
		Calcestruzzo armato	8	10	25	35							
3.4		Legno lamellare	15	20	50	60							
		Metallo (acciaio)	15	20	70	80							
		Calcestruzzo armato	10	15	30	40							
		Legno lamellare	15	20	50	60							
		Metallo (acciaio)	15	20	70	80							
		Calcestruzzo armato	10	15	30	40							

La Trave: Rapporti dimensionali tipici

29

Struttura		Materiali principali	Luce in metri										
			0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	100
3.3		Legno lamellare	10	15	40	50							
		Metallo (acciaio)	10	15	50	60							
		Calcestruzzo armato	5	8	15	20							
		Legno lamellare	10	15	40	50							
		Metallo (acciaio)	10	15	50	60							
		Calcestruzzo armato	5	8	15	20							
3.4		Legno lamellare	10	15	40	50							
		Metallo (acciaio)	10	15	50	60							
		Calcestruzzo armato	5	8	15	20							
		Legno lamellare	10	15	40	50							
		Metallo (acciaio)	10	15	50	60							
		Calcestruzzo armato	5	8	15	20							

L'insieme di travi: Rapporti dimensionali tipici

30

La non linearità geometrica e meccanica Push_over



31

La non linearità geometrica e meccanica Push_over -2-



32

La non linearità geometrica e meccanica Push_over -2-



33

PARTE I I sub-componenti



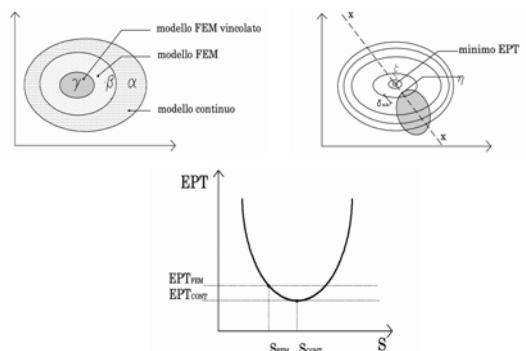
Kublai Kan "...*E qual è la pietra che sostiene il ponte?*"
Marco Polo "*Il ponte non è sostenuto da questa o quella pietra, ma dalla linea dell'arco che esse formano*".
Kublai Kan rimane silenzioso, riflettendo. Poi soggiunge: "*E perché mi parli di pietre? È solo dell'arco che m'importa*".
Marco Polo: "*Senza pietre non c'è arco*". [...]

Da: Italo Calvino, *Le città invisibili*, Einaudi, 1972

(Metodo degli Elementi Finiti)

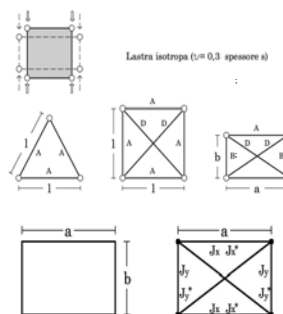
34

La qualità della soluzione numerica



35

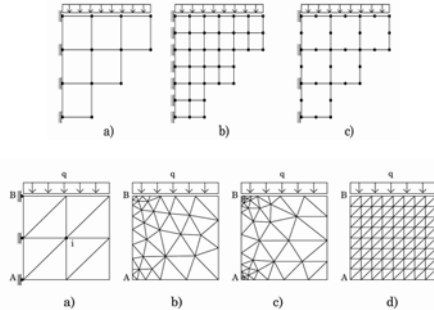
Elementi piani **equivalenti**: 'quasi' elementi finiti



36

Miglioramento della qualità della modellazione

Con incremento dei nodi e con o senza variazione delle funzioni di forma



37

La qualità della modellazione



MODELLO	Abbassamento estremità	errore
1. Trave di De Saint Venant	1.03	0%
2. Trave 1shell a 4 nodi (equivalente)	0.74	-27.8%
3. Trave 2shell a 4 nodi (equivalente)	0.94	-8.5%
4. Trave 4shell a 4 nodi (equivalente)	0.95	-7.5%
5. Trave 6shell a 4 nodi (equivalente)	0.98	-4.6%
6. Trave 10shell a 4 nodi (equivalente)	1.00	-2.7%
7. Trave 20shell a 4 nodi (equivalente)	1.01	-1.7%
8. Trave 1shell a 8 nodi (isoparametrico)	0.94	-8.5%
9. Trave 2shell a 8 nodi (isoparametrico)	1.00	-2.7%
10. Trave 4shell a 8 nodi (isoparametrico)	1.00	-2.7%
11. Trave 4shell a 8 nodi (isoparametrico)EIS	1.01	-1.7%

38

Mensola bidimensionale

esplorazione flessionale piastre rettangolari

ipotesi piastra in x, incastrata lungo il lato minore

DM9/1/96

C

l

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

ν

a

b

h

ρ

E

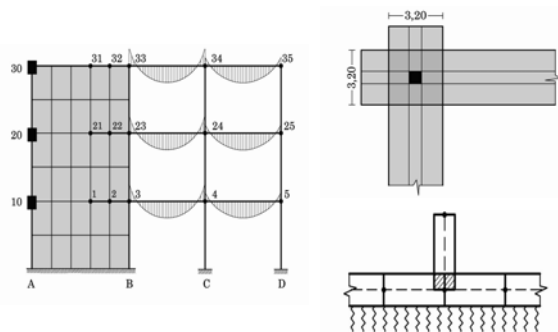
ν

a

b

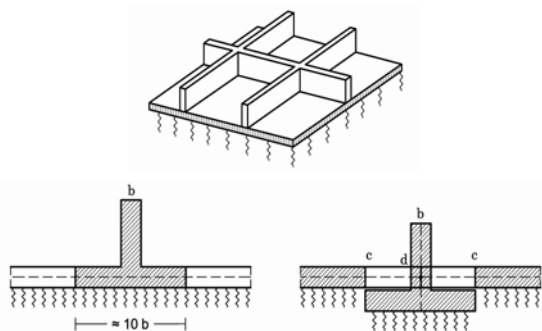
h

La sovrapposizione di elementi



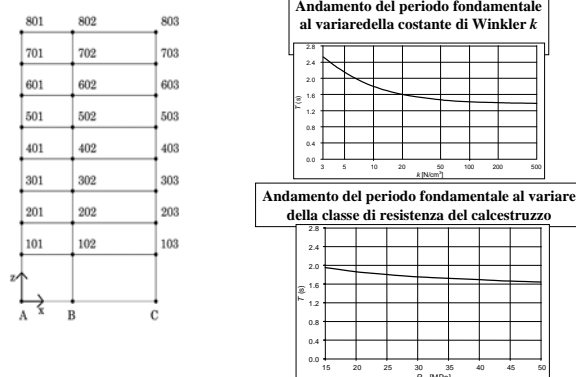
43

La composizione di elementi

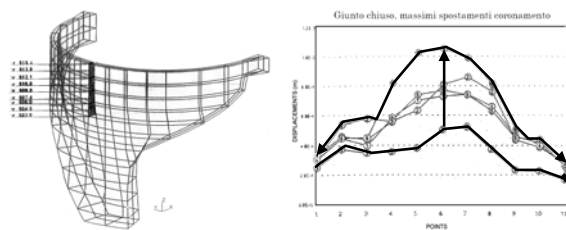


44

La qualità della modellazione



La qualità della modellazione: confronto tra diversi software



46

FATTORE DI STRUTTURA

6.3.3 Fattore di struttura

Il fattore di struttura q è introdotto per tener conto della capacità di dissipazione dell'energia sismica, dipende dalla tipologia strutturale, dal grado di dissipazione, dalla duttilità locale delle componenti e dal grado di regolarità della configurazione strutturale. Per questo, esso viene espresso per ciascuna tipologia strutturale nella forma seguente:

$$q = q_0 \cdot I_p \cdot I_d \quad (6.1)$$

dalla quale:

- q_0 dipende dalla tipologia strutturale e dal grado di dissipazione sismica (classe di duttilità);
- I_p è un fattore che tiene conto delle risorse di duttilità locale delle zone dissipative;
- I_d è un fattore che dipende dalle caratteristiche di regolarità dell'edificio.

Il fattore I_p vale:

- Edificio regolare in altezza (punto 4.3): $I_p = 1.0$
- Edificio non regolare in altezza (punto 4.3): $I_p = 0.5$

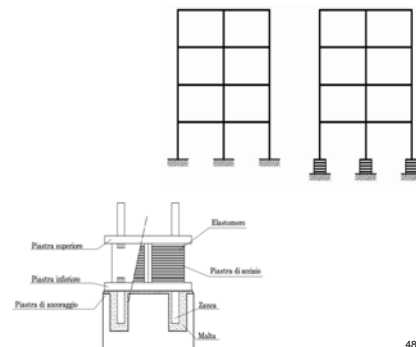
Tabella 6.1 - Valori di q_0 per le diverse tipologie strutturali e le diverse classi di duttilità

TIPOLOGIA STRUTTURALE	CLASSE DI DUTTILITÀ	
	BASSA	ALTA
Strutture intelaiate	4	$5q_0 \cdot I_d$
Controventi reticolari concentrici	2	4
Controventi eccentrici	4	$5q_0 \cdot I_d$
Strutture a muro o a parete invertita	2	—
Strutture intelaiate controventate	4	$4q_0 \cdot I_d$

47

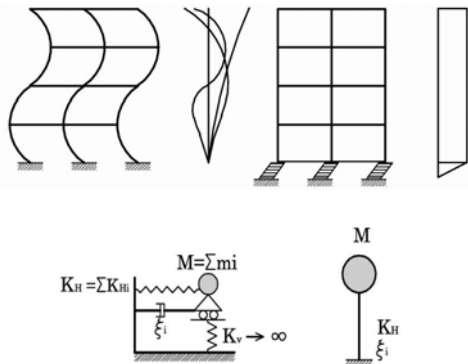
Sistemi strutturali isolati alla base

Gli isolatori HDRB



48

Sistemi strutturali isolati alla base



49

Parte IV Conclusioni

1 – Frequenti cause di errore

1. Errori numerici del solutore (in passato)
2. Operatore poco formato sul metodo e sulle ipotesi o documentazione insufficiente
3. Errata interpretazione del problema fisico
4. Scelta di elementi finiti non opportuni in relazione del problema fisico in esame

50

Le fonti di errore nella progettazione strutturale

Fattori quasi 'esogeni' alla modellazione

- Caratterizzazione dei suoli – prove in situ – trincee trivellazioni – affidabilità dei risultati (deduzioni) in funzione delle caratteristiche del suolo, della fondazione e della sovrastruttura
- Storia tensionale e deformativo del sito – grado di antropizzazione del sito – reti e sottoservizi – stratificazioni -

Fattori quasi 'endogeni' alla modellazione

51

Conclusioni 2 – Controlli indispensabili

1. Verifica con schemi semplici diversi
2. Controllo ordini di grandezza
3. Verifica della stabilità della soluzione in seguito a piccole variazioni dei principali parametri come:
Stabilità della soluzione al variare della mesh
Stabilità della sol. al variare del num. di nodi
Stabilità della soluz. al variare del tipo di elementi

52

Conclusioni 3 - Attenzione ai benchmark

- Gli esempi di calcolo (benchmark) riportati nei manuali, per testare la 'robustezza' del codice di calcolo, funzionano SEMPRE. (Es. stato tensionale in una lastra forata) – Tuttavia, la validazione globale basata SOLO su tali test, potenzialmente, può risultare **ERRATA CON GRANDE ESATTEZZA se estesa al modello globale.**
- I Benchmark per strutture reali globali, salvo eccezioni, non possono esistere in quanto la difficoltà risiede nella interpretazione della realtà fisica. Con approccio ingegneristico (e non matematico) si deve testare la soluzione in un intervallo di comportamento. In relazione alle finalità, la validazione deve quindi mostrare che il calcolo è **APPROSSIMATO CONSAPEVOLMENTE.**

53

Conclusione

Per le strutture reali, oltre alla verifica dell'applicazione delle norme tecniche, la validazione del calcolo (in assenza di target) deve essere basata essenzialmente sulla verifica della stabilità della soluzione numerica, al mutare di tutti i parametri in intervalli fisicamente significativi, criticamente individuabili solo dal progettista strutturale.



Grazie per l'attenzione

54

**ESEMPI NUMERICI DI
MODELLAZIONE**
(vedere altri files allegati)

55