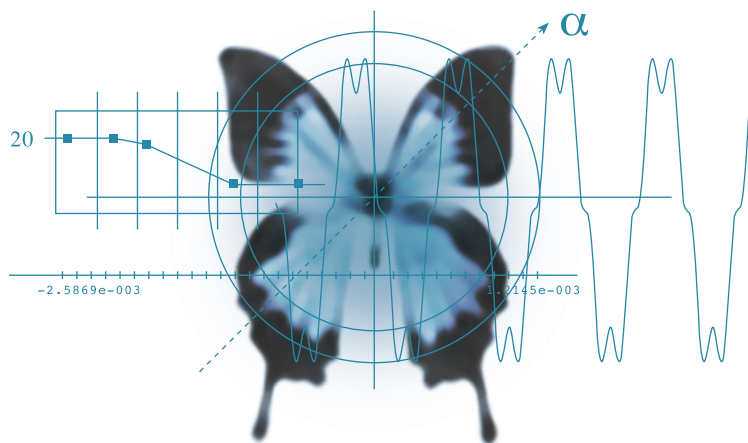


ROBERTO SPAGNUOLO | GIUSEPPE PASCUCCI

# CONCETTI

DI INGEGNERIA ANTISISMICA  
ALLA BASE DELLA NUOVA  
NORMATIVA



# INDICE

Premessa .....	5
1. Introduzione al corso.....	10
2. La simulazione virtuale.....	20
3. La duttilità.....	33
4. La tecnica dello spettro di risposta .....	40
5. Duttilità delle membrature in calcestruzzo armato .....	45
6. Effetti del secondo ordine .....	53
7. Analisi dinamica nel dominio del tempo.....	63
8. Capacity design.....	74
9. MultiStage .....	79

---

<b>Percorsi progettuali .....</b>	<b>87</b>
Presentazione .....	89
Introduzione .....	90
Percorso 1 .....	92
Percorso 2 .....	118
Percorso 3 .....	152
Percorso 4 .....	168
Percorso 5 .....	174
Percorso 6 .....	191

---

<b>Easy Beam per immagini.....</b>	<b>217</b>
------------------------------------	------------

---

<b>Cenni sull'origine dei terremoti</b> di Elena Spagnuolo .....	<b>239</b>
--	------------

© 2007, Softing srl.

Questo testo è stato redatto a cura della Softing srl. È proprietà della Softing srl. La diffusione è consentita solo a patto che sia integra e che venga integralmente riportato il testo, il titolo e la proprietà. La copia parziale per inserimento o per citazioni è espressamente proibita se non è chiaramente citata la fonte. Questo testo contiene opinioni e consigli della Softing srl sui quali la Softing non assume alcuna responsabilità né in merito alla esattezza né alla applicabilità a casi specifici.

# PREMESSA

Nel 2007 abbiamo deciso di parlare di ingegneria antisismica per “svelare” e in qualche modo “smitizzare” la pantomima della “nuova” normativa antisismica che, nel silenzio generale, sta aggiungendo incertezze e difficoltà a un professione già marginalizzata. Questa iniziativa nasce da la nostra passione per l’ingegneria e si è potuta realizzare perché la Softing ha deciso di non partecipare più ad eventi fieristici, ritenendoli del tutto fuori degli schemi di comunicazione adatti alla sobrietà della vera ingegneria, ed è tornata all’incontro diretto, molto più serio e significativo per un rapporto tra professionisti che sono poi anche pochi di numero. Questo testo costituisce una “traccia” stesa durante la preparazione di questo corso. Nelle parti più tecniche rispecchia abbastanza fedelmente gli argomenti toccati nel corso anche se tali argomenti sono stati sviluppati in modo diverso secondo le esigenze. Nelle parti introduttive e generali invece si tratta solo di idee fissate per agevolare l’esposizione in quanto durante il corso si è andati, per certi argomenti, molto “a braccio”.

Pertanto non si ha alcuna pretesa di completezza o chiarezza né tanto meno di esattezza. Questo testo è stato reso disponibile su richiesta degli intervenuti ai corsi che desideravano, oltre al volume “Percorsi progettuali” loro dato in omaggio, avere una traccia del corso. Quindi va inteso in questo senso e con questo spirito.

Per chi non abbia assistito al corso, aggiungiamo che agli argomenti teorici qui trattati si intercalavano degli esempi fatti al computer che allargavano in genere l’argomento estendendolo quasi sempre a situazioni “insolite” per portare l’ascoltatore sempre verso un’immagine più rilassata e aperta possibile del problema.

Un altro elemento che ci piace notare – che per la prima volta è stato introdotto in questo settore, nei limiti delle possibilità di persone come i relatori con formazione prevalentemente tecnica – è l’idea di ravvivare l’esposizione con una esposizione “a due voci” tra i relatori che ha la funzione di porre in modo diretto le domande che si presumeva potessero voler fare gli intervenuti. A nostro avviso questa “tecnica” ha aiutato a rendere meno stancante un argomento non certo “leggero” soprattutto se trattato così a lungo come in questo corso. Speriamo che il nostro sforzo di seguire anche tecniche di comunicazione specifiche per dare la maggiore utilizzabilità di questo nostro sforzo sia stato gradito ai presenti.

## Presentazione del corso

Sono quattro anni che è uscita la “nuova” normativa antisismica. Noi, come molti altri, siamo stati coinvolti da varie diverse esigenze ad approfondire gli aspetti della normativa. Da una parte siamo stati chiamati a fare dei corsi per i nostri utenti e ci siamo confrontati con i più diversi livelli di conoscenza e con le più diverse esigenze dei progettisti. Ma più che altro abbiamo dovuto progettare il software in grado di rispondere al meglio ai requisiti della nuova normativa. E non solo. Abbiamo anche dovuto preparare i nostri utenti all’uso dei nostri programmi con la nuova normativa perché, purtroppo, una “cultura” del calcolo automatico delle strutture non è affatto diffusa.

Fare software, contrariamente a quanto molti pensano, non è una attività “compilativa” ma sofisticatamente progettuale. Almeno, se si fa software seriamente. Quindi non abbiamo potuto limitarci a vedere i requisiti di normativa come fatti “burocratici” e procedurali, disuniformi e parcellizzati nei paragrafi del testo di legge. Si richiede l’x % di staffe in tali condizioni? E noi ce le mettiamo. Questo sarebbe stato un approccio sbagliato progettualmente e perdente come politica industriale. Noi abbiamo dovuto risalire alle fonti della normativa per comprenderne le esigenze più nascoste in modo da consentire ai nostri prodotti di dare le risposte più ampie e soddisfacenti per i nostri clienti.

Per questo ci teniamo molto a dire che siamo “diversi” e che il nostro software “fa la differenza”. Perché noi crediamo che andando al cuore del problema si offra una soluzione valida. Se invece lo si affronta solo per dare una risposta contingente, non si costruisce, non si progetta e in definitiva non si dà un buon servizio al cliente.

Questo corso è ispirato proprio a questa filosofia di approccio: non fermarsi alla superficie della norma ma vedere i motivi fisici dell’approccio che la normativa propone, ma non dice, e poi di vedere le prescrizioni che ne scaturiscono come un “sotto prodotto” dell’idea generale. Una volta padroneggiato il principio informatore, il resto diviene molto banale.

Quindi quello che faremo in questo corso è “scattare” delle “fotografie” degli aspetti fisici del progetto antisismico e cioè non faremo degli approfondimenti calcolistici ben noti e forse poco utili a chi usa sistemi informatici, ma delle “immagini” dei problemi perché se ne capisca la portata e si sia in grado, da progettisti, di muoversi in uno spazio di conoscenza corretta.

Per questo motivo abbiamo fatto di tutto per studiare un approccio molto

semplice evitando formule. I meno attenti non si lascino ingannare. Farsi aiutare dalle formule è molto semplice: si tratta di un linguaggio sacerdotale che spesso serve a nascondere non-conoscenze e incertezze. Inventare invece un percorso didattico che speriamo sia convincente e utile è ben altra impresa.

Il corso quindi si svolgerà a vari livelli. Una presentazione del problema fisico che sottende l'ingegneria antisismica. Il problema verrà illustrato non tramite formulazioni teoriche ma tramite la risoluzione numerica caso per caso con i nostri programmi e quindi sarà una sorta di approccio "sperimentale" e non teorico. Alla illustrazione di questi "esperimenti" affiancheremo la risoluzione di alcuni di essi direttamente con i nostri programmi per introdurre gradatamente le tecniche di approccio consapevole a qualsiasi approfondimento tecnico con programmi flessibili ed evoluti come i nostri.

Appena i concetti generali saranno stati tutti esposti, intercaleremo queste illustrazioni dei principi di base con la soluzione di problemi di analisi e progetto di strutture con modelli completi fatti sempre con i nostri programmi. Questa terzo livello di lettura del corso serve sia a far conoscere il nostro modo di approcciare il problema sia a far vedere il nesso causale immediato tra principio fisico o normativo e risvolto progettuale e di calcolo.

Abbiamo investito molta passione e molte energie nel pensare e preparare questi corsi. Speriamo di essere riusciti nell'intento di dare delle informazioni senza soprattutto annoiare.

## **Normativa e ingegneria antisismica**

La normativa non è una "linea guida" di progetto, come molti la intendono ma rappresenta dei requisiti minimi che devono essere osservati nel progetto di una struttura.

Purtroppo la normativa in Italia è "cogente" nel senso che va rispettata alla lettera perché è una legge. Diciamo purtroppo perché questo fatto ha generato una mentalità progettuale più volta al soddisfacimento dei requisiti di legge che non di progetto. Ciò non di meno, la normativa si basa su criteri progettuali e ne indica i metodi e i parametri secondo cui devono essere applicati tali criteri. Possiamo quindi vedere la normativa come una raccolta di elementi emergenti e visibili di un substrato invisibile che li collega tutti. Il substrato sono i criteri progettuali. Se non si conoscono o non si capiscono a fondo tali criteri, la norma appare come una disordinata collezione di prescrizioni astruse. Si possono anche criticare certe prescrizioni o il modo in cui

sono espresse ma è innegabile che derivino da un concetto unitario che purtroppo non è sempre chiaro a tutti e non molti, in genere, si spendono per renderlo noto.

La normativa antisismica, che da circa quattro anni ci viene proposta in varie forme, è basata sull'Eurocodice 8 e quindi nulla di nuovo e l'Eurocodice 8 è basato sui “moderni” metodi di ingegneria antisismica. Anche questi si possono valutare ed eventualmente anche non condividere ma prima bisogna conoscerli.

Molti corsi sulla normativa si perdono nell'esame dei singoli paragrafi illustrandone il contenuto. I dettami della normativa sono facilmente comprensibili, non serve certo chiarirli a dei professionisti. Quello che occorre chiarire è invece quanto soggiace alla normativa per far vedere come i singoli provvedimenti scaturiscano da questo disegno generale. E questo vogliamo fare con il nostro corso, un corso prezioso perché questo approccio orientato più alla cultura che non alla nozione non è comune ed è tutto da costruire.

In una sintesi estrema, utile soprattutto per capire come e perché abbiamo strutturato in questo modo questo corso, possiamo dire che la moderna ingegneria antisismica parte da queste considerazioni:

- Una struttura deve reagire a eventi sismici di bassa intensità non danneggiandosi e quindi non subendo deformazioni plastiche, cioè restando in campo elastico.
- Per eventi più intensi, la struttura può danneggiarsi, cioè subire deformazioni plastiche, ma non deve crollare.
- Il secondo punto si può ottenere facendo valutazioni in campo non elastico facendo affidamento sulla duttilità della struttura e quindi sulla sua capacità di dissipare energia per deformazione plastica.
- La difficoltà di ricorrere ad analisi non lineari, indispensabili perché il comportamento duttile può essere descritto solo da leggi non lineari, viene risolta con un ampliamento della già collaudata e semplice tecnica dello spettro di risposta tramite la riduzione degli spettri elastici a spettri di risposta che tengano conto del comportamento anelastico in funzione della duttilità e della morfologia della struttura.

- Poiché questa riduzione degli spettri elastici è attuabile solo usando parametri pre-calcolati per varie e ben definite tipologie strutturali (fattore di struttura), nella realizzazione della struttura si devono scrupolosamente rispettare i criteri usati nel definire i modelli della tipologia strutturale “campione”. Questo soprattutto per conseguire la duttilità che in tali modelli si è ipotizzata. Va notato che certe prescrizioni che possono sembrare solo di “buon progetto” in zona sismica (regolarità etc.) sono invece anche prescrizioni per operare su modelli analoghi a quelli di riferimento. Questo aspetto non deve essere mai trascurato!

Visto così, il coacervo di prescrizioni articolata nel modo tipico delle leggi, e non delle linee guida progettuali, anche se non perdono l'odore di avvocatizio, mentre vi vorremmo più sapore di cemento, sono assolutamente e facilmente comprensibili.

La parola chiave della moderna normativa antisismica è “duttilità”. Ed è il fil-rouge che la percorre e che percorrerà in gran parte questo nostro corso.



# 1. INTRODUZIONE AL CORSO

Questo corso vuole essere diverso da quelli che si sono susseguiti in questi ultimi quattro anni sul tema delle nuove normativa.

La nuova normativa ha sollevato una serie di problemi e destato degli allarmi che francamente non si comprendono. I contenuti sono noti da anni in quanto sono frutto di studi sulla progettazione antisismica che datano almeno venti anni e inoltre sono negli Eurocodici da almeno dieci anni. Basti citare, e qui lo facciamo per motivi affettivi visto che chi scrive è stato prima allievo e poi assistente di quel genio che fu Sergio Musmeci, “Introduzione alle costruzioni antisismiche” ben del luglio 1976. Quindi ci si chiede il motivo di tanta preoccupazione per cose che dovrebbero essere più che familiari a ogni progettista.

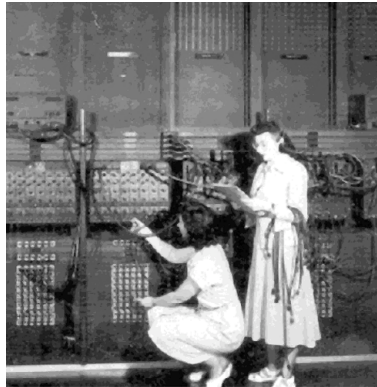
Il problema di fondo è che forse l'ingegneria strutturale si è andata involvendo verso una visione quasi cabalistica e esoterica, complice in questo anche un certo mal uso l'uso di quella “palla di vetro” che è il software per ingegneria strutturale, per cui si è perso lo scopo di certe modellazioni matematiche e cioè quello di “simulare” la realtà per capire come operare al meglio. Prevale, complice l'aspetto cogente delle norme, l'aspetto burocratico e procedurale del progetto.

Ci sono due aspetti invece, a nostro avviso, fondamentali.

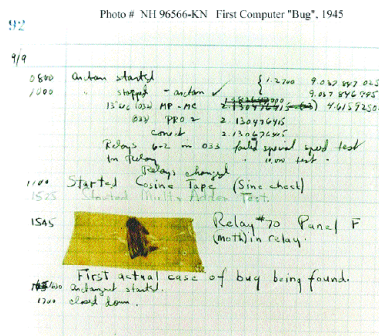
Primo punto. La “moderna” ingegneria antisismica si basa su concetti non del tutto nuovi ma certamente poco noti ai più e certamente poco applicati con consapevolezza. Intendiamo, sommariamente, parlare dei criteri atti a far dissipare energia alla struttura ricorrendo alla conoscenza dei meccanismi di duttilità, di gerarchia delle resistenze e così via.

Secondo punto. L'uso del software è indispensabile nella progettazione antisismica. Ma c'è una domanda che non ci si vuole porre perché è comodo non porsi: Quale deve essere il ruolo del software nella progettazione? Come si diceva, il prevalere di un atteggiamento procedurale e burocratico può far credere che il software per progettare sia paragonabile, nel suo ruolo, a quello gestionale. E molti programmi per ingegneria sono progettati in tal senso. Ma è corretto? Noi riteniamo di no. L'ingegneria ha troppe variabili e non si presta a essere “inscatolata” salvo problemi molto standardizzati e ripetitivi. Ma

sappiamo bene che anche in una banale villetta di due piani vi è una tale variabilità morfologica e strutturale che può essere ricondotta solo con molte approssimazioni a uno “standard”. Quindi il software per ingegneria non può essere procedurale e deve poter dare risposte trasparenti. Quello che c’è dentro la scatola nera del software si deve poter vedere.



*Anche se spesso facciamo finta di niente tutti noi con il computer ci dobbiamo misurare. (Electronic Numerical Integrator and Computer (ENIAC), 1946. Sviluppato dalla US Army durante la II Guerra Mondiale per calcoli balistici, pesava più di 30 tonnellate e occupava quasi 200 mq di superficie).*



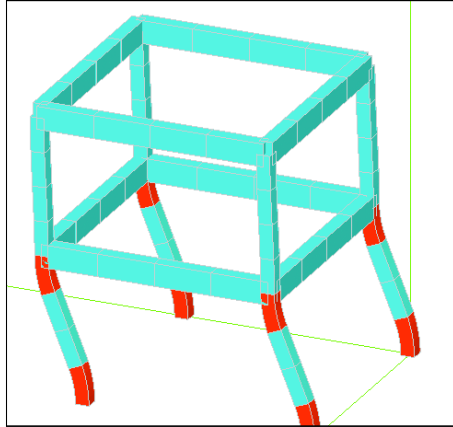
*Il primo “baco” mai documentato. Si trattava di una farfallina impigliatasi nei contatti di un relay.*

Quindi in questo corso ci siamo proposti di affrontare i temi del progetto antisismico non solo dal punto di vista delle prescrizioni normative, che sono banali, ma dal punto di vista dei criteri di fondo. E poiché tali criteri si riescono a spiegare molto bene usando software che abbia il requisito della generalità, della potenza e della trasparenza, il nostro intento sarà quello di mostrare contemporaneamente i due aspetti fondamentali e cioè i criteri progettuali e la loro simulazione tramite software.

I temi che tratteremo saranno quindi i seguenti:

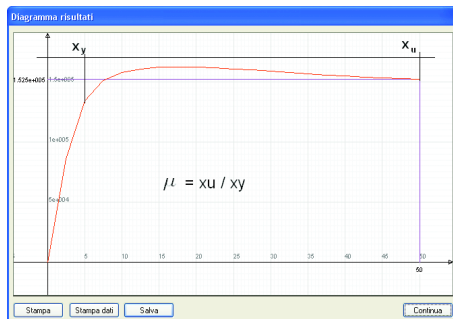
- *Simulazione virtuale*

Mostreremo la “frontiera” che si è raggiunta con la sofisticata modellazione dei materiali.



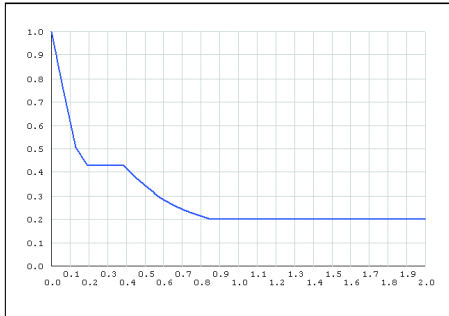
- *Duttilità*

Ne vedremo l'importanza fondamentale nel progetto di strutture sismo resistenti.

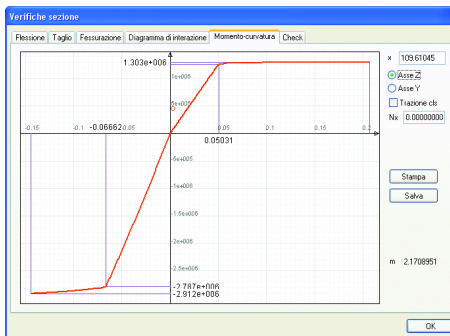


- *Le tecnica dello spettro di risposta*

Faremo vedere la natura dello spettri di risposta e l'influenza che hanno sul progetto.



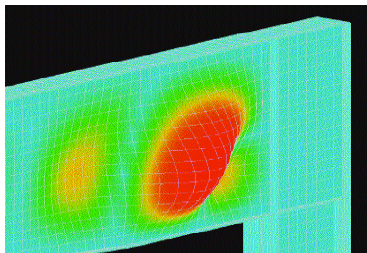
- *Duttilità delle strutture in calcestruzzo armato*  
Vedremo l'importanza, il calcolo, la variazione della duttilità in funzione della densità di armatura.



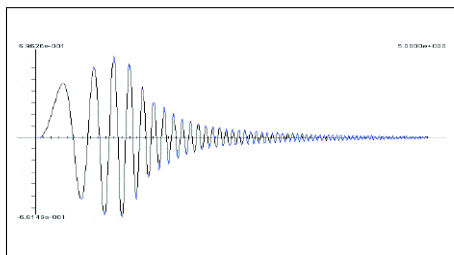
- *Gerarchia delle resistenze e "Piano soffice"*  
Faremo vedere l'effetto della gerarchia delle resistenze sulla formazione del fenomeno del "piano soffice" e l'importanza che riveste nella sicurezza della struttura.



- *Effetti del secondo ordine*  
Mostreremo gli effetti del secondo ordine sia in analisi statica che modale.



- *Analisi nel dominio del tempo*  
Illustreremo la differenza tra analisi spettrale e nel dominio del tempo.  
Mostreremo e useremo gli accelerogrammi di terremoti “famosi”.

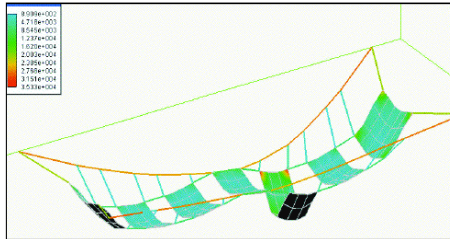


- *Capacity design*  
Illustreremo le tecniche di capacity design (“pushover”).



- *Multistage*

Faremo vedere la nostra nuova tecnologia MultiStage per l'analisi di strutture in fasi temporali.



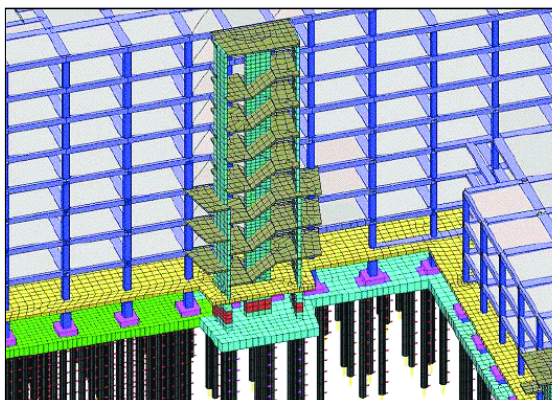
Vorremmo fosse molto chiaro un fatto. Per avere dei benefici da questo corso, occorre sgombrare la mente dall'assillo di domande come: Ma io come faccio a fare la relazione di calcolo? Come faccio ad adempiere al comma tal dei tali? Cosa dirà il paragrafo a pagina tale? Non si deve tenere, in questo incontro, la mente sospesa nell'attesa continua di una risposta a una nostra esigenza contingente. Questa risposta viene da sola dopo che si sono compresi i criteri di fondo. Quindi vi invitiamo a prendere questo incontro come una "passeggiata" nell'ingegneria antisismica e vedrete che alla fine della passeggiata avrete forse risposto a molte domande di fondo che sono più importanti e proficue del comma e del paragrafo.

Un'altra cosa della quale occorre sgombrare la mente in questo incontro, è quello di aspettare a ogni momento che si veda risolta sul monitor la vostra struttura. Non è questo il nostro scopo, non dovete pensare in termini di lavoro quotidiano. Gli esempi e le modellazioni che faremo non sono finalizzate a farvi vedere quanto i nostri programmi siano in grado di raffigurare i panorami della vostra quotidianità, quanto vi siano aderenti e quindi rassicuranti. Se facessimo questo non vi daremmo molto. Noi qui invece vogliamo far vedere come i nostri programmi possano modellare la realtà e quindi quanto in essi vi siano potenzialità che, usate poi appunto nella quotidianità, vi possano dare la sicurezza di operare con modelli matematici affidabili. Quindi vi apriamo la scatola nera del nostro software che è una scatola preziosa e delicata e va guardata con attenzione e cura, non faremo invece vedere i fuochi di artificio, anche se potremmo benissimo farlo, perché i fuochi d'artificio di renderizzazioni di grosse strutture, di strutture magari note, fanno pubblicità ma non fanno capire.

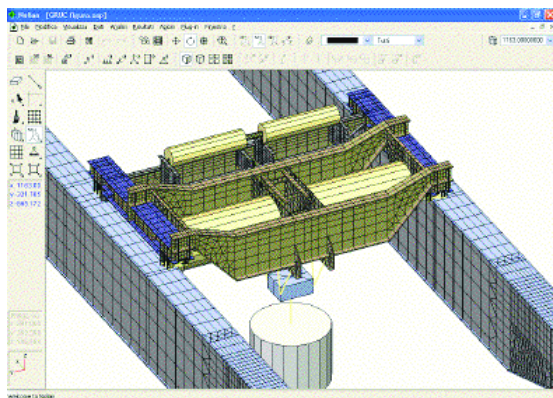
E il nostri intento oggi, qui, è quello di capire.

Per far questo, come abbiamo detto, oggi impiegheremo esempi quasi da manuale. Questo però non deve far credere che i nostri programmi siano per l'accademia. Tutt'altro! Sono potentissimi ed insieme trasparenti e flessibili nell'uso. Con i nostri programmi si lavora. E ci lavorano organizzazioni e studi professionali prestigiosi tra cui Servizio Nazionale Dighe, Presidenza del Consiglio dei Ministri, Ferrovie dello Stato, ENEL, Sogin, ENEA, etc.

Qui potremmo fare una panoramica di fotografie o modelli di strutture progettate con Nòlian. In ormai 24 anni che Nòlian esiste (nacque nel 1983 con il nome di MacSap) di strutture ne sono state fatte tante.



*Modello tipico di struttura edile.*



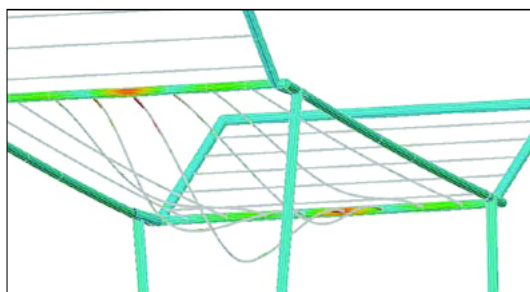
*Modello di gru radiale (Gentile concessione SOGIN).*

Vi farò vedere invece la mia struttura personalmente preferita: lo stendino “Tapiro”.



*Lo stendino “Tapiro”.*

Questo stendino è stato analizzato dalla casa produttrice, per motivi di certificazione di qualità, prima con Ansys e poi con Nòlian versione FreeLite. Ovviamene le analisi fatte con Ansys, commissionate a una società di consulenza erano piuttosto costose: La versione FreeLite di Nòlian le ha rese... gratuite. Ma quello che mi affascina di questa struttura e che anche in un oggetto così comune e casalingo vi sono problemi non lineari notevolissimi.



*Deformata e tensioni a colori dopo una analisi non lineare con Nòlian.*

Nella immagine precedente sono raffigurate le tensioni e le deformazioni. Notate come il carico sulla sola corda centrale, peraltro pretesa, induca una torsione nei profili tubolari di appoggio che a sua volta determina la deformazione delle cordicelle vicine. Non che avessimo dubbi, ma anche in questo difficile problema non lineare Nòlian ha ottenuto risultati coincidenti con quelli del costosissimo Ansys. Chi vuol sapere di più dello stendino Tapiro può vederne la case history completa sul nostro sito: [www.softing.it](http://www.softing.it).



Quindi chiarito, riteniamo, che la flessibilità del nostro software, che useremo per il corso, non lo fa appartenere necessariamente a una specifica sfera di utilizzo e visto che ci si progettano ogni giorno migliaia di metri cubi di strutture importanti, ora lo useremo per approfondire i problemi di base dell'ingegneria antisismica.

Questa è solo una introduzione al corso che vuole spiegare la strada che percorreremo. Per fare questo intendiamo mostrare soprattutto che i modelli matematici oggi disponibili e implementati nei programmi sono in grado di “simulare” la realtà in modo molto sofisticato consentendoci di avere risposte a problemi complessi e, fino a qualche anno, fa senza soluzioni facili immediate.

Vogliamo cioè far capire che il software può essere una “marcia in più” per fare ingegneria e non soltanto uno strumento per fare burocrazia progettuale, per sfornare “relazioni di calcolo” senza progettare. I meccanismi che vedrete illustrati non indicano che vi stiamo complicando la vita per progettare la villetta abbassando i costi e per portare la relazione tecnica al Genio Civile in tempi brevi. Vi mostriamo invece quello che, se volete, potete ignorare nella progettazione quotidiana e ve lo mostriamo oggi per farvi capire la sofisticazione e la sicurezza di cui potete disporre.

Per fare questo faremo un esempio introduttivo che vuol essere più che altro un esempio del metodo che useremo per approfondire altri argomenti e delle possibilità odierne del software per darci una simulazione accurata dei problemi fisici che sottendono il problema ingegneristico.



*Il Paramecio, un organismo unicellulare che contiene il suo DNA (macchia più scura).  
Ogni cellula di un organismo ha in sé il seme del tutto.*

C'è un certo fascino nel minimalismo dal quale si può essere soggiogati. Nelle piccole cose vi è il seme del tutto. Come il DNA nelle cellule. E investigare la cellula elementare, il sistema minimo che contenga la descrizione del sistema, è come andare al nocciolo della verità. Per questo i benchmark si progettano su casi molto definiti e precisi, senza orpelli. Quindi gli esempi, o meglio gli esercizi, che eseguiremo saranno tutti su casi molto precisi e sintetici. Questo non vuol dire che il software che useremo, Nòlian cioè, sia limitato, anzi, in questo modo ve ne mostreremo il cuore. Nella complessità invece c'è poca possibilità di chiarezza e conoscenza.

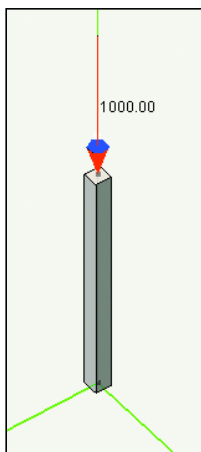
### Esercizio 1

*Il nostro Percorso ha dei tasselli costituiti da "Esercizi" nei quali con i programmi si intendono illustrare alcuni problemi strutturali. Il primo di questi Esercizi è appunto sullo stendino "Tapiro". Qui per la prima volta entriamo nel campo della analisi non lineare. Confrontando sullo stendino, che presenta il difficile problema delle corde tese, i risultati di un'analisi lineare e non lineare vediamo gli effetti di non linearità geometrica come forniscono una soluzione non solo quantitativamente ma anche qualitativamente molto diversa. Inoltre notiamo come nell'analisi non lineare delle corde entri in gioco la tensione per cui la deformata della corda, con l'analisi non lineare, è inferiore a quella che si ottiene da un'analisi lineare.*

## 2. LA SIMULAZIONE VIRTUALE

Lo sviluppo della informatica negli ultimi venti anni è stata così dirompente che le possibilità di venti anni fa si sono così ampliate da dare accesso a nuove metodologie e aprire nuovi orizzonti progettuali. Purtroppo motivi esistenziali hanno spinto all'uso della informatica in ingegneria più caso l'informatica permette ora risultati spettacolari, non certo nelle ingannevoli rappresentazioni foto realistiche, anche esse oggi possibili, ma nei livelli di conoscenza e approfondimento degli elementi progettuali. Per questo motivo oggi in certi casi si parla più di "simulazione virtuale" che non di "calcolo" in quanto le componenti del problema fisico soggiacente possono essere considerate con le loro interrelazioni fino al punto di simulare il realistico comportamento globale della struttura sotto le volute condizioni. Per illustrare questo progresso vorremo illustrare solo una possibilità avanzata che è quella di simulare in modo ormai quasi reale, il comportamento, notoriamente molto complesso, del calcestruzzo.

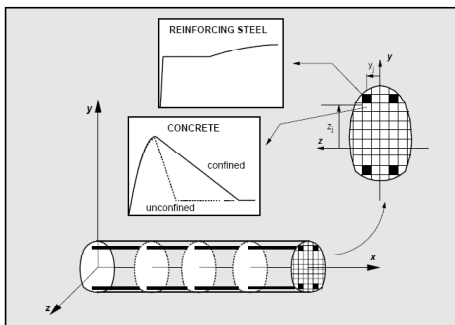
Vogliamo quindi investigare, in questo primo approccio al problema strutturale, il comportamento di una struttura in calcestruzzo armato. Non ci interessa il comportamento, come abbiamo detto, complessivo della struttura perché non ci farebbe capire bene i particolari. Quindi ricorriamo a un semplicissimo pilastro. Lo caricheremo con una forza assiale in sommità e faremo variare questa forza.



*L'elemento strutturale dell'esempio: un pilastro in calcestruzzo sollecitato assialmente.*

Oggi, con il software e i modelli di calcolo avanzati siamo in grado di modellare il comportamento non lineare del calcestruzzo armato con molta precisione.

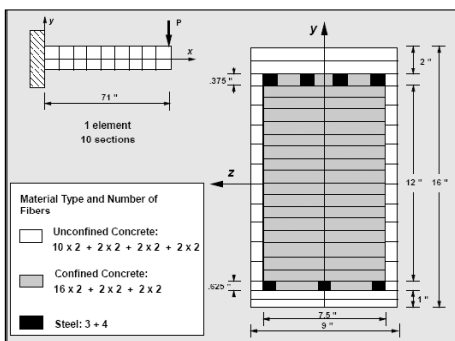
Per far questo useremo un elemento finito cosiddetto “trave a fibre”.



*Immagine schematica della trave a fibre.*

*(Immagine tratta da Taucer, Spacone e Filippou “A fiber beam-column element for seismic response analysis”).*

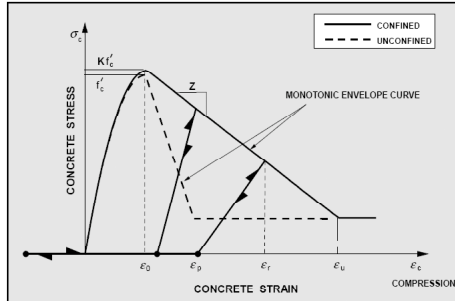
In questo elemento ogni areola in sezione, considerata prolungata in lunghezza per tutto l’elemento, costituisce una “fibra” e può avere caratteristiche meccaniche sue proprie e quindi nella sezione si possono avere contemporaneamente materiali di comportamento del tutto diverso. È importante notare, e lo vedremo meglio in seguito, che si può addirittura modellare in modo diverso il comportamento del calcestruzzo “confinato” nel nucleo da quello non confinato esterno alle staffe.



*Discretizzazione a fibre di una sezione in calcestruzzo armato.*

*(Immagine tratta da Taucer, Spacone e Filippou “A fiber beam-column element for seismic response analysis”).*

Qui di seguito è illustrata la funzione del legame costitutivo del calcestruzzo secondo Kent e Park, che è il più accreditato. Non crediamo abbia bisogno di essere spiegata.



*Il legame costitutivo del calcestruzzo secondo Kent e Park.*

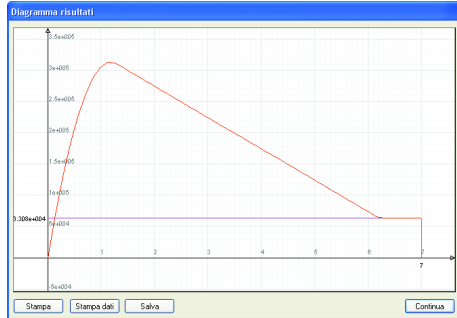
Ora vedremo il nostro pilastro come si comporta. Poiché ci concentriamo sul comportamento del calcestruzzo, metteremo un'armatura non significativa.

*Assegnazione delle caratteristiche della trave a fibre in Nölian per una trave in calcestruzzo armato.*

Eseguiamo ora una analisi non lineare incrementale.

*Assegnazione dei parametri per l'analisi incrementale in Nölian.*

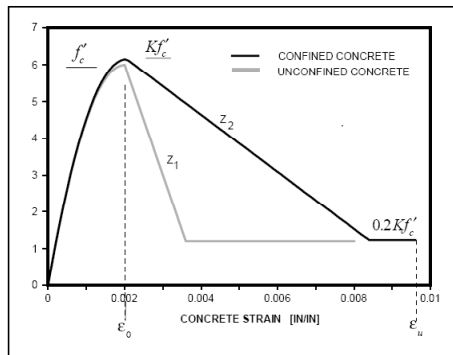
Facendo crescere la forza in compressione otteniamo con Nòlian un diagramma che rispecchia il comportamento descritto dalla legge di Kent e Park la quale è stata molto collaudata in casi sperimentali e quindi è molto vicina a descrivere il comportamento reale del pilastro.



*Diagramma forza assiale-spostamento della trave in calcestruzzo in Nòlian.*

Ora per vedere a che punto di accuratezza si è arrivati, cambiamo la armatura trasversale. Facendo ripetere l'analisi vediamo come il “confinamento” del calcestruzzo abbia influito nettamente sulla resistenza del pilastro.

Nella figura seguente, l'andamento del legame di Kent e Park.



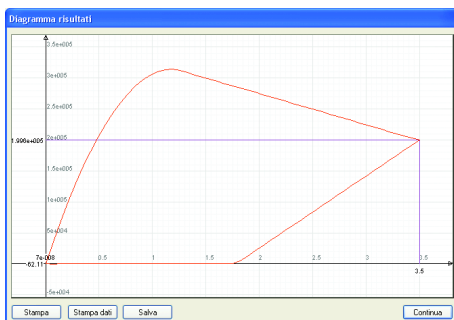
*Il legame costitutivo di Kent e Park in funzione del confinamento del calcestruzzo.*

Nell'immagine successiva, in sovrapposizione, i risultati ottenuti con il nostro pilastro in Nòlian.



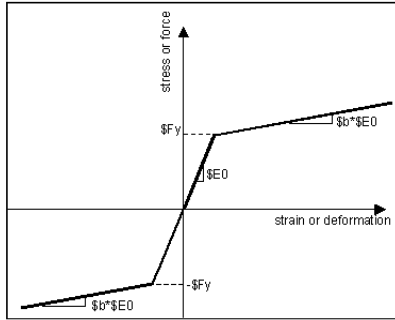
*Il diagramma forza-assestamento del pilastro in Nölian con diversi gradi di confinamento.*

Ma ora facciamo un'altra prova. Dopo aver caricato il pilastro, lo scarichiamo. Come vedete il comportamento del calcestruzzo è molto complesso ma siamo in grado di seguirlo e "simularlo" in tutto il suo ciclo di carico e scarico come avviene in una struttura soggetta alle oscillazioni dovute a un sisma.

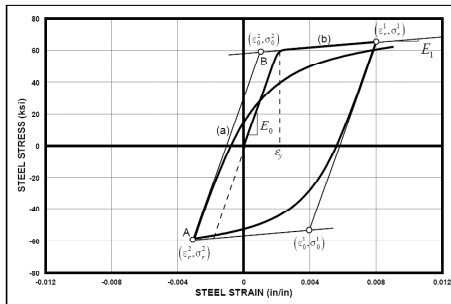


*Diagramma con inversione di carico. Comportamento del calcestruzzo.*

Lo stesso "esperimento" lo possiamo fare per l'acciaio. Useremo il legame costitutivo dovuto a Pinto e Menegotto il quale è anch'esso molto accreditato ed è molto sofisticato. Basti vedere quanto quanto differisce dal più semplice e noto legame a "bilatera" (immagine seguente) più comunemente usato.

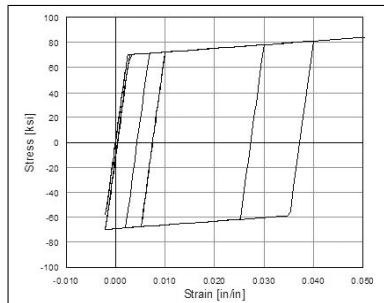


*Il noto legame costitutivo dell'acciaio a "bilatera".*



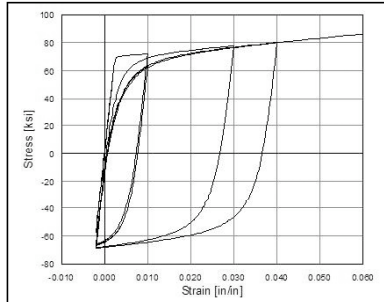
*Il legame costitutivo di Pinto-Menegotto.*

Qui sotto vediamo un ciclo isteretico con incrudimento isotropico del legame a bilatera e poi di Pinto-Menegotto.



*Ciclo isteretico con legame a bilatera.*





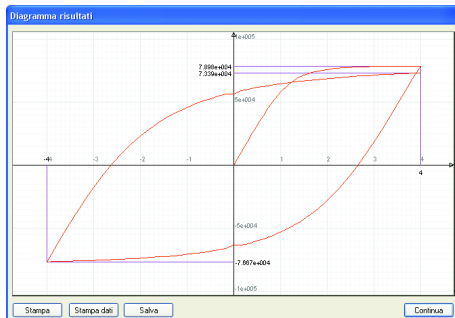
*Ciclo isteretico con legame Pinto Menegotto.*

Al nostro pilastro assegnamo ora una resistenza irrisoria del calcestruzzo e una forte armatura per cogliere il comportamento del solo acciaio. Vediamo prima cosa accade all'aumentare del carico.



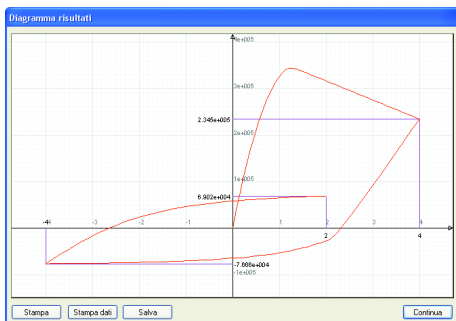
*Trave a fibre con il solo contributo dell'acciaio. Diagramma forza assiale spostamenti all'aumentare del carico.*

E ora scarichiamo e caricando di nuovo, vediamo che la resistenza dell'acciaio è diminuita per lo snervamento occorso al primo ciclo. Come si vede, questo modello è molto sofisticato.



*Lo stesso diagramma della figura precedente ma con inversione del carico.*

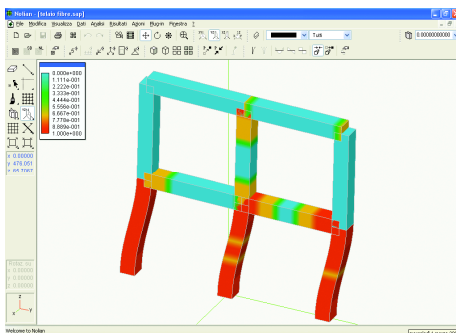
Abbiamo mostrato le due situazioni (solo acciaio o solo calcestruzzo) per poterle comparare con quelle teoriche. Ora vediamo il comportamento della sezione armata dove lavorano sia il calcestruzzo che l'acciaio. Anche qui eseguiamo un ciclo di carico, scarico e nuovo carico. Come si può vedere il comportamento della sezione è molto interessante.



*Ciclo con inversione del carico del pilastro in calcestruzzo armato.*

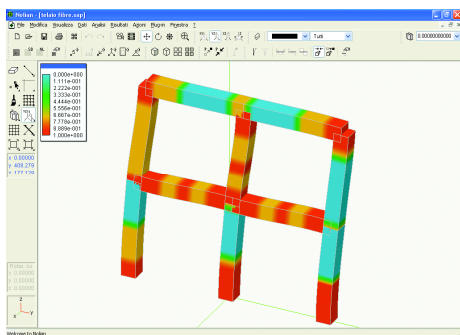
Chi abbia un po' di dimestichezza con la progettazione antisismica avrà capito subito che avendo la possibilità di modellare il ciclo isteretico possiamo valutare la quantità di energia dissipata durante l'evento sismico e cioè possiamo tenerne conto nell'analisi e quindi siamo in grado di progettare con maggiore consapevolezza.

Infatti se consideriamo un semplice telaio, possiamo vedere la formazione di cerniere plastiche. Questa volta nei pilastri.



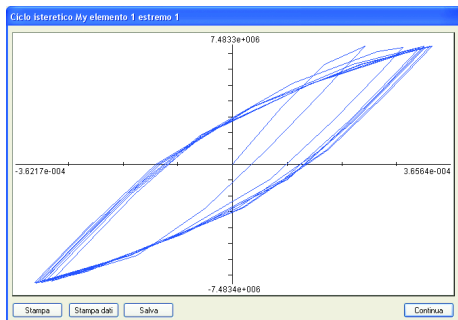
*Grado di plasticizzazione. Qui i pilastri si plasticizzano prima delle travi (piano sovrano).  
(Grafico ottenuto con Nòlian).*

È molto interessante vedere ora il differente meccanismo di collasso con una diversa distribuzione delle armature secondo quella gerarchia delle resistenze che in seguito approfondiremo.



*Come la figura precedente, ma una maggiore quantità di armatura nei pilastri consente una plasticizzazione delle travi prima dei pilastri come richiede il criterio di “gerarchia delle resistenze”.*

Quello nella figura che segue è infine il ciclo isteretico del nostro pilastro inserito nel telaio sottoposto ad azione dinamica.



*Ciclo isteretico di un giunto durante una sollecitazione alternata (Grafico ottenuto con Nölian).*

Inutile dire che l’area racchiusa dalla curva è un lavoro e quindi si può vedere già adesso, ma ci torneremo in seguito, che la duttilità dell’elemento, è quella che governa la dissipazione di energia. Questo ovviamente insieme a altri fenomeni come quello dello smorzamento che vedremo in seguito.

Speriamo di essere riusciti a tracciare una sorta di “guida” per poter seguire al meglio questo nostro corso.

A chi scrive, personalmente, piace definire il software “cristalli di conoscenza”. Quando dopo un lungo e faticoso lavoro di implementazione di un algoritmo si è riusciti a curarne tutte le parti e a testarle e vederlo funzionare anche nei casi prova più complessi, sembra di aver racchiuso un piccolo grumo di conoscenza in uno scrigno da dove non andrà più perso e sarà sempre disponibile per consentirci di raggiungere nuove conoscenze. Oltre alla mia visione “poetica” del mio lavoro è vero che il software consente di accedere e usufruire di conoscenze che non sono proprie e quindi di accedere a una propria operatività amplificata dal software. Quindi il software attribuisce maggiore potere a chi lo usa. Inoltre se il software, come il nostro, consente di capire quello che si fa, di sperimentare, di provare varie soluzioni progettuali, il software fa anche crescere professionalmente. Quindi uno degli elementi che vorremmo comunicare in questo incontro è il concetto di software come elemento di crescita personale sia culturale che professionale.

I modelli matematici fanno parte della storia e delle conquiste dell'umanità. Per questo concluderemo questa introduzione con l'immagine della piramide di Dashur.

Questa piramide fu costruita inizialmente con un angolo di elevazione di  $54^\circ$  e poi, bruscamente, come si vede bene nella foto, l'angolo di elevazione fu portato a  $43^\circ$ .



*La piramide di Dashur, regnante Sneferu della 12<sup>a</sup> dinastia.  
L'angolo di elevazione passa bruscamente dai  $54^\circ$  iniziali ai  $43^\circ$  verso la sommità.*

Il motivo di questo cambiamento molto probabilmente è da ascrivere al crollo della piramide di Meidum che si stava contemporaneamente ultimando e che aveva appunto un angolo di elevazione di  $54^\circ$ .



*La piramide di Meidum, regnante Sneferu della 12<sup>a</sup> dinastia, subì un crollo durante la sua costruzione. L'angolo di elevazione era di 54°.*

Cioè i modelli dell'antichità erano euristici. L'esperienza costituiva l'unico strumento di previsione e di guida nelle scelte. E anche le piramidi, viste come simbolo di capacità costruttiva, non sfuggivano a questa esigenza di scrupolosa ricerca. Oggi le cose sono molto cambiate con i modelli matematici e ancora di più con la possibilità di gestire modelli matematici complessi tramite il calcolatore elettronico.

Ricordiamo infine che le prove e le sperimentazioni che faremo in questo corso si possono eseguire anche con le versioni FreeLite® dei nostri programmi, liberamente scaricabili dal nostro sito. Le versioni FreeLite® hanno limiti molto ampi e soltanto nelle dimensioni dei problemi da trattare, non nelle loro funzionalità.

Il nostro payoff aziendale recita:

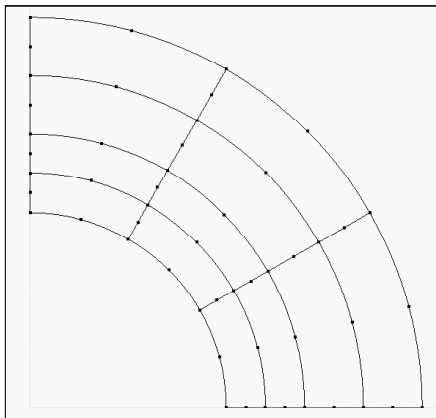
**“Il software che fa la differenza”.**

Con questo incontro speriamo infatti di mostrarvi efficacemente i criteri di progettazione antisismica ma anche di farvi capire perché il nostro software fa davvero la differenza riportando il progetto al centro della scena.

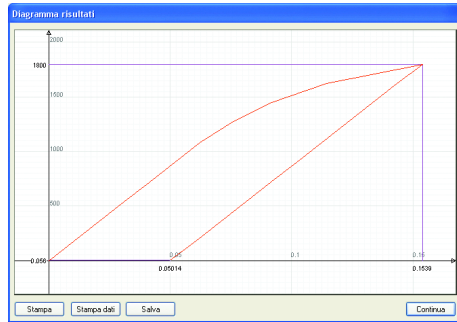
## Esercizio 2

Con questo secondo Esercizio vogliamo uscire subito dal campo delle strutture formate da travi perché per avere una idea completa e aperta dell'ingegneria strutturale non si deve vedere un mondo fatto a telai altrimenti si perde buona parte della sensibilità strutturale che invece si acquisisce pensando la realtà piuttosto come un continuo. Quindi illustreremo un elemento strutturale particolare: un tubo indefinitamente lungo soggetto a pressione interna del quale analizzeremo il comportamento plastico. In questo Esercizio useremo elementi a Deformazione Piana perché il tubo è indefinitamente lungo e quindi si sviluppano tensioni longitudinali e useremo nel modello la simmetria radiale per ridurre le dimensioni del modello. Quindi è un esercizio molto interessante, conciso, nel quale si possono analizzare molti fenomeni con chiarezza.

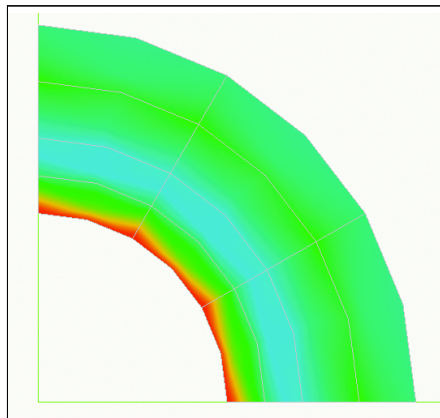
Di seguito riportiamo le figure della mesh e del diagramma forza-spostamento dove si ha un ciclo di carico seguito da un ciclo di scarico. È interessante notare come sia perfettamente chiara la deformazione plastica residua. Nell'ultima figura, le tensioni ideali mostrano una residua tensione circonferenziale dovuta alla plasticizzazione. Si possono vedere con questo esercizio, ma qui non ne riportiamo le immagini, anche come le tensioni non superino mai il valore limite e la plasticizzazione man mano si propaghi dall'interno all'esterno finché, plasticizzata tutta la sezione, non si ha più un equilibrio possibile e si raggiunge lo stato limite ultimo.



Mesh di un quarto di un cilindro di lunghezza indefinita sottoposto a pressione interna. Materiale elasto plastico.

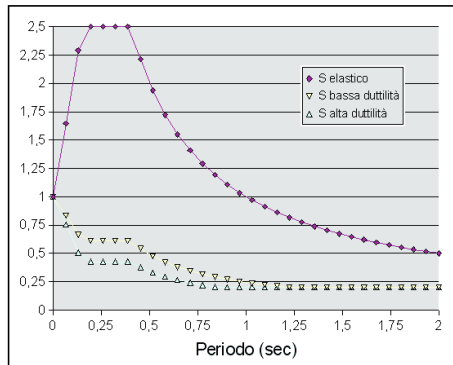


*Diagramma forza-spostamento della parete interna del cilindro in fase di carico e poi di scarico totale.  
Notare la deformazione elastica residua.*



*Rappresentazione degli sforzi equivalenti dopo lo scarico: si noti la tensione residua.*

### 3. LA DUTTILITÀ



Raffronto tra gli spettri di risposta elastico, ad alta e bassa duttilità secondo OPCM 3274.

La nuova normativa antisismica ci propone per la prima volta non solo più spettri di risposta dipendenti dalle caratteristiche del sito ma anche spettri di risposta “elastico” e “limite ultimo”. Se li confrontiamo possiamo rimanere perplessi. Infatti lo spettro elastico impone che la struttura debba sopportare accelerazioni maggiori che non allo stato limite ultimo. Sembra un contro senso. Non lo è. Non lo è per un concetto che per la prima volta entra in modo esplicito nella normativa italiana: la duttilità. Questo “nuovo” concetto di ingegneria antisismica pervade tutta la normativa ed è la chiave di lettura di tutte le prescrizioni. Se non si capisce che sotto quasi ogni riga vi è il concetto di duttilità, non si può capire questa normativa.

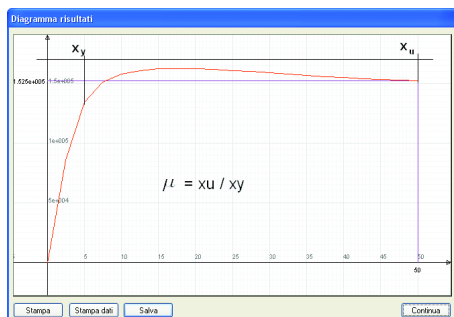
Nello stato di esercizio di una struttura è normale ritenere che il suo comportamento debba restare in campo elastico. Ma per eventi eccezionali, e il sisma è uno di questi, è economico affidarsi alla resistenza o si può sfruttare qualche altra caratteristica perché la struttura non collassi?

Questa caratteristica, come abbiamo detto, è ovviamente nota ma non era però evidente nella precedente normativa. Parliamo della “duttività” e cioè della capacità della struttura di dissipare energia tramite deformazioni plastiche.

Questo fenomeno può essere descritto solo da leggi non lineari e forse è questo il motivo per cui vi è stata una certa “resistenza” a farlo entrare nella pratica quotidiana di progettazione.



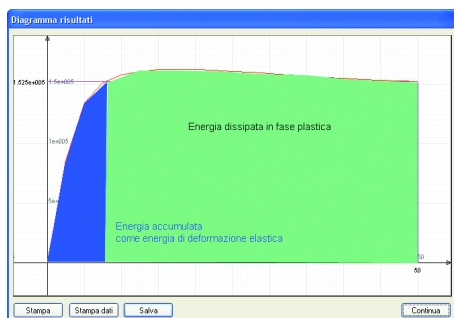
Per illustrare questo concetto, ci riferiamo per ora ad un oscillatore elementare.



*La valutazione della duttilità disponibile è abbastanza agevole anche se richiede una formulazione non lineare.*

Nella figura precedente, la curva forza spostamento, ottenuta con Nòlian, ci permette di dare una valutazione di duttilità intesa come rapporto tra spostamento ultimo e di prima plasticizzazione.

Inoltre ci consente di vedere l'energia assorbita come energia di deformazione elastica e quella dissipata in fase plastica e già ci fa capire come una maggiore duttilità consenta, in genere, una maggiore dissipazione di energia.

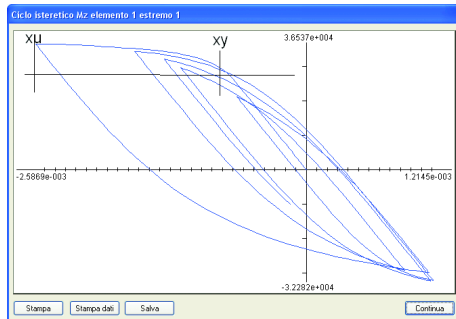


*Le aree racchiuse dal diagramma forza-spostamento rappresentano l'energia accumulata in fase elastica e dissipata in fase plastica.*

Per valutare la duttilità richiesta a una struttura sotto un determinato accelerogramma che descrive un evento sismico, si deve ottenere lo spostamento massimo prodotto da carico applicato e ciò è possibile solo integrando l'equazione non lineare del moto:

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + k u = r$$

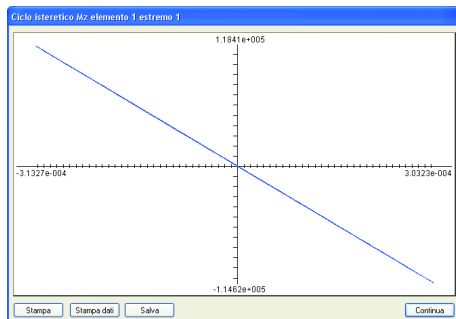
Con Nòlian possiamo farlo tramite l'analisi non lineare nel dominio del tempo detta anche "time history". Integriamo l'equazione del moto di un oscillatore elementare di periodo unitario e vediamo innanzitutto il ciclo isteretico.



*La duttilità dell'elemento è valutabile nel ciclo isteretico (ottenuto con Nòlian) dove sono chiari i punti di primo snervamento e di massimo spostamento.*

Il ciclo isteretico dell'oscillatore elementare ci permette di valutare la duttilità dell'elemento. Infatti vediamo il primo tratto elastico uscente dall'origine, il punto di prima plasticizzazione e il punto di massimo spostamento.

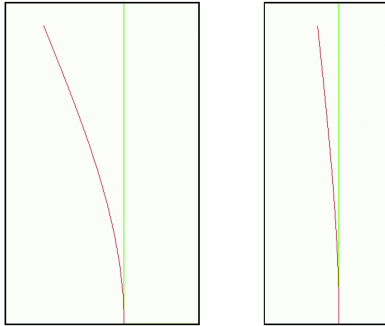
Ora assumiamo che lo stesso elemento abbia comportamento lineare e vediamo il ciclo isteretico.



*Il ciclo isteretico di un elemento a comportamento lineare ha area nulla. Non è vi è la possibilità di cogliere la dissipazione di energia.*

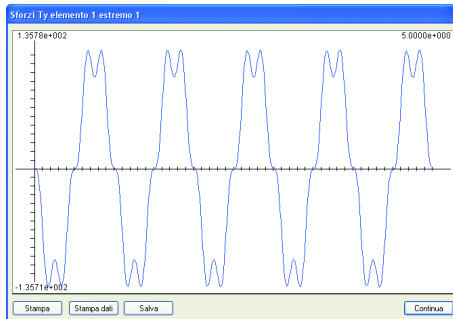
Come si vede, la duttilità è unitaria in quanto spostamento ultimo e di plasticizzazione si possono assumere coincidenti.

Ora, sempre integrando con Nòlian le equazioni del moto dell'oscillatore sottoposto a un accelerogramma di progetto, valutiamo il diverso comportamento dell'oscillatore a comportamento lineare e non lineare.

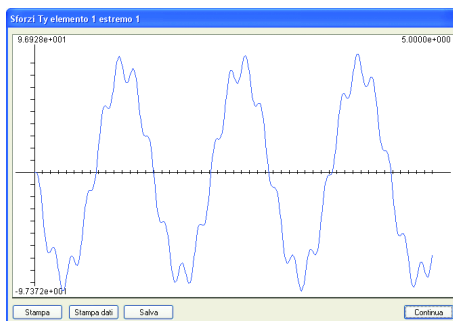


Due oscillatori a confronto analizzati supponendo un comportamento elastico (a sinistra) ed elasto-plastico.

Ora, sempre con Nòlian, diagrammiamo la forza di taglio al piede dell'oscillatore plastico e di quello elastico.



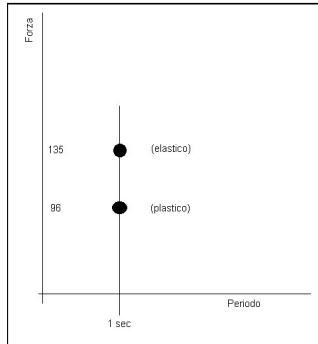
Risposta in termini di taglio alla base dell'oscillatore elastico.



Risposta in termini di taglio alla base dell'oscillatore plastico.

Quello elastico ha una taglio massimo al piede di 135. Quello plastico ha un taglio massimo al piede di 97. Cioè circa il 30% in meno. Ovviamente questi

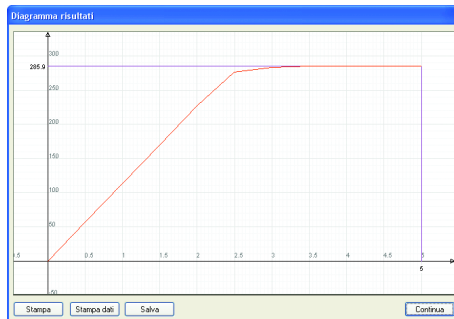
due valori sono legati solo all'esempio che stiamo facendo e non hanno alcuna altra valenza.



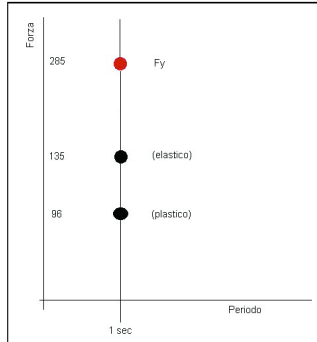
*Diagramma delle "risposte" dei due oscillatori.*

Questi dati potremmo organizzarli in un diagramma. In tale diagramma per l'oscillatore di periodo 1 sec sottoposto allo stesso accelerogramma si hanno le risposte "richieste" da quel particolare accelerogramma. Dove, si vede, la "richiesta" elastica è superiore a quella plastica.

Ora possiamo fare un altro passo per completare il quadro. Prendiamo una struttura con lo stesso periodo proprio (potrebbe essere lo stesso oscillatore) e vediamo se ha una "capacità" tale da soddisfare la "richiesta". Facendo un'analisi limite (pushover) si ha un diagramma forza spostamento che ci fa vedere che la forza di snervamento della struttura è circa 285 e pertanto in questo esempio illustrativo la struttura è in grado di soddisfare la richiesta già in campo elastico.



*La curva forza-spostamento del pilastro sottoposto a forza crescente, individua la forza ultima.*



*Il diagramma delle risposte arricchito del valore ultimo è emblematico dei parametri in gioco per la progettazione antisismica.*

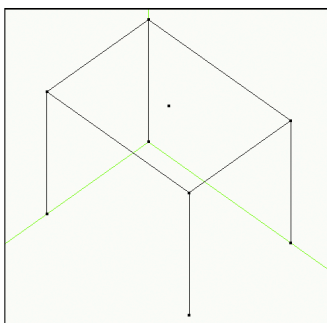
Questa situazione possiamo graficizzarla per completare i dati che già avevamo. Otteniamo un diagramma che introduce un aspetto importante: il progetto di una struttura sismo resistente può essere fatto dosando giudiziosamente le caratteristiche di resistenza e di duttilità. Cioè il “progetto” strutturale recupera una sua autonomia divenendo “prestazionale” e non più prescrittivo. Già il fatto che si possa scegliere se la struttura sarà in alta o bassa duttilità è un aspetto non burocratico ma essenziale.

Ovviamente anche i programmi di calcolo, per questo nuovo approccio, non possono più essere procedurali ma devono essere flessibili per consentire un progetto prestazionale.

Vi sono alcuni problemi che abbiamo lasciato aperti. Il primo è che la struttura da noi considerata è a un solo grado di libertà e quindi ha un solo periodo di vibrazione. Il secondo punto lasciato aperto è che per ottenere i dati che abbiamo impiegato abbiamo dovuto fare una integrazione delle equazioni non lineari del moto che non è una operazione del tutto agevole anche se in alcuni casi è indispensabile. Infine abbiamo considerato un solo accelerogramma. Nel prossimo capitolo, sugli Spettri di Risposta, vedremo le tecniche per superare questi problemi pratici.

### Esercizio 3

In questo esercizio valuteremo il comportamento di un telaino sotto il profilo della duttilità mostrando come essa cambi notevolmente con il meccanismo di collasso. Infatti in un primo tempo armeremo i pilastri con il 2% di armatura per ogni lato e poi porteremo questa armatura all'8%. Nel primo caso avremo un collasso per plasticizzazione dei pilastri prima delle travi (piano soffice) e otterremo una duttilità pari a circa 3. Con l'armatura aumentata nei pilastri invece si ha una plasticizzazione prima nelle travi e quindi lo spostamento ultimo aumenta a beneficio della duttilità che diviene circa 6. Nelle figure che seguono, la mesh del telaino e il diagramma forza-spostamento del telaino con armatura aumentata nei pilastri.



Mesh del telaino di questo esercizio.

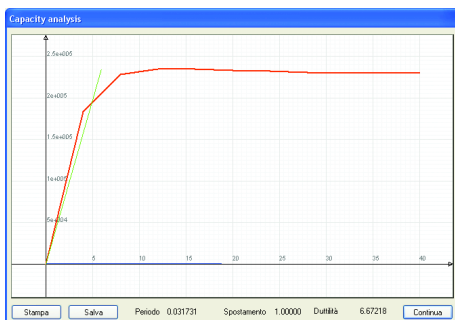


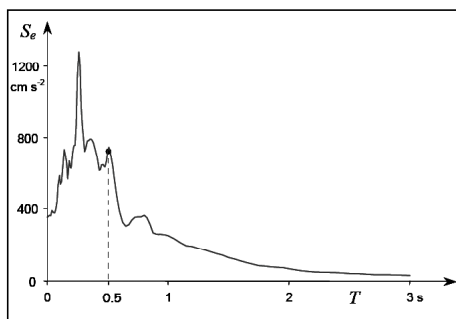
Diagramma forza-spostamento del telaino con armatura aumentata nei pilastri.

## 4. LA TECNICA DELLO SPETTRO DI RISPOSTA

Il modo di costruire gli spettri di risposta non è compito del progettista che può e deve usare gli spettri forniti dalla normativa.

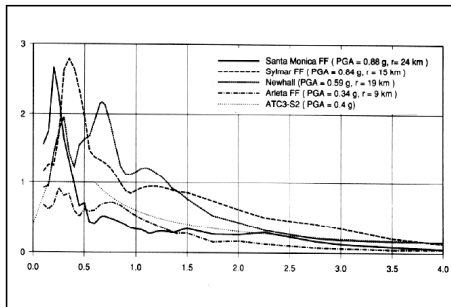
Brevemente, abbiamo già indicato nel capitolo precedente il modo in cui si costruiscono. La definizione di spettro è proprio quella di una “suddivisione” delle componenti di un accelerogramma esattamente come lo “spettro” della luce quando passa attraverso un prisma. E quindi lo scopo è ottenere per ogni singola frequenza la risposta dell’oscillatore elementare a quell’accelerogramma.

La tecnica per costruirlo è quindi, concettualmente molto semplice: si sottopongono oscillatori di frequenze diverse all’accelerogramma voluto integrando le equazioni del moto in modo da ottenere per ogni frequenza una risposta. Il metodo effettivamente impiegato non è ovviamente questo ma è di natura matematica: Quella che ne abbiamo data è una interpretazione ingegneristica molto più efficace.



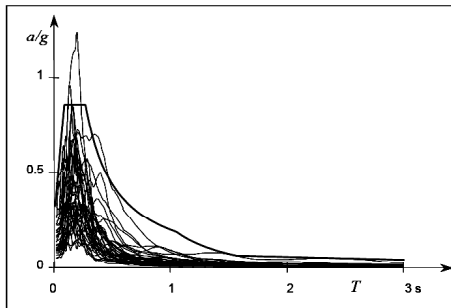
*Spettro di risposta: per ogni periodo si ha il valore della risposta.*

Ovviamente ogni accelerogramma avrà un suo spettro. Qui vediamo gli spettri in accelerazione ricavati dagli accelerogrammi di famosi terremoti.



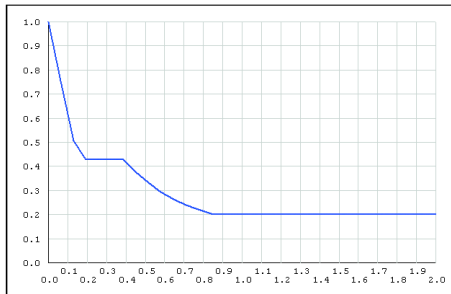
*Gli spettri di risposta di alcuni noti terremoti: un solo accelerogramma non basta a descrivere il possibile "terremoto di progetto".*

Ovviamente un sito non sarà interessato da un solo accelerogramma e quindi si dovranno sviluppare le risposte degli oscillatori per una famiglia di accelerogrammi.



*Inviluppo degli spettri degli accelerogrammi di più terremoti.*

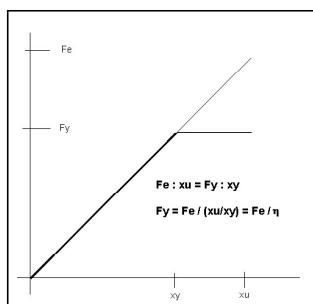
In questo modo si ottiene lo spettro elastico ben noto:





Certamente il calcolo dello spettro non lineare tramite il metodo d'integrazione delle equazioni del moto non è molto pratico e allora si è fatto ricorso a dei metodi approssimati per ottenere lo spettro non lineare da quello elastico. Illustreremo solo il metodo che si basa sulla equivalenza di spostamento in quanto illustra bene la differenza tra la risposta lineare e non lineare.

Questo metodo si basa sull'ipotesi che lo spostamento massimo indotto da un terremoto su un oscillatore, sia lo stesso e che il comportamento elastico e plastico non cambino la rigidità.



*Il metodo della equivalenza di spostamento per la costruzione dello spettro plastico.*

Secondo questo metodo è il fattore di duttilità che determina direttamente lo scalamento della risposta e ciò fa subito capire che se la valutazione della duttilità usata per ottenere lo spettro di risposta non è quello che poi caratterizzerà la struttura, le ipotesi sulle azioni assunte per il progetto non saranno più valide. E questo è un modo di procedere abbastanza diverso da quello al quale eravamo abituati.

Ci si può chiedere inoltre: Ma una struttura cosa ha a che fare con un oscillatore elementare? In effetti in campo lineare si può pensare di combinare linearmente le risposte dei modi di vibrare della struttura usando dei moltiplicatori detti “coefficienti di partecipazione modale”. Il procedimento è banale e non molto interessante per il progettista visto che viene eseguito in automatico dai programmi di calcolo. Però ci si potrebbe chiedere: visto che stiamo parlando di comportamenti non lineari, la combinazione lineare dei contributi modalì è lecita?

Teoricamente l'operazione non è lecita e si dovrebbe ricorrere alla integrazione delle equazioni del moto. Nonostante questo, vista l'utilità pratica della semplicità del metodo della tecnica dello spettro di risposta, si usano degli spettri di risposta che tengano conto di comportamenti non lineari. Tali spettri vengo-

no ottenuti per scalamento di quello elastico tramite opportuni “coefficienti di struttura”. La validità del metodo quindi è tutta affidata al grado di approssimazione del coefficiente di struttura.

Vi sono anche qui vari metodi. In sostanza sono una generalizzazione dello scalamento dello spettro elastico che abbiamo già visto. In genere il fattore di struttura  $q$  viene rigorosamente calcolato per una ben precisa tipologia strutturale e quindi si applica a tipologie simili. Qui si comprende come sia fondamentale che la tipologia strutturale sia più vicina possibile a quella ipotizzata nel calcolo di  $q$  per cui le norme tendono a essere molto restrittive per ricondurre la struttura alla tipologia strutturale prevista.

Va notato, ed è importante, che tramite l'approssimazione della tecnica dello spettro di risposta a spettri non lineari (è un'approssimazione!) si supera il problema della integrazione delle equazioni non lineari del moto e si semplifica un problema altrimenti ostico da trattare nella pratica progettuale quotidiana. Infatti con questo metodo si possono includere effetti dal comportamento della struttura descrivibili altrimenti solo con relazioni non lineari.

Un cenno, che ha valenza squisitamente progettuale, merita il concetto di “stato limite di danno”. Infatti è auspicabile che sotto un sisma con periodo di ritorno inferiore a quello dell'azione di progetto (e quindi più frequente) ma con accelerazioni minori, la struttura non subisca danni o interruzioni d'uso. A questo scopo si considera uno spettro di progetto ridotto rispetto a quello elastico e non si fa affidamento sulle risorse plastiche della struttura, cioè non si utilizzano fattori di struttura  $q$ .

È interessante notare come nel caso di edifici con buona duttilità ( $q > 2.50$ ) lo spettro SLD, e quindi l'azione sismica da applicare nelle analisi, sia maggiore che nel caso SLU. In edifici con media duttilità ( $q = 2.50$ ) i due spettri sono simili. In edifici con bassa duttilità lo spettro SLU è invece predominante.

Queste considerazioni indicano che nonostante non si possa stabilire a priori quale verifica sia più onerosa, tendenzialmente in una struttura a bassa duttilità l'obiettivo di più difficile realizzazione sarà il raggiungimento di una sufficiente resistenza, viceversa nel caso di struttura con buona duttilità sarà il raggiungimento di una sufficiente rigidezza.

Lo stato limite di danno diventa tanto più importante quanto più si ha a che fare con strutture deformabili che, avendo buona duttilità riescono generalmente a soddisfare le richieste di resistenza allo SLU ma più difficilmente rie-

scono a soddisfare le prescrizioni sugli spostamenti.

Notiamo infine che i coefficienti di struttura, che di fatto scalano la risposta dello spettro in accelerazione, variano di circa 3 volte nella nostra normativa. Francamente non sappiamo con quale precisione possa avvenire la valutazione di tale coefficiente per cui affidandosi alla duttilità come fattore progettuale si accetta una incertezza di valutazione delle quantità in gioco che può non essere indifferente.

Sarebbe interessantissimo uno studio, che non ci risulta sia stato fatto, tra la incertezza insita negli spettri prospettati dalla normativa (sismologia) e le incertezze insita nei parametri ingegneristici (strutturistica). Intendiamo dire che una errata valutazione del coefficiente di struttura porta di fatto a progettare una struttura per accelerazioni del tutto diverse da quelle aspettate e quindi per caratteristiche spettrali dell'evento sismico del tutto diverse.

#### Esercizio 4

*In questo esercizio sottoporremo un oscillatore elementare all'accelerogramma del terremoto di El Centro valutando alternativamente le risposta lineare e non lineare nel dominio del tempo. Questo esercizio è sostanzialmente quello illustrato nel capitolo della duttilità.*

