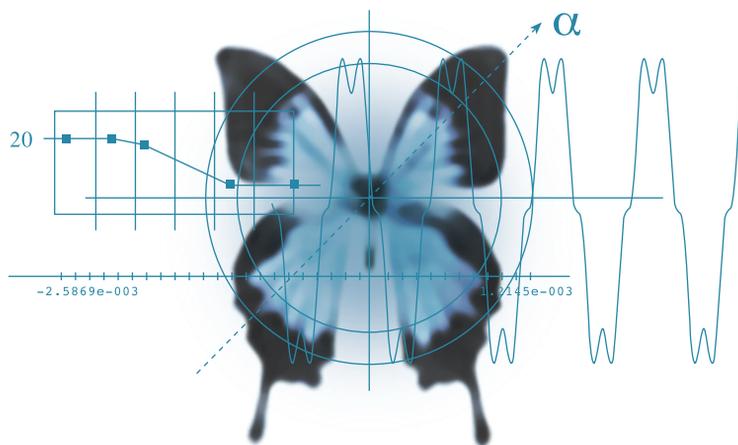


ROBERTO SPAGNUOLO | GIUSEPPE PASCUCCI

# 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>
--	------------

**EASY BEAM PER IMMAGINI**

---

## STORIA DI UNA SFIDA

EasyBeam è stata la sfida software più entusiasmante che abbiamo affrontato alla Softing.

Certo anche il riprogetto di Nòlian in C++ e il progetto, che risale al 1983, della sua rivoluzionaria interfaccia grafica, non furono da poco. Né da poco è il progetto, recentissimo, di inMod. Ma EasyBeam è stata una sfida con un suo sapore tutto particolare. Perché, sopra a tutto, coinvolgeva contemporaneamente temi di ingegneria, di analisi numerica oltre che di informatica.

Eravamo nel 1992. La sfida era il progetto tridimensionale delle armature. Una sfida la cui difficoltà può immaginare solo chi, a quei tempi, si sia cimentato con questo problema. Non vi erano esempi. Non vi era letteratura. Non vi era idea di interfaccia: tutto da inventare. E la sfida, con molti anni di lavoro e con lo sprone dei rimproveri, dei mugugni e degli accidenti dei nostri utenti, possiamo dire di averla vinta. E non siano ironici nel riferirci in tal modo ai nostri utenti. Senza il loro sprone a migliorare il progetto, forse ci saremmo arresi e saremmo tornati al problema nel piano rinunciando a quello tridimensionale. Il problema nel piano, così semplice, abituale, col suo rassicurante sapore di tavola da libro di testo.

Invece siamo andati avanti. Sappiamo che in questi anni la incontentabilità dei progettisti (mai sentito di un software che li soddisfi) unita a una certa pigrizia nell'approfondirne la conoscenza ha dato a EasyBeam la fama immeritata di essere "difficile". E sappiamo bene che se si vuole avere tutti contro basta tentare di cambiare qualcosa. E noi lo facciamo sempre! Ma noi siamo diversi anche perché siamo maledettamente cocciuti, quando crediamo che un'idea sia giusta.

To mando alle caratteristiche innovative di EasyBeam, naturalmente basta saper andare a fondo nel conoscere le cose e farlo con la propria testa per capire che EasyBeam ha una marcia in più per chi progetta, non certo il contrario! A meno, ovviamente, che manchi del tutto il desiderio di capire le potenzialità di strumenti innovativi e si desideri invece restare su vecchie posizioni rinunciando a crescere professionalmente e intellettualmente. È vero, una certa ingegneria è ormai più che matùra per cui gli schemi mentali e di calcolo degli anni '30 per il cemento armato, e non solo, vanno benissimo anche oggi. Ma non così si può dire dell'informatica che non solo ha sconvolto il nostro modo di lavorare ma ci costringe a ripensarlo.

Una sfida, dicevamo, basata su un concetto molto preciso: il calcolatore non ha buon senso. Se noi gli affidiamo un problema complesso non può semplificarlo con intelligenza come fa rebbe il progettista umano. Che succede allora? Che se gli si affida un problema complesso lasciandogli i modelli di calcolo semplici che usa il progettista umano, il calcolatore, privo di buon senso, li applica anche quando non deve e così sbaglia. Che fare? Occorre trovare modelli di calcolo adatti alla nuova complessità del problema che si vuole gestire

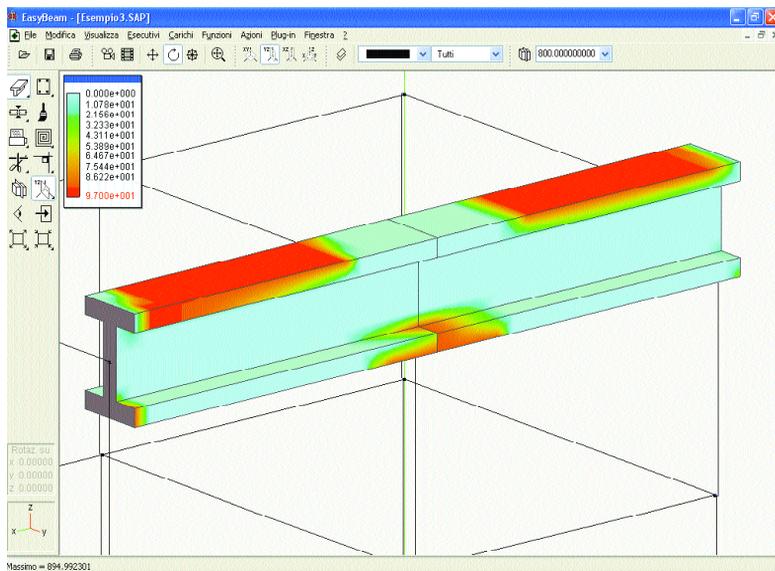
Si trattò di abbandonare un mondo di certezze, di algoritmi arcinoti, stracolaudati e ricominciare tutto da capo. A esempio, come calcolare la tensione tangenziale in una sezione generica sollecitata in una qualsiasi direzione? EasyBeam lo fa! E con una integrazione numerica di notevole ingegnosità e complessità. Ancora, venendo a un problema di diversa natura. Come realizzare l'interfaccia per la gestione e la modifica di armature disposte in modo del tutto libero nella sezione? Bel problema. Nessun precedente. Fino ad allora solo armatura “superiore” e “inferiore”. Ma se si ha una sollecitazione nello spazio il concetto di superiore e inferiore non hanno più senso! Qualcuno all'inizio (certamente anche ora) si sarà lamentato del nostro approccio. Ma non era un compito semplice. Decine di idee, di prove, di sperimentazioni, di cambiamenti, fino a trovare concetti che funzionassero e che oggi sono traguardi validi per tutti. Un progresso, cioè.

Insomma, EasyBeam è un bel pezzo di storia dell'informatica applicata al progetto del calcestruzzo armato. Aver fatto questo pezzo di software è un bell'orgoglio. Anche usarlo e saperlo usare lo è. Ed EasyBeam non aspetta altro: che voi lo mettiate alla prova con i vostri progetti più ambiziosi. EasyBeam: la differenza di essere veramente 3D!

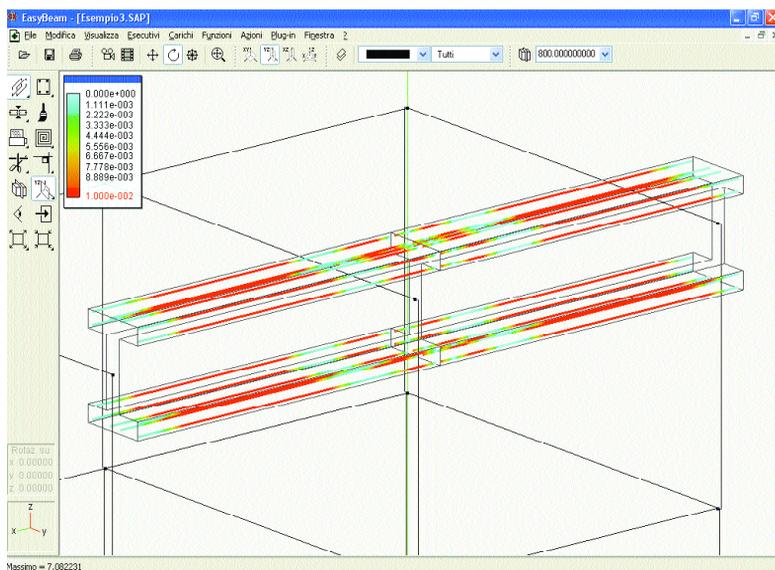
### **Un'immagine vale più di molte parole**

Questo è il motivo di queste immagini. Ma esse intendono dire di più. Non sono immagini di “strumenti” che probabilmente non si desidera usare quando si ha fretta di progettare. Ma sono immagini che mostrano soprattutto i “contenuti” di EasyBeam. Infatti le procedure di calcolo si basano su algoritmi che spesso non si “vedono”. E questi algoritmi, perché il programma sia affidabile, devono essere molto generali e potenti. Queste immagini vogliono soprattutto essere una panoramica sulla “potenza” nascosta di EasyBeam.

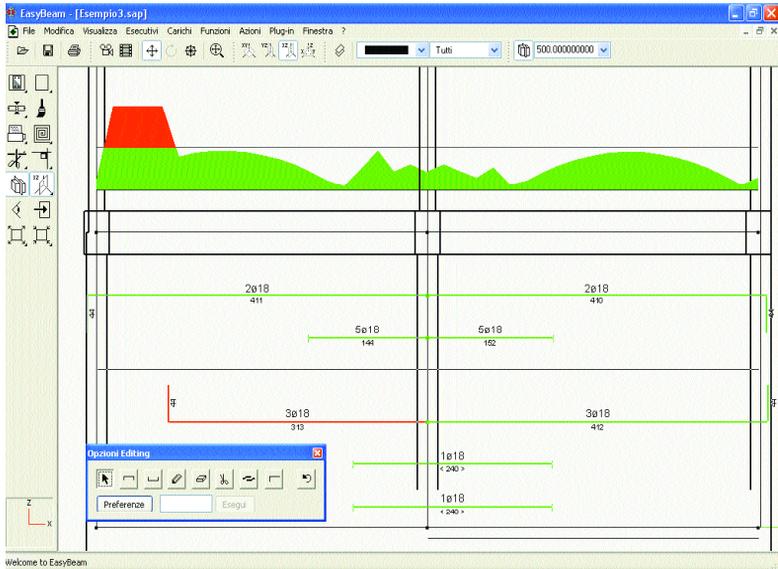
## Immagini da EasyBeam



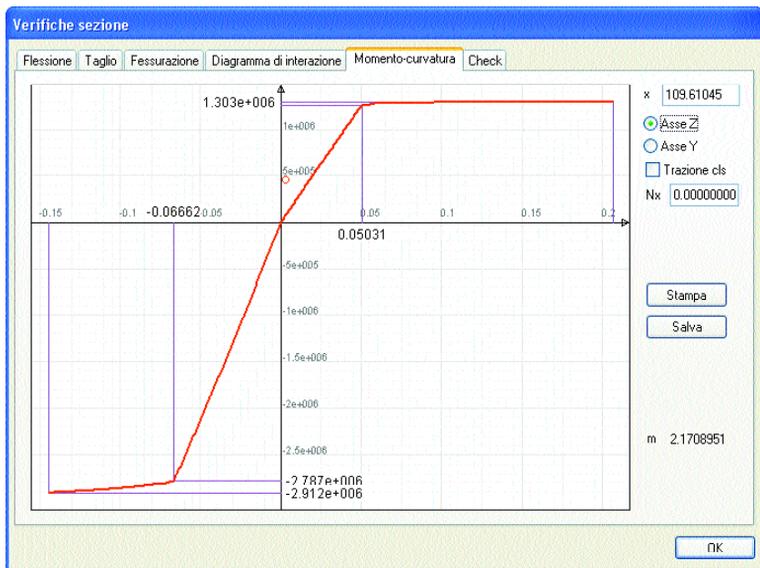
*Tensioni mappate a colori sull'involucro del calcestruzzo*



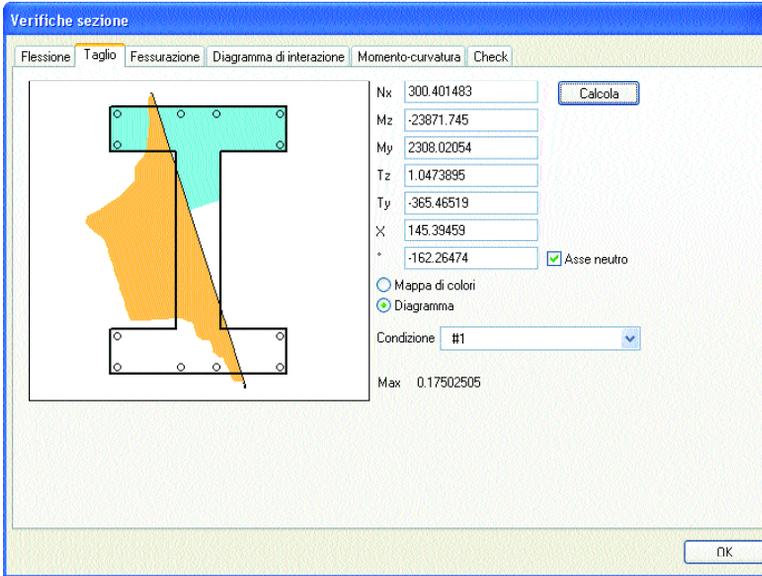
*Coefficiente di sicurezza (o tensioni o deformazioni) mappate a colori sulle barre di armatura*



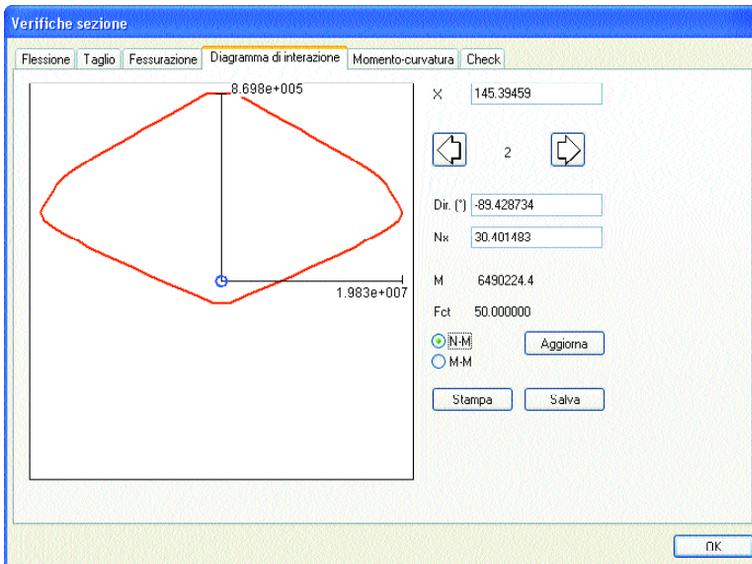
*Editing delle barre di armatura con grafico di controllo del criterio di rottura tridimensionale*



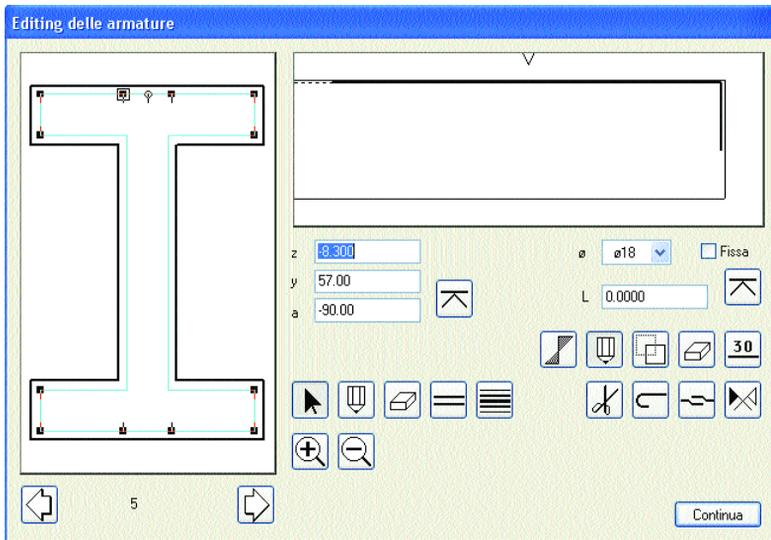
*Diagramma momento-curvatura per il controllo accurato della duttilità*



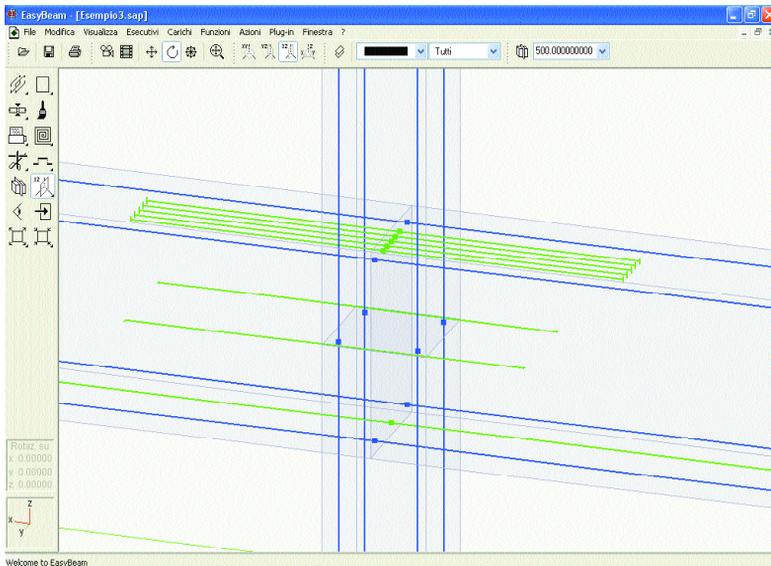
*Calcolo di verifica delle tensioni tangenziali anche per sollecitazioni deviate*



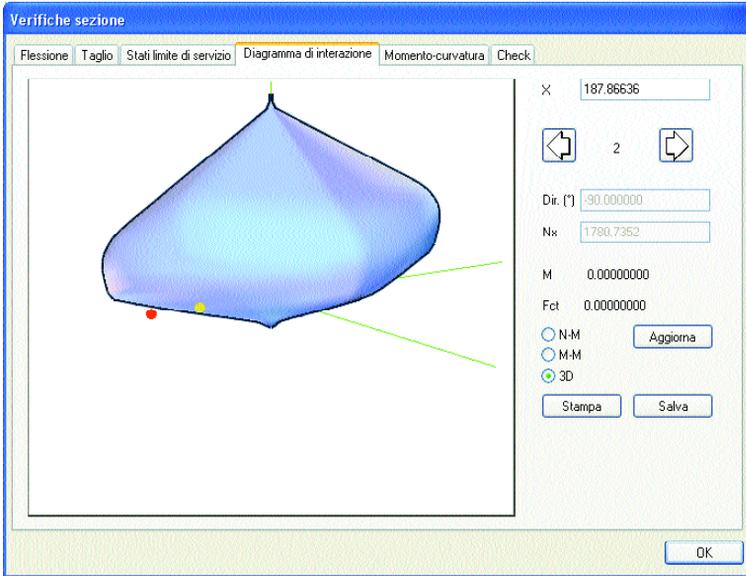
*Diagramma di interazione (di rottura) in rappresentazione piana*



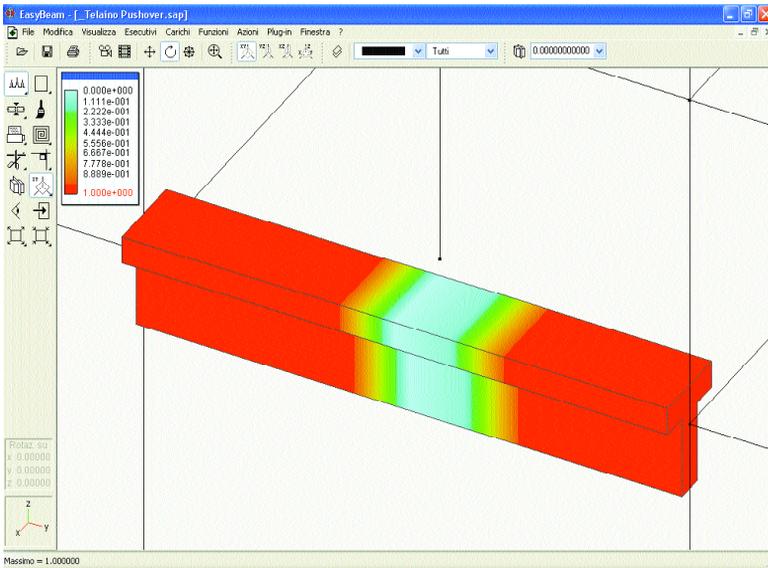
*Editing delle barre nella sezione con possibilità di posizionamento generico*



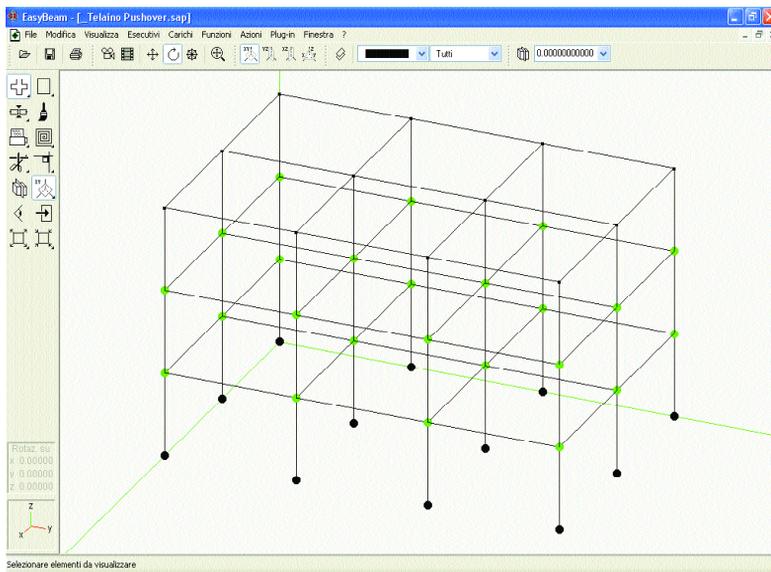
*Rappresentazione solida tridimensionale dell'armatura*



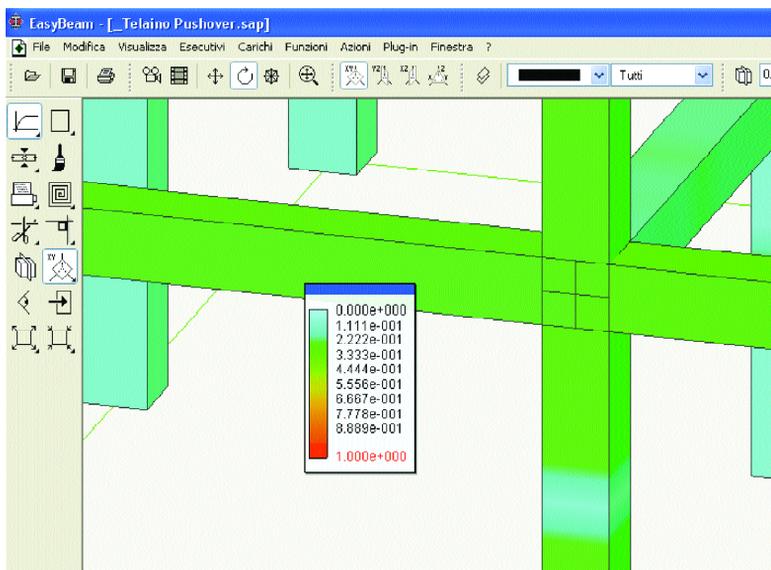
*Domino di interazione (di rottura) tridimensionale. Le combinazioni di carico sono i punti in colore. I colori sono funzione del fattore di sicurezza.*



*Verifica stati limite di servizio. Mappatura a colori del livello di sicurezza sulla fessurazione.*



*Verifica rapporti di resistenza del giunto. A colori rappresentati gli esiti delle verifica.*



*Rappresentazione a colori dei livelli di duttilità*

## EasyBeam: il bello di essere veramente 3D

Avete presenti le tecniche prospettiche? Grande conquista del Rinascimento? Si aveva l'illusione dello spazio semplicemente rappresentando le cose nel piano in modo astuto.

Questo è quello che fanno molti programmi di progetto: riconducono nel piano un problema tridimensionale in modo astuto.

Certo che tra gestire un disegno prospettico sul piano e fare una scultura tridimensionale i problemi tecnici (non artistici) hanno una vera esplosione di difficoltà. Pensate allo scultore che deve controllare l'oggetto tridimensionale da ogni punto di vista e non da uno solo privilegiato!

Nel 1992 noi avevamo un ottimo programma, si chiamava MacBeam ed è stato, modestia a parte, il papà di tanti programmi di progetto di armature che si vendono oggi come attualissimi. Era uno dei primi programmi, se non il primo, nel suo campo, ad essere "interattivo". Potevate tirare di qua e di là le armature e avevate il "digramma di ricoprimento" che vi aiutava a sentirvi padroni del progetto.

Perché abbiamo abbandonato questo gioiellino e ci siamo imbarcati nel faraonico progetto di EasyBeam?

Lo abbiamo fatto per uscire dal quadro dove eravamo schiacciati nella prospettiva, falsa illusione della tridimensionalità e volevamo "conquistare" lo spazio.

Usiamo un tono leggero, non vogliatecene, ma ce lo possiamo permettere perché la seriosità (noioso mal vezzo di certa ingegneria) spesso nasconde insicurezza. Noi con EasyBeam sappiamo di essere anni avanti a ogni altro programma del genere.

In effetti in quegli anni la velocità dei calcolatori consentiva di effettuare in tempi ragionevoli la progettazione delle sezioni generiche sottoposte a sollecitazioni deviate e con questo si apriva la porta verso il vero tridimensionale

È ovvio, lo dicevamo, che il controllo che può esercitare l'occhio sulle tre dimensioni richiede più attenzione di quanto non avvenga nelle banali due dimensioni e quindi il modo di progettare usando EasyBeam è esponenzialmente più versatile e potente ma richiede mano calda. O, almeno, visto che

EasyBeam segue benissimo per conto suo la rotta di un progetto sicuro, non si deve pretendere di essere nocchieri dello spazio e cambiare le scelte di EasyBeam, vero esperto del 3D, se non si domina l'astronave.

Quindi EasyBeam è nato per dare al progetto un reale controllo sulla terza dimensione. Questo nella geometria delle sezioni, nella posizione reciproca delle travi (comunque inclinate), nel controllo della “profondità” della sezione, nel controllo delle armature provenienti nei nodi da più direzioni e per le sollecitazioni che possono essere comunque dirette e composte.

Ora vorremmo lasciare i discorsi generali e fare un piccolo esempio. Ovviamente non potremo illustrare tutta la potenza del controllo 3D che EasyBeam esercita e consente di esercitare sul progetto. Ci soffermeremo su un caso molto semplice ma che è il più comune a facile da seguire. Così facile che... molti programmi lo ignorano.

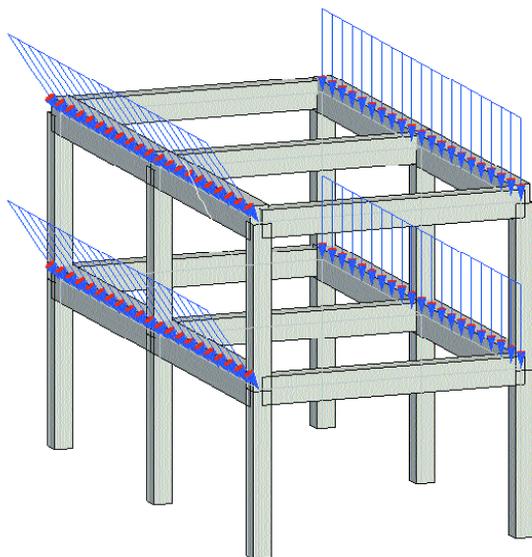
Parliamo della gestione della presso-flessione deviata nelle travi. Della disposizione tridimensionale complessa delle armature che essa comporta, di come questa complessità si rifletta sulla redazione degli esecutivi, di come la terza dimensione richieda strumenti particolari per esercitare dei controlli sul progetto.

Ma vedremo anche come rinunciare al controllo della terza dimensione vuol dire correre grossi rischi.

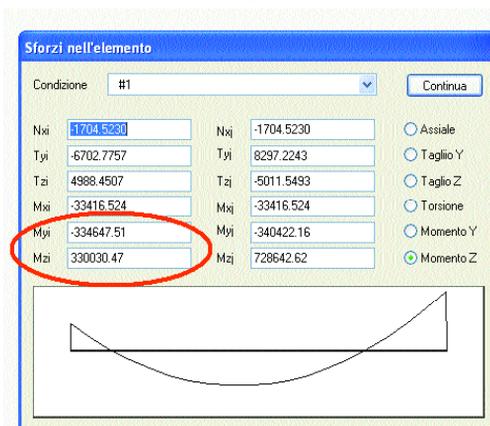
Come si vede, anche non andando in temi più complessi come il progetto gerarchico tridimensionale dei nodi, come il progetto per taglio comunque orientato in sezioni generiche, come i digrammi tridimensionali di interazione, già abbiamo molta carne al fuoco.

Cominciamo.

In un banalissimo telaino oltre ai carichi verticali agisce una azione orizzontale che può derivare dal vento o dal sisma. Qui abbiamo applicato un carico statico e lo abbiamo rappresentato in figura (siamo in Nòlian) come combinazione dei due carichi: verticale e orizzontale. Si tratta di un caso comunissimo. Vediamo cosa succede nelle travi.

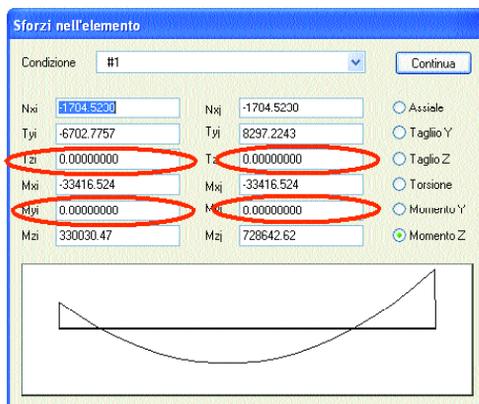


Leggiamo il file di Nòlian con EasyBeam e per capire subito se abbiamo una presso-flessione deviata, facciamo un clic su una delle travi. Vedremo i valori di carico dai quali si deduce subito che lo stato di sollecitazione è tridimensionale e molto complesso nonostante fossimo partiti da un problema apparentemente molto banale: un telaino soggetto a carichi verticali e al vento.

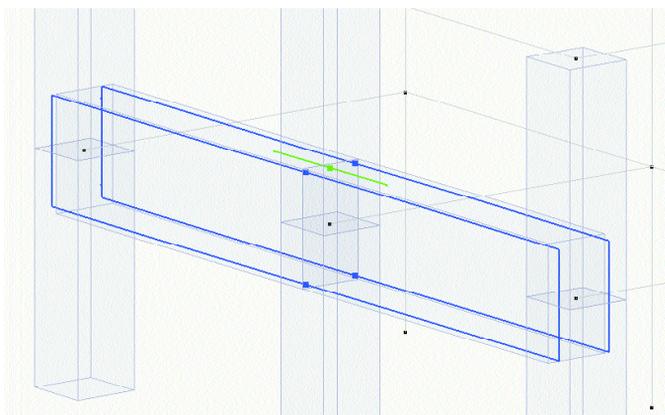


Ora facciamo un esperimento. Il bello di EasyBeam, come di tutti i programmi di EasyWorld, è quello di lasciarvi liberi di andare dove volete. Avete voi il timone in mano. Quindi se volete seguire una strada semplice che vi conduca rapidamente agli esecutivi, nessun problema. Ma se siete di quelli che voglio-

no capire, controllare, battere strade nuove, EasyBeam ve lo permette. Infatti EasyBeam in questo caso vi consente di modificare con estrema naturalezza i dati di sforzo. Annulliamo le azioni derivanti dalla forza orizzontale. Cosa abbiamo fatto? Ci siamo portati nel piano. Abbiamo fatto una “prospettiva”, un’immagine non veritiera della realtà tridimensionale, un progetto ricondotto nel piano come faceva MacBeam, ben dodici anni fa, e come fanno tanti sui emuli attuali.

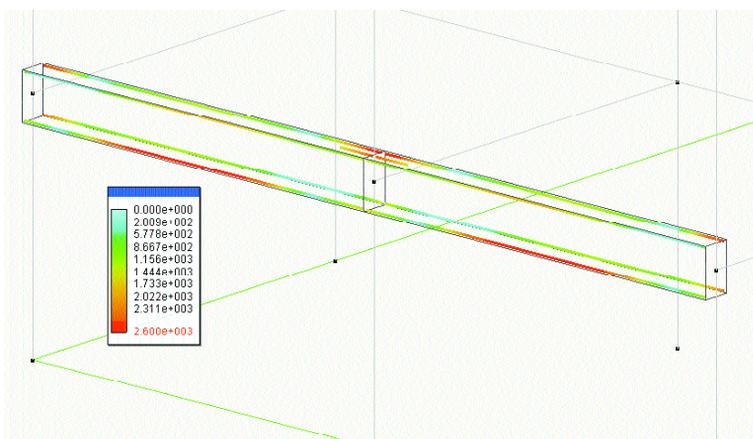


Ora finalmente progettiamo una travata. Vi facciamo notare che dobbiamo fare solo “dic” sugli elementi da progettare: EasyBeam individua la continuità tra elementi, la disposizione delle armature di continuità, gli ancoraggi perché... è 3D e gestisce ogni “assemblaggio” tridimensionale senza che siate voi a doverlo per mano ricondurre nel piano indicandogli composizioni di travate o altre informazioni non necessarie quando si opera davvero nello spazio.

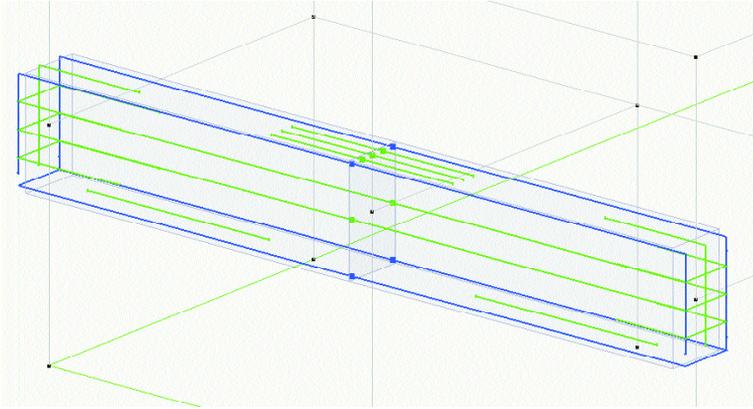


Come si vede l'armatura, annullata la componente orizzontale di flessione, risulta molto semplice e "pulita".

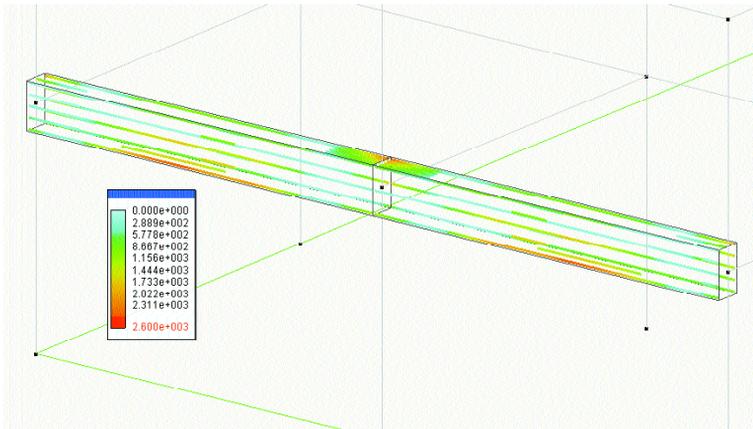
Ma verifichiamo questa armatura dopo aver ripristinato il vero stato di sollecitazione tridimensionale. EasyBeam consente una verifica a colori. Infatti i noti metodi dei diagrammi (che aveva, per intenderci MacBeam dodici anni fa) non consentono di visualizzare le tensioni in un armatura tridimensionale. Si vede, infatti come le barre inferiori abbiano tensioni totalmente diverse. Il solito diagramma per "armatura superiore e inferiore" fallirebbe miseramente e non sarebbe in grado di darci informazioni utili. Quello che abbiamo capito in un attimo da questa verifica è che aver ridotto al piano il problema ci avrebbe portato a grossi guai.



Eseguiamo allora il progetto con le sollecitazioni reali e vediamo quanto risulta più ricco e complesso: in grado di sopperire alle esigenze di resistenza opportune per una sollecitazione tridimensionale. Abbiamo armature orizzontali importanti che fanno cadere il concetto di armatura "superiore e inferiore" e a tutte le semplificazioni sia concettuali che di rappresentazione che esse consentono. Forse qui è necessario spiegare, per chi non conosce EasyBeam, che EasyBeam ha molte opzioni che consentono una disposizione "personalizzata" delle armature. In questo caso abbiamo disabilitato ogni tipo di disposizione simmetrica o bilanciata proprio per enfatizzare come EasyBeam dispone le armature seguendo le esigenze della flessione deviata.

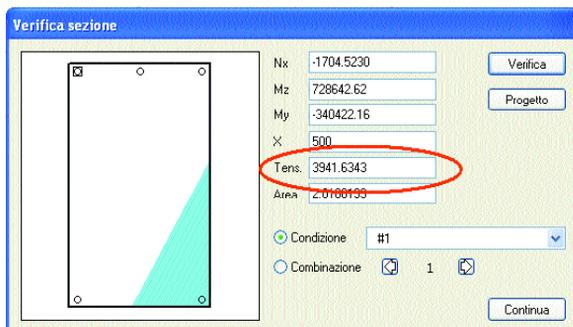


Se eseguiamo ora una verifica a colori della nuova armatura soggetta alla sollecitazione completa, vediamo come risponda perfettamente alle esigenze di progetto. Precisiamo che abbiamo usato, in questo esempio, il metodo delle tensioni ammissibili perché è più familiare al progettista ma che EasyBeam progetta anche con il metodo degli stati limite ultimi, sempre per sezioni generiche comunque sollecitate, impiegando un sofisticato algoritmo di analisi non lineare di sezioni impiegando un diagramma sforzo-deformazione non lineare dei materiali.



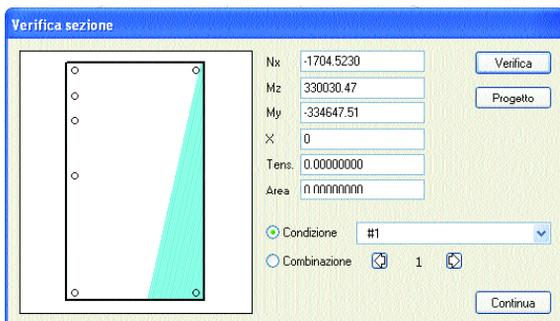
Quanto abbiamo visto nei diagrammi a colori possiamo vederlo anche in modo numerico in un apposito potentissimo dialogo che consente il progetto e la verifica delle sezioni. Cioè un dialogo che contiene, da solo, funzioni della potenza che alcuni affidano a degli interi programmi.

In questo dialogo proviamo a verificare le armature della versione “piana” con le sollecitazioni complete, come abbiamo fatto in precedenza con la verifica a colori.

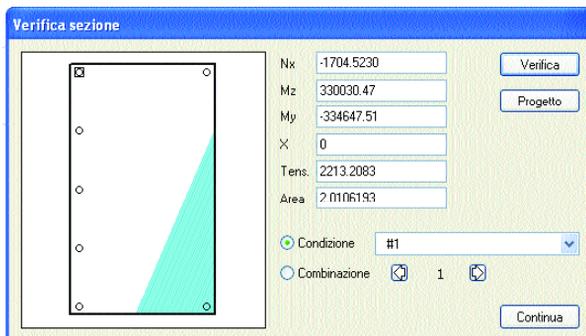


Vediamo che le tensioni nell'acciaio superano di gran lunga quelle ammissibili.

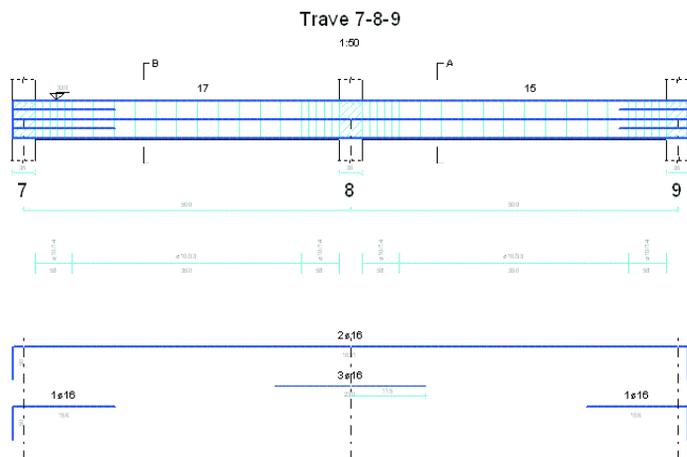
Ora, restando sempre nello stesso dialogo, proviamo a riprogettare la sezione e vedere cosa ci propone EasyBeam. Come dicevamo, EasyBeam è potentissimo nel trovare la soluzione ottimale ma lo fa sulla scorta delle indicazioni del progettista. Un progettista che volesse risparmiare armatura potrebbe chiedere che venisse posizionata all'interno della sezione nella posizione ottimale. Questo sarebbe il risultato.



Come si vede, nel progetto tridimensionale si perde ogni concetto di superiore, inferiore, laterale. Le armature si possono disporre assolutamente dove è necessario. Però, costruttivamente questa disposizione potrebbe essere scomoda e allora chiediamo a EasyBeam di “regolarizzarne” la disposizione lungo il lato in modo che in fase costruttiva ci sarebbero meno dubbi di posizionamento. Questo è il risultato.



Ripetiamo, che EasyBeam mette molte possibilità a disposizione del progettista per disporre le armature come egli più desidera. Qui abbiamo voluto risparmiare ferro con una disposizione non difficile da attuare in cantiere. Ma avremmo potuto chiedere a EasyBeam di simmetrizzare l'armatura in modo che nel montaggio non ci potessero essere errori sul lato o di bilanciare l'armatura per motivi di duttilità. EasyBeam fa la scelta giusta nell'ambito dei vostri desideri.



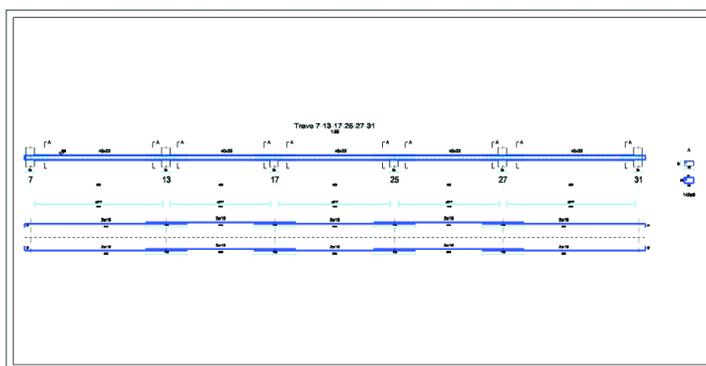
Terminiamo con il disegno esecutivo. Come si vede la disposizione più complessa che comprende armature asimmetriche sui lati (vedere anche le sezioni, eseguibili in qualsiasi punto e in qualsiasi numero si voglia) è gestita da EasyBeam con molta eleganza conducendo, nonostante la accresciuta complessità di un progetto tridimensionale, a un esecutivo molto comprensibile e pulito.

Essere tridimensionali è già una conquista, esserlo con eleganza è solo da EasyBeam.

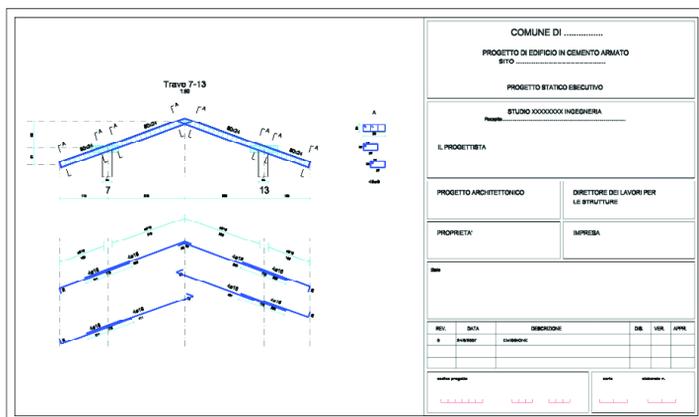
## Impaginazione avanzata con EasyBeam

Uno dei motivi per cui si usavano tavole di grande formato era dovuto al fatto che venivano disegnate manualmente. Una tavola con più elementi strutturali voleva dire meno tempo per squadratura, cartiglio, posizionamento del foglio, stampa. Oggi tutto questo non esiste più. Perché ostinarsi a usare scomodi fogli di grande formato immancabilmente destinati a essere fatta a brani in cantiere?

EasyBeam offre una soluzione a questo problema: il foglio a lunghezza variabile con un solo elemento strutturale per tavola. Variabile perché dimensionata sulla lunghezza dell'elemento strutturale. Generalmente, in quanto all'altezza, è sufficiente quella di un A4. In tal modo un progetto di armature diventa un comodo libretto A4 e nessuno più farà a brani le tavole.

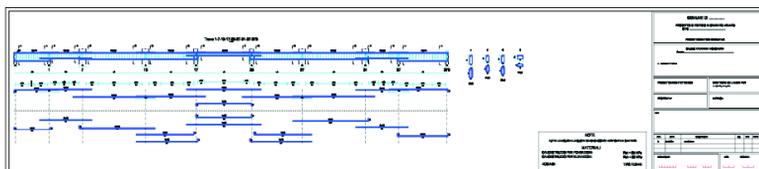


Naturalmente l'automazione della produzione dell'esecutivo non si ferma qui. Vogliamo metterci in automatico il cartiglio?

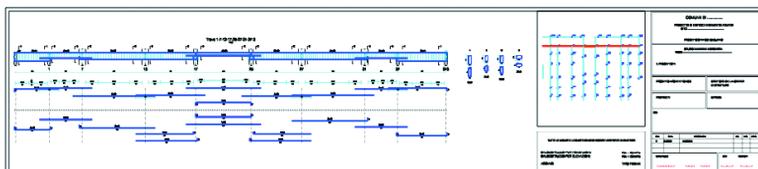


Il cartiglio lo potete realizzare voi, come elemento grafico anche includendo bitmap come quella del vostro logo e potete inserirvi anche della “variabili” in modo tale che esso sarà riempito di testi automaticamente. Ad esempio il nome dell'opera, la quota dell'impalcato e altro. E le tavole saranno numerato in automatico.

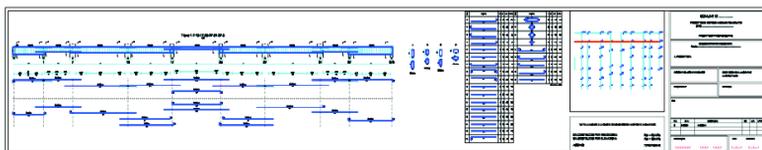
Pensate sia utile un campo note? Lo si aggiunge immediatamente, sempre redatto da voi e quindi con le vostre esigenze, con gli stessi criteri del cartiglio.



Non è finita! Una “key plan” è un tocco di eleganza notevole e aiuta anche a capire con un solo sguardo di che elemento strutturale stiamo parlando.



Se poi siete dei raffinati, potete aggiungere in automatico la distinta delle armature.



Una documentazione completa ed accuratissima dell'elemento strutturale, tutto racchiuso nella comoda idea di un singolo foglio.

Naturalmente i disegni che avete visto sono prodotti non solo completamente in automatico ma per tutta la struttura e, se volete, ordinandoli per quote



# CENNI SULL'ORIGINE DEI TERREMOTI

---

di Elena Spagnuolo\*

\*Laureata in Fisica all'Università degli Studi di Roma "La Sapienza", attualmente svolge il dottorato di ricerca presso il Dip.Te.Ris di Genova e l'INGV di Roma, con specializzazione in sismologia.

## Introduzione

Le onde sismiche rilasciate in occasione di un terremoto si traducono in superficie in un'oscillazione di complicata forma funzionale che si trasmette nei terreni, da questi alle fondazioni e quindi alle strutture. La capacità di valutare a livello quantitativo l'azione delle forze sismiche nella progettazione strutturale è strettamente connessa alla conoscenza generale del fenomeno sismico, perché le variabili che ne controllano l'evoluzione caratterizzano la forma d'onda che raggiunge la superficie e quindi l'impatto del terremoto in una determinata area di interesse.

In tal senso la conoscenza generale del fenomeno sismico viene ad assumere un ruolo primario nella modellazione dell'azione sismica nella progettazione strutturale, sebbene la sua descrizione, come ogni problema fisico, sia notevolmente complessa.

## L'origine del terremoto

Nella crosta terrestre si accumulano sforzi notevoli dovuti al continuo movimento di origine tettonica delle masse rocciose che compongono la terra. In superficie, tale dinamicità si manifesta attraverso diversi fenomeni come la subduzione delle placche oceaniche, le eruzioni vulcaniche, la crescita e mutazione delle catene orogeniche, i terremoti (Fig 1.1).

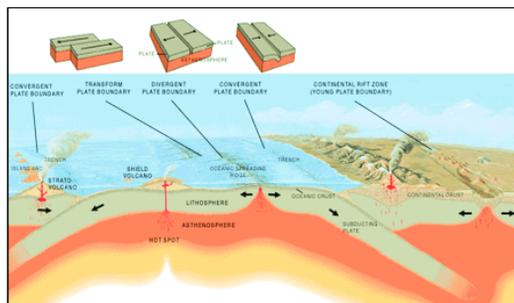


Figura 1.1: Manifestazione della dinamicità all'interno della terra.

La figura mostra la teoria della tettonica a zolle: la crosta terrestre è in espansione grazie al meccanismo distensivo delle dorsali; in seguito a questa spinta alcuni lembi di crosta subducono dando origine a diversi fenomeni, ad esempio le eruzioni vulcaniche. Questi movimenti generano forti spinte e alterano la pressione e la temperatura di alcune zone che possono raggiungere le condizioni adatte all'origine del fenomeno sismico. (Tratto da: <http://www.protezionecivile.it/cms/images/RISCHIminisito/sismico/zolle.gif>)

Il terremoto si genera principalmente nella crosta terrestre ed è associato al rilascio dello sforzo accumulato nel tempo ad opera del lento meccanismo di deformazione di origine tettonica che interessa gli strati elastico fragili della terra.

La sua evoluzione è legata a complessi meccanismi dinamici che controllano il rilascio dell'energia accumulata nel tempo dalle rocce e la sua comprensione è oggetto di studio dai primi anni del secolo scorso, con l'introduzione del concetto di meccanica della frattura nello studio dei processi di fagliazione con Griffith (1921). Lo studio del comportamento meccanico delle rocce, a livello microscopico e macroscopico, ha fatto nascere l'idea che l'evento sismico potesse essere interpretato come la propagazione di una frattura di taglio in un campo di sforzo preesistente. Le rocce reagiscono alla sollecitazione imposta deformandosi elasticamente fino ad un certo valore di soglia, dopo il quale assumono un comportamento che esce dalla linearità, fino ad un nuovo valore critico in seguito al quale la roccia rompe. Le eterogeneità della terra fanno sì che alcune zone della superficie sollecitata raggiungano le condizioni critiche più velocemente di altre così che la frattura enuclei in un punto e si propaghi esercitando una tensione aggiuntiva sul materiale circostante e creando le condizioni necessarie affinché almeno uno dei punti attigui possa rompere.

Una volta superata la soglia di massima resistenza si verifica una brusca caduta di tensione che provoca lo scorrimento relativo dei due lembi della faglia e il rilascio di energia. Parte di questa energia viene spesa per la creazione di nuova superficie e per la propagazione di una frattura, in parte viene spesa nel meccanismo di deformazione elastica del volume, altra viene dissipata sotto forma di calore e in parte si propaga nel mezzo sotto forma di onde elastiche, le stesse che raggiungendo la superficie danno origine al terremoto. La crosta terrestre è quindi fortemente fratturata e i terremoti avvengono principalmente su faglie preesistenti, dove le condizioni energetiche sono più favorevoli. In questo caso la tensione si accumula a causa dell'attrito statico tra i due lembi della faglia che ne impedisce lo scorrimento. La soglia è definita dalla massima resistenza all'attrito superata la quale viene rilasciata energia e ha luogo lo scorrimento relativo. In questo caso è l'attrito a determinare la stabilità e l'instabilità per la struttura sismogenetica e l'interpretazione del processo è nuovamente associata a un meccanismo di fatturazione delle asperità (protuberanze microscopiche) che ricoprono le due superfici della faglia.

La superficie dove la frattura si propaga (o anche la superficie di contatto tra due lembi di una faglia preesistente), sotto opportune condizioni, è approssimabile ad un piano, un piano costituito da materiali fortemente eterogenei dove lo stato di sforzo non è uniforme. La frattura pertanto si propaga seguendo un percorso individuato da zone dove la resistenza della roccia è minore rispetto alle zone adiacenti. Quando le condizioni energetiche non

sono più favorevoli, ovvero la roccia oppone una forte resistenza al rilascio di sforzo, la frattura (o anche la dislocazione relativa) si arresta e lo sforzo residuo si ridistribuisce sul piano andando a costituire quello che sarà considerato lo stato di sforzo preesistente in occasione di un nuovo episodio sismico. In tal senso, il terremoto può essere interpretato come un breve episodio di un lungo ciclo (su scale temporali geologiche) in cui lo stress si accumula per decine, centinaia o migliaia di anni per poi essere rilasciato in un massimo di pochi minuti e quindi ridistribuito.

### **La propagazione**

È importante sottolineare il fatto che la sorgente sismica non è puntuale ma estesa (ha una dimensione fisica) e le onde non si generano in un solo punto ma in una serie di punti in successione e pertanto interferiscono e si propagano distribuendo l'energia in modo anisotropo (secondo direzioni preferenziali).

La propagazione delle onde è un altro aspetto molto importante nella comprensione del fenomeno poiché il mezzo (la terra) non è omogeneo. In prima approssimazione possiamo immaginare la terra come composta da diversi strati ognuno dei quali con determinate caratteristiche elastiche costanti. La propagazione della radiazione attraverso questi strati può essere studiata in analogia all'ottica geometrica: le onde si riflettono, si rifrangono, si trasformano in nuove onde di diverso stato di polarizzazione alterando la radiazione che raggiunge la superficie (ad esempio ne alterano la durata). Inoltre l'onda si attenua con la distanza e viene filtrata in frequenza poiché la terra si comporta come un filtro passabasso.

Un altro fenomeno, necessario alla comprensione del fenomeno in superficie, è legato alla conformazione geometrica del sito di interesse (ad esempio un bacino potrebbe intrappolare un'onda generando fenomeni di risonanza) ma anche alla tipologia del terreno che caratterizza gli strati superficiali della crosta terrestre: un sedimento soffice potrebbe amplificare l'onda.

Queste premesse aiutano a comprendere la complessità del fenomeno sismico, quindi la sua imprevedibilità e la sua difficile modellazione. La realizzazione di un modello presuppone la capacità di caratterizzare la sorgente, risolvere adeguatamente il problema della propagazione, descrivere il comportamento degli strati più superficiali della crosta terrestre, nonché tenere conto del regime tettonico in cui la faglia è inserita, la sua storia, lo stato di stress preesistente.

## Il piano di faglia

La propagazione della frattura avviene su un piano, detto piano di faglia, le cui superfici subiscono uno scorrimento relativo (dislocazione) e il punto dove ha origine l'episodio di frattura viene detto ipocentro (Fig. 1.2).

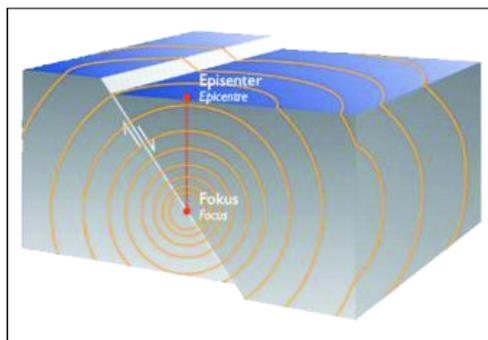


Figura 1.2: il piano di faglia.

(Tratto da: <http://www.geo.uib.no/jordskjelv/index.php?topic=earthquakes&lang=en>)

In natura è possibile rilevare faglie con movimenti complessi risultanti da uno spostamento sia verticale che orizzontale. Tali spostamenti sono controllati dalle componenti principali dello sforzo che determinano il tipo di dislocazione e la sua direzione. Assumendo che uno degli assi principali sia verticale è possibile descrivere il meccanismo di fagliazione in base alle componenti principali sul piano ad esso ortogonale. In questo caso ci si aspetta che quando sull'asse verticale la tensione è massima, sul piano perpendicolare a tale asse si esercitino la componente di massimo e di minimo sforzo, e che pertanto la dislocazione si accomodi sulla componente orizzontale. Quando sulla faglia agiscono sia la componente di massimo che quella di minimo sforzo la dislocazione avviene con un meccanismo detto 'strike slip faulting' e in questo caso sulla verticale si esercita lo sforzo principale intermedio ( $\sigma_2$ ). Una faglia che sull'asse verticale abbia lo sforzo principale minimo ( $\sigma_3$ ), ha un meccanismo di fagliazione inverso, detto 'thrust faulting', di tipo compressivo su entrambe le direzioni. Quando lo sforzo principale massimo ( $\sigma_1$ ) è sulla verticale, allora il moto è di tipo distensivo sulle due componenti e il meccanismo di fagliazione è normale, 'normal faulting' (Fig. 1.3a e Fig. 1.3b).

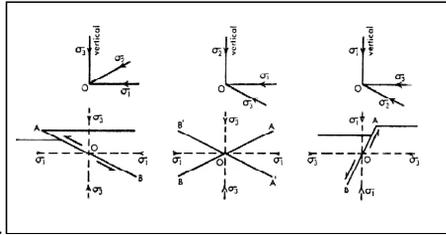


Figura 1.3a: meccanismi di fagliazione

(tratto da: Stein & Wysession: *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*, 2003)

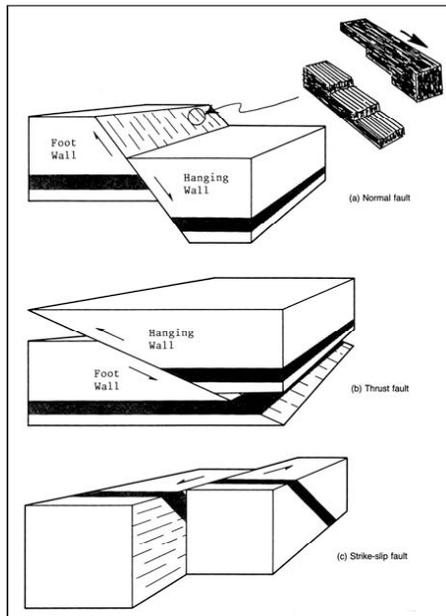


Figura 1.3b: tre principali meccanismi di dislocazione.

(Tratto da: [www.dukelabs.com/.../1CManual0209.htm](http://www.dukelabs.com/.../1CManual0209.htm))

Le faglie sono raramente isolate: di solito sono associate in sistemi o famiglie: in questo caso interagiscono tra loro. Ne sono esempio le fosse tettoniche originate da un complesso meccanismo di interazione tra faglie che dislocano con angoli simili ma in direzione opposte spingendo verso il basso una sezione di crosta. A queste depressioni morfologiche viene dato il nome di 'rift valleys'.

Le faglie possono essere inoltre segmentate ovvero presentare un certo numero di segmenti adiacenti che interagiscono tra di loro attraverso il campo di

sforzo. La segmentazione è associata alla resistenza delle rocce che in alcune zone della faglia crea delle vere e proprie barriere alla propagazione della frattura rendendo il piano di faglia discontinuo e ostacolando il processo. La faglia Nord Anatoliana presenta ad esempio una maggiore segmentazione rispetto a quella di San Andreas e tende a rompere in terremoti più piccoli. Un'altra caratteristica importante delle faglie è l'esposizione. Alcune faglie sono ben visibili perché la frattura ha potuto propagare fino in superficie generando tracce (Fig. 1.4).



Figura 1.4: faglia di San Andreas (California)

(Tratto da: <http://images.encarta.msn.com/xref/media/sharemed/targets/images/pbo/t978/T978800.A.jpg>)

Altre faglie sono nascoste ovvero l'episodio di frattura si arresta a qualche chilometro dalla superficie rendendone difficile l'individuazione ed è questo il caso della maggior parte delle faglie italiane.

## La pericolosità sismica

La difesa dalle conseguenze dannose dei terremoti coinvolge una gamma molto vasta di attività scientifiche, sia per quanto riguarda la conoscenza generale del fenomeno sismico (geofisica, geologia) sia per quanto riguarda la modellazione dell'azione sismica nella progettazione strutturale (geotecnica, ingegneria). Difatti la stessa definizione di rischio sismico, pericolosità -esposizione - vulnerabilità, interessa competenze molto diverse fra loro. La pericolosità sismica è lo strumento di previsione delle azioni sismiche attese relativamente ad un certo sito su base probabilistica ed è un ambito di competenza sismologica. Un evento sismico non è ancora prevedibile ma su base probabilistica è possibile discriminare tra i possibili scenari legati alle potenzialità di una faglia e quindi attribuirgli un peso.

Sinteticamente uno studio probabilistico necessita di tre ingredienti: l'individuazione delle faglie attive relativamente ad un sito di interesse; una legge che descriva un determinato parametro di interesse; una legge di ricorrenza che rechi le informazioni necessarie sul comportamento della o delle faglie nel passato. Su questa base viene suddiviso il territorio nazionale in zone sismiche e viene calcolata la probabilità che un determinato parametro di interesse (ad esempio il picco massimo di accelerazione - PGA) superi un valore di soglia atteso. Quindi supponendo che il verificarsi di un evento sismico segua una distribuzione Poissoniana, si calcola il valore del parametro di scuotimento che ha probabilità di verificarsi non superiore al 10% in 50 anni, valore standard assunto dalla normativa italiana (Fig 1.5).

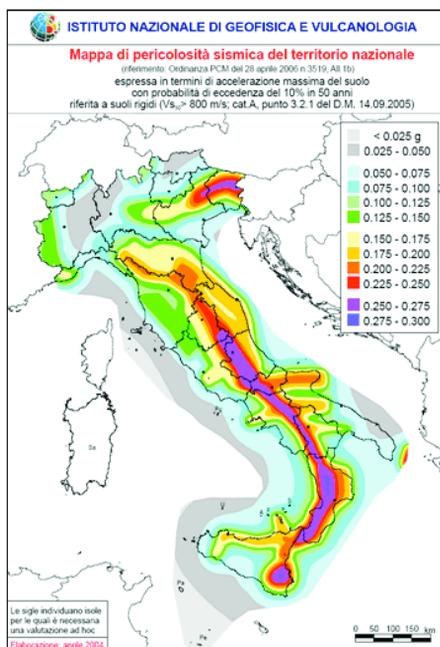


Figura 1.5: mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale espressa in termini di accelerazione massima del suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (Tratto da: <http://zonesismiche.mi.ingv.it/>)

Questo approccio, detto probabilistico, viene anche utilizzato per identificare il terremoto di riferimento, definito dalla terna  $M, R, \sigma$ , in base al quale vengono selezionati gli accelerogrammi impiegati nelle analisi non lineari una volta verificata la compatibilità con gli spettri di normativa.

Diversamente, la pericolosità viene anche calcolata facendo uso di un metodo deterministico, un metodo basato sulla simulazione dell'evento sismico a partire dalle conoscenze relative alla faglia, alla zona e al mezzo di propagazione. Con tale metodo si ha accesso diretto al sismogramma sintetico sebbene allo stato attuale la necessità di una modellazione realistica generi una grande variabilità di sintetici e una semplificazione su vari livelli delle complessità legate al fenomeno. Tuttavia tale tecnica permette di fissare dei limiti superiori allo scuotimento del terreno e di definire possibili scenari anche in zone sismiche che non dispongono dei dati empirici necessari ad esempio all'applicabilità della tecnica probabilistica.

