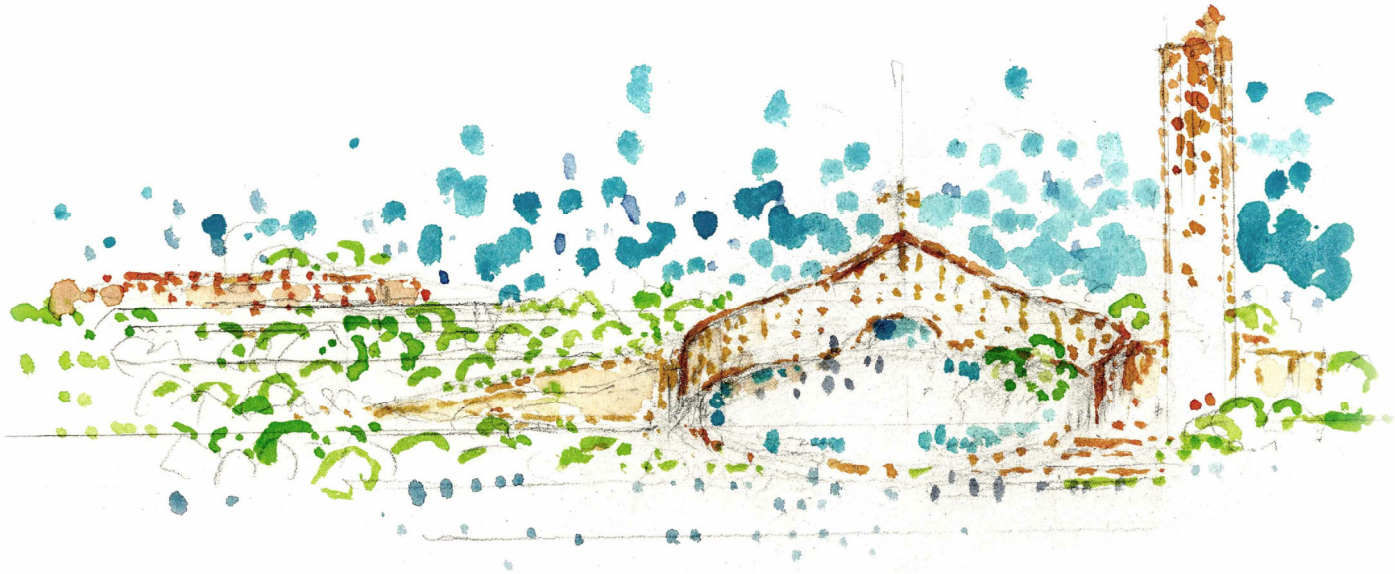
Comune di Oppido Lucano
Provincia di Potenza
Arcidiocesi di Acerenza

CHIESA PARROCCHIALE "SANTI PIETRO E PAOLO APOSTOLI"



PROGETTO ESECUTIVO

COMMITTENTE: Parrocchia SS. Pietro e Paolo
Via Palermo 12, Oppido Lucano (Pz)
Parroco: Don Domenico Santomauro

PROGETTO: ISOLARCHITETTI Srl (capogruppo)
Prof. Arch. Aimaro Oreglia d' Isola
Arch. Saverio oreglia d'Isola
Arch. Flavio Bruna
Arch. Michele Battaggia
Arch. Andrea Bondonio
Arch. Stefano Peyretti
LSB ARCHITETTI ASSOCIATI
Arch. Giuseppe Dell'Aquila
Arch. Luca Pugno
Arch. Simone Pugno
ARCH. DOMENICO CHIUMMENTO (CSP e CSE d.lgs. 81/08)

PROGETTO STRUTTURE: Ing. Michele Masciavè
PROGETTO IMPIANTI: Per. Ind. Gerardo Cannella
Ing. Vito Oliveto

tavola	oggetto	data
STR - 7	Validazione codice di calcolo	GIUGNO 2020
		Rev. 00

CARATTERISITCHE E VALIDAZIONE DEL CODICE DI CALCOLO.

Il codice di calcolo, nome commerciale Sismicad, è prodotto e distribuito dalla casa di software Concrete s.r.l. - Via della Pieve, 19 - 35121 Padova (Tel. 049-8754720 Fax 049-8755234) - CF/PI: 02268670284

SismiCad è un programma per il calcolo strutturale con modellazione agli elementi finiti, dotato di input grafico proprio o mediante CAD esterno, con un solutore tridimensionale di tipo SAP e con strumenti di progettazione specifici per strutture in c.a., acciaio, muratura e legno.

Il prodotto utilizzato per questa elaborazione è SismiCad ver. 12.15 - Licenza N° 4279523 assegnata a Studio Tecnico Associato Masciavè' e Mangialardi – Via Mangione, 21 - CORATO (BA).

Il codice di calcolo impiegato per questa analisi e verifica strutturale, dopo una attenta valutazione e disamina dei risultati ottenuti e della documentazione a supporto dello stesso fornita dal produttore, <u>risulta affidabile e idoneo</u> per questo caso specifico di impiego.

La **validazione del codice** è stata condotta verificando strutture semplici risolte con metodi manuali nonché il confronto dei risultati ottenuti con codici di calcolo diversi al fine di eseguire un controllo incrociato dei risultati della elaborazione. Al termine di detta procedura si ritiene il software Sismicad affidabile, ovvero esente da difetti, anomalie di funzionamento e rispecchia le prestazioni tecnologiche esposte nel materiale di documentazione a corredo del software.

DESCRIZIONE DEL PROGRAMMA SISMICAD

Si tratta di un programma di calcolo strutturale che nella versione più estesa è dedicato al progetto e verifica degli elementi in cemento armato, acciaio, muratura e legno di opere civili. Il programma utilizza come analizzatore e solutore del modello strutturale un proprio solutore agli elementi finiti tridimensionale fornito col pacchetto. Il programma è sostanzialmente diviso in tre moduli: un pre processore che consente l'introduzione della geometria e dei carichi e crea il file dati di input al solutore; il solutore agli elementi finiti; un post processore che a soluzione avvenuta elabora i risultati eseguendo il progetto e la verifica delle membrature e producendo i grafici ed i tabulati di output.

SCHEMATIZZAZIONE STRUTTURALE E CRITERI DI CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI.

Il programma schematizza la struttura attraverso l'introduzione nell'ordine di fondazioni, poste anche a quote diverse, platee, platee nervate, plinti e travi di fondazione poggianti tutte su suolo elastico alla Winkler, di elementi verticali, pilastri e pareti in c.a. anche con fori, di orizzontamenti costituiti da solai orizzontali e inclinati (falde), e relative travi di piano e di falda; è ammessa anche l'introduzione di elementi prismatici in c.a. di interpiano con possibilità di collegamento in inclinato a solai posti a quote diverse. I nodi strutturali possono essere connessi solo a travi, pilastri e pareti, simulando così impalcati infinitamente deformabili nel piano, oppure a elementi lastra di spessore dichiarato dall'utente simulando in tal modo impalcati a rigidezza finita. I nodi appartenenti agli impalcati orizzontali possono essere connessi rigidamente ad uno o più nodi principali giacenti nel piano dell'impalcato; generalmente un nodo principale coincide con il baricentro delle masse. Tale opzione, oltre a ridurre significativamente i tempi di elaborazione, elimina le approssimazioni numeriche connesse all'utilizzo di elementi lastra quando si richiede l'analisi a impalcati infinitamente rigidi. Per quanto concerne i carichi, in fase di immissione dati, vengono definite, in numero a scelta dell'utente, condizioni di carico elementari le quali, in aggiunta alle azioni sismiche e variazioni termiche, vengono combinate attraverso coefficienti moltiplicativi per fornire le combinazioni richieste per le verifiche successive. L'effetto di disassamento delle forze orizzontali, indotto ad esempio dai torcenti di piano per costruzioni in zona sismica, viene simulato attraverso l'introduzione di eccentricità planari aggiuntive le quali costituiscono ulteriori condizioni elementari di carico da cumulare e combinare secondo i criteri del paragrafo precedente. Tipologicamente sono ammessi sulle travi e sulle pareti carichi uniformemente distribuiti e carichi trapezoidali; lungo le aste e nei nodi di incrocio delle membrature sono anche definibili componenti di forze e coppie concentrate comunque dirette nello spazio. Sono previste distribuzioni di temperatura, di intensità a scelta dell'utente, agenti anche su singole porzioni di struttura. Il calcolo delle sollecitazioni si basa sulle seguenti ipotesi e modalità: - travi e pilastri deformabili a sforzo normale, flessione deviata, taglio deviato e momento torcente. Sono previsti coefficienti riduttivi dei momenti di inerzia a scelta dell'utente per considerare la riduzione della rigidezza flessionale e torsionale per effetto della fessurazione del conglomerato cementizio. E' previsto un moltiplicatore della rigidezza assiale dei pilastri per considerare, se pure in modo approssimato, l'accorciamento dei pilastri per sforzo normale durante la costruzione. - le travi di fondazione su suolo alla Winkler sono risolte in forma chiusa tramite uno specifico elemento finito; - le pareti in c.a. sono analizzate schematizzandole come elementi lastra-piastra discretizzati con passo massimo assegnato in fase di immissione dati; - le pareti in muratura possono essere schematizzate con elementi lastra-piastra con spessore flessionale ridotto rispetto allo spessore membranale.- I plinti su suolo alla Winkler sono modellati

con la introduzione di molle verticali elastoplastiche. La traslazione orizzontale a scelta dell'utente è bloccata o gestita da molle orizzontali di modulo di reazione proporzionale al verticale. - I pali sono modellati suddividendo l'asta in più aste immerse in terreni di stratigrafia definita dall'utente. Nei nodi di divisione tra le aste vengono inserite molle assialsimmetriche elastoplastiche precaricate dalla spinta a riposo che hanno come pressione limite minima la spinta attiva e come pressione limite massima la spinta passiva modificabile attraverso opportuni coefficienti. - i plinti su pali sono modellati attraverso aste di rigidezza elevata che collegano un punto della struttura in elevazione con le aste che simulano la presenza dei pali;- le piastre sono discretizzate in un numero finito di elementi lastra-piastra con passo massimo assegnato in fase di immissione dati; nel caso di platee di fondazione i nodi sono collegati al suolo da molle aventi rigidezze alla traslazione verticale ed richiesta anche orizzontale.- La deformabilità nel proprio piano di piani dichiarati non infinitamente rigidi e di falde (piani inclinati) può essere controllata attraverso la introduzione di elementi membranali nelle zone di solaio. - I disassamenti tra elementi asta sono gestiti automaticamente dal programma attraverso la introduzione di collegamenti rigidi locali.- Alle estremità di elementi asta è possibile inserire svincolamenti tradizionali così come cerniere parziali (che trasmettono una quota di ciò che trasmetterebbero in condizioni di collegamento rigido) o cerniere plastiche.- Alle estremità di elementi bidimensionali è possibile inserire svincolamenti con cerniere parziali del momento flettente avente come asse il bordo dell'elemento.- Il calcolo degli effetti del sisma è condotto, a scelta dell'utente, con analisi statica lineare, con analisi dinamica modale o con analisi statica non lineare, in accordo alle varie normative adottate. Le masse, nel caso di impalcati dichiarati rigidi sono concentrate nei nodi principali di piano altrimenti vengono considerate diffuse nei nodi giacenti sull'impalcato stesso. Nel caso di analisi sismica vengono anche controllati gli spostamenti di interpiano.

VERIFICHE DELLE MEMBRATURE IN ACCIAIO

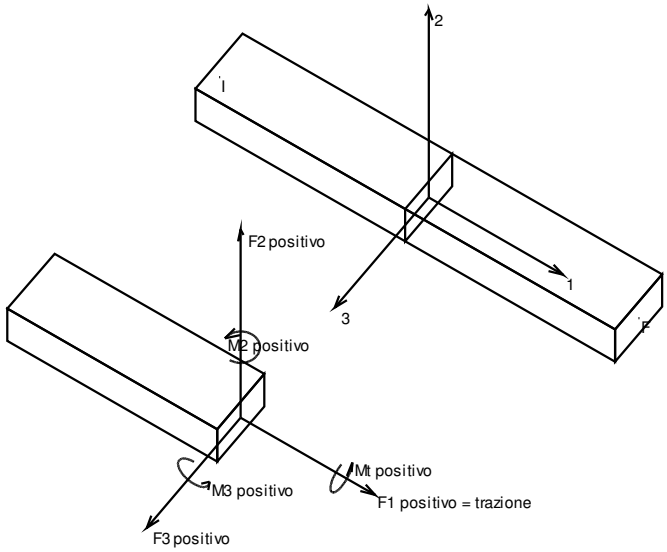
Le verifiche delle membrature in acciaio (solo per utenti SismiCad acciaio) possono essere condotte secondo NTC 2008, CNR 10011 (stato limite o tensioni ammissibili), CNR 10022, Eurocodice 3. Sono previste verifiche di resistenza e di instabilità. Queste ultime possono interessare superelementi cioè membrature composte di più aste. Le verifiche tengono conto, ove richiesto, della distinzione delle condizioni di carico in normali o eccezionali (I e II) previste dalle normative adottate.

Convenzioni di segno aste

Le abbreviazioni relative alle sollecitazioni sugli elementi aste sono da intendersi:

- F1 (N): sforzo normale nell’asta;
- F2: sforzo di taglio agente nella direzione dell’asse locale 2;

- F3: sforzo di taglio agente nella direzione dell'asse locale 3;
- M1 (Mt): momento attorno all'asse locale 1; equivale al momento torcente;
- M2: momento attorno all'asse locale 2;
- M3: momento attorno all'asse locale 3;



La convenzione sui segni per i parametri di sollecitazione delle aste è la seguente:

presa un'asta con nodo iniziale i e nodo finale f, asse 1 che va da i a f, assi 2 e 3 presi secondo quanto indicato nei paragrafi successivi relativi al sistema locale delle aste sezionando l'asta in un punto e considerando la sezione sinistra del punto in cui si è effettuato il taglio (sezione da cui esce il versore asse 1) i parametri di sollecitazione sono positivi se hanno verso e direzione concordi con il sistema di riferimento locale dell'asta 1, 2, 3 (per i momenti si adotta la regola della mano destra).

Il sistema è definito diversamente per tre categorie di aste, a seconda che siano originate da:

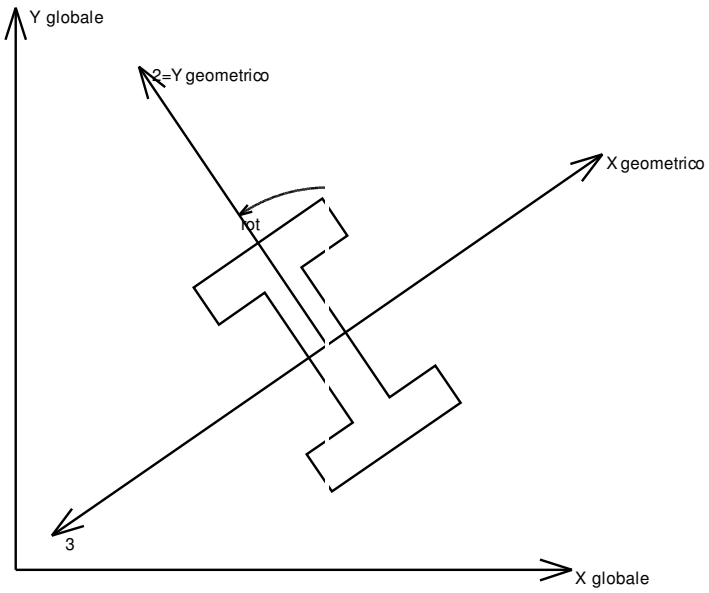
- aste verticali ad esempio pilastri e colonne;
- aste non verticali non di c.a., ad esempio travi di acciaio o legno;
- aste non verticali in c.a.: travi in c.a. di piano, falda o a quota generica.

Nel seguito si indica con 1, 2 e 3 il sistema locale dell'asta che non sempre coincide con gli assi principali della sezione. Si ricorda che per assi principali si intendono gli assi rispetto a cui si ha il raggio di inerzia minimo e massimo. Gli assi 1, 2 e 3 rispettano la regola della mano destra.

Sistema locale aste verticali

Nella figura si considera l'asse 1 uscente dal foglio (l'osservatore guarda in direzione opposta a quella dell'asse 1).

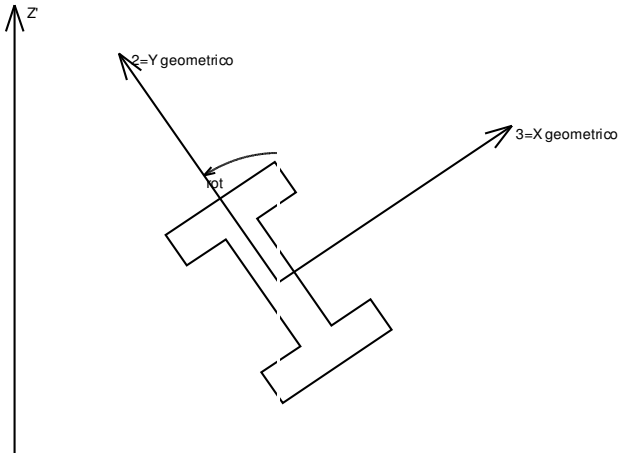
Sistema locale aste non verticali



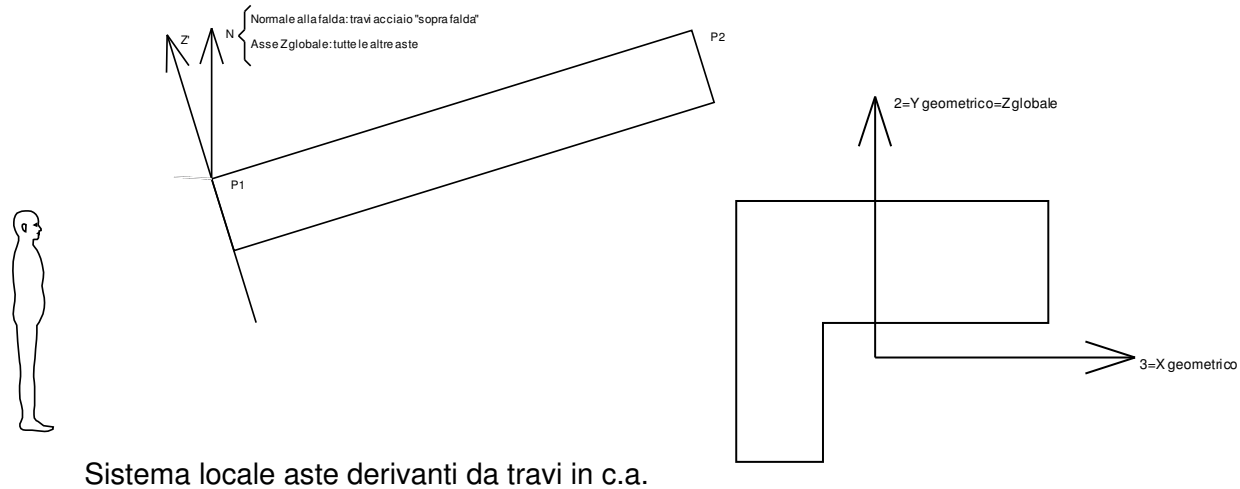
Nella figura si considera l'asse 1 entrante nel foglio (l'osservatore guarda in direzione coincidente a quella dell'asse 1).

L'asse Z' è illustrato nella figura seguente dove:

- P1 è il punto di inserimento iniziale dell'asta
- P2 è il punto di inserimento finale dell'asta
- N è la normale al piano o falda di inserimento



Z' è quindi l'intersezione tra il piano passante per P1, P2 contenente N e il piano della sezione iniziale dell'asta.



Sistema locale aste derivanti da travi in c.a.

Nella figura si considera l'asse 1 entrante nel foglio (l'osservatore guarda in direzione coincidente a quella dell'asse 1). L'asse 2 è sempre verticale e quindi coincidente con l'asse Z globale nonché con l'asse y geometrico. L'asse 3 coincide con l'asse x geometrico. Si sottolinea il fatto che gli assi 2 e 3 non corrispondono agli assi principali della sezione.

Convenzioni di segno gusci

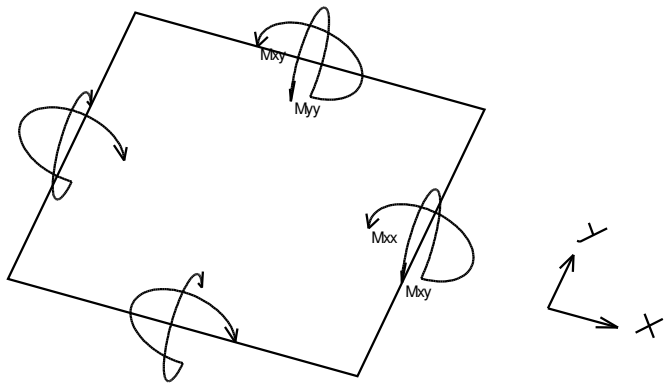
Sono individuate distinte convenzioni di segno in relazione al tipo di elemento strutturale a cui il guscio si riferisce:

- convenzione per gusci non verticali, originati ad esempio da piastre e platee
- convenzione per gusci verticali, originati ad esempio da pareti e muri

Convenzione di segno per gusci non verticali

Il sistema di riferimento nel quale sono espressi i parametri di sollecitazione è così definito: origine appartenente al piano dell'elemento, asse x e y contenuti nel piano dell'elemento e terzo asse (z) ortogonale al piano dell'elemento a formare una terna destrogira. In particolare l'asse x ha proiezione in pianta parallelaed equiversa all'asse globale X. Nel caso di piastre orizzontali (caso più comune) gli assi x, y e z locali all'elemento sono paralleli ed equiversi agli assi X, Y e Z globali. Si sottolinea che non ha alcun interesse collocare esattamente nel piano dell'elemento la posizione dell'origine in quanto i parametri di sollecitazione sono invarianti rispetto a tale posizione.

In figura è mostrato un elemento infinitesimo di shell orizzontale con indicato il sistema di riferimento e i parametri di sollecitazione Mxx, Myy, Mxy.



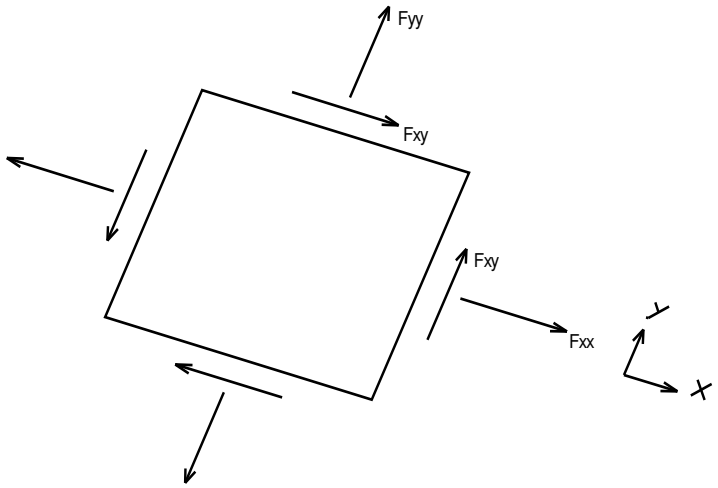
Si definiscono:

- Mxx: momento flettente [Forza*Lunghezza/Lunghezza] agente sul bordo di normale x (verso positivo indicato dalla freccia in figura che tende le fibre inferiori);
- Myy: momento flettente [Forza*Lunghezza/Lunghezza] agente sul bordo di normale y (verso positivo indicato dalla freccia in figura che tende le fibre inferiori);
- Mxy: momento torcente [Forza*Lunghezza/Lunghezza] agente sui bordi (verso positivo indicato dalla freccia in figura);

Per quanto riguarda le sollecitazioni estensionali si faccia riferimento alla figura seguente dove per lo stesso elemento infinitesimo di shell orizzontale con indicato il sistema di riferimento e i parametri di sollecitazione Fxx, Fyy, Fxy.

Si definiscono:

- Fxx: sforzo estensionale [Forza/Lunghezza] agente sul bordo di normale x (verso positivo indicato dalla freccia in figura che mette in trazione l'elemento);
- Fyy: sforzo estensionale [Forza/Lunghezza] agente sul bordo di normale all'asse y (verso positivo indicato dalla freccia in figura che mette in trazione l'elemento);
- Fxy: sforzo di taglio [Forza/Lunghezza] agente sui bordi (verso positivo indicato dalla freccia in figura).



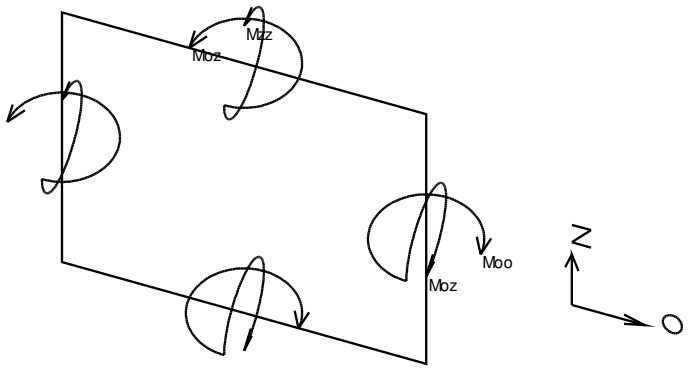
Vengono riportati inoltre i tagli fuori dal piano dell'elemento guscio:

- Vx: taglio fuori piano [Forza/Lunghezza] applicato al bordo di normale parallela all'asse x;
- Vy: taglio fuori piano [Forza/Lunghezza] applicato al bordo di normale parallela all'asse y;

Convenzione di segno per gusci verticali

Il sistema di riferimento nel quale sono espressi i parametri di sollecitazione è così definito: origine appartenente al piano dell'elemento, asse O (ascisse) e z (ordinate) contenuti nel piano dell'elemento e terzo asse ortogonale al piano dell'elemento a formare una terna destrogira. In particolare l'asse O è orizzontale e l'asse z parallelo ed equiverso con l'asse Z globale. Si sottolinea che non ha alcun interesse collocare esattamente nel piano dell'elemento la posizione dell'origine in quanto i parametri di sollecitazione sono invarianti rispetto a tale posizione.In figura è mostrato un elemento infinitesimo di shell orizzontale con indicato il sistema di riferimento e i parametri di sollecitazione Moo, Mzz, Moz.

- Moo: momento flettente distribuito [Forza*Lunghezza/Lunghezza] applicato al bordo di normale parallela all'asse O (verso positivo indicato dalla freccia in figura che tende le fibre inferiori);
- Mzz: momento flettente distribuito [Forza*Lunghezza/Lunghezza] applicato al bordo di normale parallela all'asse z (verso positivo indicato dalla freccia in figura che tende le fibre inferiori);
- Moz: momento "torcente" distribuito [Forza*Lunghezza/Lunghezza] applicato sui bordi (verso positivo indicato dalla freccia in figura);

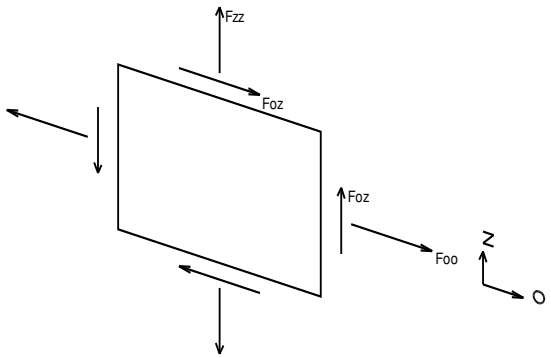


Per quanto riguarda le sollecitazioni estensionali si faccia riferimento alla figura seguente dove per lo stesso elemento infinitesimo di shell con indicato il sistema di riferimento i parametri di sollecitazione Foo, Fzz, Foz sono rispettivamente:

- Fzz: sforzo tensionale distribuito [Forza/Lunghezza] applicato al bordo di normale parallela all'asse z (verso positivo indicato dalla freccia in figura che mette in trazione l'elemento);

- Foo: sforzo tensionale distribuito [Forza/Lunghezza] applicato al bordo di normale parallela all'asse O (verso positivo indicato dalla freccia in figura che mette in trazione l'elemento);

- Foz: sforzo tagliante distribuito [Forza/Lunghezza] applicato sui bordi (verso positivo indicato dalla freccia in figura);



Vengono riportati inoltre i tagli fuori dal piano dell'elemento guscio:

- Vo: taglio fuori piano applicato al bordo di normale parallela all'asse O ;
- Vz: taglio fuori piano applicato al bordo di normale parallela all'asse z .

LICENZE SOFTWARE CALCOLO

Corato, Il calcolatore delle strutture

Concrete srl
Via della Pieve, 19 - 35121 Padova tlf 049 87 54 720 fx 049 87 55 234
www.concrete.it - info@concrete.it

Licenza d'uso

Prodotto: SismiCAD

Numero di licenza: 4279523

Concrete srl
Via della Pieve, 19 - 35121 Padova tlf 049 87 54 720 fx 049 87 55 234
www.concrete.it - info@concrete.it

Licenza d'uso

Prodotto: SismiCAD Acc.

Numero di licenza: 4279523

Concrete srl
Via della Pieve, 19 - 35121 Padova tlf 049 87 54 720 fx 049 87 55 234
www.concrete.it - info@concrete.it

Licenza d'uso

Prodotto: SismiCAD Legno Modulo

Numero di licenza: 4279523

Numero chiave: 4753

Rilasciata a: MASCIAVE' ING. M. MANGIALARDI GEOL. M.
70033 CORATO (BA)

Consigliamo di conservare con cura ed in luogo sicuro questo documento che costituisce, unitamente

Casi di prova per la validazione del software di calcolo strutturale Sismicad versione 12.15

Concrete s.r.l.

Indice

1 Basi teoriche ed algoritmi impiegati 5
1.1 Il solutore ad elementi finiti 5
1.2 Tipi di analisi 6
1.3 La libreria degli elementi finiti 10
1.4 Riferimenti bibliografici al solutore 22
2 Campi di impiego 26
3 Bibliografia 28

1 Basi teoriche ed algoritmi impiegati

1.1 IL SOLUTORE AD ELEMENTI FINITI

Sismicad è dotato di un solutore per l'analisi numerica delle strutture condotta attraverso l'utilizzo del metodo degli elementi finiti.
Esso nasce per soddisfare le seguenti esigenze:

- dotare il programma ad elementi finiti di un file di input e di output facilmente interpretabile da parte dell'utenza;
- eseguire un accurato controllo della correttezza dei dati prima di passare alla fase di soluzione vera e propria;
- consentire l'introduzione modulare di nuovi elementi finiti e procedure di analisi senza modificare l'impianto generale del programma;
- consentire facilmente la sostituzione degli elementi finiti esistenti con altri la cui formulazione derivi dai progressi scientifici nel campo dell'analisi numerica delle strutture;
- offrire all'utenza le tecniche di soluzione e le formulazioni più aggiornate nel campo dell'analisi numerica;
- essere pronti ad accogliere le prescrizioni di calcolo dettate dalla normativa vigente;
- costituire la base di un programma per la ricerca scientifica nel campo dell'analisi numerica.

Il programma è dotato di una vasta libreria di elementi finiti mono e bidimensionali la cui formulazione è basata su lavori di ricerca pubblicati sulle più autorevoli riviste internazionali.
A corredo del programma è fornito il presente manuale illustrativo, un manuale di esempi svolti di comparazione con i risultati teorici, un manuale in forma abbreviata riguardante l'impostazione del file di input e un manuale in forma estesa con la descrizione di tutte le basi teoriche adottate nella formulazione degli elementi finiti, i metodi di analisi, la descrizione del file di input e di quelli di output a cui si rimanda per gli ulteriori approfondimenti.

1.1.1 Principali caratteristiche del programma

Il solutore ad elementi finiti consente di eseguire le seguenti analisi strutturali:

- analisi statica lineare delle strutture;
- analisi dinamica lineare delle strutture;
- risposta allo spettro;
- analisi P-Delta;
- analisi per l'instabilità globale (Buckling);
- analisi statica non-lineare in controllo di forze;
- analisi statica non-lineare in controllo di spostamento (Path-Following).

1.1.2 Struttura del file di input ed organizzazione del programma

Il solutore ad elementi finiti è un programma aperto dal punto di vista dell'immissione dei dati i quali sono immessi attraverso un separatore alfabetico iniziale e da una successione di stringhe alfabetiche seguite da un segno di eguale e dal valore numerico.
I blocchi dati possono essere immessi senza alcuna priorità e tutti i dati letti vengono di volta in volta processati, controllati e archiviati in file binari o sequenziali avendo quindi la possibilità, in ogni momento dell'elaborazione, di attingere dati da files ove se ne ravvisi la necessità.
Questa organizzazione del programma lo rende quindi di facile sviluppo ed ampliamento senza che ne venga sconvolto l'impianto generale e consente facilmente successivi aggiornamenti.

1.1.3 Il check dei dati

E' la fase più complessa del programma. Ogni dato immesso viene processato, ne viene controllata la compatibilità e, in caso di errore, viene segnato a video e in un file di errore il problema riscontrato.

1.1.4 La modellazione strutturale

Il programma consente di analizzare strutture tridimensionali discretizzate attraverso elementi finiti mono e bidimensionali che si connettono in certi punti detti nodi. Ogni nodo possiede 6 gradi di libertà, 3 traslazioni e 3 rotazioni che sono espressi nel sistema di riferimento globale a cui è riferita la struttura.
Su ogni nodo strutturale possono essere assegnati carichi e coppie concentrate, masse traslazionali e rotazionali.
Ogni nodo strutturale può essere collegato ad altri nodi strutturali attraverso legami di tipo rigido che rispettano la meccanica dei corpi rigidi. In particolare è possibile modellare piani rigidi, disassamenti strutturali (ad esempio tra pilastri), connessioni totalmente rigide tra nodi.
Tutti i carichi, le coppie, le masse traslazionali e rotazionali assegnate ai nodi dipendenti sono riportate in automatico ai nodi principali attraverso il loro valore e coppie di trasporto.

1.2 TIPI DI ANALISI

1.2.1 L'analisi statica lineare

La soluzione del problema di equilibrio della struttura discretizzata si traduce nella soluzione del seguente sistema algebrico di equazioni lineari:

$$Ku=f$$

i cui coefficienti sono costituiti dai termini della matrice di rigidezza **K**, le incognite sono gli spostamenti e le rotazioni nodali contenuti nel vettore **u** e i termini noti sono costituiti dai vettori dei carichi **f** in numero pari alle condizioni di carico indipendenti dichiarate.
La matrice di rigidezza, almeno nei casi comuni, risulta essere una matrice di tipo sparso nel senso che molti coefficienti sono nulli. Opportune numerazioni dei nodi della struttura riescono a compattare i coefficienti intorno alla diagonale principale della matrice dando luogo a una banda. Se per ogni riga della matrice si calcolano, a partire dall'elemento diagonale, il numero di elementi oltre il quale i termini sono tutti nulli, si definisce ampiezza di banda il numero massimo di elementi riscontrati per ogni riga.
Si definisce inoltre profilo della matrice di rigidezza la somma dei termini contenuti in ogni colonna partendo dall'elemento diagonale e finendo al primo termine non nullo partendo dall'alto nella colonna considerata.
Un'ottima numerazione dei nodi, quella cioè per cui il profilo risulta essere minimo consente, da un punto di vista computazionale, notevoli risparmi di risorse potendo memorizzare solo i termini utili ed evitando in fase di risoluzione inutili operazioni sugli zeri della matrice di rigidezza.
Il programma prevede in cascata un duplice metodo di minimizzazione del profilo della matrice di rigidezza e il programma valuta quale dei due metodi abbia dato i migliori risultati rinumerando quindi in modo ottimo i nodi. Le procedure di minimizzazione sono tratte dai Rif. [45] e [46].
Durante la fase di assemblaggio della matrice di rigidezza viene controllata la presenza di elementi nulli posti lungo la diagonale principale; in quest'ultimo caso l'elaborazione termina con l'indicazione del numero di equazione ove si è riscontrata l'anomalia.

- La risoluzione del sistema di equazioni è condotto attraverso il metodo di Gauss che consiste nel decomporre la matrice di rigidezza nel prodotto di una matrice triangolare inferiore avente sulla diagonale principale tutti i termini pari all'unità con una matrice triangolare superiore:

$$K=LU$$

Il solutore ad elementi finiti consente di risolvere il sistema di equazioni attraverso due metodi, entrambi ottimizzati per matrici sparse.
Il primo metodo, è basato su un lavoro riportato nel Rif. [49] ed è distribuito dalla ditta Aspentech con sede in U.S.A.

Questo codice si compone di tre parti e rispettivamente una prima parte che è dedicata a riordinare il sistema di equazioni, una seconda che è dedicata a fattorizzare la matrice di rigidezza mentre una terza parte, dato il vettore dei termini noti, calcola la soluzione del sistema di equazioni.
Il riordino del sistema di equazioni è basato sui Rif. [50] e [51].
Il secondo metodo, impiega invece le librerie Intel MKL PARDISO che sono in grado di sfruttare i moderni sistemi multiprocessore eseguendo il calcolo in parallelo e quindi potenzialmente con maggior velocità.
Per entrambi i metodi, in fase di riduzione della matrice di rigidezza viene controllato che il generico termine diagonale della matrice ridotta sia, numericamente, maggiore di zero. In caso contrario l'elaborazione termina con la segnalazione di errore grave.
Al termine dell'elaborazione, è controllato il bilancio globale delle forze confrontando tra loro le risultanti e i momenti risultanti delle forze attive e reattive. Il risultato di questo confronto è l'unico che può garantire l'attendibilità della soluzione trovata.

1.2.2 L'analisi dinamica

Il metodo della proiezione nel sottospazio

L'analisi dinamica della struttura consiste nel determinare le frequenze proprie di vibrazione e le deformate modali, cioè gli autovalori e gli autovettori della matrice dinamica. Dalla seguente equazione:

$$(\mathbf{K} - \lambda\mathbf{M})\,\boldsymbol{\phi} = \mathbf{0}$$

in cui **K** è la matrice di rigidezza e **M** è la matrice delle masse si determinano le frequenze proprie λ e la deformata modale descritta dal vettore $\boldsymbol{\phi}$.
Quando il numero dei gradi di libertà della struttura è notevole e non è richiesto il calcolo di tutti gli autovalori ma solo di quelli collegati ai periodi più alti, allora è conveniente ricorrere al metodo iterativo della proiezione nel sottospazio adottando un certo numero di vettori iterativi. Il metodo per la ricerca delle frequenze di vibrazione e per la determinazione delle deformate modali è contenuto nel Rif. [55].
Pur avendo scelto un numero sufficientemente ampio di vettori iterativi può accadere in alcuni problemi specifici che gli autovalori nel gruppo che si sta iterando non siano sufficientemente separati per cui la velocità di convergenza risulta estremamente bassa.
In tali condizioni è utile applicare la procedura dello "shift" che aumenta notevolmente la velocità di convergenza.

Il metodo dei vettori di Ritz

In vista dell'analisi dinamica di edifici soggetti a terremoti, si dimostra che i modi di vibrare a forte componente rotazionale intorno all'asse verticale contribuiscono poco alla risposta dello spettro.
Alla luce di questa considerazione si è dimostrato valido un approccio differente per il calcolo dei modi di vibrare della struttura. Questo metodo prende in nome di estrazione dei modi di vibrare attraverso i vettori di Ritz Rif. [56] e [57].
Il metodo numerico è stato originato per essere applicato a problemi di risposta dinamica del tipo time-history e con qualche modifica può essere adoperato per trovare con una ragionevole approssimazione i modi di vibrare della struttura e le pulsazioni ad essi associati.
Questo metodo ha lo scopo di generare una sequenza di vettori massa ortogonali i quali, attraverso un'unica proiezione nel sottospazio, vengono ruotati per generare i vettori di Ritz finali.
Si segnala che la procedura precedentemente esposta offre da un punto di vista computazionale notevoli vantaggi in termini di velocità di elaborazione (da 1/2 a 1/3 del tempo di CPU rispetto al calcolo classico degli autovalori).
Essa inoltre consente di raggiungere la percentuale delle masse partecipanti con un numero di vettori inferiori rispetto all'analisi dinamica classica in quanto il metodo, per un numero limitato di vettori, scarta le rotazioni di impalcato che non danno contributo al calcolo delle masse partecipanti.
Le rotazioni di impalcato iniziano a manifestarsi all'aumentare del numero di vettori richiesti.
Alla luce di quanto esposto, si ritiene che questo metodo, sia del tutto alternativo al metodo classico e comunque costituisce un indispensabile e agevole strumento per il predimensionamento strutturale.

Il troncamento modale

Nella valutazione della risposta di strutture soggette a carichi dinamici, spesso si ritiene accettabile considerare un numero limitato di autovettori al fine di ottenere una soluzione convenientemente approssimata. Tale operazione viene detta troncamento modale.
Un parametro che tiene conto in modo forfetario dell'ammissibilità del troncamento modale è il cosiddetto fattore percentuale delle masse traslazionali e di quelle rotazionali partecipanti.
La nostra normativa, similmente a quella americana, impone di considerare tanti modi di vibrare fino a che le percentuali delle masse traslazionali partecipanti attingano valori superiori al 85%.

1.2.3 La risposta allo spettro e le tecniche di combinazione

In generale su una struttura possono agire contemporaneamente terremoti lungo due direzioni ortogonali nel piano X,Y e lungo Z aventi ognuno uno spettro di risposta. Il solutore ad elementi finiti prevede questa ipotesi.
Assegnato uno spettro di risposta, per ogni modo di vibrare, il programma calcola i massimi spostamenti e le massime sollecitazioni associate allo spettro assegnato
Il metodo più noto per combinare la generica entità è quello della radice quadrata della somma dei quadrati detto anche SRSS. Modellazioni numeriche hanno mostrato che questo metodo è efficiente solo quando le frequenze di vibrazione sono ben separate tra loro.
Un metodo che ha mostrato buoni risultati anche quando le frequenze modali sono ravvicinate è il cosiddetto metodo CQC (combinazione quadratica completa) funzione anche del fattore di smorzamento inteso come frazione di quello critico (cfr. Rif. [58]). Nel programma è previsto l'adozione di uno o dell'altro metodo di combinazione.
Un parametro importante nell'analisi di risposta allo spettro è costituito dallo sforzo di taglio alla base dell'edificio.
Il programma, per ogni modo di vibrare e per ogni direzione di ingresso del sisma, fornisce le forze di taglio lungo gli assi globali del sistema di riferimento e lungo le direzioni di ingresso del terremoto. Queste forze vengono combinate sia attraverso il metodo CQC sia attraverso il metodo SRSS per fornire il massimo valore.
Quando vengono assegnati terremoti contemporanei lungo le tre direzioni ortogonali (1-2-Z), il programma per determinare il tagliante risultante, adopera il metodo della radice quadrata della somma dei quadrati (SRSS) per combinare la risposta sia in termini di CQC che in termini di SRSS.
Una buona progettazione strutturale dovrebbe fare in modo che la struttura resista con adeguato coefficiente di sicurezza per tutti gli angoli di ingresso del terremoto.
La nostra normativa, come altre, prevede tuttavia che l'edificio sia analizzato solo per una coppia di terremoti agenti ortogonalmente tra loro la cui direzione è lasciata alla sensibilità del progettista.
Di solito l'angolo di ingresso del terremoto viene posto lungo una direzione parallela alla tessitura degli elementi preposti ad assorbire le azioni sismiche. Questa non è detto che sia la scelta più opportuna in quanto il progettista dovrebbe tentare con più direzioni di ingresso di valutare quale caso sia il più gravoso.
Se si dispone la struttura con un asse che si ritiene principale lungo una direzione del sistema di riferimento globale (ad esempio X), si può valutare almeno quale sia l'angolo di ingresso del sisma che induce il massimo taglio proprio lungo quella direzione (ad esempio X).
Il programma prevede la possibilità di calcolare l'angolo che si ritiene critico e i valori dei taglianti attinti sotto questa condizione. La valutazione viene ovviamente condotta con riferimento alla combinazione CQC e SRSS.

1.2.4 L'analisi P-delta

Questo tipo di analisi consente di includere gli effetti del carico assiale sul comportamento flessionale di alcuni elementi finiti e questo tipo di non-linearità geometrica è conosciuta come effetto p-delta.
L'opzione è particolarmente utile per considerare gli effetti dei pesi propri e dei sovraccarichi permanenti sulla rigidezza laterale di strutture intelaiate. Essa è anche utile per l'analisi di strutture dotate di cavi come ponti sospesi, tensostrutture ecc.
Il programma ottiene, attraverso successive iterazioni, le equazioni di equilibrio che includono l'effetto p-delta dovuto a una combinazione di casi di carico che sono applicati alla struttura. Queste equazioni poi sono utilizzate per tutti gli altri casi di carico e i risultati possono essere combinati.
Per ogni modello strutturale analizzato dal programma deve essere definita un'unica combinazione di carico che crea l'effetto p-delta. Questa combinazione è una combinazione arbitraria dei carichi applicati alla struttura come carichi nodali, carichi indotti dai pesi propri, dalle variazioni termiche, dalle pressioni ecc.

Quando è attivata l'opzione p-delta, la struttura prima è soggetta ai carichi p-delta e poi è analizzata iterativamente per determinare gli effetti p-delta sulla matrice di rigidezza globale e sulle matrici locali sforzo-spostamento delle travi.
Le matrici di rigidezza risultanti e quelle relative alle relazioni sforzo-spostamento che includono l'effetto p-delta sono utilizzate per tutte le analisi seguenti. Queste includono tutte le condizioni di carico statico, l'analisi dinamica e la risposta allo spettro. Poichè queste matrici sono costanti, queste analisi sono tutte lineari avendo come conseguenza una grande efficienza computazionale e consentendo la sovrapposizione degli effetti.
Affinché i risultati siano ragionevoli, lo sforzo normale che viene a generarsi nelle combinazioni di carico non deve differire di molto da quello determinato attraverso la combinazione p-delta. L'accuratezza del risultato è lasciata al giudizio dell'utente.
Il metodo P-delta adottato dal programma è basato sulle seguenti ipotesi:

- si assume una legge di tipo cubico per gli spostamenti;
- si assume una legge esatta non lineare tra le deformazioni e gli spostamenti;
- il legame tra le tensioni e le deformazioni è di tipo lineare;
- nel funzionale dell'energia potenziale vengono trascurati i termini di ordine superiore al terzo.

In base a queste assunzioni si viene a determinare una matrice di rigidezza che è somma di due termini.
Il primo è la comune matrice di rigidezza che dipende dalle caratteristiche elastiche della trave mentre la seconda è funzione lineare dello sforzo normale agente nella trave stessa e dalla lunghezza della trave e pertanto in letteratura viene definita convenzionalmente matrice di rigidezza geometrica.
L'effetto combinato dell'analisi p-delta, dell'analisi dinamica e della conseguente risposta allo spettro non è di facile predizione.
Negli edifici, specie in quelli alti, l'effetto p-delta risulta essere predominante nei pilastri a causa dei carichi gravitazionali che includono i sovraccarichi permanenti e quelli accidentali; infatti i pilastri diventano più deformabili e per conseguenza la struttura diventa lateralmente più deformabile.
Nelle strutture in zona sismica sottoposte ad azioni sismiche statiche di tipo equivalente, di solito, per sisma in una direzione, ci si limita a considerare le seguenti combinazioni di carico:

1) Permanenti + accidentali (caso statico)
2) permanenti $\pm$ sisma x (massima possibile inversione del momento sotto un appoggio delle travi o in testa e al piede di qualche pilastro)
3) permanenti + accidentali $\pm$ sisma x (massimo momento in corrispondenza degli appoggi delle travi o alla testa e al piede dei pilastri)

Da un punto di vista teorico sarebbe necessario analizzare separatamente con l'effetto P-delta le combinazioni 1), 2) e 3) (in totale cinque) ma da un punto di vista operativo è sufficiente imporre come effetto P-delta solo la combinazione n° 1 in quanto ai fini della deformabilità laterale della struttura in conseguenza dei carichi assiali la scelta è cautelativa per la combinazione 2) ed all'incirca equivalente per la combinazione 3).
Per la combinazione 2) solitamente l'incremento di sforzo normale nei pilastri per effetto del sisma non è superiore al carico indotto dai sovraccarichi accidentali mentre per la combinazione 3) globalmente in alcuni pilastri vi è un aumento di compressione (aumento di deformabilità) ed in altri vi è una diminuzione di sforzo normale (aumento di rigidezza) con conseguente bilanciamento della rigidezza laterale di tutta la struttura.
Il metodo P-delta si presta ottimamente allo studio delle strutture a cavi pretesi.

1.2.5 L'analisi per instabilità globale (buckling)

Attraverso questa opzione è possibile valutare il moltiplicatore dei carichi definiti nella combinazione P-delta che porta al collasso la struttura. Si tratta quindi di risolvere la seguente equazione scritta, per semplicità, per la generica asta:

$$(\mathbf{K}_e + \lambda N \mathbf{K}_g)\mathbf{u}=\mathbf{0}$$

in cui $\mathbf{K}_e$ è la matrice di rigidezza, $\mathbf{K}_g$ è la matrice di rigidezza geometrica, N è lo sforzo normale nell'asta, λ è il fattore che rende la matrice di rigidezza semidefinita positiva.
E' da risolvere, quindi, un classico problema agli autovalori e autovettori del tipo:

$$\mathbf{K}_e\,\mathbf{u}=-\,\lambda N \mathbf{K}_g \mathbf{u}$$

In cui λ è l'autovalore e **u** è il corrispondente autovettore. In pratica l'autovettore **u**, o meglio le sue componenti in termini di spostamento generalizzato rappresentano la forma della deformata sotto il carico di collasso.

1.2.6 L'analisi non lineare in controllo di forze

Il programma consente di analizzare strutture per le quali si sia dichiarata la non linearità del materiale. In questa analisi si possono includere gli effetti P-Delta.
Il programma analizza la struttura sotto una serie di combinazioni di carico definite dall'utente in quanto, come è noto, in campo non lineare non è ammessa la sovrapposizione degli effetti.
Si deve quindi risolvere il seguente sistema di equazioni non lineari:
$\mathbf{r}(\mathbf{u})=\mathbf{f}$
in cui **r** è la risultante degli elementi finiti, **u** è il vettore degli spostamenti e **f** è il vettore dei carichi.
La soluzione del problema non lineare è condotto per via iterativa adottando il metodo della secante (metodo diretto) e quello della tangente (Newton-Raphson).
Il metodo della secante prevede la costruzione della matrice di rigidezza secante $\mathbf{K}_s$ valutata in funzione degli spostamenti determinati nell'iterazione precedente k-1 e nella soluzione del seguente sistema di equazioni:
$\mathbf{K}_s\mathbf{u}_k=\mathbf{f}$
Il metodo di Newton-Raphson prevede la costruzione di una successione di spostamenti incrementali $\Delta\mathbf{u}_k$ tali che:
$\mathbf{u}_{k+1}=\mathbf{u}_k+\Delta\mathbf{u}_k$
e la soluzione del seguente sistema di equazioni:
$\mathbf{K}_t\,\Delta\mathbf{u}_k=\mathbf{f}-\mathbf{r}(\mathbf{u}_k)$
in cui $\mathbf{K}_t$ è la matrice di rigidezza tangente e $\mathbf{r}(\mathbf{u}_k)$ è il vettore della risultante degli elementi finiti valutata sotto il campo di spostamento $\mathbf{u}_k$.
Per entrambi i metodi, le iterazioni si arrestano in corrispondenza della tolleranza assegnata sulla norma residuale degli spostamenti o al raggiungimento del numero massimo di iterazioni. (cfr. Rif. [7])
Alla fine dell'analisi è condotto il bilancio globale delle forze. Questo metodo, anche se non computazionalmente efficiente, garantisce nella maggior parte dei casi la convergenza.

1.2.7 L'analisi non lineare in controllo di spostamento (Path-Following)

Per molti sistemi strutturali è necessario calcolare la relazione non lineare tra i carichi applicati e le corrispondenti deformazioni strutturali.
Tracciando questi percorsi di equilibrio, è possibile identificare fenomeni di collasso e, in generale, comprendere il comportamento delle strutture. Il metodo è regolato dalla soluzione del seguente sistema di equazioni non-lineari:
$\mathbf{r}(\mathbf{u})=\mathbf{f}_d+\lambda\mathbf{f}_L$
in cui **u** è il vettore degli spostamenti nodali, **r** è la risultante degli elementi finiti sotto lo spostamento **u**, $\mathbf{f}_d$ è il vettore dei carichi gravitazionali (in generale carichi permanenti e accidentali), λ è il moltiplicatore di un sistema di carichi assegnati $\mathbf{f}_L$ (distribuzione dei carichi laterali per strutture in zona sismica).
Il metodo prevede l'individuazione di un nodo di controllo strutturale e del relativo grado di libertà associato (in genere spostamento lungo l'asse X o Y del sistema di riferimento globale della struttura). Assegnata quindi l'entità dello spostamento si vuole determinare il moltiplicatore dei carichi laterali sotto lo spostamento assegnato.
Il metodo di risoluzione è tratto dal Rif. [11]

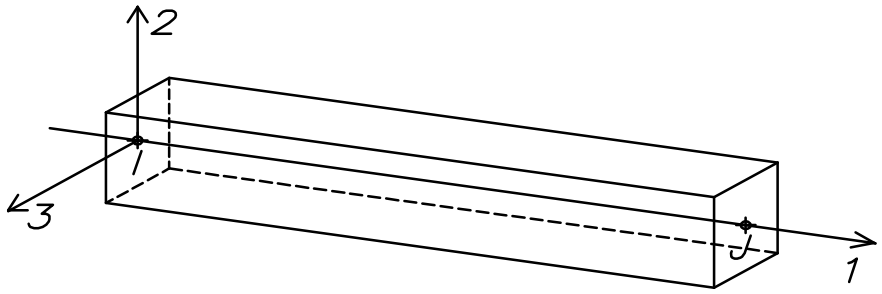
1.3 LA LIBRERIA DEGLI ELEMENTI FINITI

1.3.1 L'elemento finito SPRING

L'elemento finito SPRING è costituito da una molla che connette i nodi strutturali al suolo.
Questo elemento finito viene definito nel sistema di riferimento globale e possiede in esso 6 gradi di libertà: 3 alla traslazione e 3 alla rotazione. Si assegnano 3 rigidezze alla traslazione e 3 rigidezze alla rotazione. Il comportamento è solo del tipo lineare.

1.3.2 L'elemento finito FRAME

L'elemento finito FRAME è costituito da una trave spaziale ad asse rettilineo.
Questo elemento finito possiede due nodi di estremità e nel sistema di riferimento globale come in quello locale possiede per ogni nodo 6 gradi di libertà: 3 alla traslazione e 3 alla rotazione per un totale complessivo di 12 gradi di libertà.



In fase di input devono essere assegnati:

- l'area della sezione trasversale;
- i momenti d'inerzia flessionali calcolati rispetto agli assi locali 3 e 2
- il momento di inerzia torsionale già rapportato al fattore di torsione;
- le aree di taglio per taglio agente nelle direzioni 2 e 3 degli assi di riferimento locale.

Le aree di taglio relative all'asse di riferimento locale, sono definite dal rapporto tra l'area della sezione trasversale e il fattore di taglio. Se si vuole escludere dall'analisi la deformabilità a taglio, alle aree di taglio deve essere attribuito il valore nullo.
Il materiale costituente la trave è assunto essere di tipo isotropo per la definizione del quale è sufficiente assegnare solo il modulo E di elasticità longitudinale e il modulo G di elasticità tangenziale.
Le altre caratteristiche del materiale sono costituite dal peso proprio per unità di lunghezza della trave, dalla massa per unità di lunghezza e dal coefficiente termico di dilatazione lineare.
Nel caso di analisi non-lineare, il programma consente di considerare la trave come composta da una famiglia di fibre parallele al proprio asse. Tale opzione può essere attivata solo definendo il blocco dati NONLIN e il parametro **kpush**.
Nel caso di analisi non-lineare e avendo definito il parametro **kpush**, è possibile assegnare al materiale base una qualsiasi funzione che ne definisca il comportamento. La formulazione della matrice di rigidezza dell'elemento si basa sull' assunzione che la deformata della linea d'asse è descritta da una funzione di tipo cubico e che le sezioni rimangano piane dopo la deformazione (ipotesi di Bernoulli). In tal senso, dalla conoscenza degli spostamenti e rotazioni di estremità della trave, si può risalire, sezione per sezione, alle curvature e al coefficiente di dilatazione assiale a livello del baricentro dell'elemento. Conoscendo quindi le coordinate del generico punto della sezione trasversale rispetto al baricentro della sezione, si conosce pure la dilatazione in quel punto e quindi, dal legame costitutivo, la tensione. L'integrale di volume è condotto per via numerica considerando 5 sezioni trasversali di cui due di estremità e tre intermedie disposte secondo lo schema di Lobatto. Le sezioni trasversali sono integrate adottando, per ogni quadrilatero costituente la sezione, uno schema di integrazione a 9 punti di Gauss. La matrice di rigidezza (tangente o secante) include la presenza dei tronchi rigidi di estremità e prevede la non linearità geometrica (P-delta). Ai fini dell'integrazione numerica, la sezione deve essere divisa in quadrilateri convessi e, ove presenti, devono essere specificate le armature e il materiale con cui è composta la trave. In particolare è possibile definire per ogni quadrilatero e ogni barra di armatura il materiale di cui è composto. Prima dell'assegnazione del blocco dati SECTIONS deve essere introdotto il blocco dati MATERIALS.
Sono ammessi un massimo di 100 quadrilateri e un massimo di 200 barre presenti nella sezione.
Opzionalmente la trave può essere considerata poggiante su suolo di Winkler il cui modulo può essere assunto variabile linearmente dal nodo iniziale a nodo finale della trave.
In campo non-lineare il comportamento del suolo di Winkler può essere assunto di tipo elasto-plastico perfetto.
Si assume che il suolo di Winkler reagisca per traslazioni della linea d'asse della trave lungo le tre direzioni 1,2,3 del sistema di riferimento locale e per deformazioni torsionali.
Si assume che per traslazioni lungo le direzioni 2 e 3 del sistema di riferimento locale il contatto del suolo avvenga sulla faccia di normale negativa degli assi 2 e 3.
Il legame costitutivo del suolo è assunto del tipo elastico perfettamente plastico.

Sulla linea d'asse della trave possono agire una molteplicità di carichi che nel seguito vengono elencati:

- carichi distribuiti uniformi espressi nel sistema di riferimento locale dell'asta;
- carichi distribuiti uniformi espressi nel sistema di riferimento globale;
- carichi trapezoidali espressi nel sistema di riferimento locale dell'asta;
- carichi concentrati espressi nel sistema di riferimento locale dell'asta;
- coppie concentrate espresse nel sistema di riferimento locale dell'asta;
- distribuzioni di temperatura;

La valutazione dei momenti di incastro perfetto indotti dagli schemi di carico tiene conto della presenza all'estremità della trave dei tronchi rigidi.
Nel caso di analisi lineare e per travi non poggianti su suolo di Winkler è possibile svincolare i nodi alle sollecitazioni.
Per ogni estremità della trave, vengono rilasciati nell'ordine:

- lo sforzo normale
- il taglio lungo la direzione 2 dell'asse locale;
- il taglio lungo la direzione 3 dell'asse locale
- il momento torcente
- il momento flettente avente vettore parallelo all'asse 2;
- il momento flettente avente vettore parallelo all'asse 3.

Per questo elemento viene formulata una legge forze-spostamenti nodali non lineare, se richiesto, del tipo:

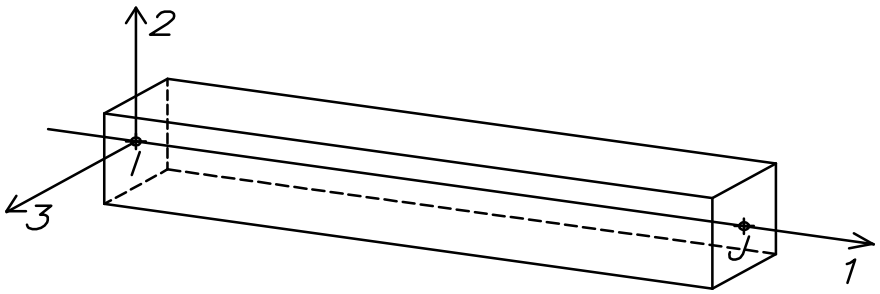
$$\mathbf{F}=(\mathbf{K}+N\mathbf{K}_g)\mathbf{u}$$

in cui:

- **K** è la matrice di rigidezza elastica che tiene anche conto della deformabilità a taglio della trave;
- N è lo sforzo normale medio nella trave in generale non conosciuto a priori
- $\mathbf{K_g}$ è la matrice di rigidezza geometrica della trave formulata nell'ipotesi di indeformabilità a taglio e funzione solo delle caratteristiche geometriche della trave.

1.3.3 L'elemento finito TRUSS

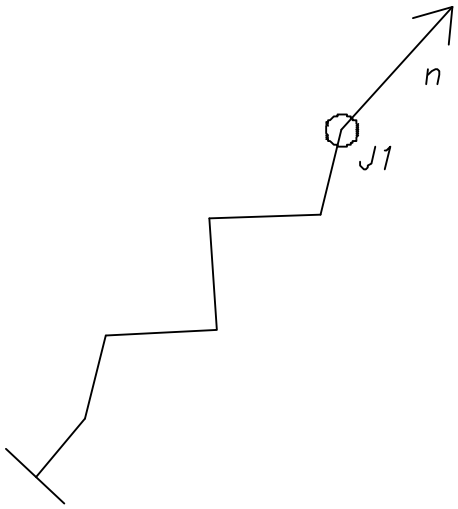
L'elemento finito TRUSS è costituito da una trave spaziale ad asse rettilineo avente alle estremità sconnessioni a momento flettente e torcente; in letteratura questo elemento è più conosciuto come biella.
Essa possiede due nodi di estremità e nel sistema di riferimento globale come in quello locale possiede per ogni nodo 3 gradi di libertà alla traslazione per un totale di 6 gradi di libertà.



Il legame costitutivo a sforzo normale può essere di tipo lineare oppure non-lineare nel senso che è possibile un comportamento di tipo elasto-plastico con fattore di incrudimento.
Opzionalmente può essere presente l'effetto P-delta modellando così strutture a fune.
E' possibile assegnare carichi di presollecitazione. Si tratta di coazioni imposte all'atto della costruzione. Gli sforzi di presollecitazione sono positivi se inducono trazione nella biella quando i nodi sono bloccati.
Come per gli elementi trave è possibile introdurre tronchi rigidi di estremità fattorizzate attraverso un parametro z di riduzione.

1.3.4 L'elemento finito BOUND

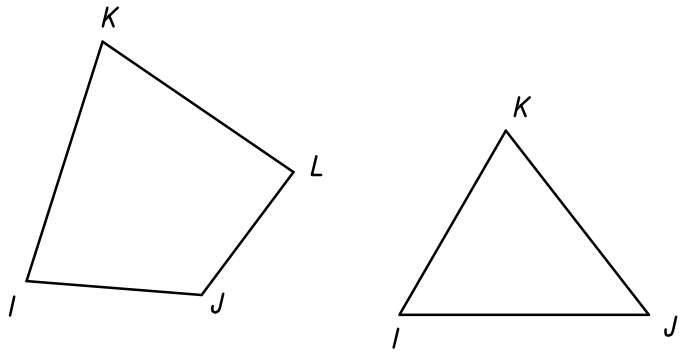
L'elemento finito BOUND è costituito da una molla orientata avente rigidezza estensionale e rotazionale.



Esso possiede un unico nodo costituito da quello di attacco agli altri elementi finiti.
La molla possiede nel sistema di riferimento locale un grado di libertà alla traslazione e un grado di libertà alla rotazione mentre nel sistema di riferimento globale tre gradi di libertà alla traslazione e tre gradi di liberta alla rotazione.
Il legame costitutivo estensionale è del tipo lineare oppure non-lineare nel senso che è possibile assegnare un comportamento di tipo elasto-plastico.
Sono previste forze di presollecitazione

1.3.5 L'elemento finito SHELL

L'elemento finito SHELL è costituito da un elemento spaziale di tipo lastra, piastra o da un accoppiamento di entrambi. Questo elemento finito possiede tre o quattro nodi di vertice.



Nel sistema di riferimento locale l'elemento lastra o membrana possiede 3 gradi di libertà per nodo e precisamente una coppia di spostamenti planari e un grado di libertà alla rotazione intorno ad un asse perpendicolare al piano medio (drilling).
Nel sistema di riferimento locale l'elemento piastra possiede 3 gradi di libertà per nodo e precisamente uno spostamento perpendicolare al piano medio e una coppia di rotazioni ortogonali aventi assi sostegno paralleli al piano medio.
L'elemento lastra-piastra, nel seguito denominato guscio, possiede nel sistema di riferimento locale come in quello globale 6 gradi di libertà per nodo.
Su questo elemento finito viene impiantato un sistema di riferimento locale rispetto al quale vanno definite tutte le proprietà meccaniche dell'elemento.
L'elemento finito guscio quadrangolare connette nodi che in generale non appartengono a un piano. Per l'accuratezza dei risultati è preferibile che i nodi siano moderatamente fuori piano.
Una volta definito il sistema di riferimento locale dell'elemento, i nodi dell'elemento vengono proiettati ortogonalmente sul piano di riferimento; per ripristinare la geometria spaziale dell'elemento, i nodi originari dell'elemento vengono assunti come nodi master e i nodi proiettati vengono assunti come

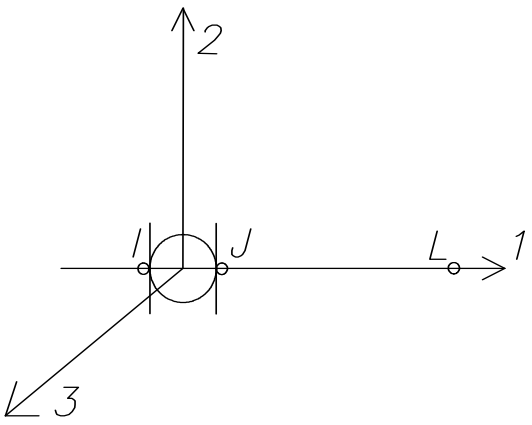
nodi slave. Ad uno a uno i nodi slave vengono connessi ai nodi master attraverso legami di tipo rigido come già descritto nel capitolo relativo ai vincolamenti.
Tali legami rigidi devono essere necessariamente introdotti per l'accuratezza del calcolo. Infatti è possibile verificare, ad esempio, che per travi distorte torsionalmente intorno al proprio asse (ossia a forma di elica) e discretizzate attraverso elementi di tipo guscio, l'errore in termini di spostamento derivante da una analisi senza le connessioni rigide è pari al 95% rispetto all'analisi condotta attraverso le connessioni rigide. Inoltre viene perso il bilancio tra le forze reattive e i carichi applicati ai nodi.
Il materiale costituente l'elemento SHELL può essere del tutto arbitrario. Per i materiali isotropi è sufficiente assegnare il modulo di elasticità longitudinale E e il modulo di Poisson ν.
Sugli elementi SHELL possono agire i seguenti carichi:

- carichi indotti dal peso proprio resi concentrati e trasportati ai nodi;
- carichi di tipo pressorio sul piano dell'elemento variabili bilinearmente per elementi quadrangolari e linearmente per elementi triangolari; questi carichi distribuiti vengono concentrati e riportati ai nodi e carichi di tipo termico.

La distribuzione di pressione e quella termica assegnata all'elemento piastra in fase input degli elementi SHELL è da considerare come la pressione agente sull'elemento all'atto della costruzione
E' prevista l'opzione di piastra poggiante su suolo elastico alla Winkler. L'interazione tra la piastra e il suolo viene ridotta al calcolo della rigidezza di molle equivalenti concentrate nei nodi.
Nel programma è prevista una doppia formulazione della matrice di rigidezza e della matrice sforzo-deformazione denominata formulazione standard e formulazione avanzata.
L'integrazione della matrice di rigidezza viene condotta con riferimento a 9 punti di Gauss. Le sollecitazioni (momenti flettenti e torcenti) vengono calcolate direttamente ai nodi.
Nel caso di indeformabilità a taglio, il calcolo degli sforzi taglianti viene condotto assumendo per gli elementi quadrangolari una legge di variazione dei momenti unitari bilineare mentre per gli elementi triangolari una legge di variazione di tipo lineare. Queste leggi, partendo dai valori nodali, interpolano, il campo di sforzi e dalle equazioni differenziali di equilibrio delle piastre vengono quindi calcolati i tagli ai nodi. Nel caso di piastre deformabili a taglio, i tagli sono calcolati attraverso i legami costitutivi.
La formulazione standard viene attivata attraverso l'istruzione EN=0
La formulazione della matrice di rigidezza per la parte membranale si basa sui Rif. [25], [26] [27] e [28].
Il recupero degli sforzi membranali è condotto usando il metodo dei minimi quadrati proposto in [31].
La formulazione per la parte flessionale si basa sui Rif. [16] e [17] usando il metodo dei vincoli discreti. Il modello è quello di piastra indeformabile a taglio.
La formulazione standard viene attivata attraverso l'istruzione EN=1
La formulazione della matrice di rigidezza per la parte membranale si basa sui Rif. [23] [27] e [34].
Il recupero degli sforzi membranali è condotto usando il metodo dei minimi quadrati proposto in [18].
La formulazione per la parte flessionale si basa sul Rif. [22] usando il metodo dei vincoli discreti. Il modello è quello di piastra deformabile a taglio.
Se richiesta, l'analisi strutturale tiene in conto gli effetti del secondo ordine dovuti a non linearità geometrica. Precisamente, viene formulata la matrice di rigidezza geometrica che dipende dal valore degli sforzi membranali i quali, in via approssimata, vengono assunti costanti e pari alla media degli sforzi valutati ai nodi (Cfr. Rif. [8])

1.3.6 L'elemento finito HINGE

L'elemento finito HINGE è un elemento finito puntuale di connessione tra due nodi; nel seguito genericamente sarà indicato come cerniera.



Esso possiede due nodi di estremità e nel sistema di riferimento globale come in quello locale possiede per ogni nodo 3 gradi di libertà alla traslazione e 3 gradi di libertà alla rotazione per un totale di 12 gradi di libertà.
Per ogni caratteristica della sollecitazione il legame costitutivo è di tipo elasto-plastico perfetto.
Poiché la cerniera è un elemento puntuale, è necessario, per definirne la geometria, l'introduzione di 3 nodi. La prima coppia definisce i nodi di connessione mentre l'ultimo è preposto a definire l'asse della cerniera.
In fase di input devono essere assegnati:

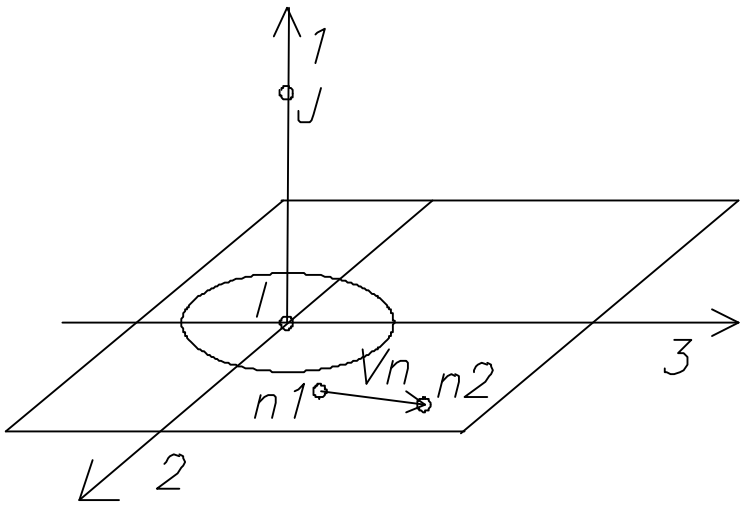
- la rigidezza estensionale nella direzione 1 del sistema di riferimento locale
- la rigidezza a taglio nelle direzioni 2,3 del sistema di riferimento locale
- la rigidezza torsionale per rotazioni intorno all'asse 1 del sistema di riferimento locale
- la rigidezza flessionale intorno agli assi 2,3 del sistema di riferimento locale.

E' da rilevare che imporre nulla una rigidezza in una direzione equivale a sconnettere i nodi in quella direzione.
Opzionalmente, se si esegue un'analisi esclusivamente non-lineare, devono essere assegnati gli sforzi di plasticizzazione; essi sono nel numero di 12 ed a coppie riguardano:

- le resistenze limiti a sforzo normale
- le resistenze limiti a taglio nelle direzioni positive e negative degli assi 2,3
- le resistenze limiti a torsione
- le resistenze limiti a flessione intorno alle direzioni positive e negative degli assi 2,3

1.3.7 L'elemento finito FLAT

L'elemento finito FLAT è un elemento finito del tipo molla assialsimmetrica. Essa si connette ad un nodo strutturale.
Esso possiede nel sistema di riferimento locale due gradi di libertà planari, un grado di libertà assiale ed un grado di libertà alla rotazione intorno all'asse. Nel sistema di riferimento globale possiede 6 gradi di libertà.



Per ogni caratteristica di sforzo il legame costitutivo può essere lineare oppure di tipo elasto-plastico perfetto.
In fase di input devono essere assegnati:

- la rigidezza estensionale nella direzione 1 del sistema di riferimento locale;
- la rigidezza planare intesa come la rigidezza estensionale delle molle poste dalla parte positiva dell'asse locale 2 e dalla parte negativa;
- la rigidezza torsionale per rotazioni intorno all'asse 1 del sistema di riferimento locale.

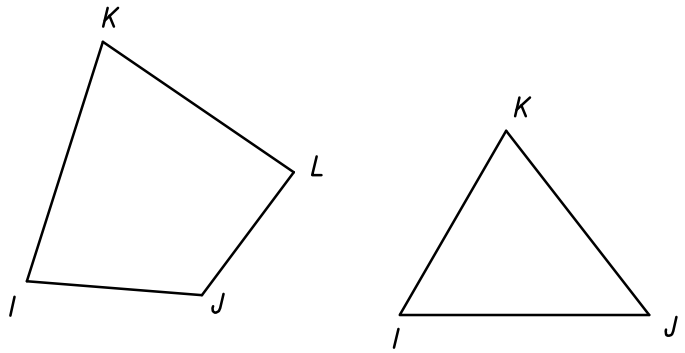
Opzionalmente, se si esegue un'analisi esclusivamente non-lineare, devono essere assegnati gli sforzi di plasticizzazione; essi sono nel numero di 6 e a coppie riguardano:

- le resistenze limiti a sforzo lungo la direzione dell'asse locale 1;
- le resistenze limiti per sforzi agenti nel piano della molla nelle direzioni positive e negative della risultante;
- le resistenze limiti a torsione intorno all'asse locale 1 della cerniera.

Sono previsti sforzi di presollecitazione in riferimento alla parte planare.

1.3.8 L'elemento finito CONCRETE

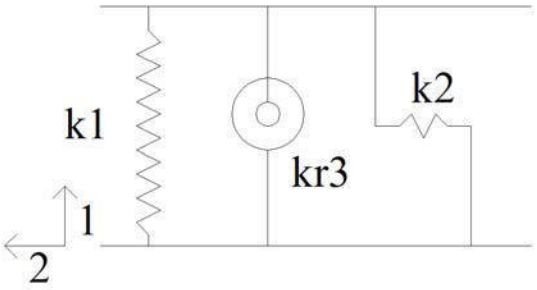
L'elemento finito CONCRETE è costituito da un elemento spaziale di tipo lastra accoppiata a un elemento di tipo piastra. Questo elemento finito possiede tre o quattro nodi di vertice.



Nel sistema di riferimento locale, la parte planare dell'elemento possiede 3 gradi di libertà per nodo e precisamente una coppia di spostamenti planari e una rotazione intorno alla normale al piano medio mentre la parte flessionale possiede tre gradi di libertà per nodo e precisamente uno spostamento ortogonale al piano a una coppia di rotazioni.
L'elemento finito possiede quindi per ogni nodo 6 gradi di libertà. L'elemento finito si presta per studiare problemi nei quali l'accoppiamento lastra piastra è necessario e cioè strutture sottili spaziali tipo volte, murature che presentano variazioni di spessore nella loro altezza, pareti di calcestruzzo armate che sono sollecitate nel loro piano e ortogonalmente ad esso, ecc.
In questo elemento finito è prevista la disposizione di due coppie di famiglie di fibre lungo 2 direzioni assegnate. Precisamente, ogni coppia di famiglie di fibre è ubicata a una distanza dichiarata dal piano medio. La distanza è affetta da segno e si riesce così a simulare pannelli in calcestruzzo armati con reti metalliche disposte simmetricamente o disimmetricamente rispetto al piano medio della parete.
Per questo elemento è prevista l'attivazione del metodo P-delta con lo stesso modello adottato per gli elementi SHELL.

1.3.9 L'elemento finito LINK

L'elemento finito LINK è un elemento di connessione tra due nodi. Esso possiede due nodi di estremità e nel sistema di riferimento globale come in quello locale possiede per ogni nodo 6 gradi di libertà: 3 alla traslazione e 3 alla rotazione per un totale complessivo di 12 gradi di libertà.



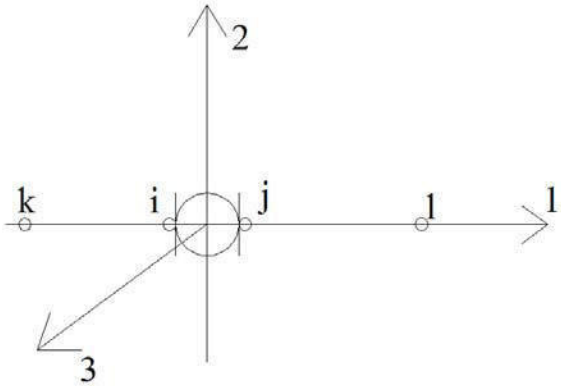
In fase di input possono essere assegnati:

- le rigidezze delle molle costituenti l'elemento;
- il peso per unità di lunghezza dell'elemento;

Le rigidezze delle molle possono anche essere nulle potendosi cosi modellare situazioni particolari di connessione tra i nodi.
Per l'elemento finito LINK è prevista l'analisi al secondo ordine attraverso la procedura P-Delta. In particolare, gli isolatori elastici, per i quali l'elemento LINK è stato propriamente formulato, esibiscono deformazioni di taglio significativamente maggiori di quelle flessionali. In questo senso la matrice di rigidezza geometrica può esse semplificata e ridotta solo nel contributo tagliante.

1.3.10 L'elemento finito FIBER HINGE

L'elemento finito FIBER HINGE è un elemento finito puntuale di connessione tra due nodi; nel seguito genericamente sarà indicato come cerniera.
Esso possiede due nodi di estremità e nel sistema di riferimento globale come in quello locale possiede per ogni nodo 3 gradi di libertà alla traslazione e 3 gradi di libertà alla rotazione per un totale di 12 gradi di libertà.



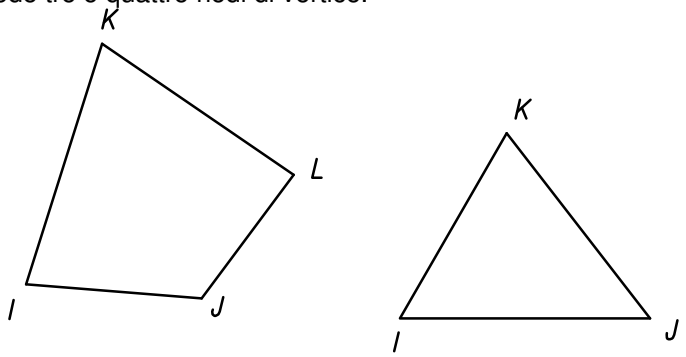
Poiché la cerniera è un elemento puntuale, è necessario, per definirne la geometria, l'introduzione di 3 nodi. La prima coppia definisce i nodi di connessione mentre l'ultimo è preposto a definire l'asse della cerniera.
In fase di input devono essere assegnati:

- l'area della sezione trasversale
- il momento di inerzia polare
- il momenti di inerzia flessionali rispettivamente intorno agli assi 3 e 2 dal sistema di riferimento locale
- il modulo di elasticità longitudinale del materiale
- il modulo di elasticità tangenziale del materiale se non viene assegnato,esso è assunto pari a E/2.60
- le aree di taglio della sessione trasversale della cerniera nelle direzioni 2 e 3 del sistema di riferimento locale della cerniera. Se le aree di taglio non vengono assegnate, il programma le assume pari all'area della sezione trasversale della cerniera.
- infine, nel caso in cui venga eseguita un'analisi non-lineare, il numero della sezione che verrà definito in seguito

Nel caso di analisi non-lineare, il programma consente di considerare la cerniera come composta da una famiglia di fibre parallele al proprio asse. Tale opzione può essere attivata solo definendo il blocco dati NONLIN oppure il blocco dati PATH FOLLOWING.
Nel caso di analisi non-lineare, è possibile assegnare al materiale base una qualsiasi funzione che ne definisca il comportamento.
La formulazione della matrice di rigidezza dell'elemento si basa sull' assunzione che le sezioni rimangano piane dopo la deformazione (ipotesi di Bernoulli). In tal senso, dalla conoscenza degli spostamenti e rotazioni di estremità della cerniera, si può risalire, alle curvature e al coefficiente di dilatazione assiale a livello del baricentro dell'elemento. Conoscendo quindi le coordinate del generico punto della sezione trasversale rispetto al baricentro della sezione, si conosce pure la dilatazione in quel punto e quindi, dal legame costitutivo, la tensione. Le sezioni trasversali sono integrate adottando, per ogni quadrilatero costituente la sezione, uno schema di integrazione a 9 punti di Gauss.
Nel caso di analisi non-lineare, il programma consente di considerare la cerniera come composta da una famiglia di fibre parallele al proprio asse.
Ai fini dell'integrazione numerica, la sezione deve essere divisa in quadrilateri convessi e, ove presenti, devono essere specificate le armature e il materiale con cui è composta la cerniera
In particolare è possibile definire per ogni quadrilatero e ogni barra di armatura il materiale di cui è composto. Prima dell'assegnazione del blocco dati SECTIONS deve essere introdotto il blocco dati MATERIALS.
I vertici del singolo quadrilatero, che deve essere necessariamente convesso, devono essere orientati come in figura e le coordinate dei vertici devono essere fornite nel sistema di riferimento 2-3 con cui era stata orientata la cerniera. Anche le coordinate della posizione delle barre deve essere fornita nel sistema di riferimento 2-3.
Sono ammessi un massimo di 100 quadrilateri e un massimo di 200 barre presenti nella sezione.

1.3.11 l'elemento finito PLANE SHEAR

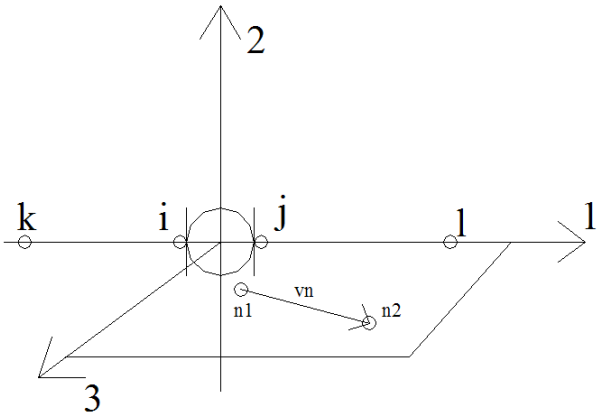
L'elemento finito PLANE SHEAR è costituito da un elemento spaziale di tipo lastra - piastra. Questo elemento finito possiede tre o quattro nodi di vertice.



Nel sistema di riferimento locale e nel comportamento a lastra possiede 3 gradi di libertà per nodo e precisamente una coppia di spostamenti planari e un grado di libertà alla rotazione intorno ad un asse perpendicolare al piano medio.
Nel sistema di riferimento locale e nel comportamento a piastra possiede 3 gradi di libertà per nodo e precisamente uno spostamento perpendicolare al piano medio e una coppia di rotazioni ortogonali aventi assi sostegno paralleli al piano medio.
L'elemento possiede quindi nel sistema di riferimento globale 6 gradi di libertà per nodo.
Su questo elemento finito viene impiantato un sistema di riferimento locale rispetto al quale vanno definite tutte le proprietà meccaniche dell'elemento.
L'elemento finito guscio quadrangolare connette nodi che in generale non appartengono a un piano. Per l'accuratezza dei risultati è preferibile che i nodi siano moderatamente fuori piano.
Questo elemento nasce con lo scopo di modellare pareti in muratura con comportamento non lineare nel piano della muratura ed elastico-lineare per comportamento fuori piano.
In questo elemento finito è prevista la disposizione di due coppie di famiglie di fibre lungo 2 direzioni assegnate. Precisamente, ogni coppia di famiglie di fibre è ubicata a una distanza dichiarata dal piano medio. La distanza è affetta da segno e si riesce così a simulare pareti in muratura rinforzate con armature metalliche o fibre FRP disposte simmetricamente o disimmetricamente rispetto al piano medio della parete.

1.3.12 L'elemento finito ROLLER HINGE

L'elemento finito ROLLER HINGE è concepito per modellare le strutture in muratura alla luce delle disposizioni contenute all'interno delle Norme Tecniche per le Costruzioni. L'elemento finito è costituito da una cerniera plastica a due nodi coincidenti.
Nel sistema di riferimento globale come in quello locale l'elemento finito possiede per ogni nodo 6 gradi di libertà: 3 alla traslazione e 3 alla rotazione per un totale complessivo di 12 gradi di libertà.



L'unica forma possibile della sezione trasversale è quella rettangolare definita da una base e una altezza. In fase di input devono essere assegnati:

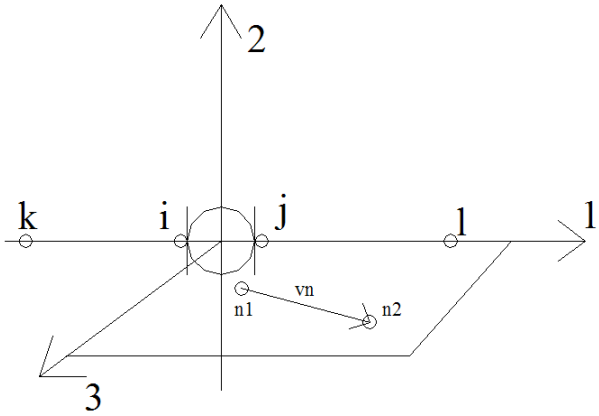
- la base della trave che è disposta parallelamente all'asse 3 del sistema di riferimento locale dell'asta;
- l'altezza della trave che è disposta parallelamente all'asse 2 della trave.

Il programma calcola automaticamente le quantità geometriche associate alla sezione trasversale quali l'area della sezione trasversale, i momenti centrali principali di inerzia, il momento di inerzia polare e le aree di taglio.
Unitamente, devono essere definiti il modulo di elasticità longitudinale o modulo di Young, il modulo di elasticità tangenziale o modulo di taglio, i fattori RIDR1 che rappresentano il fattore di riduzione del momento di inerzia polare, il fattore RIDR2 che rappresenta il fattore di riduzione del momento di inerzia della sezione trasversale fatto rispetto all'asse 2 del sistema di riferimento locale dell'asta il fatore HARD di gardening e la lunghezza della cerniera ELLEH.
Nel caso di analisi non lineare è necessario assegnare ulteriori proprietà del materiale costituente la trave. Si assume che la non-linearità si manifesti per pressoflessione e taglio solo per inflessione della trave nel piano 1-2. In particolare devono essere assegnati i seguenti ulteriori dati:

- la tensione normale ultima di compressione assumendo nulla la resistenza a trazione
- nel comportamento alla Mohr-Coulomb per taglio, la coesione del materiale e la tangente dell'angolo di attrito interno del materiale
- la tensione tangenziale limite del materiale
- gli spostamenti relativi ultimi tra le sezioni di estremità della trave per pressoflessione e per taglio espressi come frazione della lunghezza della trave (es. 0.008 per pressoflessione e 0.004 per taglio)
- infine, per architravi appartenenti a piani rigidi, la resistenza ultima del cordolo.

1.3.13 L'elemento finito REINFORCED HINGE

L'elemento finito REINFORCED HINGE è concepito per modellare le strutture in muratura rinforzate con armature metalliche o fibre FRP alla luce delle disposizioni contenute all'interno delle Norme Tecniche per le Costruzioni. L'elemento finito è costituito da una cerniera plastica a due nodi coincidenti.
Nel sistema di riferimento globale come in quello locale l'elemento finito possiede per ogni nodo 6 gradi di libertà: 3 alla traslazione e 3 alla rotazione per un totale complessivo di 12 gradi di libertà.



L'unica forma possibile della sezione trasversale è quella rettangolare definita da una base e una altezza. In fase di input devono essere assegnati:

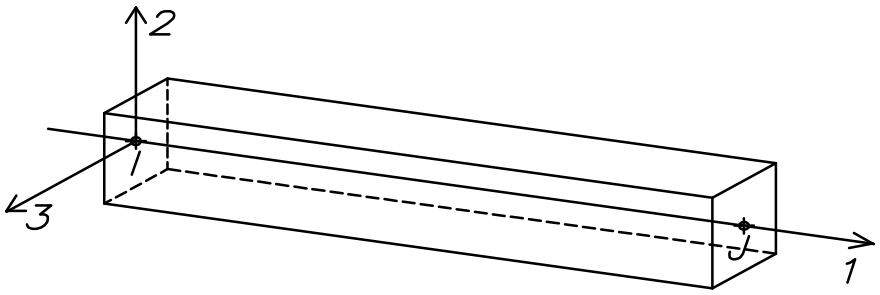
- la base della trave che è disposta parallelamente all'asse 3 del sistema di riferimento locale dell'asta;
- l'altezza della trave che è disposta parallelamente all'asse 2 della trave.

Il programma calcola automaticamente le quantità geometriche associate alla sezione trasversale quali l'area della sezione trasversale, i momenti centrali principali di inerzia, il momento di inerzia polare e le aree di taglio.
Unitamente, devono essere definiti il modulo di elasticità longitudinale o modulo di Young, il modulo di elasticità tangenziale o modulo di taglio, il fattore che rappresentano il fattore di riduzione del momento di inerzia polare, il fattore che rappresenta il fattore di riduzione del momento di inerzia della sezione trasversale fatto rispetto all'asse 2 del sistema di riferimento locale dell'asta.
Nel caso di analisi non lineare è necessario assegnare ulteriori proprietà del materiale costituente la trave. Si assume che la non-linearità si manifesti per pressoflessione e taglio solo per inflessione della trave nel piano 1-2. In particolare devono essere assegnati i seguenti ulteriori dati:

- la tensione normale ultima di compressione assumendo nulla la resistenza a trazione
- nel comportamento alla Mohr-Coulomb per taglio, la coesione del materiale e la tangente dell'angolo di attrito interno del materiale
- il rapporto meccanico r_{sw} che è necessario per calcolare la resistenza a taglio dovuta alla staffatura
- la dilatazione massima dell'acciaio oltre la quale si verifica la rottura
- gli spostamenti relativi ultimi tra le sezioni di estremità della trave per pressoflessione e per taglio espressi come frazione della lunghezza della trave (es. 0.012 per pressoflessione e 0.006 per taglio).

1.3.14 L'elemento finito SBAR

L'elemento finito SBAR è concepito per modellare le strutture in muratura in analisi pushover alla luce delle nuove disposizioni contenute all'interno delle Norme Tecniche per le Costruzioni. L'elemento finito è costituito da una trave spaziale ad asse rettilineo e possiede due nodi, uno per ogni estremità della trave. Nel sistema di riferimento globale come in quello locale l'elemento finito possiede per ogni nodo 6 gradi di libertà: 3 alla traslazione e 3 alla rotazione per un totale complessivo di 12 gradi di libertà. Una successione di queste travi costituisce un macro elemento che modella una parete di muratura tra due livelli successivi di una costruzione.



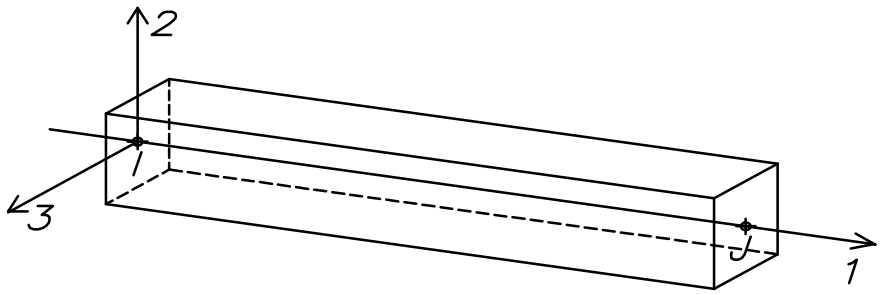
L'unica forma possibile della sezione trasversale è quella rettangolare definita da una base disposta parallelamente all'asse 3 e una altezza disposta parallelamente all'asse 2. Nel caso di analisi non

lineare è necessario assegnare ulteriori proprietà del materiale costituente la trave. Si assume che la non-linearità si manifesti per pressoflessione e taglio solo per inflessione della trave nel piano 1-2. In particolare devono essere assegnati i seguenti ulteriori dati:

- la tensione normale ultima di compressione assumendo nulla la resistenza a trazione;
- nel comportamento alla Mohr-Coulomb per taglio, la coesione del materiale e la tangente dell'angolo di attrito interno del materiale;
- la tensione tangenziale limite del materiale;
- gli spostamenti relativi ultimi tra le sezioni di estremità della trave per pressoflessione e per taglio espressi come frazione della lunghezza della trave (es. 0.008 per pressoflessione e 0.004 per taglio);
- il fattore di hardening;
- la resistenza a trazione della muratura solo in relazione alla verifica a scorrimento con il metodo della integrazione sul piano della sezione;
- infine, per gli architravi, la resistenza ultima del cordolo.

1.3.15 L'elemento finito RBEAM

L'elemento finito RBEAM è concepito per modellare, in analisi pushover, le strutture in muratura armata con acciaio o con FRP, alla luce delle nuove disposizioni contenute all'interno delle Norme Tecniche per le Costruzioni. E' in pratica l'equivalente dell'elemento cerniera REINFORCED HINGE in versione a plasticità diffusa ed impiega funzioni cubiche per la deformata delle linea d'asse.
L'elemento finito è costituito da una trave spaziale ad asse rettilineo e possiede due nodi, uno per ogni estremità della trave.
Nel sistema di riferimento globale come in quello locale l'elemento finito possiede per ogni nodo 6 gradi di libertà: 3 alla traslazione e 3 alla rotazione per un totale complessivo di 12 gradi di libertà. Una successione di queste travi costituisce un macro elemento che modella una parete di muratura tra due livelli successivi di una costruzione.



L'unica forma possibile della sezione trasversale è quella rettangolare definita da una base disposta parallelamente all'asse 3 e una altezza disposta parallelamente all'asse 2. Nel caso di analisi non lineare è necessario assegnare ulteriori proprietà del materiale costituente la trave.
Il programma calcola automaticamente le quantità geometriche associate alla sezione trasversale quali l'area della sezione trasversale, i momenti centrali principali di inerzia, il momento di inerzia polare e le aree di taglio.
Unitamente, devono essere definiti il modulo di elasticità longitudinale o modulo di Young, il modulo di elasticità tangenziale o modulo di taglio, i fattori RIDR1 che rappresentano il fattore di riduzione del momento di inerzia polare, il fattore RIDR2 che rappresenta il fattore di riduzione del momento di inerzia della sezione trasversale fatto rispetto all'asse 2 del sistema di riferimento locale dell'asta
In analisi pushover la discretizzazione a fibre della sezione avviene analogamente a quanto previsto per l'elemento FRAME mediante il valore NSEC della sezione.

Si assume che la non-linearità si manifesti per pressoflessione e taglio solo per inflessione della trave nel piano 1-2. In particolare devono essere assegnati i seguenti ulteriori dati:

- la tensione normale ultima di compressione assumendo nulla la resistenza a trazione;
- nel comportamento alla Mohr-Coulomb per taglio, la coesione del materiale e la tangente dell'angolo di attrito interno del materiale;
- il rapporto meccanico rsw che è necessario per calcolare la resistenza a taglio dovuta alla staffatura;
- la dilatazione massima dell'acciaio oltre la quale si verifica la rottura;

- gli spostamenti relativi ultimi tra le sezioni di estremità della trave per pressoflessione e per taglio espressi come frazione della lunghezza della trave (es. 0.012 per pressoflessione e 0.006 per taglio).

1.4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI AL SOLUTORE

1. **Gurtin, M. E.,**
   An Introduction to Continuum Mechanics, (1981), Academic Press
2. **Gurtin, M. E.,**
   The Linear Theory of Elasticity, Handbuck der Physik, vol. VI a/2, (1972), Springer Verlag.
3. **Marsden E. J. and Hughes, T. J. R.,**
   Mathematical foundations of elasticity, Dover Publications, Inc., (1994)
4. **Ogden, R. W.,**
   Non-Linear Elastic Deformation, Dover Publications, Inc., (1997)
5. **Simo, J. C. and Hughes, T. J. R.,**
   Computational Inelasticity, Interdisciplinary Applied Mathematics, Springer Verlag, (1998).
6. **Rao, S.S.,**
   The Finite element Method in Engineering, Pergamon Press, (1989).
7. **Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L.,**
   The Finite Element Method, McGraw-Hill, (1989).
8. **Cook, D. R., Malkus D. S. and Plesha M. E.,**
   Concepts and Applications of Finite Element Analysis, John Wiley & Sons, (1989).
9. **Bathe K. J.,**
   Finite Element Procedures, Prentice-Hall Inc., (1996).
10. **Hughes, T. J. R.,**
    The Finite Element Method, Dover Publications, Inc. Mineola New York (2000).
11. **Crisfield M.A.,**
    Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures, Wiley&Sons (1997).
12. **Jennings, A.**
    Matrix Computation for Engineers an Scientists, John Wiley & Sons, 1978.
13. **Clough, R. W. and Penzien, J.,**
    Dynamics of Structures, McGraw Hill, (1993).
14. **G. Del Piero**
    Constitutive equations and compatibility of the external loads for linear elastic masonry-like materials, Meccanica, vol. 24, 1989
15. **Simo J.C. and Vu-Quoc L.,**
    A Three-Dimensional Finite-Strain Rod Model. Part II: Computational Aspects, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, (1986).
16. **Batoz, J. L., Bathe, K. J. and Ho, L. W.**
    A Study of Three-Node Triangular Plate Bending Elements, International Journal for Numerical Methods in Engineering, (1980).
17. **Batoz, J. L. and Ben Tahar, M.**
    Evaluation of a New Quadrilateral Thin Plate Bending Element, International Journal for Numerical Methods in Engineering, (1982).

18. Shi G. and Voyiadjis G.Z.,
Efficient and Accurate Four-node Quadrilateral C^0 Plate Bending Element Based on Assumed Strain Method, International Journal for Numerical Methods in Engineering, (1991).

19. Shi G. and Tong P.,
Assumed Stress C^0 Quadrilateral/Triangular Plate Element by Interrelated Edge Displacement, International Journal for Numerical Methods in Engineering, (1996).

20. Wanji C. and Cheung Y.K.,
Refined 9-Dof Triangular Mindlin Plate Elements, International Journal for Numerical Methods in Engineering, (2001).

21. Wanji C. and Cheung Y.K.,
Refined Quadrilateral Element Based on Mindlin/Reissner Plate Theory, International Journal for Numerical Methods in Engineering, (2000).

22. Soh A.K., Cen S., Long Y.Q. and Long Z.F.,
A New Twelve DOF Quadrilateral element for Analysis of Thick and Thin Plates, European Journal Mechanics A/Solids, (2000).

23. Simo, J. C. and Rifai, M. S.
A Class of Mixed Assumed Strain Methods and the Method of Incompatible Modes, International Journal for Numerical Methods in Engineering, (1990).

24. Ibrahimbegovic, A. and Wilson E. L.
A Modified Method of Incompatible Modes, Communications in Applied Numerical Methods (1991).

25. Allman, D. J.
A Compatible Triangular Element Including Vertex Rotations for Plane Elasticity Analysis, International Journal of Computer & Structures, (1984)

26. Allman, D. J.
A Quadrilateral Finite Element Including Vertex Rotations for Plane Elasticity Analysis, International Journal for Numerical Methods in Engineering, (1988).

27. Hughes, T. J. R. and Brezzi, F.
On Drilling Degrees of Freedom, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, (1989).

28.Ibrahimbegovic, A., Taylor, R. L. and Wilson E. L.
A Robust Quadrilateral Membrane Finite Element with Drilling Degrees of Freedom, International Journal for Numerical Methods in Engineering, (1990).

29. Ibrahimbegovic, A. and Wilson E. L.
A Unified Formulation for Triangular and Quadrilateral Flat Shell Finite Elements Whith Six Nodal Degrees of Freedom, Communications in Applied Numerical Methods (1991).

30. Ibrahimbegovic, A. and Wilson E. L.
Thick Shell and Solid Finite Elements with Indipendent Rotation Field, International Journal for Numerical Methods in Engineering, (1991).

31. Hinton, E. and Campbell, J. S.
Local and Global Smoothing of Discontinuous Finite Element Functions Using a Least Squares Method, International Journal for Numerical Methods in Engineering, (1974).

32. Pimpinelli G.,
An Assumed strain Quadrilateral Element With Drilling Degrees of Freedom, Finite Elements in Analysis and Design, (2004).

33. Taylor, R. L., Simo, J. C., Zienkiewicz, O. C. and Chan, A. C. H.
The Patch Test - A Condition for Assessing FEM Convergenze, International Journal for Numerical Methods in Engineering, (1986).

34. Pimpinelli, G.
On an improved numerical method to solve the equilibrium problems of solids with bounded tensile strength that are subjected to thermal strain, Structural Engineering and Mechanics, (2003)

35. Lucchesi M., Padovani C. and Pagni A.
A Numerical Method for Solving Equilibrium Problems of Masonry-like Materials, Meccanica, vol. 29, (1994).

36. Lucchesi M., Padovani C. and Pasquinelli G.
On the Numerical Solution of Equilibrium Problems of Elastic Solids with Bounded Tensile Strength, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, (1995).

37. Lucchesi M., Padovani C. and Zani N.
Masonry-like Solids with Bounded Compressive Strength, Int. J. Solids Structures, vol. 33, (1996).

38. Padovani C.
On a Class of non-linear elastic Materials, Int. J. Solids Structures, vol. 37, (2000).

39. Padovani C., Pasquinelli G. and Zani n.
A Numerical Method for Solving Equilibrium Problems of no-tension Solids Subjected to Thermal Loads, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, (2000).

40. Lucchesi M., Padovani C. and Pasquinelli G.
Thermodynamics of no-tension Materials, Int. J. Solids Structures, vol. 37, (2000).

41. Alfano, G. L., Rosati, L. and Valoroso, N.
A Numerical strategy for Finite Element Analysis of No-tension Materials, International Journal for Numerical Methods in Engineering, (2000).

42. Kelly J. M.
Earthquake-Resistant Design with Rubber, (1997), Springer Verlag

43. Gent A.N., Lindley P.B.,
44.*The compression of Bonded Rubber Blocks*,(1959), Proceedings Institution of Mechanical Engineers

45. Gent A.N., Meinecke E.A.,
46.Compression, Bending and shear of Bonded Rubber Blocks, (1970), Polimer Engineering and Science.

47. Cuthill, E. and McKee, J.
Reducing the Bandwidth of Sparse Symmetric Matrices, Proc. ACM Nat. Conf. New York (1969).

48. Wilson, E. L. and Hoit, M. I.
An Equation Numbering Algorithm Based on a Minimum Front Criteria, International Journal of Computer & Structures, (1983).

49. Mondkar, D. P. and Powell G. H.
Towards optimal in-core Equation Solving, International Journal of Computer & Structures, (1974).

50. Mondkar, D. P. and Powell G. H.,
Large Capacity Equation Solver for Structural Analysis, International Journal of Computer & Structures, (1974).

51. Duff, I. S.,
MA57 – A new code for the resolution of sparse symmetric definite and indefinite systems, RAL-TR-2002-024

52. Amestoy P.R., Davis T.A. and Duff, I. S.,
An approximate minimum degree ordering algorithm. SIAM Journal Matrix Analysis Application, (1996).

53. Duff, I. S. and Reid J.K.,
The multifrontal solution of indefinite sparse symmetric linear systems. ACM Trans. Math. Softw., (1983).

54. Wilson, E. L. and Itoh, T.,
An Eigensolution Strategy for Large Systems, International Journal of Computer & Structures (1983).

55. Bathe, K. J. and Wilson E. L.,
Solution Methods for Eigenvalue Problems in Structural Mechanics, International Journal for Numerical Methods in Engineering, (1973).

56. Bathe, K. J. and Ramaswamy, S.,
An Accelerated Subspace Iteration Method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, (1980).

57. Wilson, E. L., Yuan, M. W. and Dickens, J. M.
Dynamic Analysis by Direct Superposizion of Ritz Vectors, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, (1982).

58. Joo K: G: and Wilson, E. L.
Ritz Vectors and Generation Criteria for Mode Superposition Analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, (1989).

59. Wilson, E. L., Der Kiureghian, A., and Bayo, E. P.
A Replacement for the SRSS Method in Seismic Analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, (1981).

60. Ibrahimbegovic, A. and Wilson E. L.
Simple Numerical Algorithms for the Mode Superposition Analysis of Linear Structural Systems with Non-Proportional Damping, International Journal of Computer & Structures (1989).

61. Clough, R. W. and Wilson, E. L.,
Dynamical Analysis of Large Structural Systems with Local Nonlinearities, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, (1979).

2 Campi di impiego

Sismicad è rivolto alla risoluzione di problematiche di progettazione strutturale. Esso consente la progettazione di manufatti in generale sia ad uso abitativo che industriale in muratura, cemento armato, acciaio e legno. Esso consente inoltre la verifica di edifici esistenti.
La progettazione può essere svolta con riferimento alle seguenti normative:

L. 05.11.1971, n. 1086
Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica

D.M. LL.PP. del 14.02.1992
Norme Tecniche per l'esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche.

D.M. del 09.01.1996
Norme Tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche.

D.M. del 16.01.1996
Norme Tecniche relative ai "Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi".

D.M. del 16.01.1996
Norme Tecniche per le costruzioni in zone sismiche.

Circolare Ministeriale del 04.07.1996 n. 156AA.GG./STC.
Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche relative ai criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi" di cui al Decreto Ministeriale 16.01.1996.

L. 02.02.1974, n. 64
Provvedimenti per costruzioni con particolari prescrizioni per zone sismiche.

D.M. LL. PP. E INT. 19.06.1984
Norme Tecniche per le costruzioni in zone sismiche.

D.M. LL. PP. 11.03.1988
Norme Tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilita' dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.

Circolare Ministeriale del 24.07.1988, n. 30483/STC.

Legge 2Febbraio 1974 n. 64, art. 1 - D.M. 11 Marzo 1988.
Norme Tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilita' dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.

Circolare Ministeriale del 15.10.1996 N°252.
Istruzioni per l'applicazione delle "Norme Tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche" di cui al D.M.09.01.1996

Circolare Ministeriale del 10.04.1997 N°65/AA.GG.
Istruzioni per l'applicazione delle "Norme Tecniche per le costruzioni in zone sismiche"
di cui al D.M.16.01.1996

Ordinanze della Presidenza del Consiglio dei ministri n.3431 ed allegati

DM.LL.PP 2-7-81
Normativa per le riparazioni ed il rafforzamento degli edifici danneggiati dal sisma nelle regioni Basilicata, Campania e Puglia.

Circolare M.LL.PP. n. 21745 del 30.7.81
Istruzioni relative alla normativa tecnica per la riparazione ed il rafforzamento degli edifici in muratura danneggiati dal sisma.

DM.LL.PP 20-11-87
Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento.

CNR-UNI 10011

CNR-UNI 10022

Eurocodici 2,3,5

D.M.Infrastrutture 14 gennaio 2008
Norme tecniche per le costruzioni

Circolare 02 febbraio 2009 n.617/C.S.LL.

D.M.Infrastrutture 17 gennaio 2018
Norme tecniche per le costruzioni

3 Bibliografia

Prontuario Le Monnier
Giovanni Falchi Delitala, Calcolo delle sezioni in cemento armato, Ed Hoepli
L.Petrini, R.Pinho, G.M.Calvi, Criteri di progettazione antisismica degli edifici, Iuss Press
Odone Belluzzi, Scienza delle costruzioni vol.3, Zanichelli
Scotta, Vitaliani, Le pareti in calcestruzzo gettate entro blocco cassero in legno mineralizzato, Edizioni Libreria Progetto Padova

Licenza d'uso software Concrete

Il presente documento attesta, unitamente alla fattura, la proprietà della licenza d'uso dei software prodotti da Concrete s.r.l.

Titolare

Masciavè Ing. M. Mangialardi Geol. M.

Studio Tecnico Associato

Prodotti

SismiCAD Classic
Integrazione Acciaio
Integrazione Legno
ManDoc
WallCAD
Integrazione BIM

Numero di chiave hardware associata ai prodotti

4279523

Le condizioni di licenza sono riportate nell'installazione di ogni singolo software