

## Premessa

Viviamo in un mondo in cui tutto sembra cambiare con rapidità incredibile e la progettazione strutturale subisce anch'essa gli effetti di tale evoluzione. Nuove normative sostituiscono quelle a cui siamo abituati, proponendo impostazioni che ci lasciano disorientati ed imponendo calcoli sempre più laboriosi. Nuovi simboli e nuove unità di misura accrescono la confusione (il taglio ora è  $V$ , non  $T$ , ed il Newton sostituisce il vecchio chilogrammo). Certo la sostanza rimane la stessa, ma che fatica aggiornarsi! E che incubo passare da un libro a un altro e trovare approcci e simboli differenti e quasi mai coincidenti con quelli della normativa! “Fortunatamente” i programmi per computer vengono in nostro soccorso, ma diventa sempre più forte il rischio di delegare tutto a loro, tanto da non capire più cosa si sta facendo. E i venditori di software fanno bene il loro mestiere e rincarano la dose, cercando di convincerci che senza programmi non si può più fare niente.

In realtà, è vero che i programmi di calcolo sono uno strumento indispensabile, ma è anche vero che essi sono – e devono restare – solo uno strumento. E le novità, che tanto ci spaventano, sembrano così complicate solo perché non le conosciamo a fondo. Il metodo degli stati limite e le verifiche allo stato limite ultimo presentano alcune differenze concettuali rispetto al metodo delle tensioni ammissibili, ma dal punto di vista operativo continuano a seguire la stessa impostazione del passato e sono addirittura più semplici nelle applicazioni. È anche vero che i libri sull'argomento spesso appaiono complicati, pieni di simboli adimensionalizzati rappresentati con lettere greche e di formule lunghissime; ma spesso chi scrive un libro scientifico tende, anche inconscia-

mente, a mostrare quanto è bravo e quanto ha approfondito l'argomento, fino ai minimi dettagli. Il tempo fa da filtro e anni di pratica professionale consentono di accantonare tutto quello che non serve e lasciare il nucleo fondamentale, semplice e concreto. Questo è avvenuto per il metodo delle tensioni ammissibili, che sta per compiere cento anni, ed inizia ora ad avvenire anche per il metodo degli stati limite, che è ancora un giovincello.

Quando, nel marzo 1995, ho iniziato a tenere il corso di Tecnica delle costruzioni ho passato in rassegna i testi "classici" e quelli più recenti, ma alla fine ho scelto una mia impostazione, che mirava soprattutto a evidenziare l'unitarietà dei diversi metodi di verifica (tensioni ammissibili e stato limite ultimo). Non ho pretese di originalità (tanti colleghi in altre università operano come me e meglio di me) ma sono rimasto soddisfatto della risposta degli studenti e questo mi conforta nell'idea che la mia sia una delle possibili vie da seguire per l'aggiornamento della didattica in questo settore.

Fin dal primo anno ho sentito la necessità di lasciare agli studenti qualche traccia scritta di quello che andavo insegnando, sotto forma di schemi sintetici degli argomenti principali. Pian piano sono andato organizzando il materiale didattico, fino a dargli la veste che qui si può vedere. Sono stati anni intensi, di grande e a volte anche travagliata maturazione. Ricordo ancora il giorno in cui durante una lezione, nel bel mezzo di una dimostrazione sull'armatura a taglio, mi sono reso conto che lo sviluppo logico della dimostrazione avrebbe portato a conclusioni ben diverse da quelle che davvo per scontate. "The show must go on" e in quell'occasione da bravo attore ho portato a termine la lezione sorvolando un po' ("con semplici passaggi si arriva all'espressione finale..."), per poi riprendere il discorso una settimana dopo per esporre, con aria umile e pentita, il frutto di numerose ore di laceranti riflessioni ed autocritiche. Ricordo i momenti entusiasmanti, ed i fine settimana frenetici, di riflessione sulla pressoflessione, che con lo stimolo e l'aiuto di Marco Muratore hanno portato a formule di verifica e progetto di una semplicità sconcertante. E chi ha avuto per le mani vecchie versioni, provvisorie, di questo testo si accorgerà di quante pagine sulla flessione semplice sono state buttate via, quando mi sono reso conto di essere caduto anch'io

nella trappola della pulizia formale, che porta a formule piene di lettere greche che rappresentano quantità adimensionalizzate, estremamente sintetiche... ma quasi del tutto incomprensibili per il comune lettore.

Certo, un lavoro come questo non può mai dirsi pienamente compiuto. Rileggo le pagine che ho scritto e mi verrebbe voglia di modificarle ancora, di tagliare qualcosa qui o di aggiungere qualcos'altro lì. Sono però contento di questa mia insoddisfazione, perché finché si è vivi c'è tempo per migliorare, e finché c'è voglia di migliorare si è veramente vivi. Prima o poi ci rimetterò mano, ma è arrivato il momento di congedarsi da queste bozze e pensare ad altro.

Per concludere, vorrei ringraziare tantissime persone. Prima di tutto, i miei studenti, che tanto mi hanno insegnato e mi hanno fatto riflettere con le loro domande. Li ringrazio per aver colto il mio entusiasmo verso questa materia e per essersi a loro volta appassionati e, spero, anche un po' divertiti nello studiarla. Li ringrazio per il bel rapporto umano che si è creato tra noi, per la stima reciproca e l'amicizia che va al di là del rapporto docente-studente. Molti di loro hanno contribuito indirettamente a questo libro, mettendo a disposizione i loro appunti, tratti dalle mie lezioni ma conditi di giuste riflessioni o stimolanti dubbi; o rileggendo e commentando le pagine di testo che andavo via via scrivendo. Tanti non hanno contrassegnato col loro nome le pagine che mi hanno messo a disposizione, e mi spiace non poterli citare. Ma ricordo e ringrazio espressamente Calogero Colina, Claudio Cravotta, Carla Bongiorno, Andrea Garofalo e Michele Privitera. Nessuno di loro ha avuto un voto altissimo in Tecnica delle costruzioni, ma la stima e l'apprezzamento che ho delle persone sono legati alle loro qualità umane, alla volontà di impegnarsi ed alle capacità complessive, ben più che all'esito di un esame.

Sono poi grato a tutti coloro che mi hanno dato una mano nel corso: Nino D'Aveni, Pier Paolo Rossi, Fabio Neri, Bruno Biondi, Edoardo Marino, Sebastiano Costa, Maria Garofalo, Giuliana Mangano, Marco Muratore, Salvo Pantano, Melina Bosco, Anna Lombardo si sono susseguiti nel tempo; il corso di Tecnica delle costruzioni è frutto anche delle loro idee e del loro impegno. E cito a parte Antonio Perretti, che ha in comune con me una smisurata passione per la didattica e che su vari argomenti costituisce un mio punto di riferimento; non per niente ho affidato

a lui il compito di scrivere un intero capitolo del testo; ed è un peccato che ancora nessuna università abbia voluto utilizzare stabilmente le sue grandi capacità.

Non può mancare un pensiero affettuoso agli amici dell'università di Napoli, in particolare a Bruno Calderoni, Zila Rinaldi (ora a Roma) e Pietro Lenza, che si sono sentiti un po' abbandonati da quando sto a Catania ma mi hanno sempre sostenuto e aiutato nella ricerca scientifica; le discussioni avute con loro sono state spesso determinanti per chiarirmi le idee su vari argomenti (anche se non sono ancora riuscito a convincere Bruno con le mie riflessioni sul taglio). Un "grazie" di cuore anche a Carlo Majorano, grande amico prima ancora che grande professionista, che ha discusso a lungo al telefono con me del taglio e si è "divorato" le pagine della prima edizione del relativo capitolo, fornendomi utili suggerimenti e spunti.

In ultimo, il ringraziamento più grande a mia moglie Lia, anche per la pazienza con la quale sopporta il fatto che io lavori a 900 chilometri da casa e che dedichi tanto tempo al lavoro anche nei fine settimana.

Vorrei infine dedicare questo mio lavoro ad Aurelio Giliberti. La sua scomparsa ha lasciato un vuoto nel cuore di tutti coloro che sono stati suoi studenti. Indipendentemente dai riconoscimenti accademici, la sensibilità strutturale, la concretezza, la chiarezza didattica e le grandi doti umane che l'hanno contraddistinto hanno plasmato generazioni di ingegneri.

# Capitolo 1

## INTRODUZIONE

### 1. Dall'arte del costruire alla Scienza e Tecnica delle costruzioni

L'uomo ha realizzato costruzioni fin da tempi antichissimi. Alcune opere hanno resistito per migliaia di anni e destano tuttora la nostra ammirazione. Si pensi ad esempio alle piramidi di Giza e ai templi di Luxor in Egitto, ai templi greci, alle costruzioni civili e religiose romane; o, andando a tempi relativamente più recenti, alle cattedrali gotiche con le loro mirabili forme slanciate. Nessuna di queste costruzioni è frutto di un "calcolo", nel senso che diamo noi oggi a tale parola. Le dimensioni degli elementi ed i particolari costruttivi erano infatti dettati da regole empiriche che si erano andate via via definendo nel tempo. Queste erano basate sull'esame del comportamento delle strutture realizzate e dei problemi da esse presentati. Ogni dissesto dava origine a modifiche che quando mostravano di essere efficaci venivano incorporate nelle regole costruttive. Si è trattato in un certo senso di una continua sperimentazione dal vero sulle cui basi è stata fondata l'arte del costruire. Il ricordo di tale modo di procedere permane anche oggi, tanto che una costruzione ben realizzata viene detta "fatta a regola d'arte".

I primi tentativi di tradurre tali regole in formulazioni matematiche risalgono al 17° e 18° secolo. Fu infatti nel 1638 che Galileo propose le prime formulazioni teoriche della resistenza a rottura di travi inflesse mentre oltre un secolo dopo, nel 1773, Coulomb cercò di definire quantitativamente la resistenza a rottura di archi in muratura. Il principio di

elasticità lineare, destinato ad essere uno dei pilastri della Scienza delle costruzioni, fu invece formulato da Hooke nel 1678.

Il 19° secolo vide giungere a piena maturità la teoria dell'elasticità. Nel 1826 Navier propose un metodo organico per il dimensionamento di strutture, basato sull'ipotesi di comportamento linearmente elastico dei materiali costitutivi, e intorno al 1855 De Saint Venant formulò il suo noto principio e fornì la soluzione del problema della relazione tra caratteristiche della sollecitazione e stato deformativo e tensionale in travi prismatiche. Verso la fine del secolo furono infine sviluppati i criteri di resistenza basati sulla crisi puntuale del materiale (Rankine, 1875; Mohr, 1882; Tresca, 1871).

Parallelamente venne affrontato il problema della valutazione delle caratteristiche della sollecitazione nelle strutture iperstatiche. I contributi più rilevanti in questo secolo furono quelli rivolti alla risoluzione di schemi di travi continue col metodo delle forze (Clapeyron, 1852; Mohr, 1860; Bresse, 1865).

All'inizio del 20° secolo vennero redatte le prime normative tecniche (Francia, 1906; Italia, 1907) che seguendo l'impostazione di Navier imponevano un'analisi lineare elastica. Grazie alla linearità di comportamento, il margine di sicurezza tra carico di rottura e carico di esercizio può essere garantito lavorando in termini di tensioni; ciò portò a denominare tale modo di procedere "metodo delle tensioni ammissibili". Successivi sviluppi portarono al *limit design* o calcolo a rottura, finalizzato alla valutazione della capacità portante ultima della sezione (anni '40 e '50), all'approccio probabilistico, che tiene conto della variabilità dei carichi e delle caratteristiche dei materiali, e al metodo semiprobabilistico (anni '50 e '60).

Per quanto riguarda la risoluzione di schemi iperstatici, nella prima metà del secolo ebbero ampio sviluppo i metodi iterativi, che consentivano l'analisi manuale di telai (Cross, 1930; Grinter, 1937). Il progredire della tecnologia diede infine impulso alla metodologia matriciale, che sfrutta in maniera ottimale le potenzialità offerte dai calcolatori elettronici (anni '60 e '70).

Il progresso teorico, brevemente delineato nelle pagine precedenti, ha portato ad una chiara indicazione del modo con cui il progettista deve

affrontare l'esame di una struttura. Il primo problema è quello della definizione di un *modello* per lo schema geometrico, per il materiale e per i carichi. L'oggetto reale è sempre abbastanza complesso e nel tradurlo in modello matematico è inevitabile fare una serie di semplificazioni; spesso le incertezze sono tali da rendere necessario l'uso di più modelli limitate, per individuare una *fascia* entro cui sia compreso il reale comportamento della struttura. Una volta definito lo schema geometrico e di carico occorre passare alla sua risoluzione, cioè alla determinazione di deformazioni e tensioni (o di spostamenti e caratteristiche di sollecitazioni); questa fase viene usualmente denominata *analisi strutturale*, anche se questo termine è a volte utilizzato con una accezione più ampia. Infine occorre effettuare una *verifica*, per controllare che la struttura sia in grado di sopportare le azioni che la solleciteranno durante la sua vita. Le tre fasi qui indicate sono riferite allo studio di una struttura esistente o comunque già idealmente definita dal progettista. Nel caso di costruzioni ancora da realizzare, un compito preliminare è quello del *dimensionamento* degli elementi strutturali; questo viene spesso fatto mediante un calcolo che segue le linee generali innanzi indicate, ma con modelli estremamente semplificati, anche se nelle situazioni più comuni è l'esperienza stessa del progettista, eventualmente tradotta in formule semplici e di uso immediato, a suggerire le dimensioni da adottare.

In tempi ormai lontani tutte le problematiche e le conoscenze teoriche citate erano racchiuse in un'unica disciplina, la Scienza delle costruzioni. Con tale nome è intitolata l'opera di Belluzzi<sup>1</sup>, che nonostante gli anni trascorsi (la sua prima edizione risale al 1941) costituisce tuttora, secondo me, un valido riferimento per numerosissimi problemi di Scienza e Tecnica delle costruzioni. Il progressivo aumento delle conoscenze ha reso necessario la suddivisione in due filoni, per l'appunto Scienza e Tecnica delle costruzioni, che costituiscono nell'attuale ordinamento universitario italiano due raggruppamenti disciplinari, capeggiati dalle omonime discipline, che includono materie quali Calcolo anelastico e a rottura, Teoria delle strutture e Dinamica (gruppo Scienza) o Costruzioni di ponti, Progetto di strutture e Ingegneria sismica (gruppo Tecnica).

---

<sup>1</sup> O. Belluzzi, Scienza delle costruzioni, 4 volumi, Zanichelli, Bologna.

Proprio per la loro origine comune, Scienza e Tecnica delle costruzioni si presentano nel segno di una unitarietà che non sempre consente una netta distinzione tra l'una e l'altra. Si può dire in linea di massima che la Scienza delle costruzioni fornisce le basi teoriche generali. Essa ad esempio affronta in maniera esaustiva la teoria della trave, di De Saint Venant, per materiale omogeneo, isotropo, linearmente elastico e sviluppa le relazioni tra caratteristiche della sollecitazione, spostamenti, deformazioni e tensioni. Per quanto riguarda l'analisi strutturale, affronta lo studio di base dei sistemi isostatici (reazioni vincolari, diagrammi delle caratteristiche di sollecitazione) e iperstatici (metodo delle forze, metodo degli spostamenti) e fornisce strumenti essenziali quali il principio dei lavori virtuali e i teoremi di deformazione per sistemi elastici. La Tecnica delle costruzioni passa ad applicazioni "tecniche", più legate alla realtà concreta. Ad esempio affronta il problema della non omogeneità del materiale (tipico del cemento armato) e dell'influenza di legami costitutivi  $\sigma$ - $\varepsilon$  del materiale non linearmente elastici. Nell'ambito dell'analisi strutturale, analizza procedimenti numerici specifici per la risoluzione di schemi strutturali più comuni (travi continue, telai a maglie rettangolari) per passare poi all'impostazione generalizzata dell'analisi matriciale (ma in questo caso la distinzione tra Scienza e Tecnica delle costruzioni diventa meno netta, perché questo argomento può far parte anche del corso di Teoria delle strutture, del gruppo Scienza). Nel corso di Tecnica vengono inoltre presentati i primi approcci al passaggio da oggetti reali a schemi di calcolo. I corsi successivi del gruppo Tecnica partono invece espressamente dall'esame di oggetti reali (ponte, edificio, ecc.) e studiano quali modelli, teorici e tecnici, utilizzare per determinare le caratteristiche di sollecitazione e verificare o progettare le sezioni, nonché tutti i dettagli costruttivi necessari per una corretta esecuzione dell'opera.

## 2. Definizione del modello di calcolo

La definizione del modello di calcolo è il primo passo necessario per analizzare una struttura. Più precisamente, occorre definire uno schema

geometrico ed un modello per i carichi, ma anche un legame costitutivo per il materiale nonché il tipo di analisi da svolgere.

Nel passato le potenzialità di calcolo erano molto limitate ed era necessario adottare modelli molto semplici. Ad esempio, le travi ed i pilastri di un edificio soggetto a soli carichi verticali venivano analizzati separatamente (con lo schema di trave continua le prime, come singole aste soggette a sforzo assiale i secondi). In presenza di azioni orizzontali si rendeva necessario ricorrere a modelli più complessi, che tenessero conto delle interazioni tra i diversi elementi, ma difficilmente si andava oltre lo schema di telaio piano. Ovviamente, il progettista era ben consapevole dei limiti del modello utilizzato e cercava di compensarne la grossolanità abbondando nelle sezioni e nelle armature.

Con l'avvento dei calcolatori elettronici è diventato facile utilizzare modelli anche notevolmente complessi, che ci forniscono indicazioni più dettagliate sul comportamento delle strutture. Non dobbiamo però trascurare alcuni rischi connessi a questa evoluzione. Innanzitutto, il problema della modellazione è diventato molto più rilevante proprio perché molto più numerose di prima sono le possibilità a disposizione; la scelta è ora più delicata ed il rischio di adottare un modello non appropriato è maggiore. In secondo luogo, il computer non commette errori di calcolo ma chi lo utilizza può sbagliare a fornirgli i dati; tanto più il modello è complicato tanto maggiore sarà, in genere, la quantità di informazioni da fornire e corrispondentemente crescerà la possibilità di un errore. Infine, la disponibilità di modelli sofisticati può generare la falsa convinzione di poter conoscere veramente il comportamento delle strutture; non bisogna invece dimenticare che anche il programma di calcolo più avanzato fornisce solo una vaga immagine della realtà, perché quest'ultima è sempre molto più complessa di qualsiasi modello.

Qual è allora il modo più giusto di operare? A costo di sembrare banale, io sono convinto che occorra usare in ogni situazione il modello più semplice (tra quelli validi per il caso in esame) e soprattutto usare solo modelli di cui si capisca bene il significato. Contemporaneamente, è importante usare modelli, anche grossolani, che forniscano immediatamente l'ordine di grandezza delle sollecitazioni, in modo da poter controllare i risultati forniti dai modelli più "esatti".

### 3. Analisi strutturale

Un primo aspetto da chiarire nel parlare di analisi strutturale è se e come il comportamento della struttura è influenzato dal modo in cui le azioni che la cimentano variano nel tempo. In generale, una volta superata la fase transitoria di costruzione una parte dei carichi (ad esempio il peso proprio degli elementi strutturali) si può considerare permanente; un'altra parte invece (i cosiddetti sovraccarichi) varia nel tempo, ma in maniera abbastanza lenta. Si parla in questo caso di *carichi statici*. Ben diverso è l'effetto delle raffiche di vento su elementi deformabili, come antenne e tralicci, o del moto del terreno durante un sisma. Si parla in tal caso di *carichi dinamici* ed una analisi che tenga espressamente conto della rapida variazione delle azioni nel tempo è detta *analisi dinamica*.

In secondo luogo, occorre esaminare in che modo il comportamento della struttura è influenzato dalla legge costitutiva dei materiali di cui sono costituiti gli elementi che la compongono. Un legame elastico lineare consente di ipotizzare una analoga relazione lineare tra azioni e deformazioni. In caso contrario si deve effettuare un'analisi che tenga conto delle non linearità *meccaniche*.

Affinché la relazione tra azioni e deformazioni sia effettivamente lineare è anche necessario che siano trascurabili gli effetti del secondo ordine, ovvero che lo spostamento del punto di applicazione dei carichi non influenzi sostanzialmente l'equilibrio. Quando ciò non avviene, occorre effettuare un'analisi che tenga conto delle non linearità *geometriche*. Altri termini usati per far riferimento a questo problema sono: effetto  $P\text{-}\delta$ , dai simboli utilizzati per la forza assiale e lo spostamento ortogonale all'asse nelle prime trattazioni, oppure effetto instabilizzante dei carichi verticali, perché un caso molto comune è l'incremento di sollecitazioni flessionali nei pilastri a causa dello sbandamento orizzontale dei traversi su cui sono applicati carichi verticali (fig. 1).

Il tipo di analisi effettuato in assenza di complicazioni di tipo meccanico o geometrico è denominato *analisi lineare*. Un aspetto molto importante è che in essa valgono il principio di sovrapposizione degli effetti e di unicità della soluzione. Ciò comporta vantaggi operativi tali da rendere questo approccio estremamente conveniente. Si finisce così col ri-

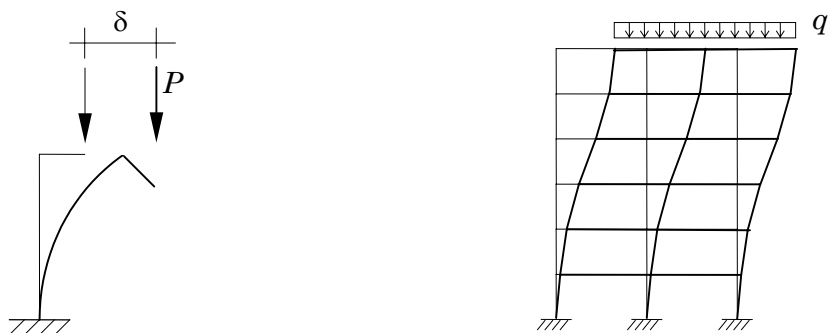


Fig. 1 - effetto  $P-\delta$  o effetto instabilizzante dei carichi verticali

correre ad esso anche in situazioni in cui non sarebbe rigorosamente applicabile. Ad esempio, nel metodo degli stati limite, di cui si tratterà più avanti, che mira a valutare la resistenza ultima della struttura si usa convenzionalmente un'analisi lineare per determinare le caratteristiche della sollecitazione indotte dai carichi e si tiene conto della reale non linearità della legge costitutiva del materiale solo nella fase finale di verifica delle sezioni.

Per tenere conto delle non linearità meccaniche occorre innanzitutto definire il legame costitutivo  $\sigma-\varepsilon$  del materiale e le conseguenti relazioni tra momento  $M$  e curvatura  $\chi$  per la sezione. Ad esempio, per una sezione a doppio T in acciaio (fig. 2) il momento cresce linearmente con  $\chi$  fino al valore  $M_y$ , che corrisponde alla curvatura  $\chi_y$  per la quale si raggiunge lo snervamento nel bordo della sezione. All'ulteriore crescere di  $\chi$  la tensione nell'ala rimane costante ed il momento cresce di poco, per il contributo della sola anima. Solo col raggiungimento della curvatura  $\chi_h$  per la quale inizia l'incrudimento dell'acciaio nelle fibre di bordo il momento riprende a crescere in maniera significativa.

L'andamento del diagramma momento-curvatura si presta ad essere schematizzato con una bilatera, cioè ipotizzando un tratto elastico ed uno perfettamente plastico. Si può così immaginare che, una volta raggiunto il momento massimo, all'ulteriore crescere del carico il concio di trave si potrà deformare con rotazione relativa tra le sue facce senza incremento di momento, come se fosse presente una cerniera. Si può allora suddividere l'analisi di una generica struttura in più fasi lineari. Inizialmente si risolve lo schema di struttura integra e si valuta il carico

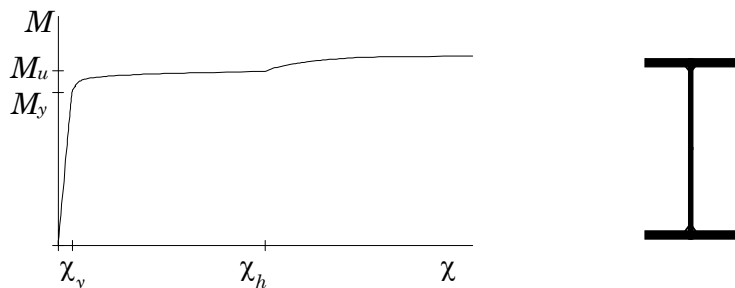


Fig. 2 - diagramma momento-curvatura per una sezione a doppio T in acciaio

per il quale si raggiunge il momento limite nella sezione più sollecitata. Poi si considera uno schema variato, che contiene una cerniera nella sezione plasticizzata e si valuta con esso l'incremento di sollecitazione indotto da un incremento di carico, sommando i valori del momento a quelli ottenuti nella prima fase. Si continua quindi a variare lo schema finché la struttura diventa labile oppure si raggiunge in corrispondenza di una cerniera un valore di rotazione relativa tanto elevato da portare alla sua rottura completa. Nelle diverse fasi occorre però controllare che la rotazione di ciascuna cerniera continui a crescere nello stesso verso; in caso di inversione, infatti, lo scarico del materiale sarebbe elastico e la sezione si comporterebbe in maniera monolitica. Il termine comunemente utilizzato per indicare questo modello di comportamento della sezione è *cerniera plastica*, per differenziarlo dalla cerniera reale che consente rotazioni relative in entrambi i versi. Un'analisi siffatta è denominata *analisi elastico-perfettamente plastica*.

La figura 3 mostra un semplice esempio di analisi elastico-perfettamente plastica. Lo schema è quello di trave continua a due campate di luce uguale, una volta iperstatica, con carico uniformemente distribuito. Nella prima fase il momento massimo si ha in corrispondenza dell'appoggio centrale. Quando tale valore è raggiunto, l'incremento di carico agisce su uno schema nel quale le due campate non sono più continue (nel senso che la rotazione degli estremi di trave a sinistra e a destra dell'appoggio centrale non sono più uguali) e produce quindi solo momento positivo. Complessivamente si hanno, rispetto all'analisi lineare, valori minori del momento negativo all'appoggio centrale e valori maggiori del momento positivo in campata.