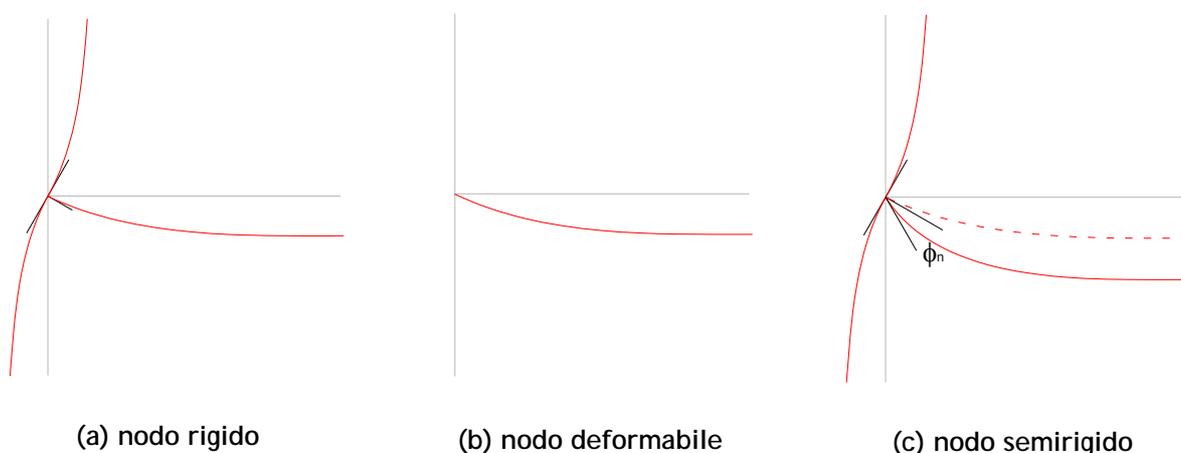


CAPITOLO I

Caratteristiche delle connessioni flangiate in acciaio

1.1 Introduzione

Il comportamento rotazionale di un nodo può essere rivisto come intermedio tra le situazioni estreme di infinitamente rigido o deformabile, ovvero di incastro e cerniera. Quando gli elementi costituenti la connessione sono sufficientemente rigidi, il nodo viene definito rigido e non si manifesta differenza tra le rotazioni assolute degli elementi collegati, ovvero la rotazione relativa è nulla. Quando invece la trave è libera di ruotare rispetto agli elementi collegati, il giunto è una cerniera. In tutti i casi intermedi, in cui la rotazione degli elementi connessi è diversa, si parla di nodi semi-rigidi.



La maniera più semplice per rappresentare un nodo siffatto è quella di inserire nello schema di calcolo una molla rotazionale in corrispondenza del collegamento. La rigidezza rotazionale del nodo K_φ è il parametro che lega il momento trasmesso alla rotazione relativa. Quando K_φ tende a zero il comportamento si avvicina a quello di nodo cerniera, quando invece la rigidezza è sufficientemente elevata il comportamento si avvicina a quello di incastro perfetto. Certamente è di fondamentale importanza ricercare il legame

costitutivo del nodo, dal momento che da questo dipende il momento trasmesso nel collegamento e la rotazione relativa tra gli elementi collegati.

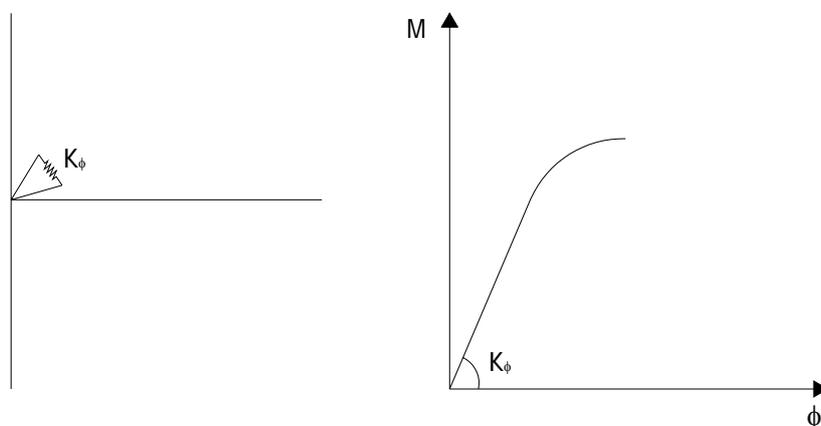


Figura 1 - Modello di un nodo semi-rigido

Quando si passa al livello superiore, quello dell'analisi globale della struttura, risulta molto importante caratterizzare con sufficiente accuratezza il legame costitutivo dei nodi, poiché da essi dipende l'intero stato di sollecitazione del sistema. Difatti, a seconda del tipo di giunto, varia non soltanto la risposta strutturale in termini di spostamenti, ma anche quella in termini di sollecitazioni, nonché la rigidità alla traslazione dei telai, come è possibile notare nella figura successiva, in cui viene rappresentato il diagramma dei momenti sia nel caso di nodi infinitamente rigidi che deformabili.

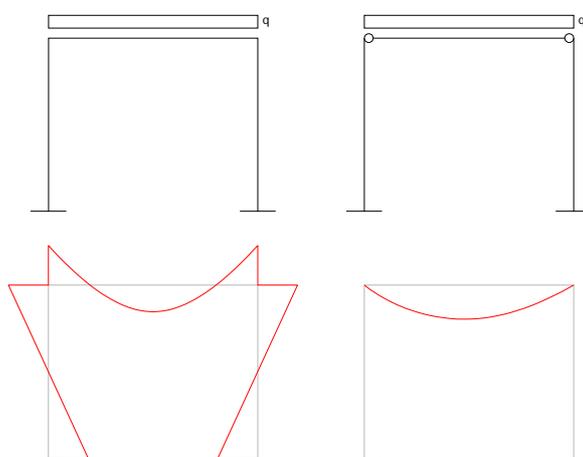


Figura 2 - Risposta di un telaio a nodi rigidi e di uno a nodi deformabili

L'EC3 individua tre tipologie di nodi con cui è possibile modellare il proprio telaio: nodi semplici, semi-continui e continui. Prima di arrivare alla classificazione finale fornita dalla norma, è necessario passare per le classificazioni fatte dalla stessa in termini di rigidezza e resistenza. L'EC3 offre la possibilità di considerare un nodo come rigido o incernierato, in base al rapporto fra la rigidezza rotazionale propria e la rigidezza flessionale della trave collegata; i limiti posti sono i seguenti:

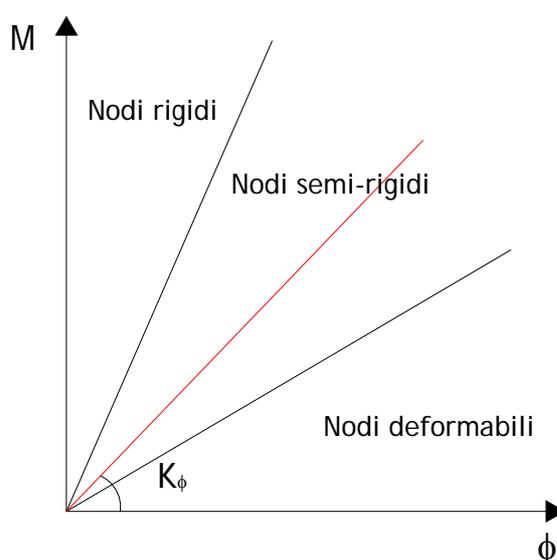


Figura 3 - Schema della classificazione in base alla rigidezza secondo l'EC3

	Telai non controventati	Telai controventati
Nodo rigido	$K_{\phi} > 25EI/L$	$K_{\phi} > 8EI/L$
Nodo semi-rigido	$0,5EI/L < K_{\phi} < 25EI/L$	$0,5EI/L < K_{\phi} < 8EI/L$
Nodo cerniera	$K_{\phi} < 0,5EI/L$	$K_{\phi} < 0,5EI/L^1$

L'altra classificazione è fatta in base al rapporto tra la resistenza del nodo (M_j) e quella della trave $M_{b,Rd}$, per cui in questo caso si parla di completo ripristino di resistenza, parziale ripristino e nodi cerniera, secondo i criteri di seguito esposti:

¹ Con EI/L rigidezza flessionale della trave collegata.

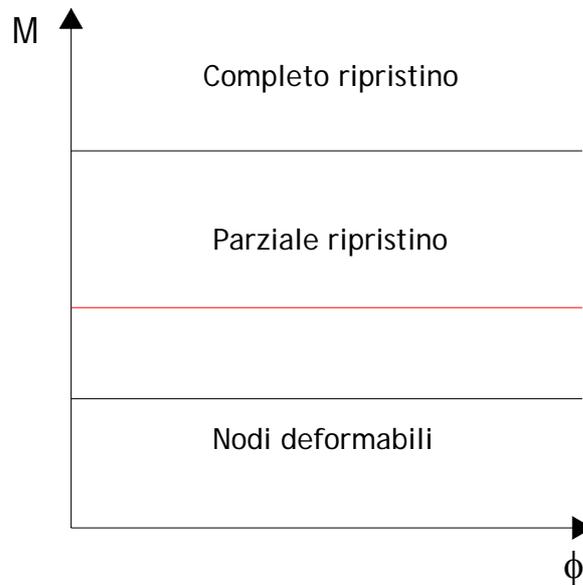


Figura 4 - Schema della classificazione in base alla resistenza secondo l'EC3

- $M_j \geq M_{b,Rd}$ [Nodo a completo ripristino]
- $0,25M_{b,Rd} < M_j < M_{b,Rd}$ [Nodo a parziale ripristino]
- $M_j \leq 0,25M_{b,Rd}^2$ [Nodi deformabile]

L'EC3 considera in definitiva cinque possibili combinazioni:

- Nodi rigidi a completo ripristino
- Nodi rigidi a parziale ripristino
- Nodi semi-rigidi a completo ripristino
- Nodi semi-rigidi a parziale ripristino
- Nodi deformabili

È proprio in base alle considerazioni esposte che viene proposta un'ulteriore classificazione, che tiene conto sia delle caratteristiche di rigidezza che di resistenza:

² Con $M_{\text{completo-ripristino}}$ pari alla momento plastico dell'elemento collegato più debole.

Rigidezza	Resistenza		
	Completo ripristino	Parziale ripristino	Cerniera
Rigido	Continuo	Semi-continuo	-
Semi-rigido	Semi-continuo	Semi-continuo	-
Cerniera	-	-	Semplice

Le terminologie di nodo continuo, semi-continuo o semplice lasciano intendere che: nel primo caso, il collegamento introduce una continuità strutturale totale fra gli elementi connessi; nel secondo caso fornisce una continuità rotazionale parziale; nel caso di nodo semplice non dà alcuna continuità.

L'interpretazione da fornire a questa nuova classificazione dipende anche dal tipo di analisi che si vuole condurre. Difatti, nel caso di un'analisi elastica globale, le uniche caratteristiche rilevanti per la modellazione sono quelle di rigidità; viceversa se stiamo effettuando un'analisi rigido-plastica ci interessano principalmente le resistenze; infine, in tutti gli altri casi, sia la rigidità che la resistenza governano il modo in cui il nodo dovrebbe essere modellato. La tabella seguente riassume la casistica presentata.

Modello	Tipo di analisi		
	Analisi elastica	Analisi rigido-plastica	Analisi elasto-plastica
Continuo	Rigido	Completo ripristino	Rigido a completo ripristino
Semi-continuo	Semi-rigido	Parziale ripristino	Rigido a parziale ripristino Semirigido a completo ripristino Semirigido a parziale ripristino
Semplice	Cerniera	Cerniera	Cerniera

1.2 Il metodo delle componenti

I nodi strutturali, in particolare le connessioni saldate e bullonate, offrono un comportamento spiccatamente non lineare. L'analisi di questi comportamenti, i quali comprendono molteplici fenomeni meccanici (contatti, scorrimenti, separazioni ed effetti $P-\Delta$), avviene solitamente solo grazie a forti approssimazioni. Le campagne sperimentali ed i test numerici vengono condotti con lo scopo di ottenere la risposta dei nodi, principalmente tramite due approcci: il primo è quello che fornisce direttamente un modello matematico della connessione; il secondo, invece, si basa sull'idea che ogni nodo, in generale, possa essere discretizzato come un insieme di componenti, le quali, a loro volta, contribuiscono alla deformabilità e alla resistenza, oppure solo alla resistenza complessiva del nodo. L'approccio attuale indicato dalle normative, come l'EC3, segue proprio questo secondo tipo di metodologia per la previsione del comportamento monotono dei nodi semi-rigidi. I modelli utilizzati nelle norme forniscono le relazioni necessarie per la conoscenza del legame momento-rotazione monotono del nodo a partire dalle sue caratteristiche geometriche e meccaniche. I programmi di ricerca, volti alla conoscenza dei comportamenti monotoni e ciclici delle singole componenti nodali, proseguono già da alcune decadi, senza essere giunti ancora ad una esatta conoscenza di tutti i fenomeni che influenzano la risposta nodale, per i legami ciclici ancor più che per quelli monotoni.

Sicuramente nella pratica progettuale la tipologia di connessione più utilizzata è rappresentata dalle connessioni semplicemente saldate, poiché esse sono in grado di ridurre notevolmente le rotazioni nodali e quindi riportano il comportamento verso l'infinitamente rigido, permettendo così di modellare la struttura semplicemente con nodi incastro. I dettagli costruttivi di una connessione saldata sono sicuramente molto vari e la scelta dell'uno o dell'altro dettaglio dipende dall'obiettivo che vuol raggiungere il progettista. Ad esempio, se si desidera un nodo rigido, certamente è possibile raggiungere lo scopo, inserendo nel dettaglio costruttivo irrigidimenti quali piatti di continuità e piatti d'anima o irrigidimenti diagonali per la zona d'anima della colonna. Molto spesso però, nella pratica comune, per perseguire criteri di economicità si eliminano dal dettaglio i suddetti irrigidimenti, continuando ciò nonostante a considerare

nel modello di calcolo i nodi rigidi, anche se in questo caso la deformabilità potrebbe non essere trascurabile.

Nel cosiddetto metodo delle componenti, il caso delle connessioni saldate è il più semplice. Occorre osservare, tuttavia, che le considerazioni effettuate per le connessioni saldate sono di interesse anche nel caso delle connessioni flangiate. Il primo step da seguire, nel metodo delle componenti, è quello dell'individuazione delle varie fonti di deformabilità. Nel caso di connessioni saldate sono:

- Pannello d'anima della colonna a taglio
- Anima della colonna in trazione
- Anima della colonna in compressione
- Flangia della colonna in flessione
- Anima e flangia della trave in compressione
- Anima della colonna in compressione

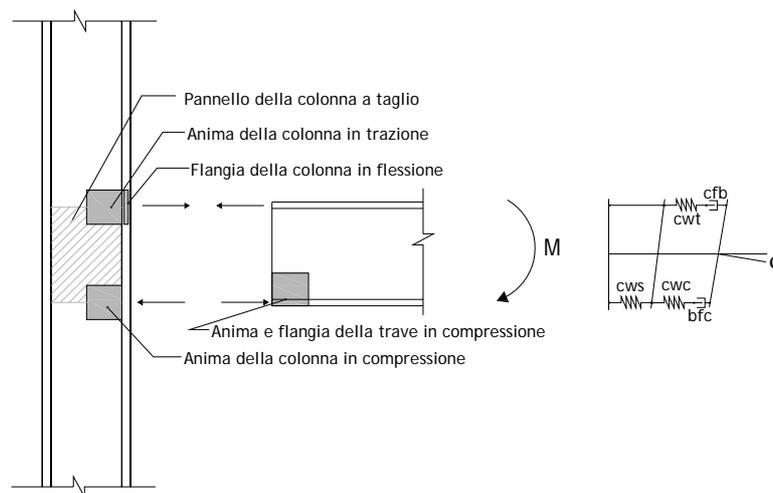


Figura 5 - Schematizzazione di un nodo saldato secondo il metodo delle componenti e relativo modello meccanico

Come è possibile notare, non tutte le componenti sono dello stesso tipo, poiché alcune di esse contribuiscono sia in termini di rigidità che di resistenza ($\text{---}\text{||||}\text{---}$), e vengono modellate con legami di tipo elasto-plastico; altre, ponendo solo una limitazione alla resistenza ($\text{---}\text{T}\text{---}$), vengono modellate con legami di tipo rigido-plastico. Le prime tre componenti, ovvero anima della colonna a taglio e pannelli a trazione e compressione, governano sia la rigidità che la resistenza

del nodo; invece, la flangia della colonna in flessione e l'anima e flangia della trave in compressione forniscono solo delle limitazioni in termini di resistenza senza contribuire in maniera rilevante alla rigidezza. In tale metodo, per i nodi saldati si ipotizza che la rottura delle saldature sia assolutamente evitata, poiché esse sono in grado di fornire piccolissime deformazioni dando vita a meccanismi di rottura fragili. Questa è la ragione per cui è auspicabile seguire criteri di progetto delle saldature, sempre a vantaggio di sicurezza e che prevedano sovraresistenze rispetto alla componente più debole.

Determinati i valori di resistenza e rigidezza di ogni componente nodale, è necessario, per ricavare il legame momento-rotazione del nodo, correlare le singole componenti fra loro, assumendo che la resistenza complessiva sia governata dalla resistenza della componente più debole, per cui:

$$F_{rd,min} = \min\{F_{cws,Rd}, F_{cwt,Rd}, F_{cwc,Rd}, F_{cfb,Rd}, F_{bfc,Rd}\} \Rightarrow M_{j,Rd} = F_{Rd,min} h_t$$

Dove h_t è il braccio della coppia interna.

Per quanti concerne la rigidezza, note le rigidezze delle singole componenti, la rigidezza nodale risultante sarà fornita dal collegamento in serie delle tre componenti deformabili:

$$K_{\varphi} = \frac{h_t^2}{\frac{1}{K_{cws}} + \frac{1}{K_{cwc}} + \frac{1}{K_{Kcwt}}}$$

I nodi flangiati permettono una grande versatilità di impiego nella pratica progettuale, consentendo di spaziare da dettagli assimilabili a cerniera a dettagli costruttivi praticamente rigidi. In particolare, è possibile modificare sia la rigidezza rotazionale che la resistenza flessionale scegliendo un appropriato numero di bulloni e il loro posizionamento, tramite uno spessore appropriato del piatto d'estremità (end-plate) e irrigidendo la zona della colonna con piatti di continuità, piatti d'anima, o irrigidimenti diagonali della zona del pannello soggetta a taglio.

Si capiscono certamente le maggiori possibilità fornite dall'impiego di una connessione di tipo flangiato rispetto ad una di tipo saldato: difatti, si è visto, nel caso precedente, come l'unico modo per variare il dettaglio era quello di irrigidirlo. Le connessioni di tipo flangiato (end-plate connections) possono essere divise in due categorie, in base al posizionamento dei bulloni: Se i bulloni si trovano tutti all'interno delle due flange della trave si parla di "flush end-plate connections"; invece, se vi sono delle file di bulloni al di fuori di una delle due flange della trave si parla di "extended end-plate connections", che a loro volta si distinguono in connessioni ad un solo lato o a due lati, a seconda che le file di bulloni siano solo al di sopra della trave o da entrambe le parti. Nel caso di connessioni di tipo "extended end-plate", il comportamento del nodo passa per l'analisi del sottomodulo di T-stub, il quale a seconda del numero di bulloni in zona tesa, oltre a considerare gli effetti forniti dalla singola riga, tiene conto delle interazioni tra le file e delle possibili limitazioni alla resistenza date da questi meccanismi. In questo caso, come nel precedente di connessione semplicemente saldata, è necessario individuare le componenti nodali, le quali, come in precedenza, si divideranno in componenti che contribuiscono sia alla rigidità che alla deformabilità ($\rightarrow \text{---} \leftarrow$), con una schematizzazione di tipo elasto-plastico, e componenti che forniscono solo una limitazione alla resistenza ($\rightarrow \square \leftarrow$), con una schematizzazione di tipo rigido-plastico. Le componenti che influenzano il comportamento nodale nel caso di nodi flangiati, risultano:

- Anima della colonna a taglio
- Anima della colonna in compressione
- Flangia della colonna in flessione
- Piatto di estremità in flessione
- Bulloni in trazione
- Anima della colonna in trazione
- Flangia e anima della trave in compressione
- Anima della trave in trazione

Le prime sei componenti influenzano sia la resistenza che la rigidità del nodo, mentre le ultime due, per le quali si assume un legame rigido plastico, forniscono solo una limitazione alla resistenza.

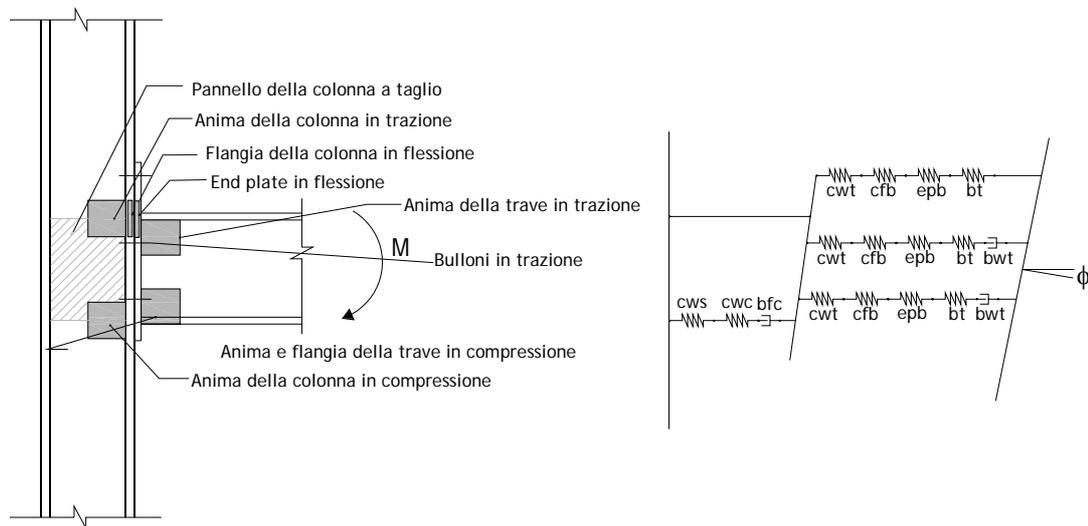


Figura 6 - Schematizzazione di un nodo flangiato secondo il metodo delle componenti e relativo modello meccanico

Alcune di queste componenti forniscono una rigidità e resistenza dipendente dal numero di file di bulloni in trazione e dal posizionamento della fila stessa. È il caso dell'anima della colonna e della trave in trazione, della flangia della colonna, dell'end-plate in flessione e dei bulloni in trazione. Il contributo di queste, va calcolato considerando il comportamento che si ha nel caso in cui la fila di bulloni lavora da sola e nel caso in cui il comportamento diventa di gruppo, calcolando le resistenze per tutte le combinazioni possibili.

Per le connessioni extended end-plate, è possibile valutare il momento resistente del nodo calcolando i contributi dei bulloni, effettuando un equilibrio alla rotazione intorno al baricentro degli sforzi di compressione, il quale viene assunto coincidente con lo spessore medio della flangia compressa della trave. La relazione per il calcolo del momento resistente è la seguente:

$$M_{j,Rd} = \sum_{i=1}^{n_b} F_{i,Rd} h_i$$

Con h_i si sono indicate le distanze dei bulloni dall'interasse della flangia compressa e con $F_{i,Rd}$ si sono indicate le resistenze delle singole file di bulloni. L'EC3 propone anche la procedura per ricavare la rigidezza rotazionale assemblando quelle delle singole componenti, semplicemente rifacendosi al modello meccanico indicato in figura 7. È facile osservare che la rigidezza complessiva del nodo si ottiene a partire dalle rigidezze estensionali delle singole componenti.

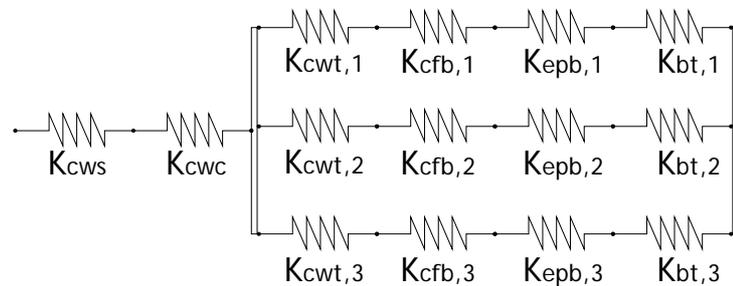


Figura 7 - Schema generale delle molle per ricavare la rigidezza rotazionale di un nodo EEP

Il primo passo per valutare la rigidezza rotazionale è quello di comporre in serie le rigidezze delle singole righe, sommandone le deformabilità, ottenendo lo schema intermedio riportato in figura 8:

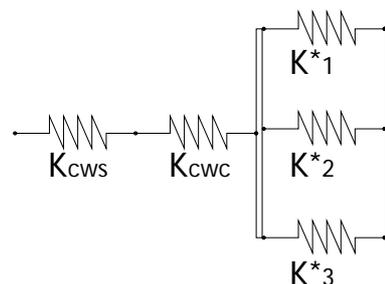


Figura 8 - Collegamento in serie delle componenti dell'i-esima fila

$$\frac{1}{K_i^*} = \frac{1}{K_{cwt,i}} + \frac{1}{K_{cfb,i}} + \frac{1}{K_{epb,i}} + \frac{1}{K_{bt,i}}$$

Ricavate le rigidezze delle singole righe è necessario sommare in parallelo le K_i^* . Tenendo presente che il collegamento in parallelo va effettuato considerando la linearità dello spostamento, per l'ipotesi fatta risulta:



Figura 9 - Collegamento in parallelo delle file di bulloni

$$K_t = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} K_i^* h_i}{h_t}$$

dove h_t è il braccio di leva dato da:

$$h_t = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} K_i^* h_i^2}{\sum_{i=1}^{n_b} K_i^* h_i}$$

Infine, la rigidezza del nodo può essere calcolata combinando in serie le rigidezze K_{cws} , K_{cwc} , K_t , al solito sommandone le deformabilità e, riportandole da rigidezze estensionali a rigidezze rotazionali:

$$K_\varphi = \frac{h_t^2}{\frac{1}{K_{cws}} + \frac{1}{K_{cwc}} + \frac{1}{K_t}}$$

In entrambi i casi di connessione saldata o bullonata noto il momento resistente di progetto e la rigidezza del nodo, è possibile ricavare il legame momento rotazione monotono con la procedura indicata in figura.

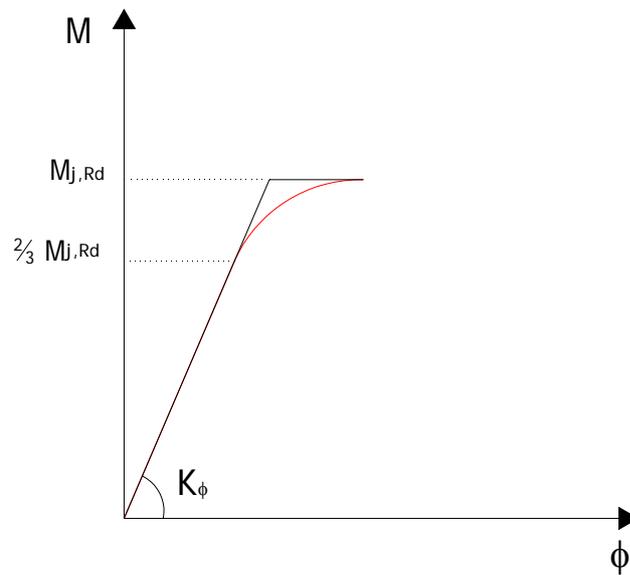


Figura 10 - Procedura per individuare il legame momento rotazione del nodo

Fatta questa panoramica, del tutto generale, sul comportamento monotono di nodi semi-rigidi secondo il metodo delle componenti, bisogna dare uno sguardo al comportamento sviluppato da questa tipologia di connessioni sotto azioni cicliche e al loro ruolo nella progettazione di telai in acciaio in zona sismica.

Nell'approccio attuale è necessario che i telai siano progettati prevedendo l'impegno plastico di alcune zone, le cosiddette zone dissipative. Durante un evento sismico catastrofico, queste zone hanno il compito di dissipare l'energia sismica in ingresso tramite un comportamento isteretico duttile in campo plastico. La formazione di meccanismi dissipativi appropriati è correlata alla tipologia strutturale. I telai sismo-resistenti hanno un gran numero di zone dissipative, posizionate proprio nei nodi trave colonna ed è proprio per questo che la duttilità dei telai in acciaio è fortemente influenzata dal comportamento delle sue connessioni. Due approcci sono possibili nella progettazione di strutture in acciaio: il primo approccio è basato sulla formazione della zona dissipativa (cerniera plastica) all'estremità della trave, in modo che l'energia sismica in ingresso sia dissipata tramite il comportamento isteretico della sezione terminale della trave. Il secondo approccio prevede la dissipazione dell'energia in input tramite la plasticizzazione della connessione. Ovviamente nel primo caso la connessione deve essere necessariamente progettata in modo

che la sua resistenza permetta la formazione della cerniera plastica sulla colonna prima della rottura del collegamento, permettendo così la dissipazione di energia all'estremità della trave. Invece, nel secondo caso, i parametri chiave del comportamento della connessione risiedono nella duttilità e nella capacità di dissipare energia sotto carichi ciclici della stessa.

Allo stato attuale, le normative vigenti suggeriscono l'adozione del primo approccio: ad esempio, l'eurocodice 3 raccomanda che le connessioni in zona dissipativa abbiano un grado sufficiente di sovrarresistenza per permettere lo snervamento delle parti connesse. L'approccio del secondo tipo è comunque previsto dalle norme vigenti, ma è di fatto molto limitato nella pratica comune, perché è richiesto il controllo sperimentale dell'efficacia delle connessioni sotto carichi ciclici. I parametri progettuali nei due approcci sono sicuramente differenti: difatti, nel secondo caso, oltre a considerare la rigidità rotazionale e la resistenza ultima della connessione, è necessario, per il progetto dei collegamenti, tenere in conto anche due parametri aggiuntivi: la capacità di rotazione della connessione e la sua capacità di dissipare energia.

In generale, la legge ciclica può essere stabile o instabile: si può considerare stabile se il comportamento ciclico ha un involuppo che segue quello dei test monotoni anche aumentando il numero di cicli; in altri casi il comportamento nodale può essere instabile, ovvero si ha rigidità decrescente all'aumentare del numero di cicli. In definitiva si individuano tre comportamenti tipici:

- i nodi della prima categoria hanno un comportamento stabile caratterizzato da cappi di isteresi con medesima area interna anche all'aumentare del numero di cicli;
- i nodi della seconda categoria esibiscono un comportamento instabile dovuto alle deformazioni permanenti in fori e bulloni: questo riduce l'effetto irrigidente dovuto alle forze di contatto. In questo caso la pendenza delle curve di isteresi è caratterizzata da una rigidità dell'*i*-esimo ciclo sempre decrescente;

- i nodi della terza categoria hanno un comportamento instabile caratterizzato dallo slittamento dei bulloni. Si ha una forma dei cappi di isteresi del tutto diversa rispetto ai casi precedenti: difatti si riduce notevolmente l'energia dissipata a parità di valori di deformazione. Il deterioramento cresce a causa delle deformazioni permanenti nei fori e nei bulloni;

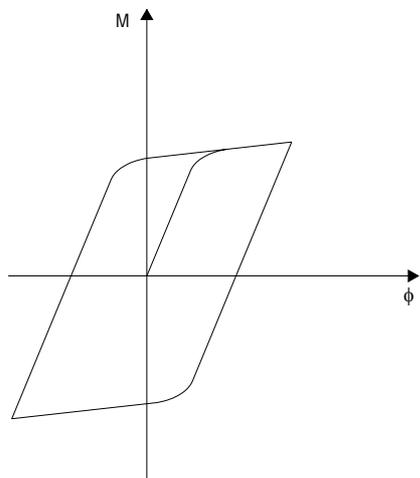


Figura 11- Comportamento ciclico stabile

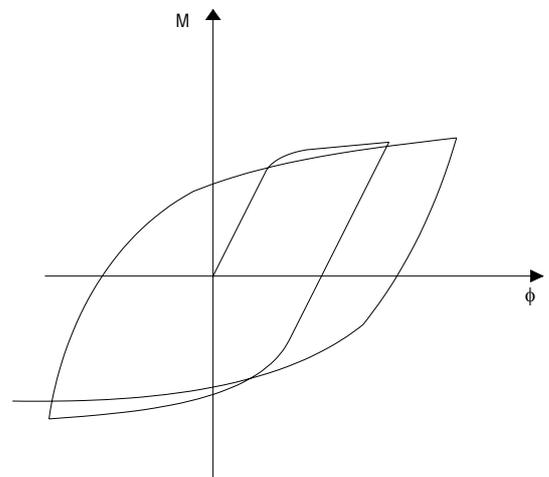


Figura 12 - Comportamento ciclico instabile

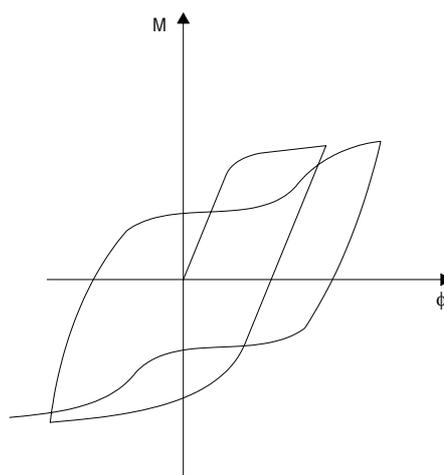


Figura 13 - Comportamento ciclico instabile con pinching