



COLLEGAMENTI BULLONATI

ALCUNI ESEMPI DI CALCOLO TRADIZIONALE E CONFRONTO CON ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI

Claudio Braccesi

Gennaio 2019



Sommario

INDICE DELLE FIGURE.....	3
INTRODUZIONE	4
1 COLLEGAMENTI CON VITI.....	4
1.1 Collegamento singolo	6
2 RIPARTIZIONE DEI CARICHI FLETTENTI	8
3 ALCUNI CASI REALI	15
3.1 Flangia di unione semialberi	15
3.2 Mensola rigida.....	20
3.3 Nodo di collegamento colonna-traversa	26
4 CONCLUSIONI.....	32



INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 Collegamento con bullone	5
Figura 2 Diagramma di carico del collegamento.....	6
Figura 3 FEM Collegamento singolo.....	7
Figura 4 Risultati FEM e teorici su collegamento singolo	8
Figura 5 Esempio di carico flettente su un piano di collegamenti bullonati.....	9
Figura 6 Schema di deformazione rigida dei collegamenti.....	10
Figura 7 forze su semiflanguia solo precarico	12
Figura 8 Bulloni precaricati, Momento esterno e rotazione baricentrica.....	13
Figura 9 Bulloni precaricati, Momento esterno e rotazione attorno all'estremo inferiore della flangia	14
Figura 10 Bulloni senza precarico, Momento esterno e rotazione attorno all'estremo inferiore della flangia.....	15
Figura 11 Unione flangiata di 2 semialberi ottimizzata	16
Figura 12 Von Mises al massimo momento applicato.....	16
Figura 13 Risultati globali FEM e teorici	17
Figura 14 Valutazione bontà della rigidità della flangia.....	18
Figura 15 Flangia debole con deformazione fuori piano	18
Figura 16 Flangia debole al massimo momento FEM e teorico	19
Figura 17 Flangia debole - Effetto leva.....	20
Figura 18 Mensola rigida ad U incastrata con tre bulloni	21
Figura 19 Bullone superiore al massimo carico	22
Figura 20 Pressioni di contatto sulla flangia al massimo carico.....	23
Figura 21 Mensola carichi sui bulloni FEM	24
Figura 22 Mensola con bulloni senza precarico	25
Figura 23 Mensola al massimo carico con moto rigido attorno al baricentro	26
Figura 24 Nodo di collegamento colonna-traversa.....	27
Figura 25 Tensioni con viti precaricate (SX) e non precaricate (DX)	28
Figura 26 Viti precaricate e rotazione attorno al baricentro delle viti	29
Figura 27 Viti precaricate e rotazione attorno all'ala inferiore della traversa.....	30
Figura 28 Viti senza precarico e rotazione attorno all'ala inferiore della traversa	31
Figura 29 Prova di rigidità della flangia sulla traversa.....	32



INTRODUZIONE

Dopo un richiamo generale sui collegamenti con viti, si analizza in particolare la distribuzione dei carichi sul singolo collegamento con particolare riguardo a carichi esterni equivalenti ad un momento 'flettente' rispetto ad un asse giacente sul piano delle viti.

Le ipotesi teoriche sono confrontate con i risultati agli elementi finiti mediante analisi non lineari con elementi di contatto.

Lo scopo della dispensa è quello di fornire una sensibilità critica di probabile ausilio alla progettazione di collegamenti della natura trattata.

1 COLLEGAMENTI CON VITI

Le brevi note che seguono sono il riassunto essenziale di quanto trattato su ogni testo didattico sui collegamenti con viti.

Il collegamento più usuale, anche per le esemplificazioni didattiche, è il collegamento con bullone. In Figura 1 si ha il collegamento reale ed i suoi diversi gradi di schematizzazione a cui si ricorre per il calcolo.

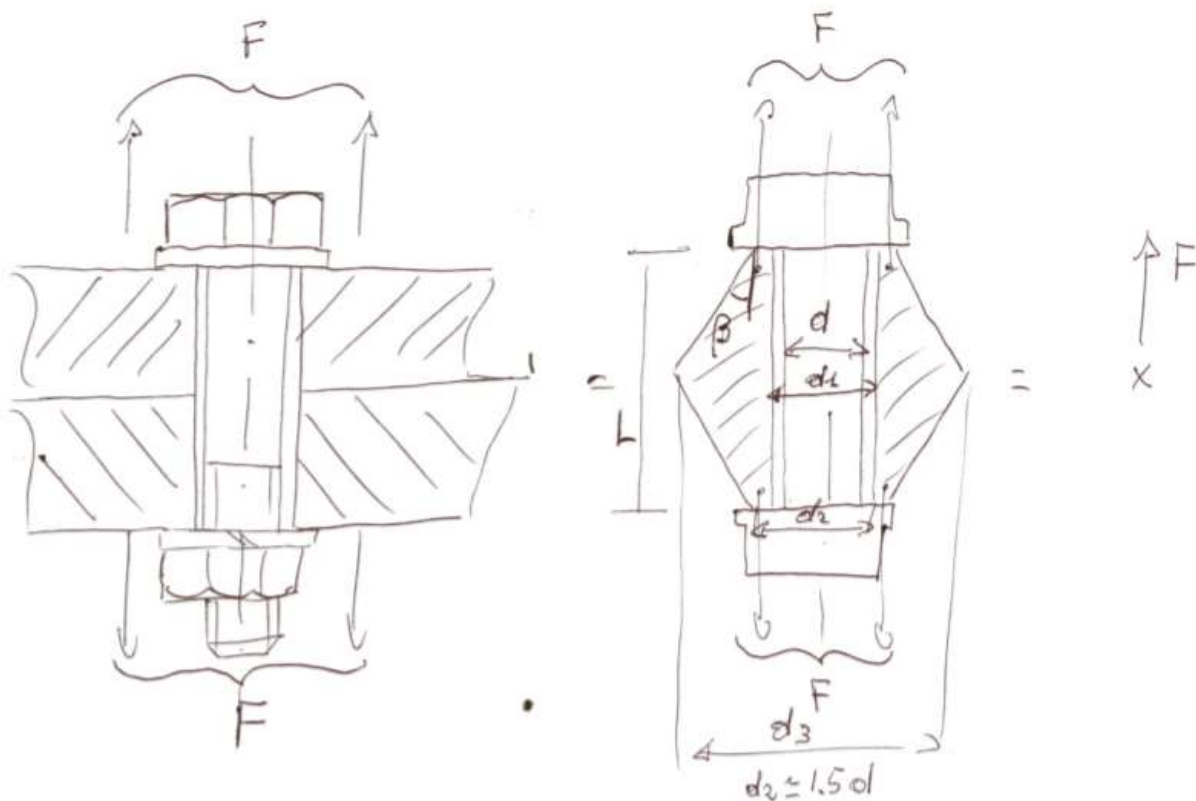


Figura 1 Collegamento con bullone – livelli di schematizzazione

La Figura 1 mostra come il collegamento nel suo insieme, assoggettato al carico esterno F si può considerare come due molle in parallelo costituite dal bullone (b) e flange (c) di rigidità opportuna. La rigidità del bullone è data dalla rigidità dei vari spezzoni che lo compongono più una aliquota di rigidità dovuta alle rosette ed alla testa della vite ed al dado

$$\frac{1}{K_b} = \frac{1}{E} \left(\sum \frac{L_i}{A_i} + \frac{\gamma}{d} \right)$$

L_i ed A_i sono le lunghezze e le aree della sezioni dei vari spezzoni di vite, γ è un parametro il cui valore può variare molto (es. tra 3 e 10) che tiene conto della rigidità delle rosette e della testa di vite e dado e d è il diametro nominale della vite.

La rigidità delle flange collegate è data dalla rigidità del cilindro equivalente della Figura 1

$$K_c = \frac{EA_c}{L} \quad \text{con} \quad A_c = \frac{\pi}{4} \left(\left(\frac{d_3 + d_2}{2} \right)^2 - d_1^2 \right)$$

La rigidità delle flange è sempre maggiore di quella del bullone (da 2 a molte volte). Il diametro d_3 si calcola dall'apertura del cono β della Figura 1, apertura che varia da 30° a 45° . E' utile il parametro

$$\alpha = \frac{K_c}{K_b}$$

Che quindi è maggiore di 1 attraverso cui si esprime la parte di carico esterno assorbita dal bullone e dalle flange

$$\Delta F_b = \frac{1}{1 + \alpha} F \quad \Delta F_c = \frac{\alpha}{1 + \alpha} F$$

Considerato il precarico P_o la forza totale sul bullone contraria alla forza totale sulle flange sono

$$F_b = P_o + \Delta F_b \quad F_c = P_o - \Delta F_c$$

Il precarico è imposto in modo che la tensione normale sulla vite sia al più intorno all' 80% della tensione di snervamento della vite ed il carico totale può far arrivare la vite fino alla sua tensione di snervamento. Si ha interesse che il precarico sia più grande possibile per tenere il collegamento unito.

Le formule precedenti sono riassunte nel grafico della Figura 2.

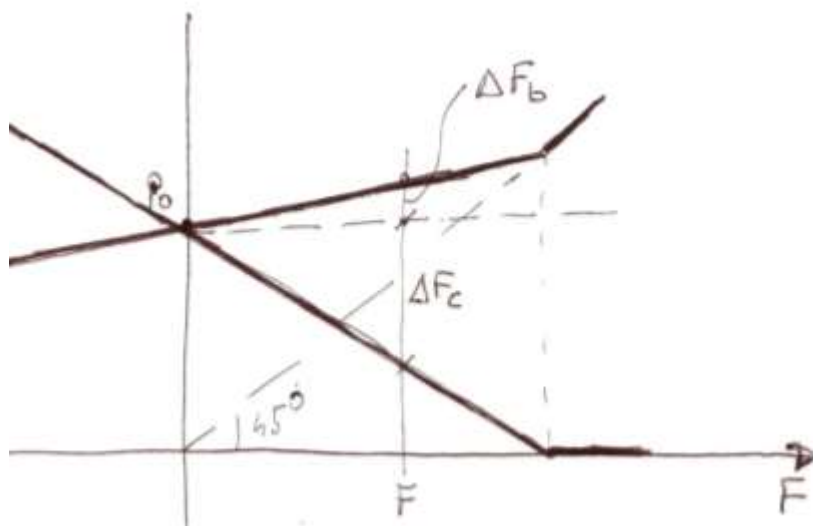


Figura 2 Diagramma di carico del collegamento

1.1 Collegamento singolo

Procediamo all'analisi di un collegamento singolo, che risponde alle formule precedenti, mediante analisi numerica agli elementi finiti. I risultati degli elementi finiti sono confrontati col calcolo secondo le formule precedenti. Il confronto è significativo perché consentirà di appurare che un semplice calcolo fornisce risultati del tutto simili rispetto ad un calcolo numerico con un modello non lineare, che è molto complesso.

La Figura 3 mostra il modello assialsimmetrico in sezione coi risultati di sollecitazione di Von Mises al precarico e dopo aver imposto il carico esterno massimo

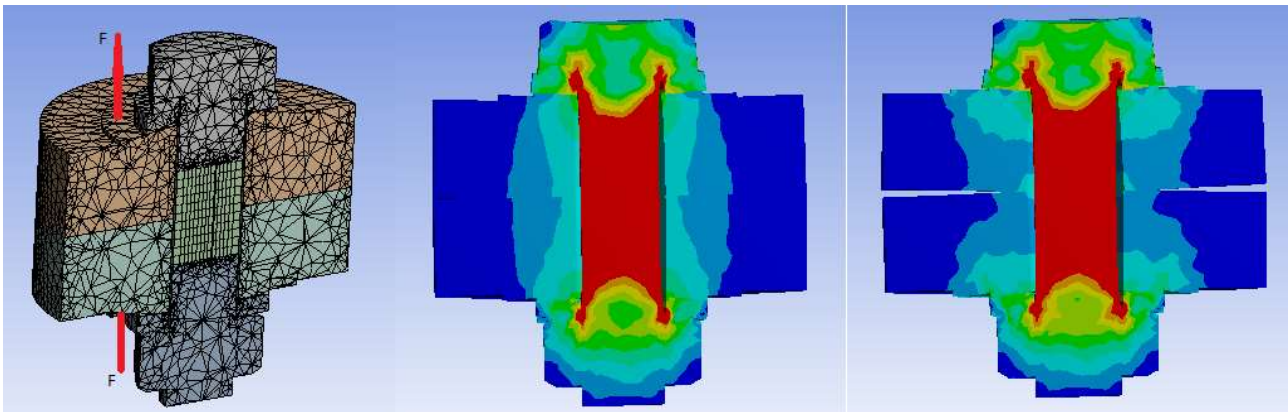


Figura 3 FEM Collegamento singolo

Il modello è piuttosto dettagliato come mostra la mesh. Al precarico il bullone ha una tensione uniforme superiore a 500 Mpa e le flange sono sollecitate in una zona di influenza che richiama il cono di Figura 1. Al massimo carico si ha un distacco delle flange alle estremità e solo una zona residua di contatto. I risultati numerici sono completi e suggestivi, ma non ci danno indicazioni di sintesi. La modellazione FEM come tale è in genere poco utile, finchè non si estraggono dai risultati numerici delle informazioni in post-processing. In questo caso l'analisi è stata suddivisa in 10 passi dal precarico fino al carico esterno massimo e, per ogni passo, sono stati estratti la forza residua sulle flange e la forza sul bullone. Tali dati sono stati elaborati e confrontati col calcolo manuale secondo le formule precedenti.

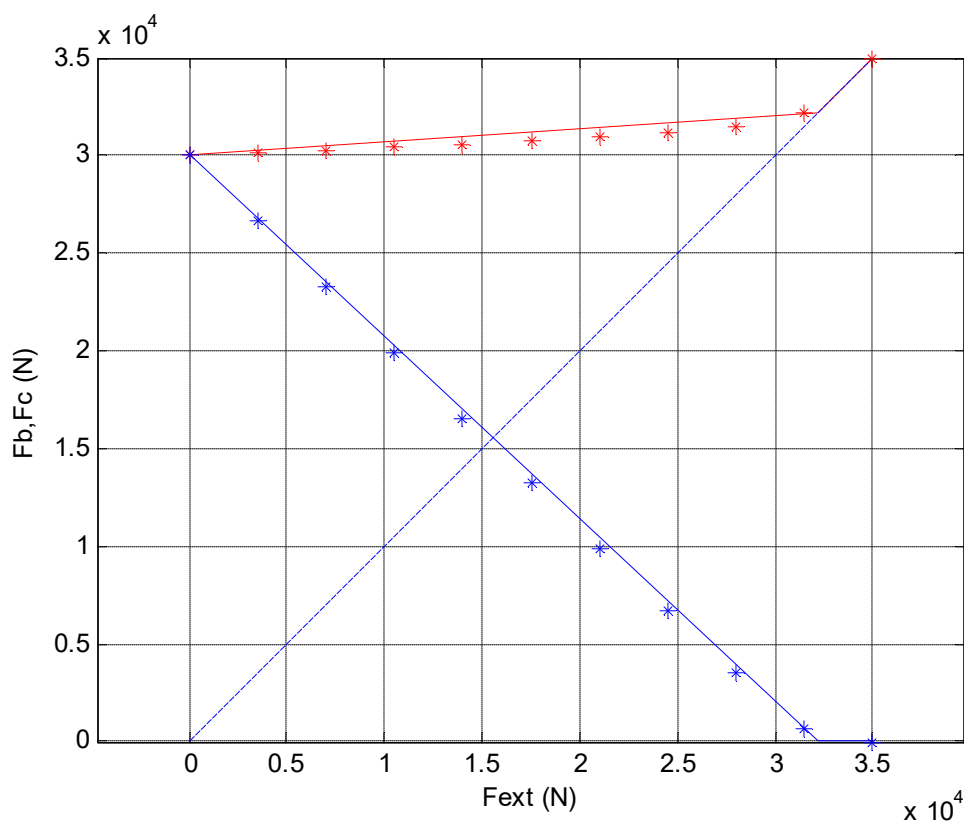


Figura 4 Risultati FEM e teorici su collegamento singolo

I risultati teorici del carico sulla vite (rosso) e sulla flangia (blu) sono in linea continua, quelli FEM sono rappresentati dagli asterischi. E' notevole il buon accordo e soprattutto la conservatività dei risultati teorici, circostanza che ci autorizza ad utilizzare con tutta tranquillità le semplici formule del paragrafo 1.

L'esempio ci dimostra anche che l'utilizzo del FEM opportunamente post-processato, ci può dare indicazioni di sintesi utili al progetto.

2 RIPARTIZIONE DEI CARICHI FLETTENTI

Vogliamo considerare il caso piuttosto frequente in cui più viti e/o bulloni giacenti su un piano debbano complessivamente sopportare un carico esterno di momento secondo un asse del piano di collegamento. Il caso corrisponde all'esempio di Figura 5

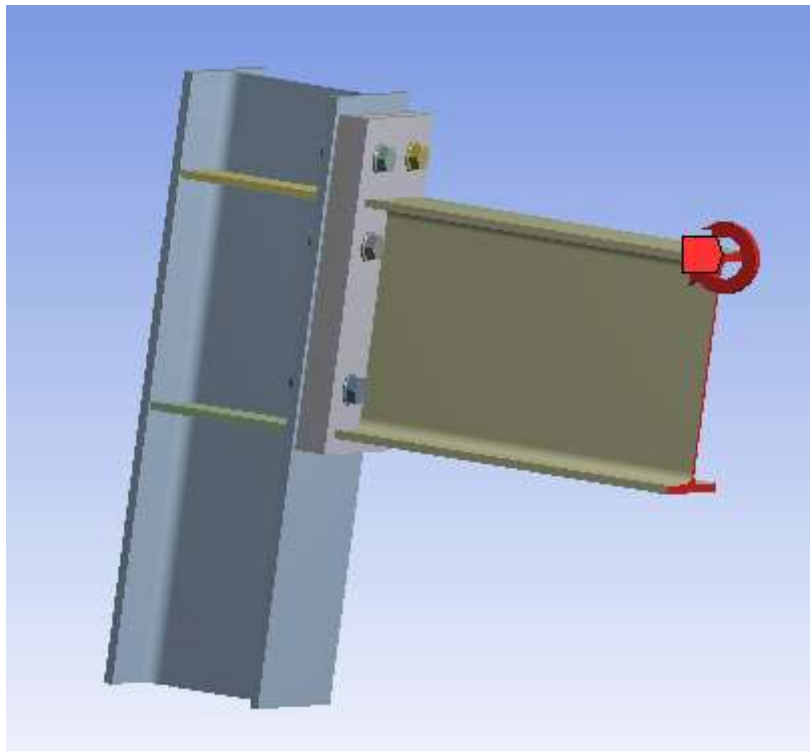


Figura 5 Esempio di carico flettente su un piano di collegamenti bullonati

E' chiaro che i 6 bulloni della figura dovranno nel loro complesso assorbire il momento. La determinazione del carico su ciascun collegamento è un problema iperstatico avendo in questo caso 3 incognite (carico sui bulloni alle varie altezze) e due sole equazioni ovvero che il momento risultante dei carichi esterni deve uguagliare il momento e la risultante dei carichi deve essere nulla. Il grado di indeterminatezza (iperstaticità) aumenta all'aumentare del numero di bulloni. Quindi possiamo pervenire ad una soluzione solo con delle ipotesi di legame e congruenza.

La Figura 6 illustra l'ipotesi correntemente usata che presuppone una deformazione piana del piano dei bulloni con rotazione attorno ad un asse C parallelo all'asse vettore del momento

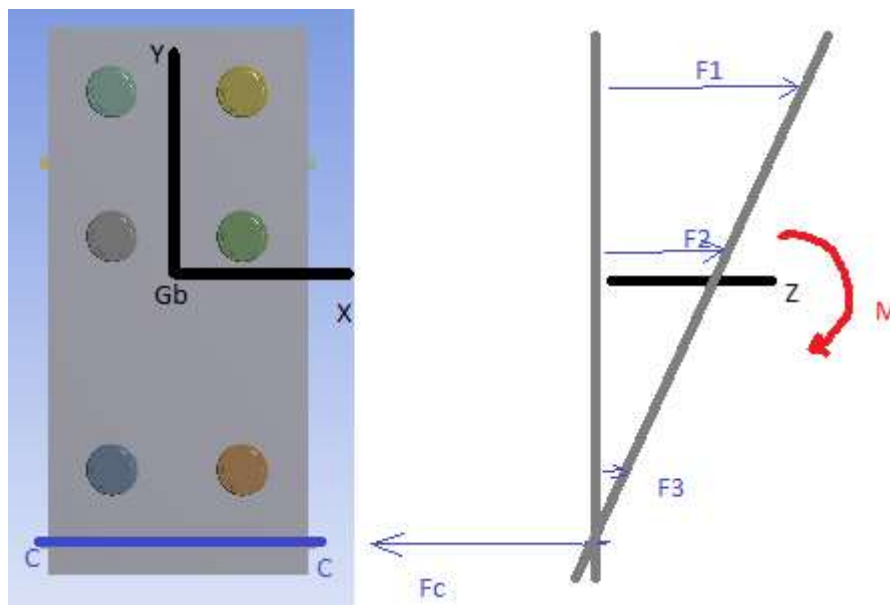


Figura 6 Schema di deformazione rigida dei collegamenti

Lo schema costituisce la congruenza della deformazione. Unito a considerare la forza esterna su ciascun collegamento proporzionale al rispettivo 'spostamento' che è la condizione di legame, ci consente di risolvere sempre il problema.

Nella Figura 6 si considera convenzionalmente un sistema di riferimento x, y sul piano dei bulloni centrato sul baricentro dei bulloni stessi Gb e principale d'inerzia.

Vedremo come si possa ipotizzare la posizione dell'asse di rotazione C, che spesso può coincidere con l'asse x baricentrico.

Un sistema di forze staticamente equivalenti al solo momento M è quello rappresentato in blu sulla Figura 6. Ciascuna coppia di collegamenti si prende la forza esterna F1, F2 ed F3 ed è necessaria una forza Fc data sulla flangia in esame dalla controflangia non rappresentata, per annullare la risultante. Le forze F1, F2 ed F3 sono da considerarsi le forze esterne su ciascun collegamento da usare come ascissa della figura 2.

Il problema ipotizzato è analogo a quello della flessione nella trave, in cui la sezione rimane piana nella deformazione. Pertanto le formule che enunciamo sono simili alla formula di Navier per la flessione nelle travi ed in modo analogo possono essere ricavate. Si ha

$$F_i = \frac{M}{J_{xc}} (y_i - y_c) \quad F_c = n \frac{M}{J_{xc}} y_c$$

Dove Fi è la forza esterna su ciascun collegamento, J_{xc} è il momento d'inerzia dei bulloni rispetto all'asse C, yi ed yc le coordinate dell'asse di ciascun bullone e dell'asse C rispettivamente, n è il numero di bulloni.



Se l'asse C coincide con l'asse x baricentrico, $F_C=0$, ovvero le forze esterne sui bulloni hanno risultante nulla, come nella flessione pura delle travi.

Un collegamento precaricato ha possibilità di lavorare indifferentemente con forza esterna di trazione o di compressione. Quindi se la rigidezza complessiva delle flange è sufficientemente elevata da ipotizzare il moto rigido del piano dei bulloni la rotazione avverrà attorno all'asse x baricentrico. Se i bulloni non sono sufficientemente precaricati o hanno precarico nullo e la rigidezza delle flange è elevata, oppure se la rigidezza delle flange è eccessiva, si tenderà ad avere una rotazione attorno ad un asse C, generalmente coincidente con l'estremo della flangia.

Quindi l'ipotesi di rotazione rigida deve essere supportata da una sufficiente rigidezza delle flange, altrimenti non è ammesso supporla e tutte le considerazioni precedenti cadono.

Questa è in sintesi l'ipotesi corrente nel calcolo della ripartizione del carico sui bulloni.

Una volta valutate le forze esterne su ciascun bullone, possiamo prendere in considerazione la vista da X di una semiflangia. Su di essa agiranno le forze sui bulloni e le forze sulle flangia derivanti dalle formule del paragrafo 1.

Ipotizzando 3 bulloni uno in alto e due in basso rispetto al loro baricentro, senza momento esterno e col solo precarico la semiflangia ha i seguenti carichi

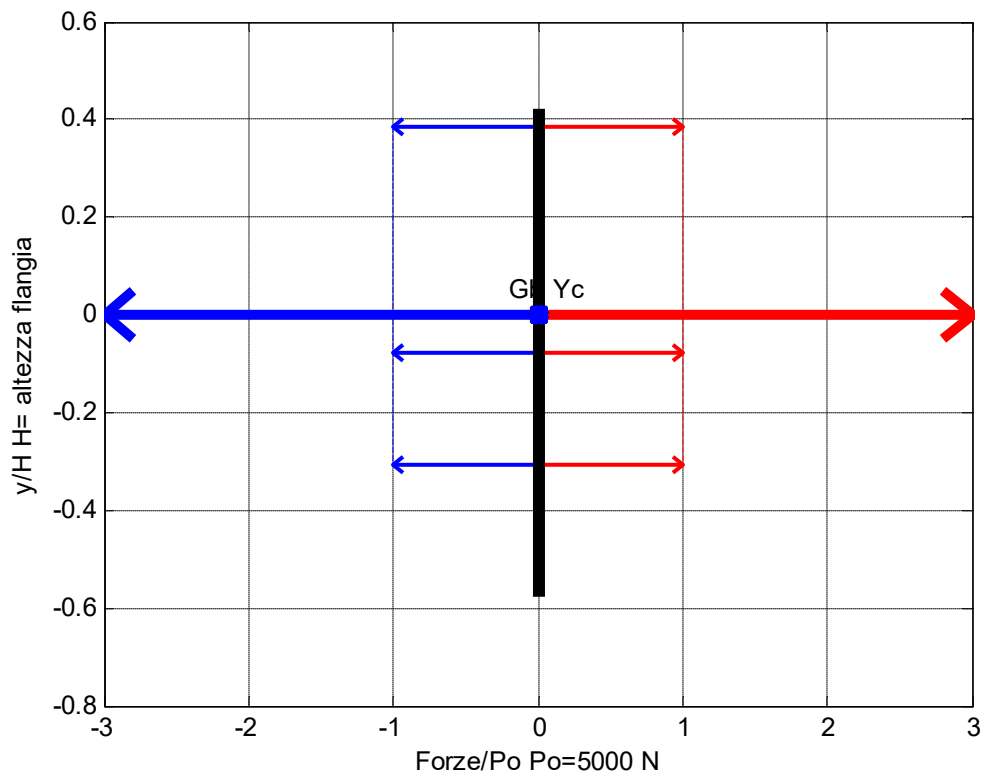


Figura 7 forze su semiflancia solo precarico

I tre bulloni sono ugualmente caricati da precarico (blu) ed esercitano sulla semiflancia forze verso sinistra. L'altra semiflancia esercita forze verso destra (rosse). La risultante delle forze dei bulloni e dell'altra semiflancia sono applicate al baricentro dei bulloni e si elidono a vicenda (blu e rosse in grassetto).

Applicando un momento M positivo il bullone superiore si carica e quelli inferiori si scaricano. Le forze trasmesse dall'altra semiflancia hanno comportamento opposto e si ha la situazione seguente, supponendo C coincidente col baricentro

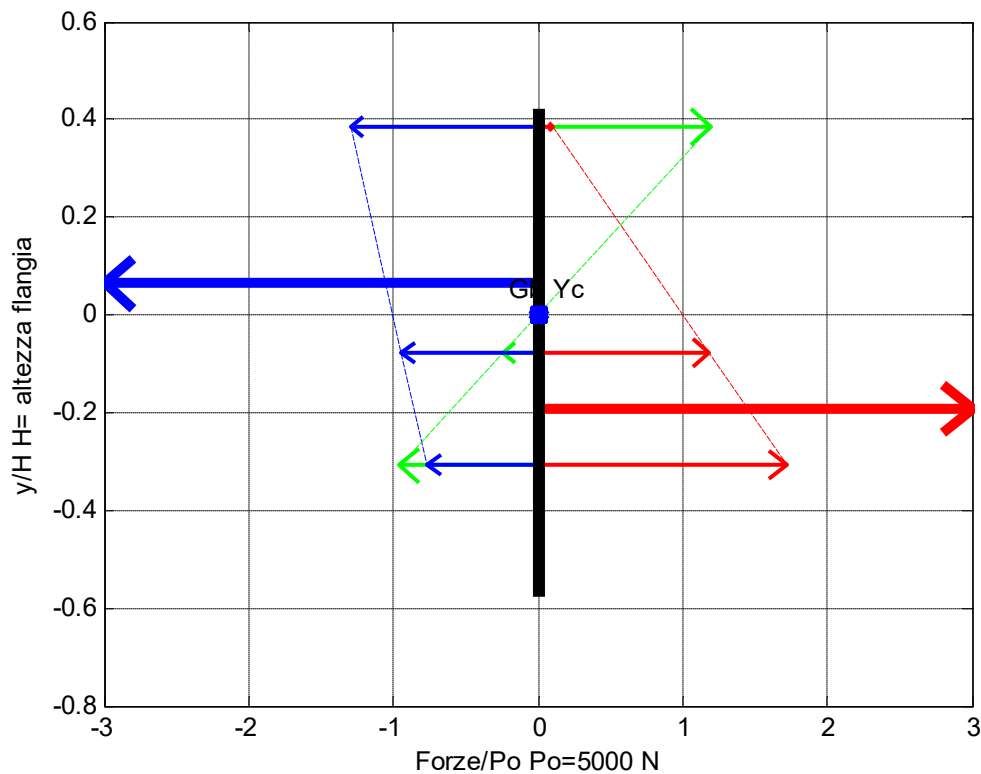


Figura 8 Bulloni precaricati, Momento esterno e rotazione baricentrica

In verde sono indicate le forze esterne. In blu linea fine le forze sui bulloni, in rosso linea fine le forze esercitate dall'altra semiflangia. In blu linea grossa la risultante delle forze sui bulloni applicata al loro centro di spinta ed in rosso linea grossa la risultante delle forze dell'altra semiflangia applicate al loro centro di spinta. Per centro di spinta si intende il punto rispetto al quale un sistema di forze ha momento risultante nullo. Quindi, complessivamente, la semiflangia è sollecitata verso sinistra dalla risultante dei bulloni e verso destra dalla risultante delle forze dell'altra semiflangia, che complessivamente danno una coppia pari al momento esterno.

Questo è un buon modo per sintetizzare quello che succede.

Nel caso che la rotazione avvenga attorno ad un asse C non baricentrico, spostato verso il basso, si ha la situazione seguente

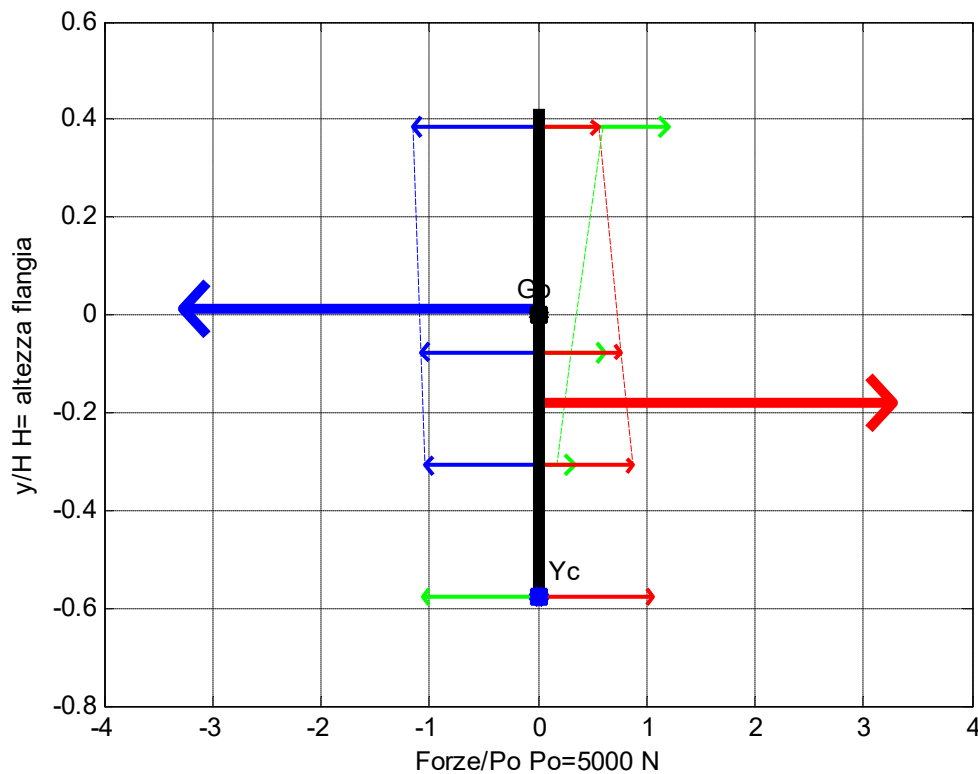


Figura 9 Bulloni precaricati, Momento esterno e rotazione attorno all'estremo inferiore della flangia

Le forze esterne verdi hanno ora anche la forza F_c che viene equilibrata da una uguale spinta fornita dall'altra semiflanguia. Le forze sui bulloni e sulla flangia si modificano in conseguenza ed allo stesso modo si modificano le risultanti ed i centri di spinta.

Tutto questo può essere ricavato analiticamente

$$R_{Fb} = -nP_o + \frac{F_c}{1 + \alpha} \quad G_{Fb} = \frac{nP_o y_c - \frac{M}{1 + \alpha}}{R_{Fb}} + y_c$$

$$R_{Fc} = nP_o - \frac{F_c}{1 + \alpha} = -R_{Fb} \quad G_{Fc} = \frac{-nP_o y_c - \frac{\alpha}{1 + \alpha} M}{R_{Fc}} + y_c$$

Le formule ci danno le risultanti delle forze sui bulloni, il loro centro di spinta e le analoghe per le forze dell'altra semiflanguia.

Nel caso che i bulloni non siano precaricati le forze sui bulloni sono semplicemente le forze F_i cambiate di segno e l'unica forza proveniente dall'altra semiflanguia è la F_c cambiata di segno. Si ha il seguente risultato con C corrispondente a quello della figura precedente

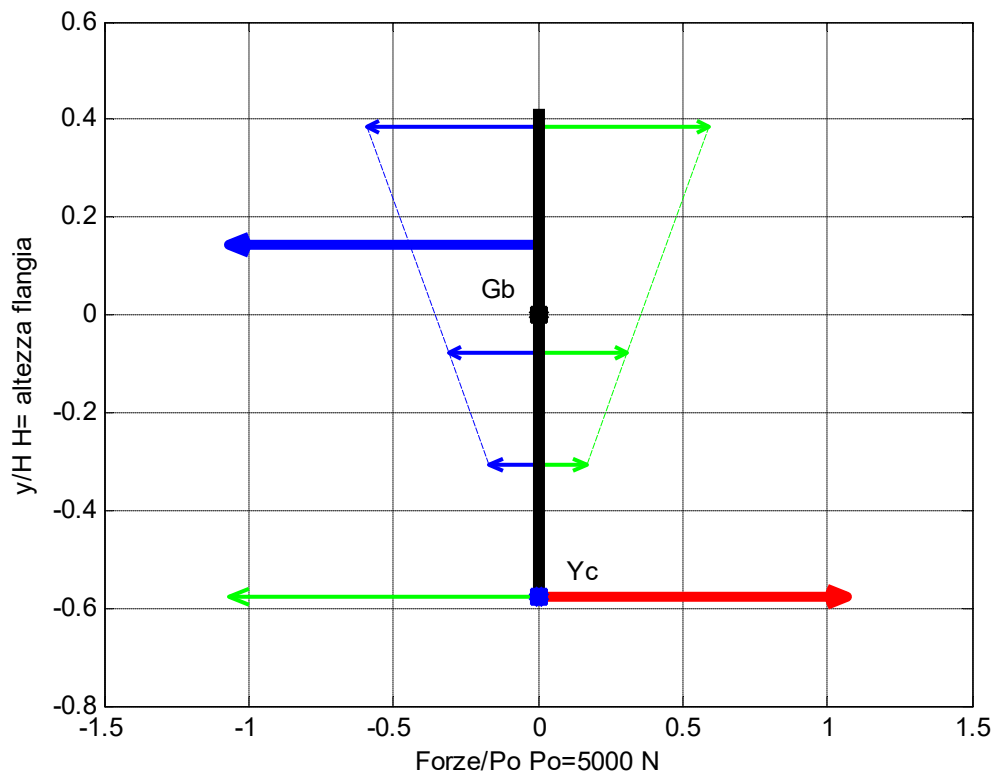


Figura 10 Bulloni senza precarico, Momento esterno e rotazione attorno all'estremo inferiore della flangia

Con questi semplici strumenti analitici possiamo passare ad analizzare casi reali.

3 ALCUNI CASI REALI

3.1 Flangia di unione semialberi

Vogliamo unire, con un collegamento flangiato a 12 bulloni, 2 semialberi, con il collegamento che deve resistere quanto l'albero omogeneo a momento flettente. La soluzione della figura seguente è quella già ottimizzata che funziona bene ed è costituita da due flange molto rigide tanto da costringerci a scavare in esse le sedi dei bulloni.

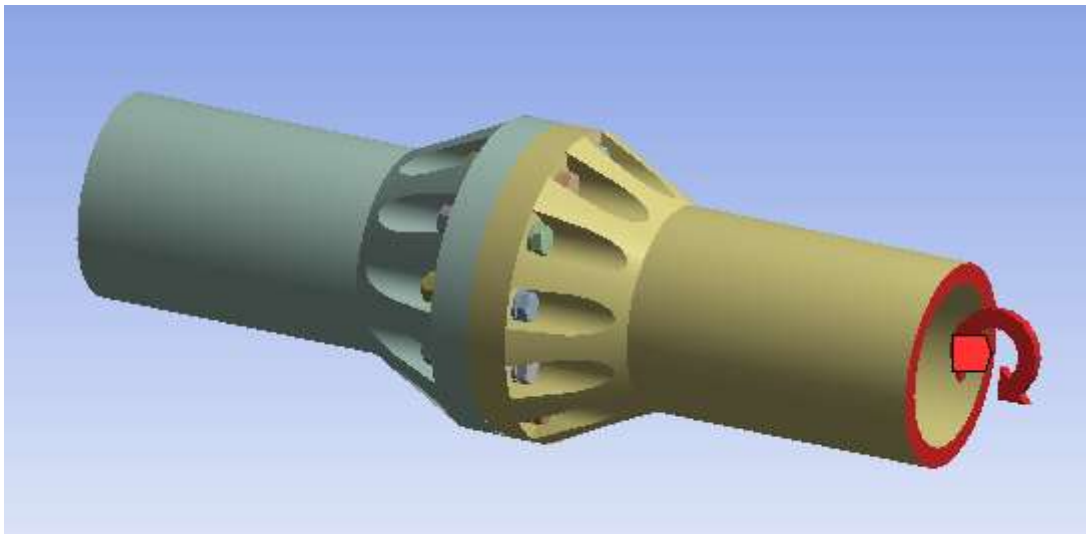


Figura 11 Unione flangiata di 2 semialberi ottimizzata

Si è imposto un adeguato precarico ai bulloni e poi, per passi il momento esterno, registrando le forze su ciascun bullone e su una semiflancia in analogia alle figure precedenti. I risultati FEM sono confrontati con quelli analitici secondo le formule precedenti.

Al solito i risultati globali FEM, sebbene suggestivi, non ci forniscono alcun dato di sintesi utile. La figura mostra la Von Mises al massimo momento applicato

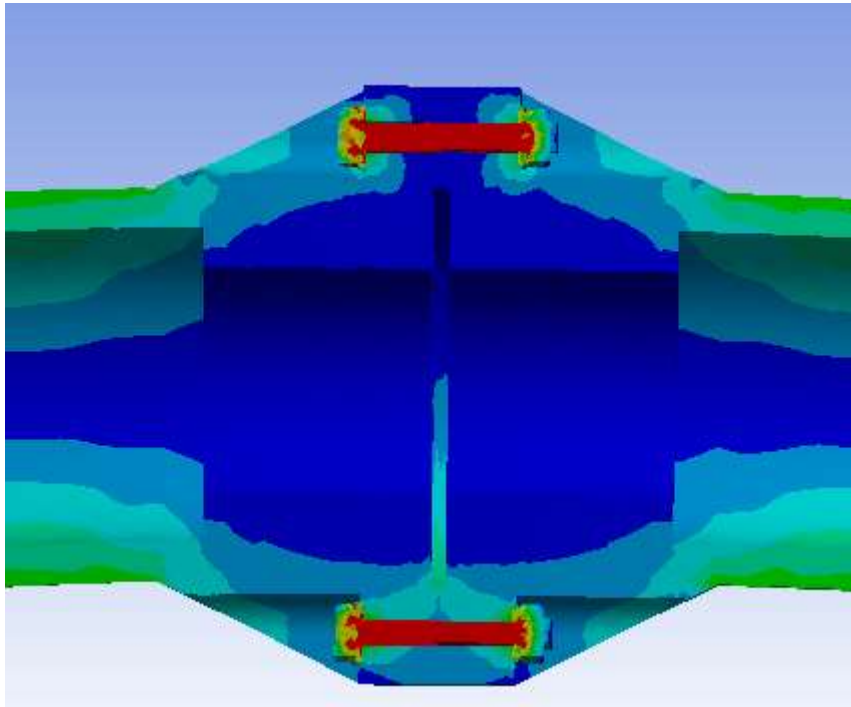


Figura 12 Von Mises al massimo momento applicato

I risultati delle forze sui bulloni e forze sulla semiflancia elaborati con Matlab e confrontati con quelli teorici sono, ai vari passi analisi

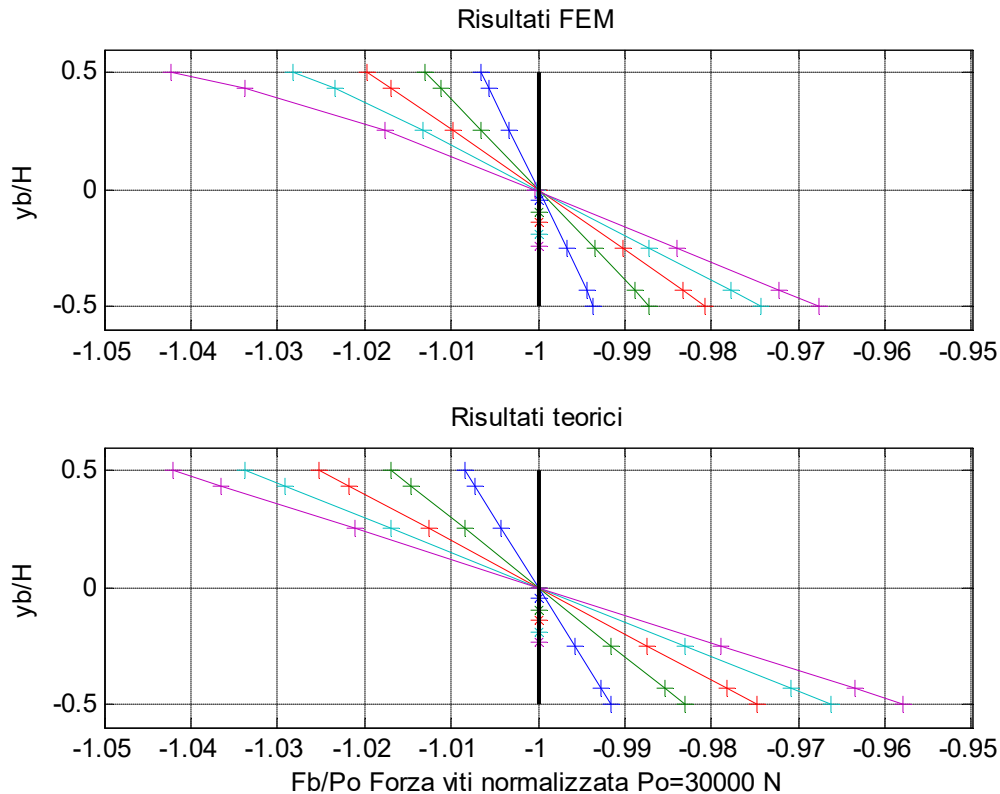


Figura 13 Risultati globali FEM e teorici

Sono riportate le forze sui singoli bulloni e, sulla semiflancia (nera) le posizioni del centro spinta delle forze sulla flangia che si abbassa via via che aumenta il momento in coerenza con la figura 8.

Si vede come il collegamento si comporta inequivocabilmente secondo lo schema di moto rigido attorno al baricentro dei bulloni. I risultati FEM mostrano una debole non linearità al massimo momento, perché il collegamento dei bulloni superiori tende ad avere un distacco un po' eccessivo. Nel complesso comunque i risultati ci confermano che possiamo tranquillamente usare il semplice schema teorico senza bisogno di usare il FEM.

Possiamo utilizzare un semplice modello FEM lineare di una semiflancia per valutare la rigidità della flangia realizzata, come in figura

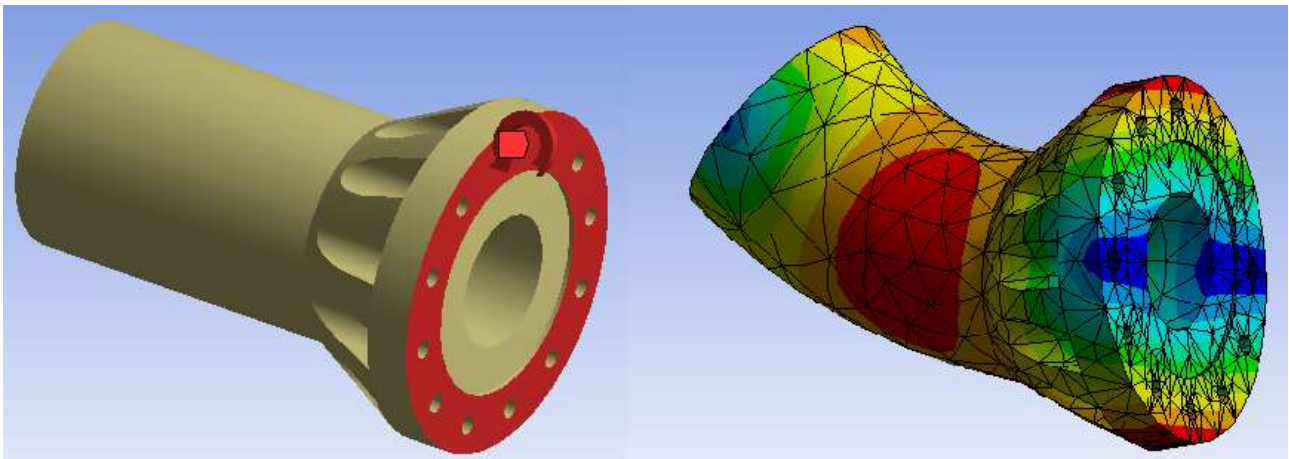


Figura 14 Valutazione bontà della rigidità della flangia

Applicando il momento all'area di contatto tra le flange e valutando la deformazione conseguente si verifica se gli spostamenti sono lineari (a farfalla) così come le forze che, applicate all'area, generano il momento. La linearità degli spostamenti comprova la bontà dello schema di congruenza-legame alla base dell'ipotesi di moto rigido attorno all'asse baricentrico dei bulloni.

Se avessimo usato una flangia più debole avremmo ottenuto il risultato seguente

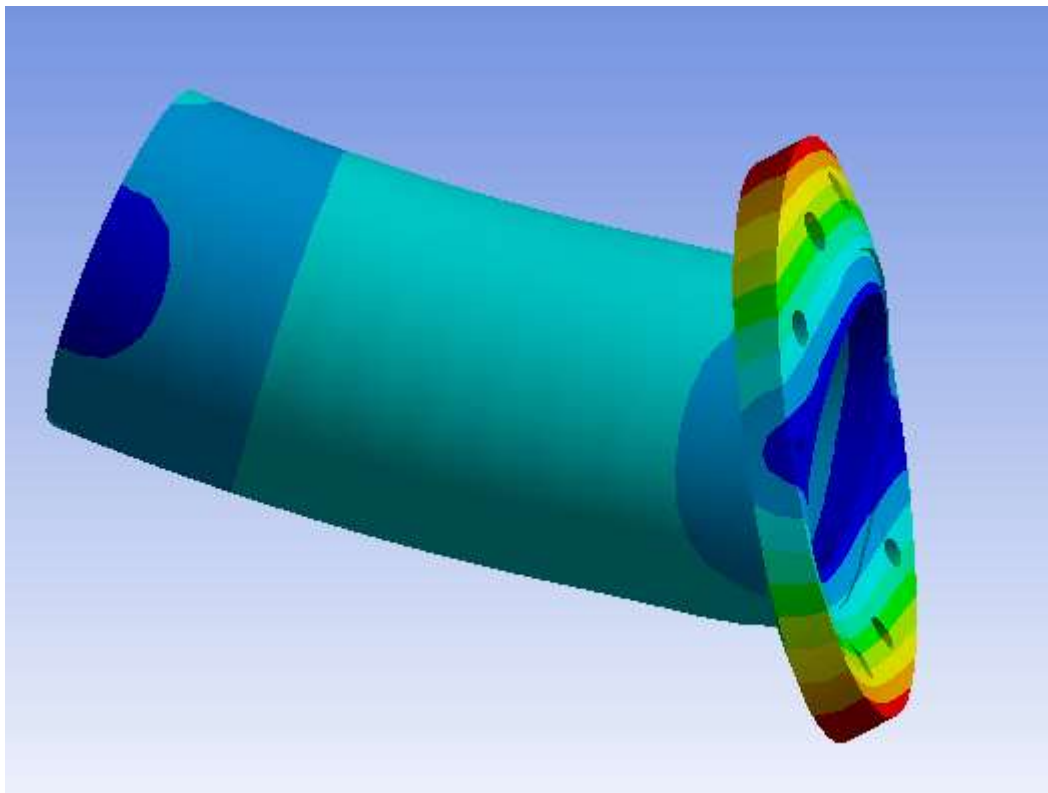


Figura 15 Flangia debole con deformazione fuori piano

E' evidente che questa flangia non è rigida e la superficie a contatto non si deforma in maniera piana. Ciò renderà non valide le ipotesi di congruenza-legame relative al moto rigido piano.

Se analizziamo questo collegamento otteniamo i seguenti risultati al massimo momento

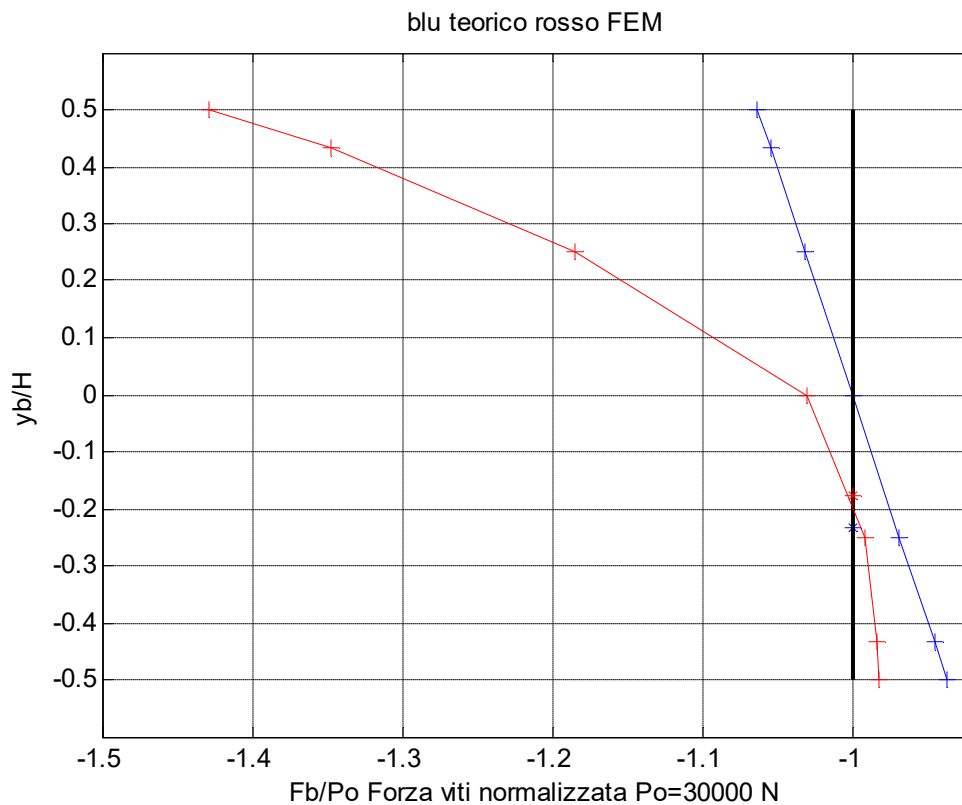


Figura 16 Flangia debole al massimo momento FEM e teorico

E' palese la non validità della teoria del moto rigido ed il carico fortemente sottostimato sul bullone più caricato. L'analisi FEM mostra questo comportamento del collegamento del bullone superiore al massimo carico

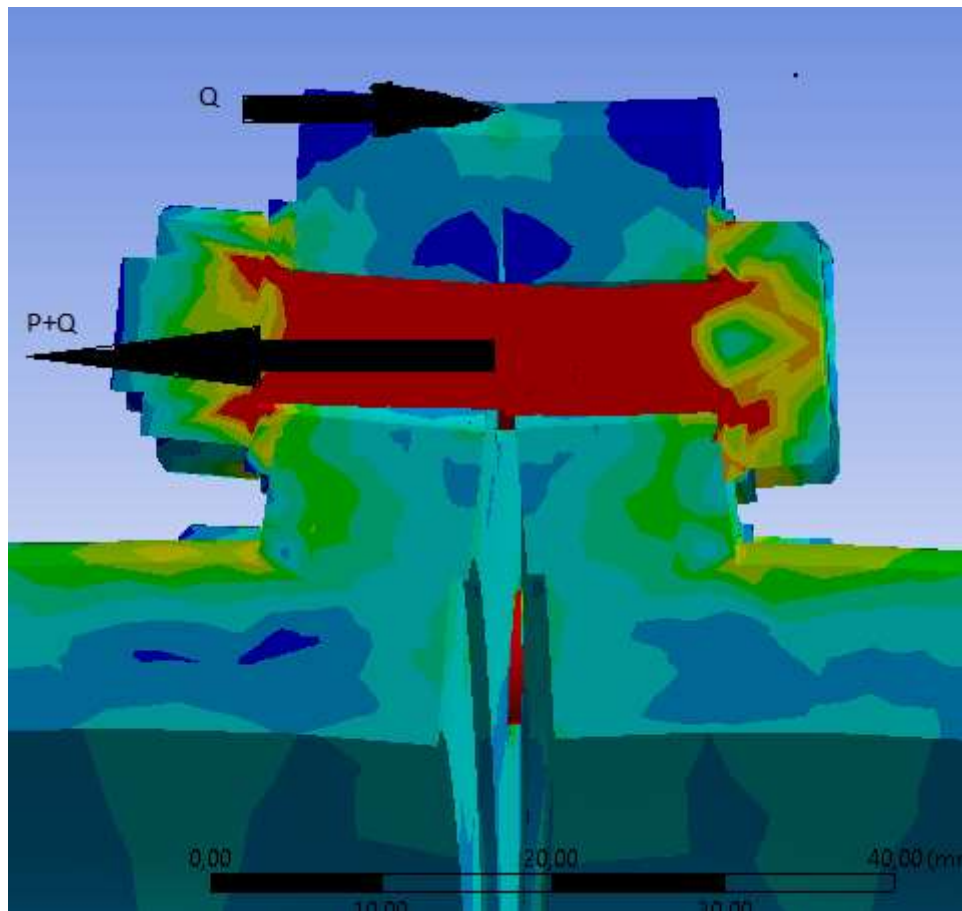


Figura 17 Flangia debole - Effetto leva

Tale comportamento è tipico delle flange deformabili nelle quali si crea una zona di appoggio con una reazione Q che va ad incrementare la forza necessaria sul bullone. La nocività di questo effetto leva è chiaramente riscontrata nei valori di Figura 16 in cui la forza sul bullone superiore è incrementata del 40% rispetto al valore previsto.

Le buone regole di progettazione dettano le proporzioni delle flange opportunamente rigide. La semplice analisi FEM lineare della semiflangia è un ottimo metodo per verificarne la bontà, mentre, una volta che la flangia è correttamente proporzionata, l'analisi FEM completa non lineare dei collegamenti è del tutto inutile, se non per confermare la validità delle ipotesi teoriche di moto rigido.

3.2 Mensola rigida

Questo caso è tratto da un esercizio del testo Juvinal. L'elemento collegato da 3 bulloni per realizzarne un incastro è una mensola con sezione ad U rigidissima.

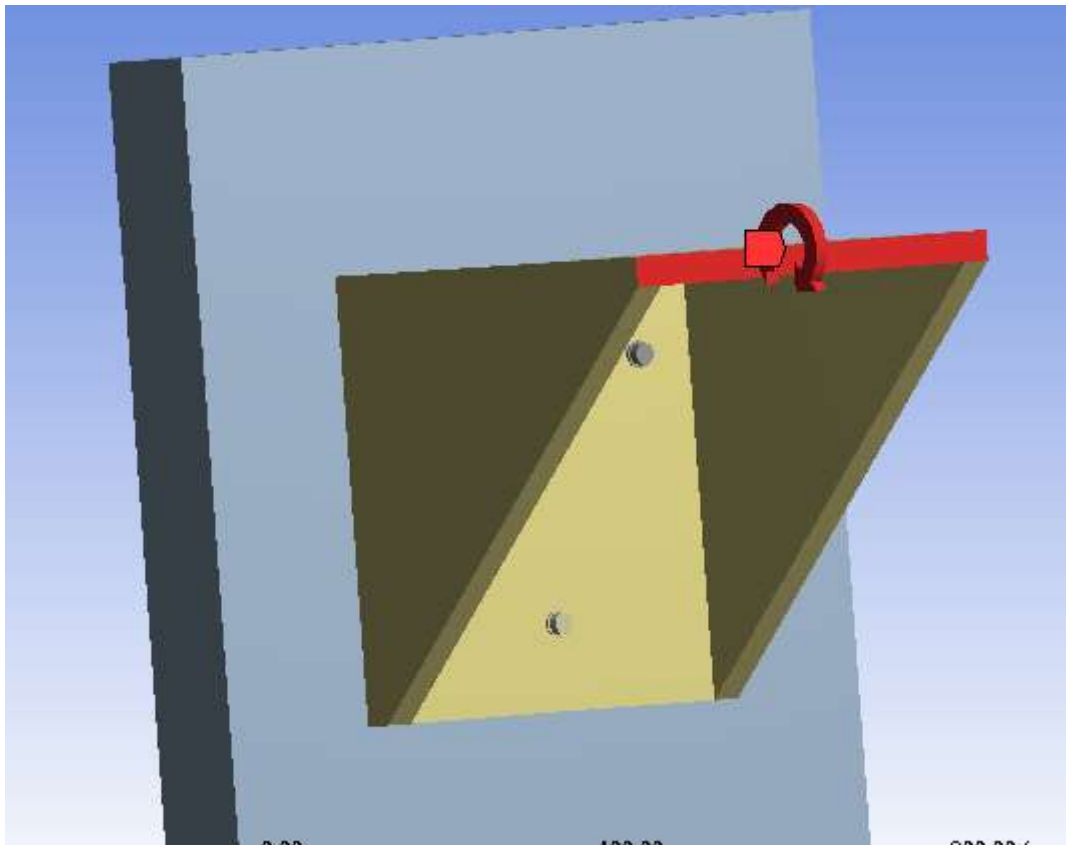


Figura 18 Mensola rigida ad U incastrata con tre bulloni

Al massimo carico i bulloni superiori hanno questo comportamento

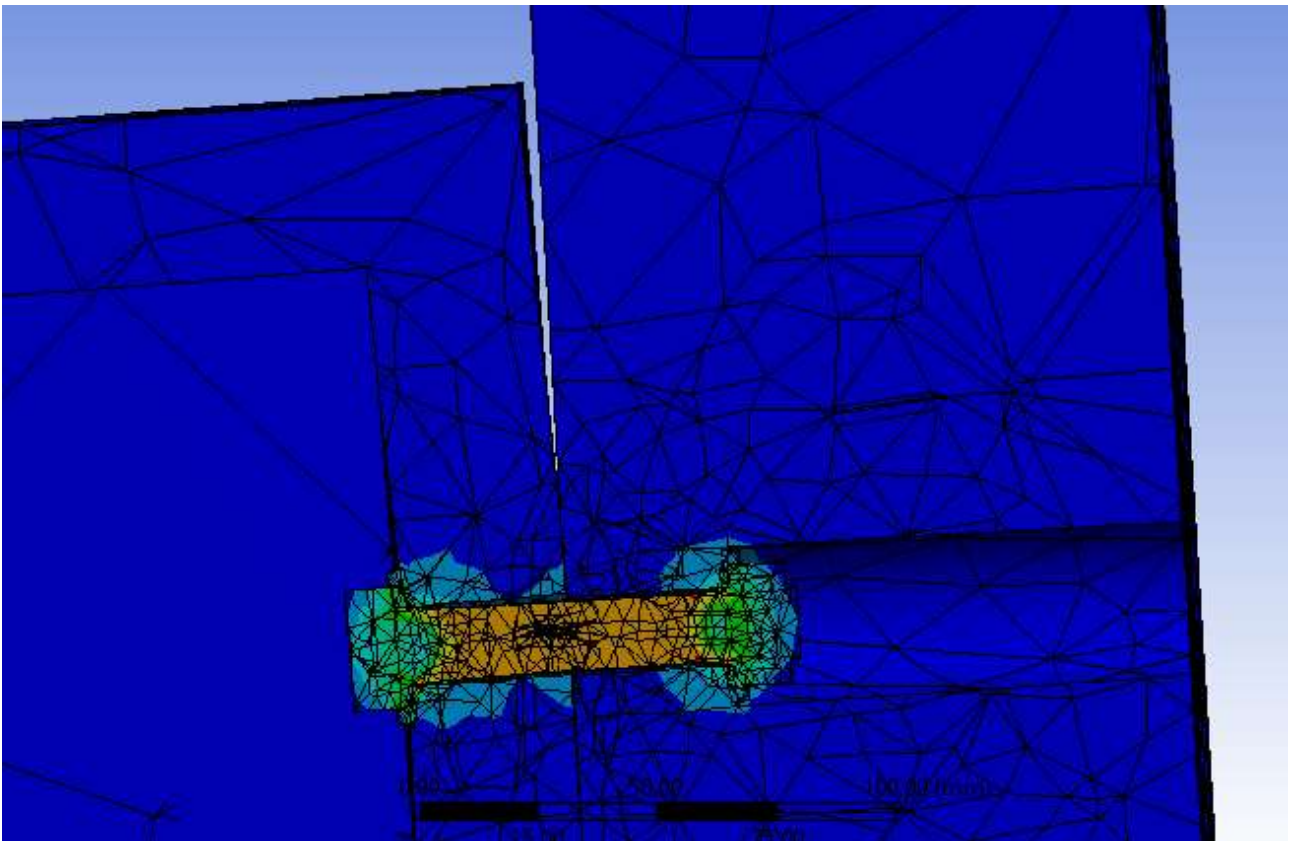


Figura 19 Bullone superiore al massimo carico

Si vede che il piano dei bulloni si distacca.

Le pressioni sulla flangia al massimo carico mostrano zone di contatto ai lati bassi a causa della rigidità della mensola che tende a ruotare attorno alla zona bassa della flangia

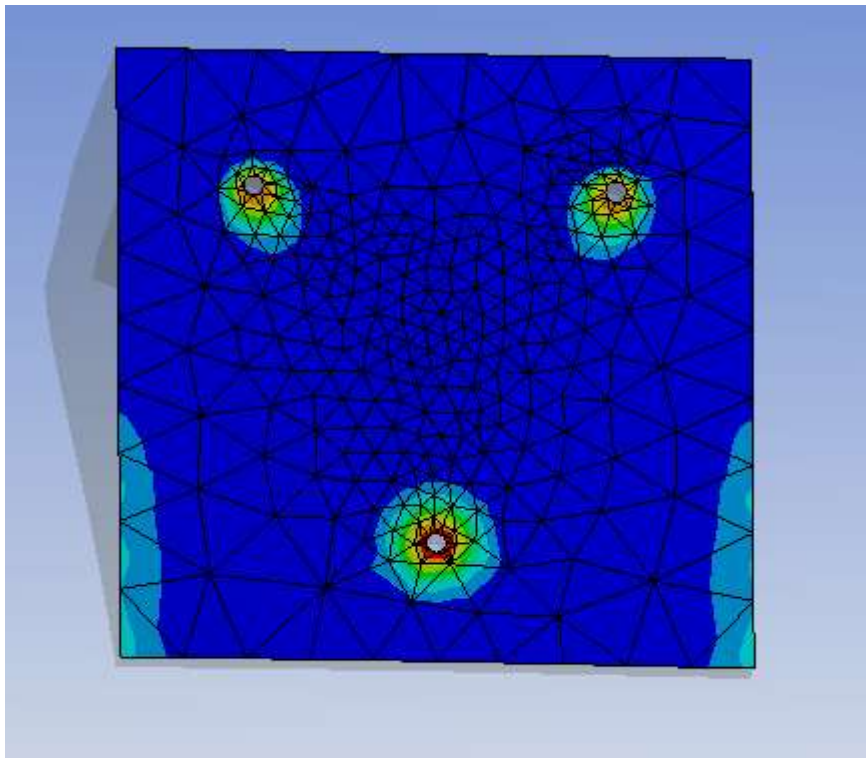


Figura 20 Pressioni di contatto sulla flangia al massimo carico

I risultati FEM globali elaborati con Matlab mostrano che i bulloni non variano significativamente il carico rispetto al loro precarico

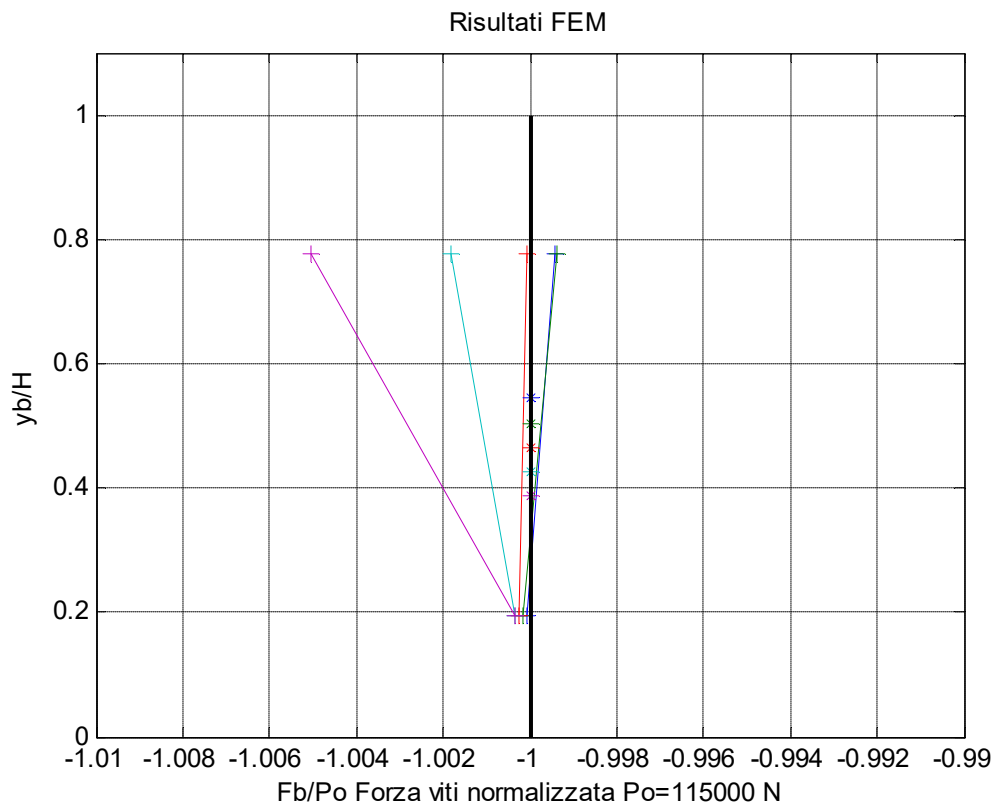


Figura 21 Mensola carichi sui bulloni FEM

La mensola è talmente grande e rigida lateralmente che il piano dei bulloni non ruota rigidamente. Bastano piccolissime ed insignificanti variazioni di carico sui bulloni per produrre il momento esterno da equilibrare. Coi collegamenti precaricati non è necessario pertanto neanche fare il calcolo.

Se i bulloni non fossero precaricati e si ammettesse un moto rigido con C all'estremo inferiore della flangia si otterrebbero i seguenti risultati

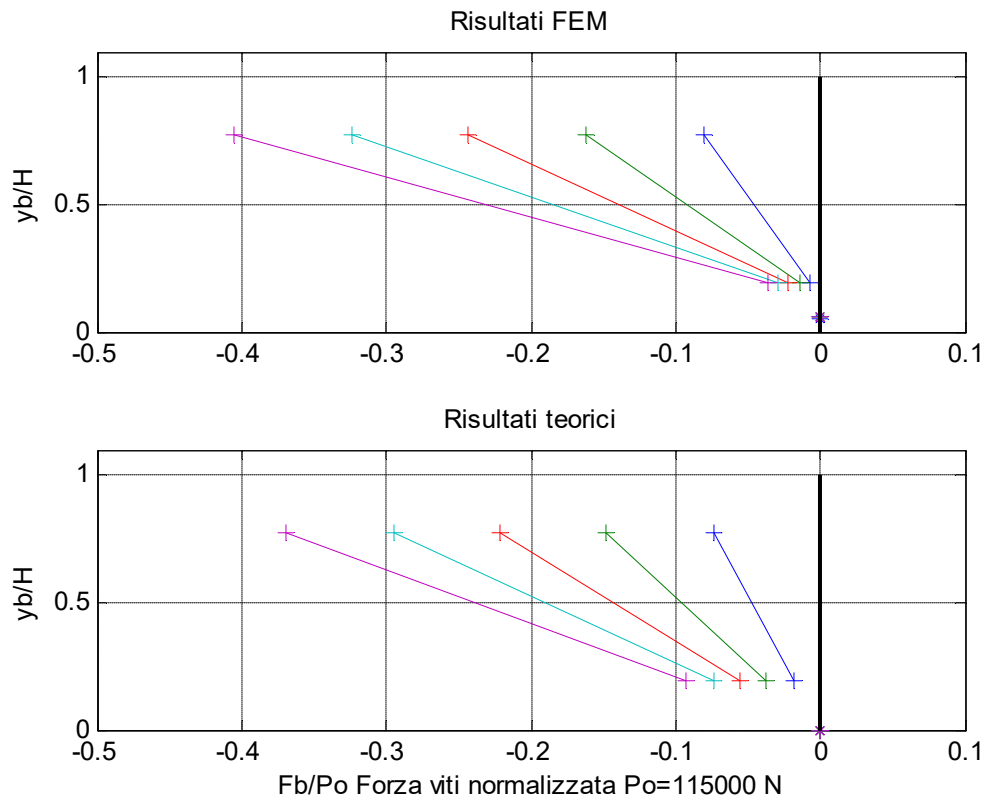


Figura 22 Mensola con bulloni senza precarico

Pur essendoci qualche differenza tra il teorico ed il FEM resta il fatto che un carico sul bullone pari a circa il 40% del precarico che sopporta sarebbe sufficiente ad equilibrare il momento. Quindi dimensionare il bullone col solo precarico è ancora una volta sufficiente.

In ogni caso il dimensionamento dei bulloni precaricati con l'ipotesi di moto rigido attorno al baricentro sarebbe ancora conservativa e quindi lecita da eseguire con tranquillità.

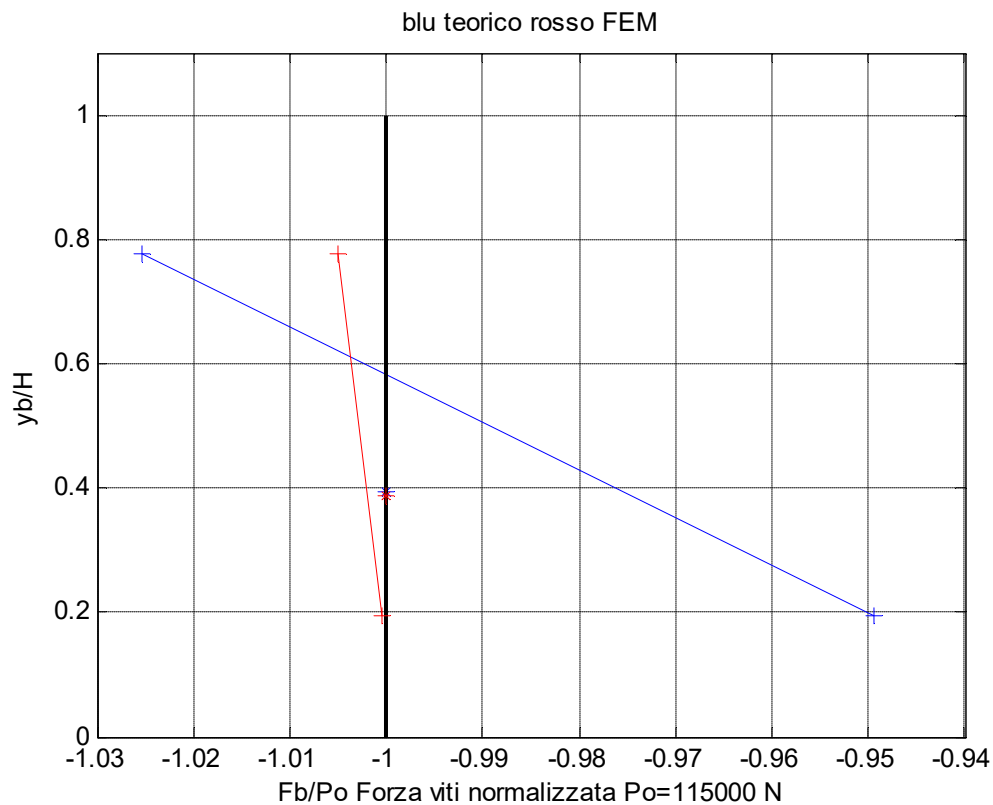


Figura 23 Mensola al massimo carico con moto rigido attorno al baricentro

Anche in questa ipotesi teorica, comunque, la variazione di carico sui bulloni è comunque piccolissima.

3.3 Nodo di collegamento colonna-traversa

L'ultimo esempio riguarda una tipologia di collegamento strutturale tra travi HPE (colonna) ed IPE (traversa) tipico delle strutture in acciaio.

Il collegamento è rappresentato in figura

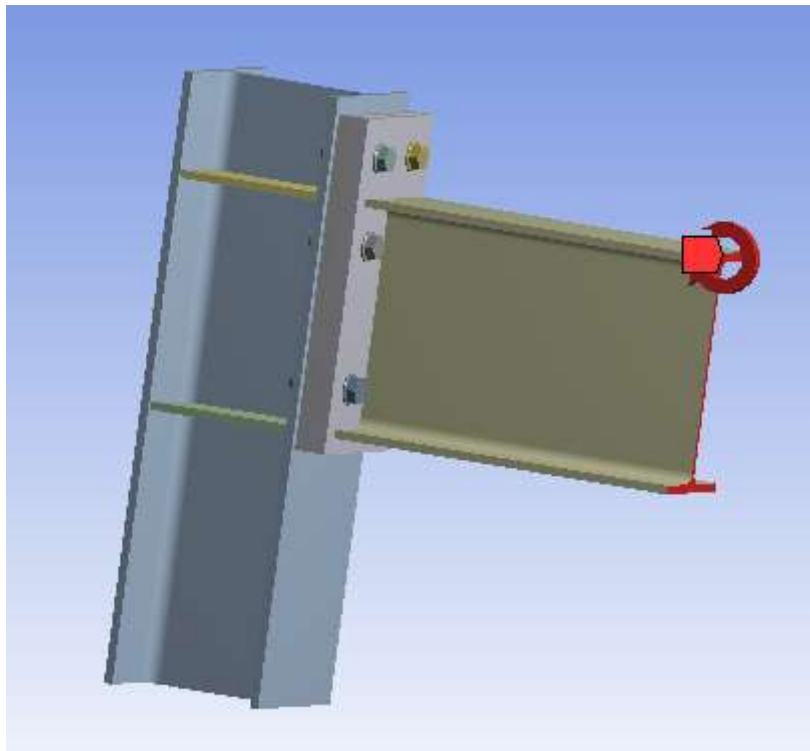


Figura 24 Nodo di collegamento colonna-traversa

La colonna ha una flangia, così come la traversa. Il collegamento è con tre file di bulloni, due a cavallo dell'ala superiore della traversa ed uno appena sopra l'ala inferiore. Il collegamento è adatto a trasmettere il momento col verso come in figura, ovvero un momento che tende l'ala superiore della traversa.

Tale tipologia di collegamenti è completamente normata (Appendice J dell'Eurocodice 3). Il calcolo dei bulloni ed il dimensionamento della flangia sono guidati passo passo mediante verifiche puntuali agli stati limite ultimi secondo diversi meccanismi di collasso. Non è il caso qui di affrontare queste questioni per le quali si rimanda all'Eurocodice per gli approfondimenti del caso.

Il giunto in questione ha misure e carichi reali di un giunto ben dimensionato, quindi i risultati sono del tutto realistici.

Giova osservare che la colonna ha i fazzoletti di irrigidimento per la corretta trasmissione del taglio da parte delle ali della traversa. In pratica la colonna riceve un taglio da lei uscente in corrispondenza dell'ala superiore della traversa ed un taglio uguale ed opposto in corrispondenza dell'ala inferiore della traversa. Tale taglio, applicato su tutta l'ala della colonna dalla flangia, viene ripartito uniformemente dai fazzoletti (essenziali) di rinforzo. A di là verità ci sarebbe bisogno di un ulteriore fazzoletto di rinforzo in diagonale per abbozzare una struttura reticolare che scarichi l'anima della colonna.

A parte questo la natura degli elementi collegati è tale da generare necessariamente variazioni di rigidità difficilmente recuperabili da una semiflanguia a meno di non farla di spessore esagerato. Quindi si parte dal presupposto che la flangia non possa essere rigida e si considera ciascuna fila di bulloni e/o più file insieme di bulloni indipendenti dalle altre.

In prima approssimazione si può pensare che le due file di bulloni superiori (4 bulloni) prendano la forza trasmessa dall'ala superiore della traversa. Che la fila inferiore di bulloni trasmetta solo il taglio che nel nostro caso è nullo e che durante la sollecitazione la semiflanguia della traversa faccia perno sull'ala inferiore della traversa. Questo è un buon modo di dimensionare in larga massima questa flangia. La figura al massimo carico con le viti precaricate e non precaricate conferma questa ipotesi

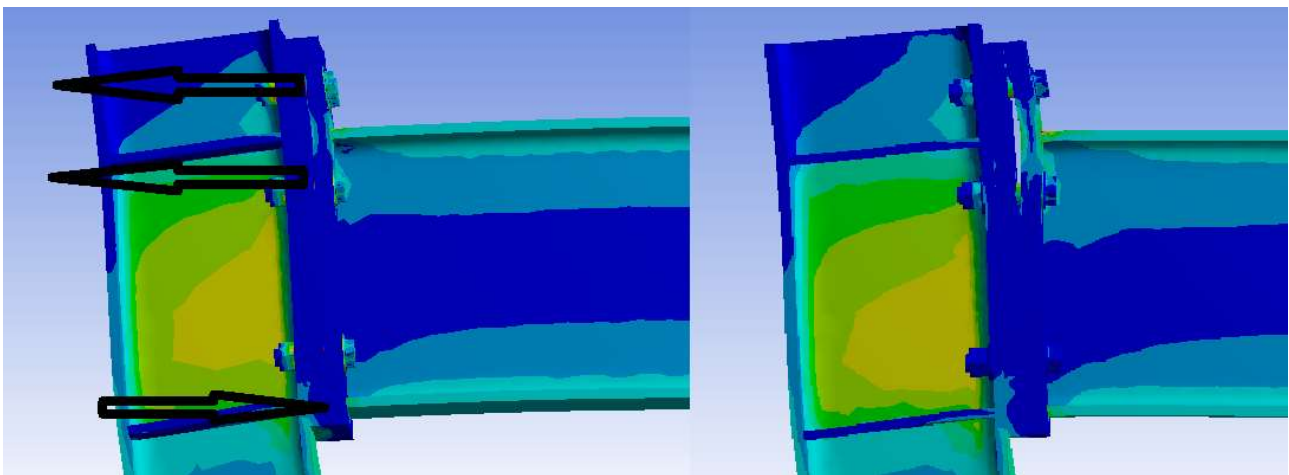


Figura 25 Tensioni con viti precaricate (SX) e non precaricate (DX)

Lo stato di tensione sugli elementi strutturali è analogo sia col precarico che in sua assenza e denota la tipologia di trasmissione dei carichi tipica di una flangia non rigida.

L'ipotesi di viti precaricate e rotazione rigida attorno al baricentro è chiaramente non rispettata

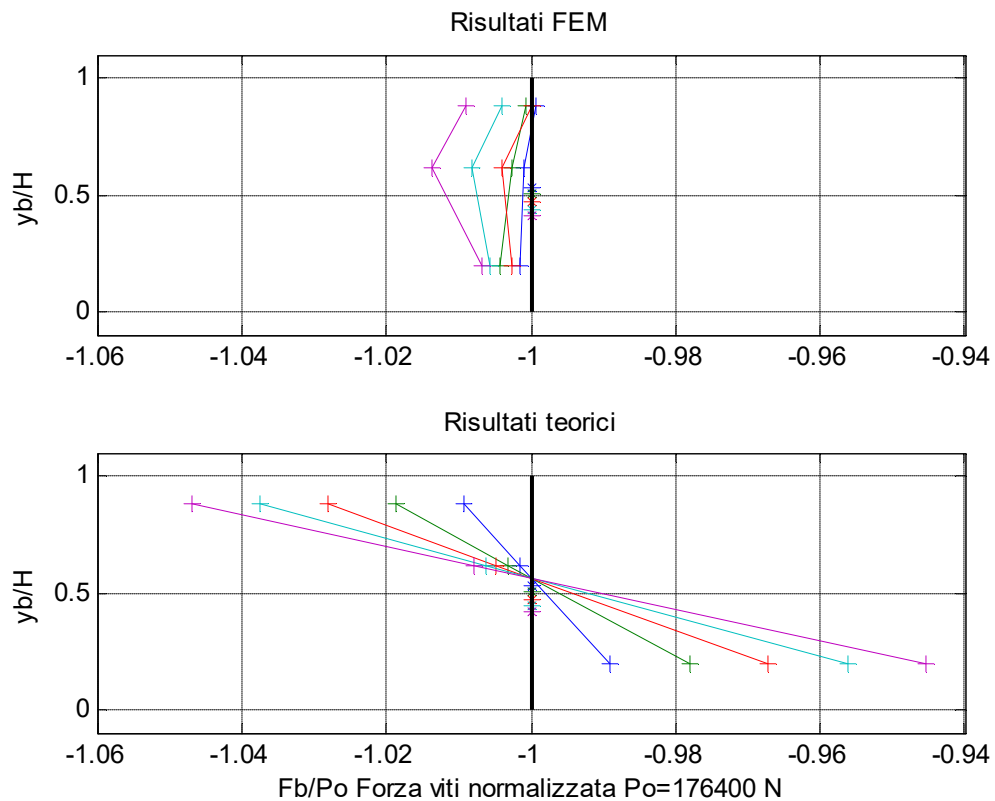


Figura 26 Viti precaricate e rotazione attorno al baricentro delle viti

Nella realtà le viti si caricano molto poco, ma il calcolo teorico continua ad essere conservativo.

Se ipotizziamo una rotazione rigida attorno all'ala inferiore della traversa si ottiene ancora un calcolo conservativo, ma più vicino alla realtà.

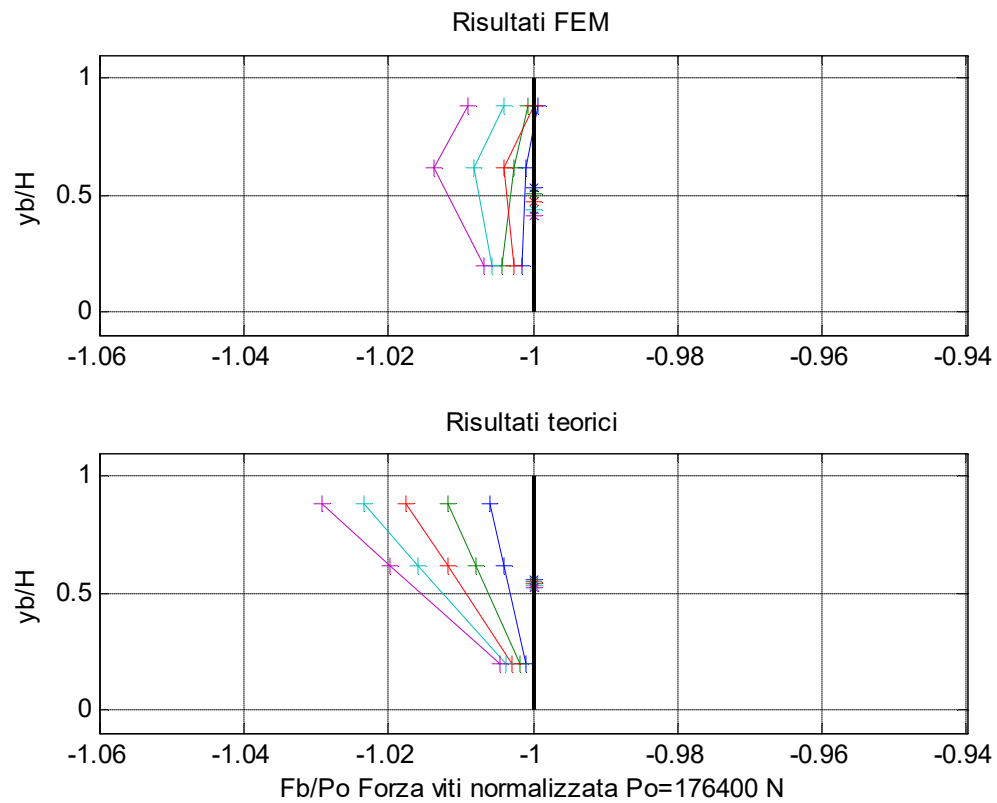


Figura 27 Viti precaricate e rotazione attorno all'ala inferiore della traversa

I risultati senza precarico sulle viti e rotazione attorno all'ala inferiore della traversa è il seguente

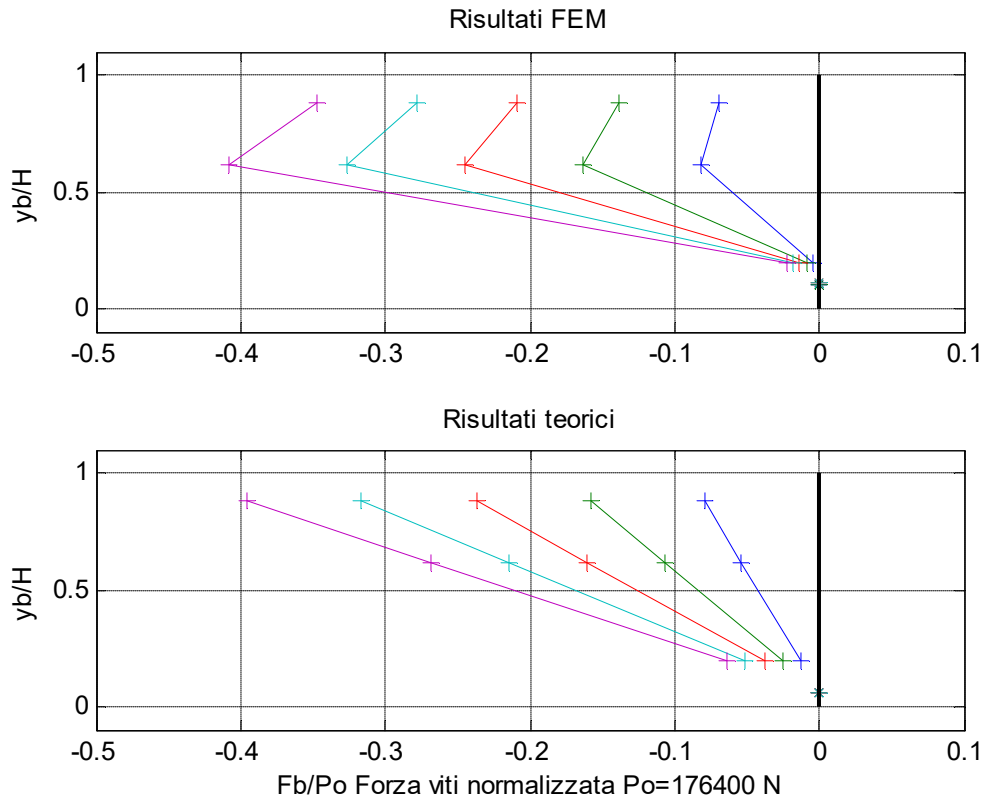


Figura 28 Viti senza precarico e rotazione attorno all'ala inferiore della traversa

Questa volta i risultati sono abbastanza buoni, fermo restando che le file di bulloni superiori si comportano nella realtà quasi come 4 bulloni unici.

In ogni caso il calcolo teorico coi bulloni precaricati è comunque cautelativo, sia che si consideri (erroneamente) la rotazione attorno al baricentro che più realisticamente attorno all'ala inferiore della traversa.

La rigidità della flangia sulla traversa, soggetta al momento, ci dimostra che non è sufficientemente rigida e non consente l'applicazione della teoria e ci conferma anche che i bulloni superiori devono prendersi meno carico del previsto, perché si trovano sulla parte flessibile della flangia.

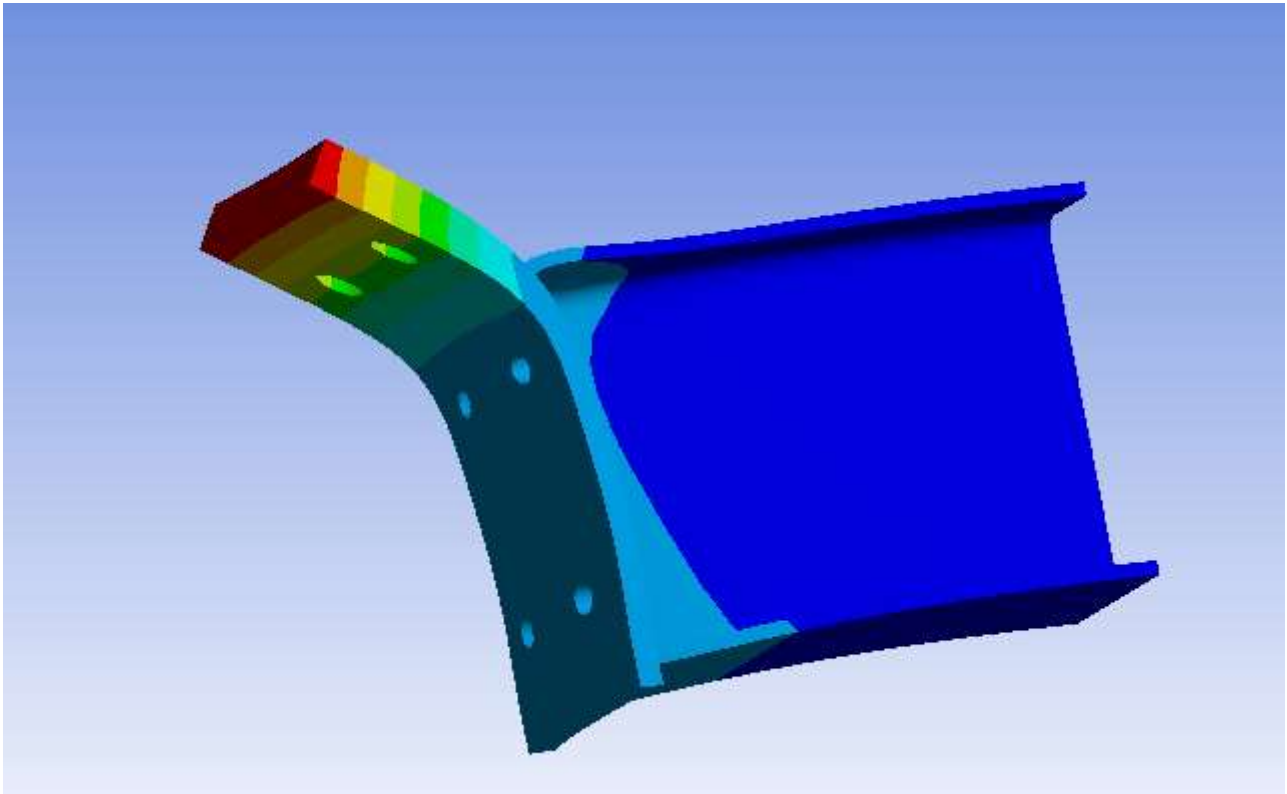


Figura 29 Prova di rigidità della flangia sulla traversa

Questa volta però non possiamo procedere ad una ottimizzazione della rigidità, perché condurrebbe ad una flangia di spessore esagerato. D'altra parte la normativa consiglia un calcolo che tiene conto dell'effettivo comportamento della flangia e quindi non ci sono problemi.

In ogni caso, con poche considerazioni di buon senso, siamo arrivati anche noi, coi nostri mezzi, a poter verificare questo collegamento.

4 CONCLUSIONI

Gli esempi mostrati possono essere indicativi di come possiamo comportarci nel dimensionamento di collegamenti bullonati o con viti soggetti a carico flettente su un asse appartenente al loro piano.

I semplici metodi analitici possono essere validi in corrispondenza di un effettivo comportamento rigido delle flange collegate. Sono in ogni caso, in genere, cautelativi.

L'analisi FEM consente di fare utili considerazioni qualitative su come si trasmettono i carichi. L'analisi FEM quantitativa è invece generalmente inutile, a meno che non si provveda ad un oculato post-processing dei risultati che non è banale e richiede una certa dimestichezza col metodo numerico.

In questa sede abbiamo usato il FEM per validare i risultati, più che altro.



Nonostante la notevole potenza dei metodi di calcolo numerico, il loro utilizzo non è sempre utile e, per l'utente inesperto, spesso genera una sensazione spiacevole di non sapere cosa dedurre dai risultati.

E' sempre necessario che un progettista 'immagini' e segua il percorso delle forze nei corpi, tenendo presente che queste si intensificano nelle zone di maggior rigidità. In questo senso, semplici analisi FEM lineari sui singoli pezzi o su insiemi semplificati possono aiutare a capire.