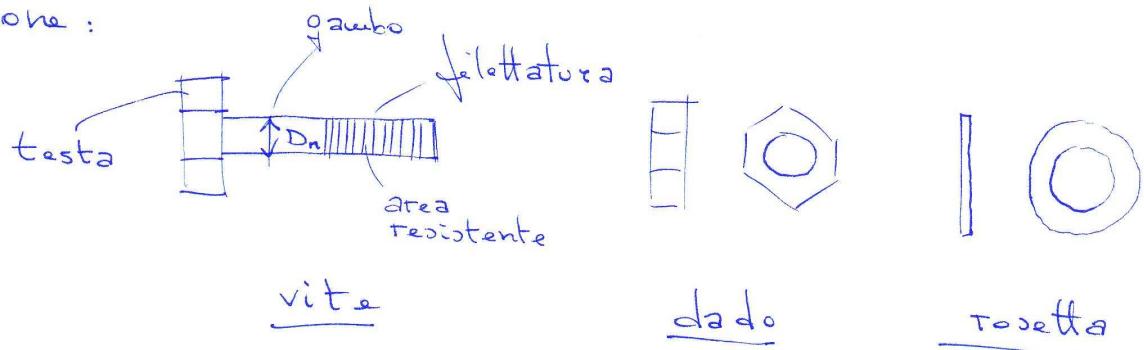


Unioni bullonate

Essendo gli elementi metallici prefabbricati e portati sul luogo di costruzione come elementi discreti, un'enorme importanza hanno le modalità di collegamento sia degli elementi metallici fra di loro, che di elementi metallici con elementi in calcestruzzo o muratura. Fino a qualche decennio fa tale operazione di collegamento veniva eseguita mediante chiodatura o rivettatura, oggi, invece, queste tecnologie sono praticamente scomparse e sostituite dalle unioni bullonate e saldate.

Cominceremo con l'occuparsi delle prime, partendo dall'individuazione delle parti che costituiscono un bullone:



Le componenti fondamentali di un bullone sono 3: vite (il cui diametro è generalmente compreso fra i 12 e i 30 mm), il dado (in genere esagonale) e

la rosetta (di forma circolare), gli altri due
in genere avvitati sulla parte filettata per bloccare
il bullone. Specifiche normative prevedono disposi-
zione per il corretto abbinnamento fra vite e rosetta.
Il singolo bullone soggetto ad una tensione forza
ha una capacità resistente che viene sempre
valutata con riferimento alla componente parallela
al fusto (bullone teso/compresso) e alla compo-
nente perpendicolare al fusto (bullone soggetto a
taglio). Rispetto a tali due componenti la norma-
tiva fornisce dei limiti basati su modelli sem-
plificati di comportamento dell'unione che sono
quanto più aderenti possibile alle risultanze speri-
mentali. Le ipotesi che generalmente vengono adot-
tate nel calcolo sono:

- trascurabilità della deformazione della
lamiera sotto carico;
- inflessione nulla del fusto;
- assenza di concentrazione di tensioni
nella prossimità dei fori.

Tali ipotesi permettono di assumere, come faremo
noi da qui in poi, le tensioni riferimenti (σ)

distribuite sul fusto e sui fori.

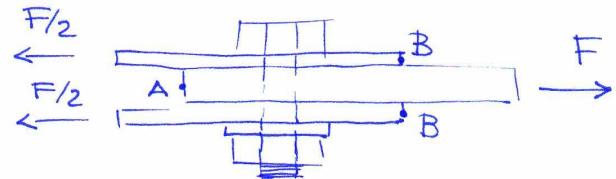
Unioni a taglio

Si parla di unione a taglio, quando la forza

risultante applicata sul fusto è in direzione ad

esso perpendicolare, ovvero è parallela alla direzioni delle barre collegate. Un'unione bullonata

presenta due modalità per trasferire le azioni normali al fusto: per attrito e per taglio. Nel primo caso l'azione è trasferita per mezzo dell'attrito che si sviluppa tra i piatti a contatto i quali sono premuti l'uno contro l'altro. Nel secondo caso, il bullone presenta la superficie laterale del fusto a contatto con quella del foro. Si ammette in questo caso che la tensione tangenziale si ripartisca uniformemente e da essa derivi uno sforzo tangenziale medio su ogni bullone il cui valore dipende da se la parte filettata risulti minore o uguale a contatto con i piatti:



(3)

$$\tau = \frac{V}{n_f \cdot A_{res}}$$

area della
sezione del
bullone
nella parte
filettata

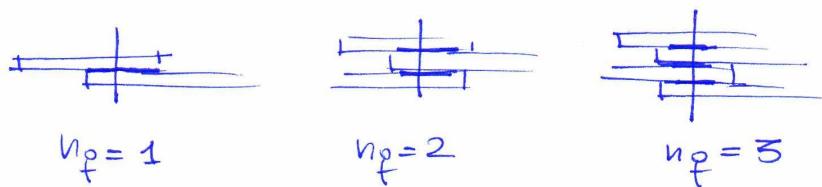
parte filettata a
contatto

$$\tau = \frac{V}{n_f \cdot A}$$

area
nominales

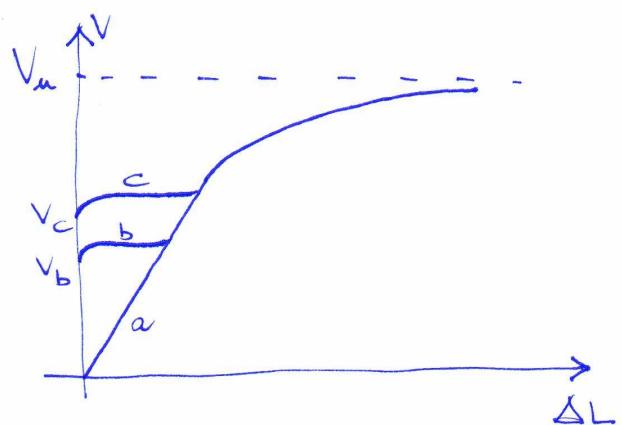
parte filettata
non a contatto

Nelle espressioni sopra riportate V indica il taglio sul bullone, mentre n_f è il numero di sezioni resistenti, ovvero dei piatti in cui le lamiere sono a contatto:



Un'unione bullonata soggetta a taglio collastra quando o si rompe il bullone a taglio, oppure si rompe la lamiera.

Il comportamento di una unione a taglio dipende dalla presenza o meno dell'azione di serraggio che permette di attivare l'attrito statico. Si faccia



riferimento alla figura di figura
precedente e si supponga aumentando l'azione
totale di taglio F_T di misurare lo "slittamento"
tra i punti A e B

(4)

Se il bullone non è serrato il suo comportamento è quello della curva "a", il legame fra la forza e lo scorrimento è praticamente lineare fino a quando o il bullone o la piastra non superano il proprio limite elastico. Da quel momento in poi il comportamento è di tipo plastico fino al raggiungimento del carico ultimo del bullone.

Vn. Se invece il bullone è serrato una certa quota del carico V nella fase iniziale è portato mediante attrito senza alcuno scorrimento. Tutto ciò fino al superamento della soglia di attrito statico, oltre la quale le due superfici a contatto scorrono subitaneamente e l'azione viene trasferita per taglio. Le curve "b" e "c" si riferiscono a due unioni serrate, in cui il livello di serraggio è maggiore nel caso della curva "c".

In talore unioni, per motivi legati agli effetti degli scorrimenti (eccessive vibrazioni e/o deformazioni, nascita di tensioni in strutture iperstatiche), si vuole che i bulloni lavorino per solo attrito. In tal caso è necessario limitare l'azione sul bullone al di sotto di un valore limite. (5)

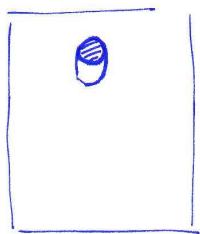
perciò:

$$f_{\text{lim,at}} = \frac{n_p (\mu \cdot N_s)}{f_f} \rightarrow \begin{array}{l} \text{azione uniaxiale} \\ \text{dovuta al} \\ \text{taglio} \end{array}$$

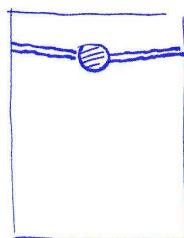
coefficiente
di attrito
statico tra
le superfici
in contatto.

coefficiente di
sicurezza facciale
rispetto allo slittamento

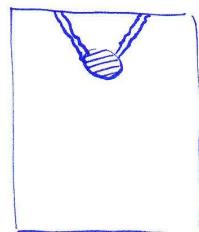
Come detto oltre che per rottura del bullone una unione a taglio può collassare anche per rottura della lamiera. Quest'ultima può avvenire secondo tre modalità differenti:



sfollamento



rottura a
trazione



rottura a
taglio

La resistenza della lamiera è, come ovvio, la minore associata a questi 3 meccanismi di rottura, e nulla garantisce che la lamiera cada in crisi dopo il bullone, per cui è assolutamente necessario valutare e rivedicare anche la lamiera rispetto ad ognuna delle tre modalità.

(6)

cominciamo con la resistenza al rifollamento, rispetto alla quale si ammette una distribuzione convenzionale uniforme delle tensioni di contatto tra bullone e piatto.

E' possibile così valutare una tensione detta di

rifallamento:

$$\sigma_{\text{rif}} = \frac{V}{t(d)} - \begin{array}{l} \text{diametro} \\ \text{del foro} \end{array}$$

spessore
della piastra



isometria
del foro

Come resistenza rispetto al rifollamento si considera quella del materiale dell'unione nella sezione più debole, amplificata per tenere in conto come la tensione massima raggiungibile risulti essere maggiore di quella monodimensionale in virtù della presenza di azioni di confinamento (stato di tensione pluriassiale) ovvero di plasticizzazioni locali.

Nel caso della verifica a trazione, si ammette una distribuzione uniforme degli sforzi nella sezione interessata. In particolare la tensione di calcolo può essere valutata come:

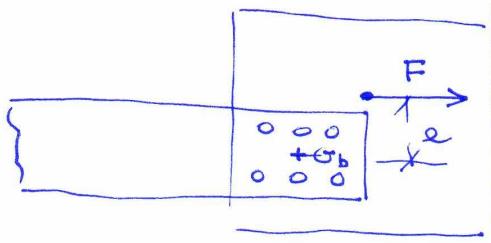
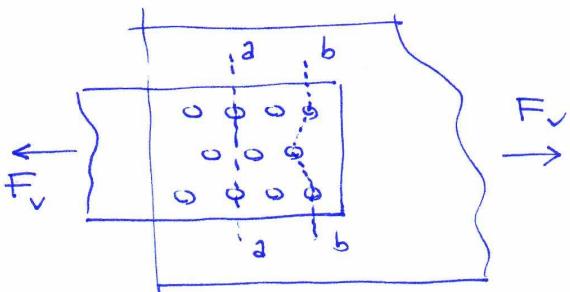
$$\sigma = \frac{F_V}{A_n} \quad \begin{array}{l} \text{area netta} \\ (\text{dai ...}) \end{array}$$

(4)

Nel caso di più file di bulloni l'individuazione della sezione più debole non è diretta, si utilizza la regola, a vantaggio di sicurezza, di far corrispondere la sezione più debole al minimo percorso parallelo per uno o più fori.

Nella figura a lato la sezione più debole è quella caratterizzata dall'area

minima lungo i percorsi a-a e b-b. Una possibilità



legata alla presenza di carichi non attesi ovvero a situazioni tecnologiche particolari, è quella in

cui l'azione parallela si risulti essere eccentrica nei confronti del baricentro della bullonatura (tale baricentro si calcola come quello di una sezione generica composta dall'unione delle aree dei singoli bulloni). La distanza fra il baricentro G_b e l'azione F è detto eccentricità "e". In questo caso l'unione non è soggetta (8)

a solo taglio, bensì a taglio e torsione, con taglio pari ad F e momento torcente pari a $M_t = F \cdot e$. I bulloni, dunque, saranno sollecitati da due caratteristiche, ognuna di essi dovrà fornire un'azione V dovuta al taglio F e una V_M dovuta al momento torcente. Come si salutano tali contributi? Con modelli molto semplici:

- il taglio viene ripartito in egual misura su ogni piano di contatto tra le piastre, il che equivale a dire che l'azione si divide in egual misura fra tutti i bulloni.

$$V = F \frac{1}{n_{\text{bul}}} \rightarrow \text{numero bulloni}$$

- l'azione torcente provoca una forza di taglio nel generico bullone "i-esimo" che è direttamente proporzionale alla distanza di tale bullone dal baricentro della bullonatura ed ha direzione normale alla congiungente fra bullone e il baricentro.

Supponendo che la risultante complessiva delle azioni in tutti i bulloni sia zero e che il momento rispetto al baricentro

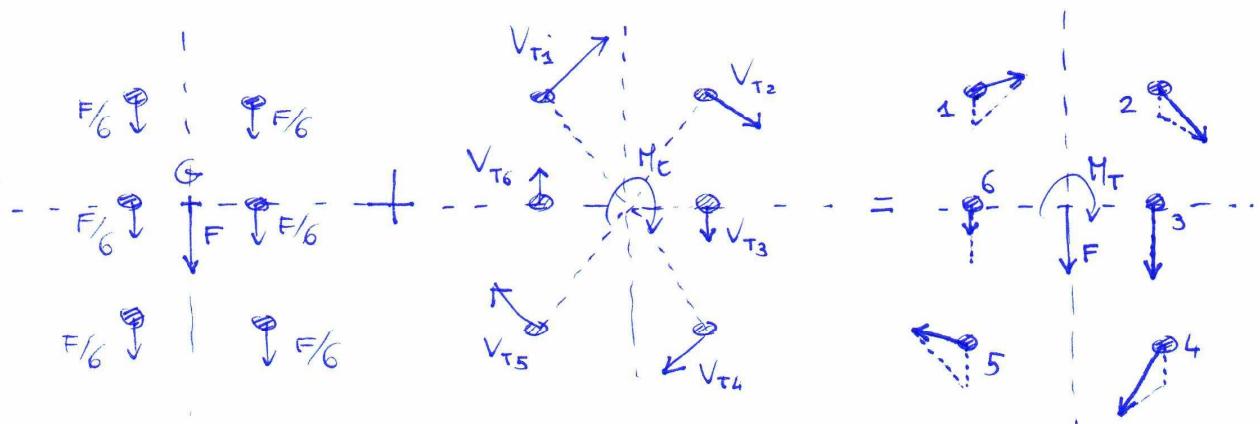
(9)

sia proprio M_t , si ottiene:

$$V_{Ti} = \frac{M_t \cdot z_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n z_i^2}$$

d'azione complessiva in ogni bullone si saluterà sommando i due contributi con la regola del parallelogramma. La verifica ovviamente andrà effettuata per il bullone che avrebbe l'azione di modulo maggiore.

Il grafico sotto riportato può chiarire le idee sulla ripartizione in una unione soggetta a taglio e torsione:

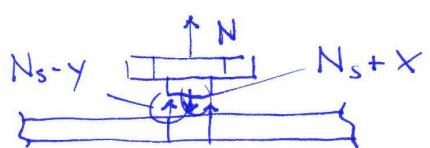
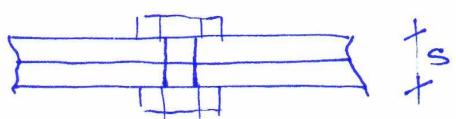


Per come si compongono le azioni nel caso in figura è plausibile pensare che i bulloni per i quali si dovrà effettuare la verifica sono quelli indicati con i numeri 2 e 4.

Unioni a trazione

Una unione bullonata è sollecitata a trazione se è soggetta ad una forza la cui direzione è perpendicolare alla direzione delle piastre collegate.

Consideriamo una unione elementare di due piastre con un singolo bullone e vediamo cosa accade aumentando progressivamente il carico N di trazione.



Prima dell'applicazione del carico N la testa del bullone e il dado trasferiscono alle lamiere lo sforzo dovuto al serraggio N_s . In questa situazione il gancio del

bullone è teso (perché vorrebbe contrarsi ma non può far il vincolo offerto dalle lamiere) mentre le lamiere sono compresse. L'applicazione di una N di trazione si ripartisce in parte sul bullone che diventa ancora più teso $N_s + x$, e in parte sulle lamiere riducendo il livello di compressione $N_s - y$.

Ovviamente per l'equilibrio $x + y = N$, per trovare l'entità di x e y c'è bisogno di effettuare

considerazioni sulla congruenza tra la deformazione del bullone e quella della lamiera:

$$\Delta b = \frac{x \cdot s}{(E \cdot A)_b} \quad \text{allungamento del bullone}$$

$$\Delta l = \frac{y \cdot s}{(E \cdot A)_e} \quad \text{allungamento della lamiera}$$

Dovevo essere $\Delta b = \Delta l \rightarrow \frac{\Delta b}{\Delta l} = 1$

sviluppando e considerando che lo sforzo è unico, come lo è anche E modulo elastico del materiale, si ottiene:

$$\frac{\Delta b}{\Delta l} = \frac{x \cdot A_l}{y \cdot A_b} = 1$$

A_b è l'area
del bullone, il
problema è la
valutazione dell'

area di lamiera interessata dal fenomeno.

Sperimentalmente si è verificato come risulti:

$$\frac{A_l}{A_b} = 10 \rightarrow 10 \cdot \frac{x}{y} = 1 \rightarrow y = 10x$$

Insieme alla condizione di equilibrio $x + y = N$
la relazione trovata permette di dividere lo
sforzo di trazione fra bullone e lamiera, in

particolare:

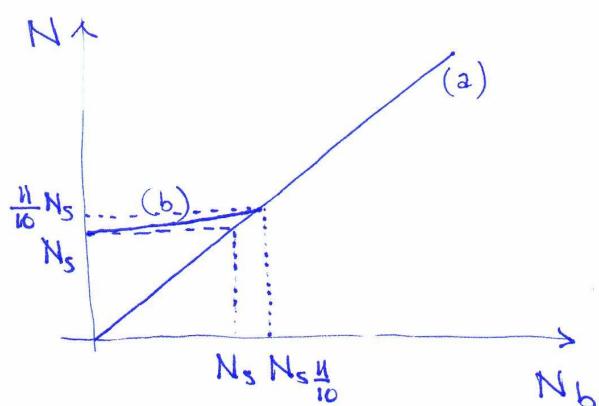
$$x = \frac{N}{11} \quad , \quad y = \frac{10}{11} N$$

Queste relazioni ci dicono che fino a quando le lamiere restano in contatto, ovvero risulta valida l'equazione di congruenza, la forza che va sul bullone è pari ad $1/11$ di quella totale. Nel momento, invece, in cui le lamiere si separano, il carico di trazione viene interamente assorbito dal bullone. Ma quando si separano le lamiere? Quando lo sforzo di compressione su di esse s'è spento nullo, ovvero:

$$N_s - Y \leq 0$$

cioè

$$Y \geq N_s \rightarrow \frac{10}{11} N \geq N_s \rightarrow N \geq \frac{11}{10} N_s$$



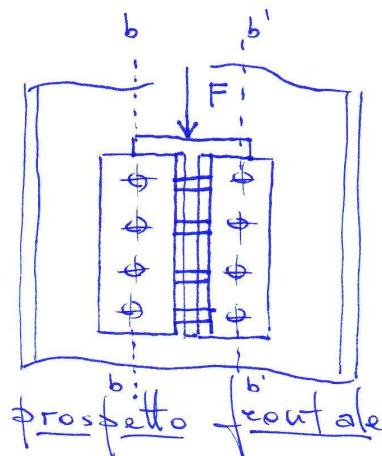
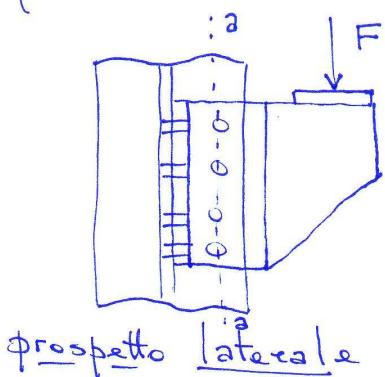
Nel grafico a lato è così rappresentato l'andamento del carico sul bullone nel caso di ausa di serraggio (a) e presenza di serraggio (b).

(13)

Unioni a trazione e taglio

Nel caso di azione combinata le sollecitazioni saranno determinate separatamente per i casi elementari e poi combinate attraverso formule di interazione che ne consentono la specifica. In quest'ultima fase la resistenza va opportunamente ridotta per tener presente della contemporaneità dei due diversi tipi di sollecitazione.

Un caso rilevante che va analizzato è quello in cui l'azione di taglio non appartiene al piano dell'unione, determinando così la nascita di una sollecitazione flettente sul collegamento. Si consideri il caso di un appoggio realizzato con un profilo a T opportunamente tagliato e collegato ad un profilo IPE verticale a mezzo di due squadrette ad L

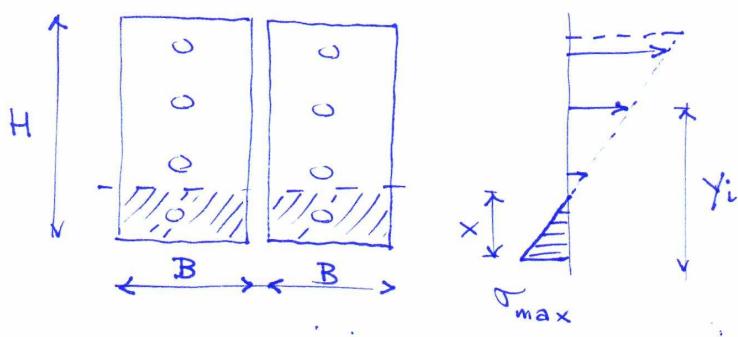


Per i punti del piano a-a lo stato tensionale è quello di taglio e torsione di cui abbiamo già discusso. Per quelli invece dei piani b-b e b'-b' la sollecitazione è di taglio e flessione.

(sl4)

L'effetto di quest'ultima puo' valutarsi assumendo la planarita' della sezione ed assumendo una distribuzione lineare delle deformazioni. Il problema e ora valutare la posizione dell'asse intorno cui la sezione ruota (asse neutro). Indicando con "x" la distanza fra tale asse e la fibra avente la tensione minima e con "y_i" la distanza fra il medesimo asse e il bordo inferiore della piastra, l'asse neutro si puo' valutare considerando i bulloni che lavorano

a trazione e la piastra, invece, solo a compressione. Scrivendo l'equazione di equilibrio



alla trazione
in cui si sfrutta
la linearita' delle
tensioni, si ha:

$$\frac{1}{2} [2B \cdot x^2] - \sum_{i=1}^n A_{b,i} (y_i - x) = 0$$

Questa e' una equazione di 2° grado in "x" che prevede la seguente radice positiva:

$$x = \frac{1}{2B} \left[- \sum_{i=1}^n A_{b,i} + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n A_{b,i} \right)^2 + 4B \left(\sum_{i=1}^n A_{b,i} y_i \right)} \right]$$

(15)

Se questo valore di "x" così calcolato porta ad avere bulloni complessi, allora il calcolo si ripetuta inserendo nella somatoria i soli bulloni che risultano dal calcolo precedente fatti. Ovviamente questa procedura risulta essere convergente. Supponendo che alla fine dell'iterazione le prime "k" file di bulloni risultino essere reagenti a compressione è possibile valutare l'inerzia del collegamento come:

$$I = \frac{2B \cdot x^3}{3} + \sum_{i=k+1}^n A_{bi} (y_i - x)^2$$

(in questa espressione "x" è una quantità nota, avendo la precedentemente calcolata)

e di conseguenza si possono calcolare il massimo sforzo di compressione sulla piastra:

$$\sigma_{max} = \frac{M}{I} \cdot x$$

e il massimo sforzo normale di trazione in un bullone:

$$N_{t,max} = \frac{M}{I} \cdot A_{bi} \cdot (y_{max} - x)$$

Esistono anche degli approcci semplificati al problema uno dei quali ipotizza, a vantaggio di sicurezza (fig)

per il collegamento, che sia $x=0$, ovvero che la flessione sia trasferita unicamente dai bulloni soggetti a trazione.

Ponendo $x=0$ nelle relazioni fin qui trovate si ottiene:

$$N_{\max} = \frac{M \cdot A_{bi} \cdot y_{\max}}{\sum_{j=k+1}^n A_{bj} y_j^2}$$

Un altro approccio prevede perfettamente l'estensione della zona compresa per $1/6$ dell'altezza della piastra, $x=H/6$, in tal caso la massima tensione sulla piastra e la massima azione di trazione sui bulloni valgono rispettivamente:

$$\sigma_{\max} = \frac{M \cdot H/6}{I} = \frac{M \cdot H}{6} \cdot \frac{1}{\frac{B \cdot H^3}{324} + \sum_{i=k+1}^n A_{bi} \left(y_i - \frac{H}{6}\right)^2}$$

$$N_{\max} = \frac{M \cdot A_{bi} \left(y_{\max} - \frac{H}{6}\right)}{\frac{B \cdot H^3}{324} + \sum_{j=k+1}^n A_{bj} \left(y_j - \frac{H}{6}\right)^2}$$

(17)

Verifica delle unioni bullonate

Prima di tutto occorre ricordare le diverse tipologie di bulloni e le loro resistenze. Tali valori sono riportati nella seguente tabella:

Classe vite	f_t [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	$f_{k,N}$ [N/mm ²]	$f_{d,N}$ [N/mm ²]	$f_{d,V}$ [N/mm ²]
4.6	400	240	240	240	170
5.6	500	300	300	300	212
6.8	600	480	360	360	255
8.8	800	640	560	560	396
10.9	1000	900	700	700	495

In essa $f_{d,N}$ è la resistenza di calcolo a trazione,
 $f_{d,V} = f_{k,N}/\sqrt{2}$ è la resistenza di calcolo a taglio.

Le unioni con bulloni sono distinte dalle NTC08 in unioni "non precaricate" e unioni "precaricate".

Nelle prime si possono utilizzare viti di classe qualsiasi, mentre nelle seconde solo viti classe 8.8 e 10.9. Per il calcolo della resistenza si utilizzano i seguenti coefficienti facziali di sicurezza:

(18)

Resistenza dei bulloni: $\gamma_{R2} = 1,25$

Resistenza a scorrimento:

SLU $\gamma_{M3} = 1,25$

SLE $\gamma_{M3} = 1,30$

Precarico di bulloni ad

alta resistenza: $\gamma_{RF} = 1,30$

Nei fionti con bulloni precaricati, la resistenza ad attrito è funzione di come vengono preparate le superfici a contatto, dalle modalità di esecuzione, dal fisco foro-bullone. Con un approssimazione semplificata la resistenza di progetto allo scorrimento del bullone si calcolerà assumendo una forza di precarico pari al 40% della resistenza ultima a trazione del bullone. La forza di precarico sarà allora pari a:

$$F_{F,cd} = 0,7 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}$$

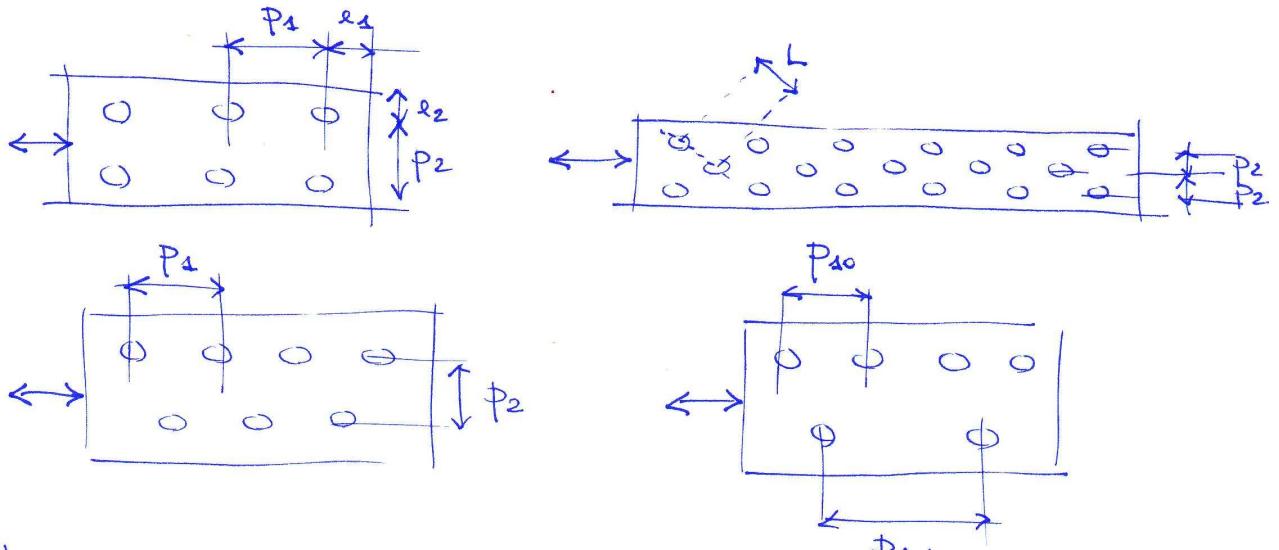
La resistenza allo scorrimento si ottiene moltiplicando tale valore per

il coefficiente di attrito μ che è assunto pari a:

$\mu = 0,45$ superfici sabbiate al metallo bianco e protette sino al serraggio dei bulloni

$\mu = 0,30$ in tutti gli altri casi.

La posizione dei fori deve rispettare delle limitazioni. Con riferimento alla seguente figura:



Distanze e interassi

	<u>Minimo</u>	<u>Maximo</u>	
l_1	$\frac{1}{2} d_o$	$4t + 40 \text{ mm}$	$-$
l_2	$1,2 d_o$	$4t + 40 \text{ mm}$	$\max(8t, 125 \text{ mm})$
P_1	$2,2 d_o$	$\min(14t, 200 \text{ mm})$	$\min(14t, 200 \text{ mm})$
$P_{1,0}$	$-$	$\min(14t, 200 \text{ mm})$	$-$
$P_{1,i}$	$-$	$\min(14t, 200 \text{ mm})$	$-$
P_2	$2,4 d_o$	$\min(14t, 200 \text{ mm})$	$\min(14t, 200 \text{ mm})$
			$\min(14t, 175 \text{ mm})$

" t " è lo spessore minimo dei piatti collegati.

" d_o " è il diametro dei fori

I fori devono essere reafigurati rispetto al diametro dei buelli di 5 mm, per buelli sino a $\phi 20$, di 4,5 mm per buelli di diametro superiore. Questa regola si puo' derogare quando eventuali avvertimenti non comportino problemi in fase di esecuzione per l'opera.

La resistenza a taglio dei buelli, per ogni piano di taglio che interessa il fusto dell'elemento, deve essere assunta pari a:

$$F_{V,Rd} = 0,6 \cdot f_{tb} \cdot \frac{A_{res}}{f_{M2}}$$

buelli clavi
4.6 5.6 e 8.8

$$F_{V,Rd} = 0,5 \cdot f_{tb} \cdot \frac{A_{res}}{f_{M2}}$$

buelli clavi
6.8 e 10.9

Come fa' detto A_{res} e' l'area resistente del bullelone, ovvero l'area in corrispondenza della parte filettata, se a contatto con la piastra vi e' unicamente la parte non filettata, la resistenza di cui sopra diventa:

$$F_{V,Rd} = 0,6 \cdot f_{tb} \cdot \frac{A}{f_{M2}}$$

per buelli di tutte le clavi

Si ricorda che f_{tb} e' la resistenza a rottura del bullelone.

(25)

La resistenza di calcolo a trascinamento del piatto dell'unione è fatta pari a:

$$F_{b,Rd} = K \cdot d \cdot f_{tk} \cdot \frac{d \cdot t}{f_{K2}}$$

con:

d diametro nominale del fusto

t spessore della piastra collegata

f_{tk} resistenza a rottura del materiale della piastra

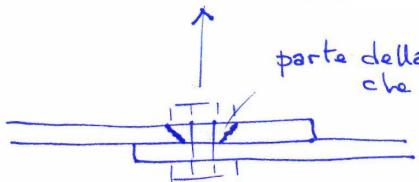
$$d = \begin{cases} \min\left(\frac{d_1}{3d_0}; \frac{f_{bt}}{f_t}; 1\right) & \text{per bulloni di bordo} \\ & \text{nella direzione del carico} \\ \min\left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{bt}}{f_t}; 1\right) & \text{per bulloni interni} \\ & \text{nella direzione del carico} \end{cases}$$

$$K = \begin{cases} \min\left(\frac{2,8 \cdot d_2 - 1,7}{d_0}; 2,5\right) & \text{per bulloni di bordo} \\ & \text{nella direzione normale} \\ & \text{al carico} \\ \min\left(\frac{1,4 \cdot p_2 - 1,7}{d_0}; 2,5\right) & \text{per bulloni interni} \\ & \text{nella direzione normale} \\ & \text{al carico.} \end{cases}$$

Ponendo alla resistenza a trazione degli elementi di connessione il DM08 prende il seguente valore per i bulloni:

$$F_{t,Rd} = 0,9 f_{tb} \frac{A_{res}}{f_{K2}}$$

Una verifica specifica prevista dal DM08 per i collegamenti soggetti a trazione è quella di punzonamento della piastra.



parte della piastra
che si rompe
per punzonamento.

La resistenza a
fusonamento
risulta essere

posta pari a:

$$B_{p,Rd} = 0,6 \pi (d_m) (t_p) \frac{f_{tk}}{f_{R2}} \rightarrow \text{tensione di rottura dell'acciaio del piatto}$$

diametro minimo
tra quello del
dato e della testa
del bullone

spessore del
piatto

Per quanto finora detto, dunque, la resistenza dell'unione a taglio sarà $\min(F_{V,Rd}, F_{b,Rd})$ per quelle a trazione $\min(B_{p,Rd}, F_{t,Rd})$

Nel caso ci sia presenza congiunta di trazione e taglio la formula di interazione proposta dalla norma è la seguente:

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1$$

$\xrightarrow{\text{sollecitazione a taglio}}$ $\xrightarrow{\text{sollecitazione a trazione}}$

con la limitazione che sia $F_{t,Ed}/F_{t,Rd} \leq 1$

Come detto precedentemente, nel caso di bulloni ad alta resistenza il bullone può essere precaricato e portare una azione di taglio anche fra le atti. Tale resistenza si dice "allo scorrimento" ed è posta pari a:

(23)

$$F_{s,Rd} = n(\mu) \frac{F_{p,c}}{f_{M3}}$$

numero
di superfici
di attrito

coefficiente di attrito

Forza di precarico del bullone che è pari a:

$$0,7 F_{tb} A_{res}$$

$$F_{M7}$$

questo termine si può assumere unitario nel caso di serraggio controllato (chiave dinamometrica).

Ovviamente questa resistenza allo scorrimento diminuisce nel caso in cui sia presente una azione di trazione sul fiutto.

In particolare per una verifica di scorrimento allo SLU, con $F_{t,Ed}$ sforzo di trazione, il valore massimo dell'azione di scorrimento si assume pari a:

$$F_{s,Rd} = n \mu (F_{p,c} - 0,8 F_{t,Ed}) / f_{M3}$$

Nel caso di verifica in condizioni di esercizio l'unica modifica da fare è sostituire l'azione di trazione allo SLU con quella allo SLE.