

## 20. COLLEGAMENTI FILETTATI E CHIODATI

### Unificazione delle viti e definizioni

La nomenclatura delle viti, con riferimento alla fig.1, è riassunta nel seguente elenco:

- $p$  passo, è la distanza fra due filetti adiacenti misurata lungo la parallela all'asse della vite; esso è il reciproco del numero di filetti per unità di lunghezza;
- $d$  diametro esterno, è il diametro maggiore della vite, misurato sulla cresta dei filetti;
- $d_r$  diametro di nocciolo, è il diametro minore della vite, misurato sul fondo dei filetti;
- $d_m$  diametro medio, è il valore medio fra i due precedenti;
- $l$  avanzamento, non mostrato in figura, è la distanza che il dado percorre nel compiere una rotazione; per viti ad un filetto esso coincide con il passo.

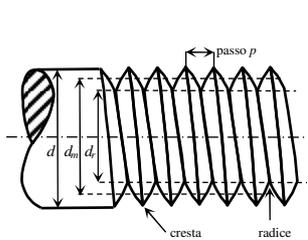


Fig.20.1 - Definizioni.

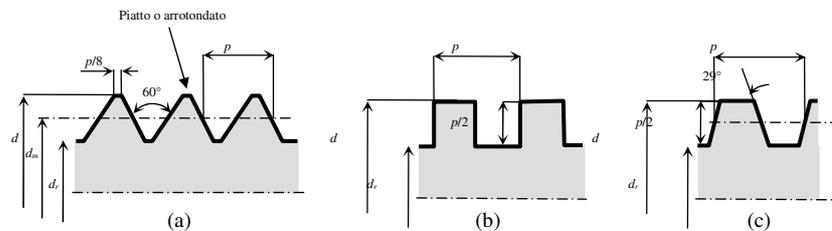


Fig.20.2 - Tipi di filetto: a) triangolare, b) quadrato, c) trapezio.

Una vite a filetti multipli (o a più principi) ha due o più filetti che si avvolgono l'uno accanto all'altro. Gli elementi unificati come viti, bulloni e dadi sono normalmente a filetti singoli, ma esistono anche elementi a filetto doppio o triplo, in tal caso l'avanzamento è uguale al doppio o al triplo del passo rispettivamente. Tutte le viti si avvitano secondo la regola della mano destra, o in senso orario, ma in alcuni casi è possibile usare viti (o dadi) che si avvitano nel senso contrario.

### Tipi di filetto

La fig.2 mostra la geometria dei filetti per le tre forme standard maggiormente in uso; la fig.2a rappresenta il filetto triangolare che è quello maggiormente in uso per scopi di collegamento: l'angolo fra i filetti è  $60^\circ$  e la cresta del filetto può essere piana o arrotondata. Le dimensioni di questo tipo di filetti sono unificate; esistono filettature triangolari dei seguenti tipi:

- metriche M a passo normale o fine (unità di misura il millimetro),
- Whitworth W (unità di misura il pollice),
- Gas (unità di misura il pollice).

Le filettature quadrate o trapezie in fig.2b e 2c sono di norma usate nelle trasmissioni di coppia o potenza; in questo caso non necessitano di unificazione sul diametro e sul passo. Inoltre le filettature trapezie sono frequentemente suscettibili di modifica, riducendo lo spazio fra i denti in modo da avere un angolo fra i filetti da  $10^\circ$  a  $15^\circ$  al fine di ottenere una maggiore efficienza, oppure riducendo l'altezza dei denti in modo da ottenere un minor diametro esterno e conseguentemente una maggiore resistenza. Esempio di viti di potenza sono la vite madre del tornio o le viti nelle macchine utensili a comando meccanico, che sono di norma impiegate per imprimere spostamenti alla traversa; in tali casi la vite di potenza si impegna in una chiocciola solidale ad un componente della macchina in modo da trasformare il moto di rotazione della vite in moto traslatorio per il pezzo comandato.

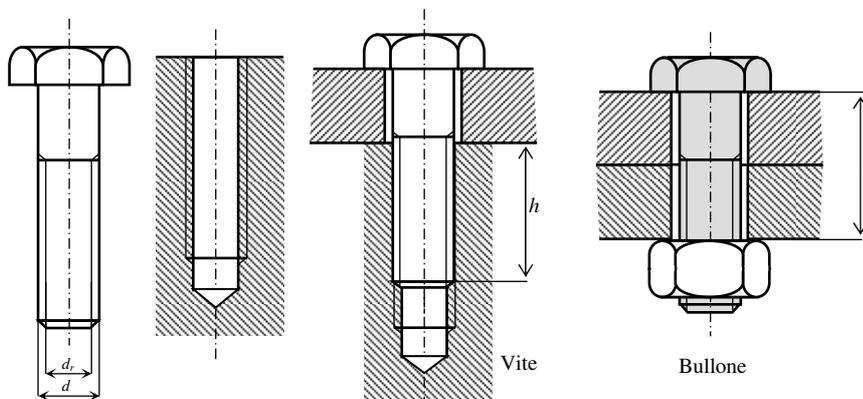


Fig.20.3 - Rappresentazione convenzionale delle filettature e dei collegamenti filettati.

**Sezione resistente**

Prove di trazione hanno mostrato che la resistenza a trazione di una vite è circa equivalente a quella di un elemento cilindrico non filettato avente diametro  $d_t=(d+d_r)/2$ . Per le viti metriche, una stima più precisa dell'area della sezione resistente è data dalla seguente espressione:

$$A_t = 4 \cdot 0.785 (d - 0.939 \cdot 2p) \quad (20.1)$$

In vari casi si può assumere, in modo semplificato, che il diametro della sezione resistente è  $d_t=0.9d$ .  
In molti casi l'area della sezione resistente è tabellata.

**Tensioni nei filetti**

La filettatura deve essere dimensionata affinché non si abbia snervamento a taglio all'attacco con il nocciolo; in alcuni casi si deve verificare che la pressione superficiale tra i filetti della vite e della madrevite non superi la tensioni di snervamento. Il primo parametro da valutare è l'altezza minima della parte filettata in presa  $h$  (fig.3), uguale anche al prodotto del passo  $p$  per il numero dei filetti in presa  $n$  ( $h=pn$ ). Essa viene determinata imponendo che lo strappamento dei filetti a taglio si verifichi per lo stesso livello di carico che provoca lo snervamento della sezione resistente della vite a trazione.

**Tensione di taglio**

Si assume che la superficie dei filetti resistente al taglio è pari al 75% della superficie del gambo coperta dai filetti, in particolare si assume  $S=0.75 \pi d_r h$ . Se si ipotizza che il carico  $F$  sia uniformemente distribuito lungo  $h$  e che i filetti della vite si rompano per taglio in corrispondenza al diametro di nocciolo, il valore approssimato della tensione di taglio è

$$\tau = \frac{1}{0.75 \pi d_r h} F = 0.424 \frac{F}{d_r h} = 0.424 \frac{F}{d_r p n} \quad (20.2)$$

In realtà la tensione non è uniformemente distribuita nei filetti in presa. Tipicamente il primo sopporta un carico maggiore. Nel caso dei bulloni per limitare questo effetto è bene usare dadi di materiale più deformabile e/o con passo leggermente maggiore di quello della vite affinché il passo sia uguale dopo la deformazione.

**Altezza della madrevite**

In base a quanto detto, l'altezza  $h$  della madrevite può essere determinata imponendo l'uguaglianza tra la forza normale che provoca lo snervamento della vite e la forza che provoca lo strappamento dei filetti della madrevite. La forza di snervamento della vite è data da:

$$F_s = \sigma_s A_t \approx \sigma_s \frac{\pi (0.9d)^2}{4} \quad (20.3)$$

Considerando materiali di uguale resistenza, la forza di strappamento dei filetti, in base alla (2) e ponendo  $\tau_s=0.577\sigma_s$  in base al criterio di Von Mises, è data da

$$F_t = 0.577 \sigma_s \pi d_r 0.75h ; \quad (20.4)$$

avendo introdotto  $d$  al posto di  $d_r$  in quanto, per la madrevite il diametro da considerare è quello nominale della vite. Uguagliando i secondi membri, delle (3) e (4) si ottiene

$$h \approx 0.47 d \quad (20.5)$$

Altezza tipica di sicurezza è  $h=0.875d$ .

Nel caso di materiali differenti per vite e madrevite, se la rigidità e la resistenza del materiale della madrevite sono inferiori a quella della vite e i materiali sono duttili, la lunghezza  $h$  può essere aumentata. Una possibile correzione consiste nel moltiplicare il secondo membro della (5) per il rapporto tra la tensione di snervamento della vite e quella della madrevite.

**Pressione superficiale**

Nei casi in cui è necessario effettuare la verifica a pressione superficiale, la tensione di compressione media nel filetto può essere ottenuta come

$$\sigma = \frac{4}{\pi} \frac{F}{d^2 - d_r^2} \frac{p}{h} \quad (20.6)$$

Vi possono inoltre essere tensioni di flessione nei filetti ed in questo caso devono essere impiegati alti fattori di sicurezza. Formule simili possono essere sviluppate per il filetto trapezoidale e triangolare.

### Viti e bulloni

La denominazione di vite o bullone (fig.4) dipende dal modo con il quale l'elemento viene impiegato:

- la vite collega elementi con l'uso di un foro filettato ed è avvitata esercitando una torsione sulla testa,
- il bullone è usato con un dado ed è serrato applicando una torsione sul dado,
- il prigioniero è una vite filettata da entrambe le parti; il prigioniero viene avvitato sull'elemento filettato e, successivamente, l'altro elemento viene posizionato e bloccato con il dado.

L'uso delle giunzioni bullonate è consigliabile quando si desidera un collegamento che possa essere smontato senza metodi distruttivi e che sia abbastanza robusto per resistere a forze esterne di trazione e di taglio.

Le caratteristiche dei collegamenti filettati sono riassunte in tabella 1.

CARATTERISTICHE DEI COLLEGAMENTI FILETTATI	
<b>Caratteristiche Meccaniche</b>	
Varie direzioni di carico ammissibili	Limitata resistenza statica
Rigidezza dipendente dalla conformazione	Limitata resistenza dinamica
Buona resistenza alla temperatura	Limitata resistenza alla corrosione
<b>Funzionalità</b>	
Facilmente smontabile e/o riutilizzabile	Limitata possibilità di conformazione
Peso e ingombro medi	Limitata capacità di centratura
<b>Caratteristiche operative</b>	
Facilità di manutenzione e ispezione	
Facilità di montaggio e automazione	
<b>Caratteristiche economiche</b>	
Basso costo	Costo di esercizio se necessaria ripresa del serraggio

Tab.20.1 - Caratteristiche dei collegamenti filettati.

### Prearico sui bulloni

Le viti e i bulloni vengono serrati in modo da produrre un prearico iniziale  $F_i$ . Gli effetti del prearico sono:

- porre gli elementi in compressione affinché non abbiano movimenti relativi di allontanamento a causa di forze agenti in direzione normale,
- creare attrito fra gli elementi affinché non abbiano movimenti relativi di slittamento a causa di forze di taglio, cioè agenti in direzioni parallele agli elementi stessi,
- diminuire l'ampiezza delle sollecitazioni di fatica sul bullone.

Se il prearico è adeguato, le forze di taglio non influiscono sulla tensione finale nel bullone e gli effetti possono essere trascurati. Il progetto della giunzione bullonata deve essere effettuato studiando gli effetti della forza esterna di trazione sullo stato di compressione iniziale degli elementi e la tensione risultante nel bullone. Quando si effettua il prearico, la deformazione cui sono sottoposti il bullone e gli elementi collegati e il modo con cui si ripartisce fra essi il carico esterno, dipende dalle diverse rigidezze del bullone e degli elementi stessi che devono essere quindi valutate.

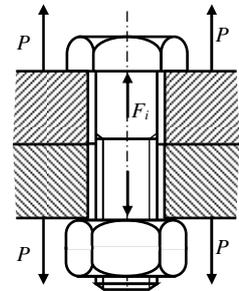


Fig.20.4 - Forze agenti sul collegamento.

### Rigidezza del bullone

La rigidezza del bullone  $k_b$ , data dal rapporto fra la forza applicata e l'allungamento da essa prodotto, si ottiene considerando la parte filettata e quella non filettata come elementi elastici di diversa rigidezza,  $k_{bt}$  e  $k_{bn}$  rispettivamente, collegati in serie, per i quali vale la relazione

$$\frac{1}{k_b} = \frac{1}{k_{bt}} + \frac{1}{k_{bn}} \quad k_b = \frac{k_{bt} k_{bn}}{k_{bt} + k_{bn}} \quad (20.7a,b)$$

Le espressioni di  $k_{bt}$  e  $k_{bn}$  si ottengono dalle espressioni dell'allungamento delle travi in trazione:

$$k_{bt} = \frac{A_t E}{l_t} \quad k_{bn} = \frac{A_n E}{l_n} \quad (20.8a,b)$$

nelle quali  $A_t$  e  $A_n$  e  $l_t$  ed  $l_n$  sono rispettivamente le aree e le lunghezze dei tratti filettato e non ed  $E$  è il modulo di Young del materiale. Nei casi in cui la lunghezza di un tratto è trascurabile rispetto all'altra la rigidezza del bullone può essere data da una delle (8), altrimenti, sostituendo le (8) nella (7b) si ottiene:

$$k_b = \frac{A_t A_n E}{A_t l_n + A_n l_t} \quad (20.9)$$

### Rigidezza degli elementi

La rigidezza dell'insieme degli elementi collegati è difficile da valutare. La rigidezza totale di più elementi collegati è analoga a quella di molle poste in serie e la zona compressa fra la testa ed il dado è a forma di doppio cono (cavo per la presenza del foro per il bullone).

Per semplicità si considera che la zona compressa sia un cilindro avente diametro esterno pari a tre volte il diametro del bullone e un foro della stessa grandezza del bullone per cui:

$$k_e = \frac{\pi[(3d)^2 - d^2]E}{4l} = \frac{2\pi d^2 E}{l} \approx 8 \frac{A_t E}{l} \quad (20.10)$$

essendo  $l$  lo spessore totale degli elementi collegati.

Se gli elementi sono di materiale differente devono essere considerati come agenti in serie. Per ciascuno si deve calcolare la costante  $k_e$  mediante la (10) inserendo l'appropriato valore di  $E$  e di  $l$  e la costante totale deve essere trovata con una formula tipo (7.a).

### Carico nel bullone e negli elementi – triangolo di serraggio

Nel seguito si indica con:

- $P$  il carico totale esterno sul collegamento che tende a separare gli elementi,
- $P_b$  l'incremento di carico del bullone (parte di  $P$  assorbita dal bullone),
- $P_e$  il decremento di carico degli elementi serrati (parte di  $P$  assorbita dagli elementi),
- $F_i$  la forza iniziale (o precarico) sul bullone dovuto al serraggio,
- $F_b = F_i + P_b$  la forza risultante sul bullone,
- $F_e = -F_i + P_e$  la forza risultante sugli elementi.

Dopo l'attuazione del precarico il bullone è soggetto alla forza di trazione  $F_i$  e ha subito un allungamento  $\delta_b = F_i/k_b$ , mentre gli elementi sono soggetti alla forza di compressione  $F_i$  e hanno subito un accorciamento  $\delta_e = F_i/k_e$ . Su bullone ed elementi agisce quindi la stessa forza in modulo, mentre l'entità degli allungamenti è differente. Ovviamente, durante l'avvitamento, parte del bullone *fuoriesce* dal dado e la zona del bullone soggetta a deformazione è solo quella compresa tra la testa e il dado stesso. Si noti che il percorso del dado sul filetto è  $\delta_t = \delta_b + \delta_e$ .

La fig.5 mostra il cosiddetto *triangolo di serraggio* nel quale sono rappresentate le caratteristiche inflessione-forza del bullone e degli elementi. In fig.5a è mostrata la situazione al serraggio con  $F_b = F_e = F_i$  e  $\delta_b > \delta_e$  essendo  $B$  ed  $E$  i punti rappresentativi dello stato del bullone e degli elementi.

Quando viene applicato il carico esterno  $P$  si verifica un aumento della deformazione di trazione del bullone ed un decremento della deformazione di compressione degli elementi collegati, che danno luogo a variazioni di lunghezza di uguale modulo pari a:

$$\Delta \delta = \Delta \delta_b = \Delta \delta_e \quad \text{con} \quad \Delta \delta_b = \frac{P_b}{k_b} \quad \Delta \delta_e = \frac{P_e}{k_e} \quad (20.11, 12, 13)$$

La nuova situazione di forze e spostamenti è visualizzabile in fig.5b: naturalmente il carico complessivo  $F_b$  agente sul bullone è maggiore del solo carico esterno  $P$  a causa dell'effetto del precarico, ma l'incremento  $P_b$  rispetto ad  $F_i$  è una aliquota di  $P$ . Al carico complessivo sul bullone si sottrae, infatti, una parte della forza di precarico in quanto, in seguito all'allungamento del bullone, diminuisce la compressione sugli elementi e, di conseguenza, la forza applicata dagli stessi sul bullone. In particolare tale forza, inizialmente pari ad  $F_i$ , diminuisce della quantità  $P_e$  (fig.5b). I nuovi punti  $B$  ed  $E$ , rappresentativi dello stato del bullone e degli elementi, si trovano lungo una verticale, poiché gli allungamenti sono uguali, e la loro distanza è pari a  $P$ .

In definitiva, la somma dell'incremento di carico di trazione sul bullone e del decremento della forza di compressione tra gli elementi è pari alla forza esterna  $P$ :

$$P = P_b + P_e \quad (20.14)$$

In base alle (11-13), si può scrivere

$$P = P_b + P_e = k_b \Delta \delta + k_e \Delta \delta = (k_b + k_e) \Delta \delta \quad (20.15)$$

ed esprimere lo spostamento  $\Delta \delta$  in funzione del carico totale  $P$

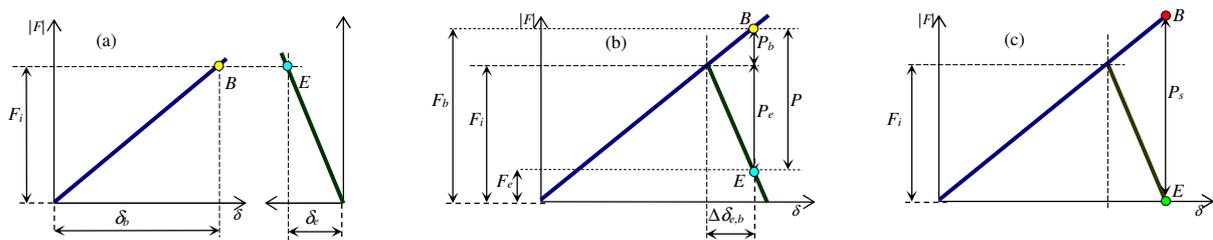


Fig.20.5 – Triangolo di serraggio; (a) precarico, (b) situazione in esercizio, (c) situazione alla separazione  $F_e=0$ ,  $P=P_b$ .

$$\Delta\delta = \frac{P}{k_b + k_e} \quad (20.16)$$

Mediante le (11-13) e la (16) si possono esprimere le forze  $P_b$  e  $P_e$  direttamente in funzione di  $P$ :

$$P_b = \Delta\delta k_b = P \frac{k_b}{k_b + k_e} \quad P_e = \Delta\delta k_e = P \frac{k_e}{k_e + k_b} \quad (20.17)$$

La forza di trazione risultante sul bullone è:

$$F_b = F_i + P_b = F_i + P \frac{k_b}{k_e + k_b}, \quad (20.18)$$

mentre la forza di compressione residua sugli elementi in collegamento è:

$$F_e = -F_i + P_e = -F_i + P \frac{k_e}{k_e + k_b} \quad (20.19)$$

Ponendo

$$C = \frac{k_b}{k_e + k_b}, \quad (20.20)$$

le eq.(18,19) possono essere riscritte come:

$$F_b = F_i + C P \quad F_e = -F_i + (1 - C) P \quad (20.21,22)$$

Queste equazioni mostrano che, come già detto, il carico sul bullone si incrementa di una aliquota della forza esterna essendo ovviamente  $C < 1$  (eq.20), mentre la forza di compressione iniziale negli elementi si decrementa proporzionalmente.

Nel caso di carichi di fatica dovuti al fatto che la forza esterna  $P$  è variabile nel tempo si ha il vantaggio che la componente alternata sul bullone risulta inferiore rispetto a quella totale e, anche se la componente media si somma al precarico, l'effetto complessivo è favorevole.

Se la forza esterna è abbastanza grande da rimuovere completamente la compressione iniziale (fig.5c), gli elementi si separano ed il carico viene interamente sopportato dal bullone ( $F_b=P$ ).

Una valutazione approssimata di  $C$ , utile per i casi di progetto, può essere ottenuta considerando le (8a) e (10):

$$C = \frac{k_b}{k_e + k_b} \approx \frac{A_t E_b / l}{8 A_t E_e / l + A_t E_b / l} = \frac{E_b}{8 E_e + E_b} \quad (20.23)$$

Nel caso di uguali materiali per bulloni ed elementi connessi si ottiene  $C \approx 1/9$ .

### Valore del precarico

Come visto l'importanza nel precarico dei bulloni è notevole poiché influisce sul bloccaggio degli elementi e sulla resistenza a fatica. Il valore del precarico consigliato è dato dalla seguente espressione:

$$F_i = K \sigma_p A_t \quad (20.24)$$

nella quale  $K=0.75$  per collegamenti rimovibili e  $K=0.9$  per collegamenti fissi:

$$F_i = 0.75 \sigma_p A_t \quad F_i = 0.9 \sigma_p A_t \quad (20.25a,b)$$

nelle (25)  $\sigma_p$  è la tensione ammissibile del bullone, inferiore alla tensione di snervamento del materiale, fornita dal costruttore o approssimativamente data da  $\sigma_p = 0.85 \sigma_s$ . In pratica si fa in modo che la tensione dovuta al precarico sia pari al 75-90% della tensione ammissibile, cioè

$$\sigma_i = K \sigma_p \quad (20.26)$$

### Momento di avvitarimento

Per mettere il bullone sotto precarico è necessario fornire una coppia di valore opportuno. La coppia serve a provocare l'allungamento del bullone, ma anche a vincere la forza di attrito tra i filetti e la forza di attrito agente sulla superficie di contatto tra il dado e gli elementi. Esistono varie tecniche per l'applicazione del precarico. Se la lunghezza del bullone può essere misurata con un micrometro dopo il montaggio, poiché il precarico  $F_i$  può essere espresso in funzione dell'allungamento del bullone mediante la formula

$$\delta_{bi} = \frac{F_i l}{AE}, \quad (20.27)$$

è sufficiente stringere il dado sino a quando la vite non si allunga della quantità calcolata.

Spesso questa procedura non può essere eseguita ed è necessario stimare il momento torcente occorrente per sviluppare il precarico desiderato. Si può dimostrare che il momento di avvvitamento può essere determinato con una relazione del tipo:

$$M_T = Q F_i d \quad (20.28)$$

nella quale il coefficiente  $Q$  varia fra 0.12 e 0.20 e dipende dall'attrito tra i filetti, che a sua volta dipende dalla finitura dei filetti, dall'accuratezza della costruzione del bullone e dal grado di lubrificazione. Se i coefficienti di attrito  $f$  tra i filetti ed  $f_c$  tra dado e superficie di contatto sono entrambi 0.15,  $Q$  assume un valore pari a circa 0.2, per cui si può scrivere:

$$M_T = 0.2 F_i d \quad (20.29)$$

Questa formula consente di calcolare il momento necessario per creare il desiderato precarico  $F_i$  noto il diametro nominale della vite. In fase di avvvitamento, a causa dell'attrito, una aliquota del momento applicato agisce sul gambo della vite come sforzo di torsione. Spesso accade che la vite si rompa proprio durante l'applicazione del precarico. Empiricamente si assume che la sollecitazione di torsione è pari a  $M_T/2$ . Componendo la tensione normale di precarico (26) con quella tangenziale dovuta alla torsione, ottenibile dalle (29) e (24) come  $\tau_t = 0.4\sigma_t$ , mediante il criterio di Von Mises si ottiene che la tensione equivalente nel punto più sollecitato del gambo della vite è  $\sigma_e = 1.22\sigma_t$ . Affinché non si abbia snervamento durante l'avvvitamento si deve verificare la seguente condizione:

$$\sigma_e = 1.22 K \sigma_p < \sigma_s \quad (20.30)$$

Esiste una tecnica di avvvitamento nella quale vengono monitorate la coppia applicata  $M_T$  e la rotazione e determinato in modo automatico l'istante in cui si verifica una variazione del gradiente della funzione  $M_T$  rispetto alla rotazione. Tale istante corrisponde allo snervamento del bullone, cioè al raggiungimento del limite  $\sigma_e = \sigma_s$  nella (30). Tipicamente il 10-20% del precarico scompare in breve tempo. Il margine d'incertezza tipico sul livello di pretensionamento è del  $\pm 30\%$ . Si noti che, in fase di esecuzione, l'ordine con il quale vengono serrati più bulloni influenza il valore finale del serraggio di ciascuno di essi ed è opportuno serrare consecutivamente bulloni distanti tra loro il più possibile.

### Resistenza statica delle giunzioni bullonate

#### Separazione

Quando il carico esterno raggiunge un valore tale che l'allungamento  $\Delta\delta_b$  del bullone (12) eguaglia la contrazione che era stata imposta agli elementi collegati  $\delta_c = F_i/k_c$ , gli elementi si rilassano completamente, la forza agente su di essi si annulla e si verifica la *separazione*:

$$F_e = (1 - C)P - F_i = 0 \quad (20.31)$$

Da questa relazione consegue che il carico esterno limite per la separazione (fig.5c) è:

$$P_s = F_i / (1 - C) \quad (20.32)$$

Il coefficiente di sicurezza relativamente alla possibilità di separazione è espresso dal rapporto tra il carico limite di separazione  $P_s$  e il carico di progetto  $P$ :

$$n_s = \frac{P_s}{P} = \frac{1}{1 - C} \frac{F_i}{P} = A_t \frac{K}{1 - C} \frac{\sigma_p}{P} \quad (20.33)$$

L'espressione (33) può essere utilizzata per calcoli di progetto imponendo il coefficiente di sicurezza e calcolando l'area del bullone:

$$A_t = n_s \frac{1 - C}{K} \frac{P}{\sigma_p} \quad (20.34)$$

In presenza di  $N$  bulloni e carico complessivo agente  $F$  si ha  $P = F/N$ , da cui il coefficiente di sicurezza e la superficie totale necessaria dei bulloni (o il loro numero) possono essere ottenuti come

$$n_s = N A_t \frac{K}{1 - C} \frac{\sigma_p}{F} \quad N A_t = n_s \frac{1 - C}{K} \frac{F}{\sigma_p} \quad (20.35,36)$$

**Cedimento statico**

La tensione agente sul bullone, in base alla (21) e alla (24), è data da:

$$\sigma_b = \frac{CP}{A_t} + \frac{F_i}{A_t} = \frac{CP}{A_t} + K\sigma_p \quad (20.37)$$

Introducendo un coefficiente di sicurezza  $n$  nel termine relativo al carico esterno ed imponendo la situazione limite per la quale la tensione agente sul bullone uguaglia il valore limite si ottiene

$$\frac{nCP}{A_t} + \frac{F_i}{A_t} = \frac{nCP}{A_t} + K\sigma_p = \sigma_p \quad (20.38)$$

La (38) può essere esplicitata rispetto ad  $A_t$  per calcoli di progetto:

$$A_t = n \frac{C}{1-K} \frac{P}{\sigma_p} \quad (20.39)$$

o rispetto ad  $n$  per calcoli di verifica:

$$n = A_t \frac{1-K}{C} \frac{\sigma_p}{P} \quad (20.40)$$

In presenza di  $N$  bulloni e carico complessivo agente  $F$ , il numero dei bulloni o la superficie totale necessaria può essere ottenuta come

$$N = n \frac{CF}{A_t \sigma_p - F_i} \quad N A_t = n \frac{C}{1-K} \frac{F}{\sigma_p} \quad (20.41a,b)$$

In caso di verifica si ottiene

$$n = N \frac{A_t \sigma_p - F_i}{CF} = N A_t \frac{1-K}{C} \frac{\sigma_p}{F} \quad (20.42)$$

I valori di  $n$  ed  $A_t$  ottenibili con le espressioni (33-36) e (39-42) sono differenti. Il rapporto tra i coefficienti di sicurezza per separazione e resistenza è dato dalla seguente espressione

$$\frac{n_s}{n} = \frac{C}{1-C} \frac{K}{1-K} \quad (20.43)$$

dalla quale è possibile osservare che usualmente è  $n_s < n$  e che i due valori si avvicinano per valori di precarico elevati cioè per  $K$  tendente a 0.9. Ad esempio per materiali uguali, in base alla (23), si ha

$$\frac{n_s}{n} = 0.125 \frac{K}{1-K} \quad (20.44)$$

e per  $K \approx 0.89$  si ha  $n_s \approx n$ . Questo implica che è opportuno effettuare il progetto in base alle (33-36) tenendo conto che il coefficiente di sicurezza alla resistenza è maggiore e può essere ottenuto dalla (43) come:

$$n = n_s \frac{1-C}{C} \frac{1-K}{K} \quad (20.45)$$

**Spaziatura dei bulloni**

In molti casi la spaziatura dei bulloni in una giunzione deve ottemperare a requisiti di ingombro e uniformità, nel senso che deve esistere una distanza tra i bulloni sufficiente per la messa in opera, ma tale da dare luogo a una distribuzione uniforme della forza di serraggio. Viene suggerita la seguente formula che mette in relazione la dimensione del collegamento, cioè la lunghezza  $L_b$  del perimetro lungo cui sono disposti i bulloni, con lo spazio occupato dai bulloni dato dal prodotto del loro numero  $N$  per il diametro  $d$ :

$$3 \leq \frac{L_b}{Nd} \leq 10 \quad (20.46)$$

Poiché il prodotto  $Nd$  è fissato in base alle (36) o (41) e  $A_t$  varia col quadrato di  $d$ , il numero di bulloni  $N$  cresce se il rapporto nella (46) si avvicina a 3 e viceversa. Dalla (46) si ottiene che il prodotto del numero di bulloni per il loro diametro deve rispettare le seguenti disuguaglianze:

$$Nd \geq 0.1L_b \quad Nd \leq 0.33L_b \quad (20.47a,b)$$

Ricordando che  $d_f \approx 0.9d$ , si ha  $d \approx 1.254 A_t^{0.5}$  e le (47) possono essere riscritte in funzione della sezione resistente del bullone come segue:

$$N\sqrt{A_t} \geq 0.08 L_b \qquad N\sqrt{A_t} \leq 0.266 L_b \qquad (20.48)$$

Le (48) possono essere utilizzate in unione con la (36) o la (41) per determinare  $N$  ed  $A_t$ .

### **Resistenza a fatica delle giunzioni bullonate**

Se la forza esterna  $P$  è variabile in modo ciclico,  $P_b$  risulta variabile allo stesso modo e i bulloni sono soggetti a fatica. In particolare sono presenti tensioni medie dovute sia al precarico che alla componente media di  $P_b$  e tensioni alternate dovute alla componente alternata di  $P_b$ , per cui, per la verifica o il progetto, è necessario ricorrere al diagramma di Haigh.

Il limite di fatica del bullone deve essere modificato introducendo il fattore di concentrazione a fatica  $k_f = 1/K_f$ , dovuto alla presenza dei filetti. Il fattore  $K_f$  per i filetti può essere ottenuto dalla tabella relativa ad albero a sezione circolare con variazione di diametro soggetto a trazione. Esso varia da  $2.2 < K_f < 3.8$  in dipendenza del grado di finitura del bullone ed è tanto maggiore quanto maggiore è il grado di finitura. Quest'ultimo varia da 0 a 8 e si identifica con marchi che sono impressi sulla testa del bullone. La tab.2 mostra i valori di  $K_f$  per viti rullate e normali.

Usualmente il carico esterno agente è pulsante con ciclo dello zero. Se il valore massimo è  $P$ , il carico fluttuante agente sul bullone varia da  $F_{bmin} = F_i$  a  $F_{bmax} = F_i + CP$ . La tensione alternata e quella media, ricordando la (26), risultano rispettivamente:

$$\sigma_a = \frac{F_i + CP - F_i}{2A_t} = \frac{CP}{2A_t} \qquad \sigma_m = \frac{F_i + CP + F_i}{2A_t} = \sigma_i + \sigma_a \qquad (20.49,50)$$

In presenza di elevati precarichi la componente alternata risulta molto bassa rispetto a quella media. La tensione media è costituita dalla somma del termine  $\sigma_i$  dovuto al precarico e di un termine pari alla componente alternata. Solo quest'ultimo è interessato a eventuali variazioni del carico di fatica e la linea di carico sul diagramma di Haigh (fig.6) può essere rappresentata da una retta a  $45^\circ$  a partire dal valore  $[\sigma_i, 0]$ , avente equazione  $\sigma_a = \sigma_m - \sigma_i$ . Nei casi in cui la retta di carico è a  $45^\circ$  le espressioni dei coefficienti di sicurezza a fatica (utilizzando il criterio di Goodman) e a snervamento sono date, rispettivamente, dalle (16.6) e (16.10) di seguito riscritte:

$$n = \frac{\sigma_f}{\sigma_a} \frac{\sigma_a - \sigma_m + \sigma_r}{\sigma_f + \sigma_r} \qquad n = \frac{\sigma_a - \sigma_m + \sigma_s}{2\sigma_a} \qquad (20.51,52)$$

Introducendo la  $\sigma_a$  e la  $\sigma_m$  espresse dalle (49,50) nella (51) si ottiene la seguente espressione del coefficiente di sicurezza per 1 o  $N$  bulloni essendo  $F = PN$  il carico complessivo agente sui bulloni:

$$n = \frac{2A_t}{CP} \frac{\sigma_r - \sigma_i}{\sigma_f + \sigma_r} \sigma_f \qquad n = \frac{2NA_t}{CF} \frac{\sigma_r - \sigma_i}{\sigma_f + \sigma_r} \sigma_f \qquad (20.53)$$

Operando analogamente, il criterio di sicurezza rispetto alla possibilità di snervamento (52) fornisce:

$$n = \frac{A_t}{CP} (\sigma_s - \sigma_i) \qquad n = \frac{NA_t}{CF} (\sigma_s - \sigma_i) \qquad (20.54a,b)$$

In alternativa alla (54) un criterio di sicurezza per lo snervamento statico, che non considera il modo con cui possono variare i carichi, è dato da

$$n = \frac{\sigma_s}{\sigma_m + \sigma_a} = \frac{\sigma_s A_t}{F_i + CP} \qquad (20.55)$$

Esplicitando i termini della (53) rispetto ad  $A_t$  ed utilizzando l'espressione (24) per la tensione di precarico, è possibile ottenere l'area del bullone o l'area complessiva di  $N$  bulloni come segue:

$$A_t = n \frac{CP}{2} \frac{1 + \sigma_r / \sigma_f}{\sigma_r - K\sigma_p} \qquad NA_t = n \frac{CF}{2} \frac{1 + \sigma_r / \sigma_f}{\sigma_r - K\sigma_p} \qquad (20.56a,b)$$

Grado finit.	$K_f$ rull.	$K_f$ norm.
da 0 a 3	2.2	2.8
da 5 a 8	3.0	3.8

Tab.20.2 – Fattori di concentrazione a fatica per i bulloni.

**Giunzioni soggette a carico eccentrico**

La giunzione bullonata/chiodata (fig.7) soggetta a carichi agenti nel piano normale all'asse dei bulloni/chiodi, costituisce un vincolo di incastro per l'elemento collegato. La reazione vincolare può essere schematizzata con una forza  $V$  e un momento  $M$ . La forza e il momento sono i risultanti degli sforzi di taglio agenti in ciascun bullone.

Per la valutazione dello sforzo di taglio nei bulloni si assume che l'elemento collegato sia perfettamente rigido. In tale ipotesi, se gli  $N$  bulloni sono uguali, la forza  $V$  si divide equamente, dando luogo a uno sforzo di taglio detto *primario*

$$T'_i = \frac{V}{N} \tag{20.57}$$

Il momento  $M$  provoca un ulteriore sforzo di taglio  $T''$  in ciascun bullone; ciascuno sforzo  $T''$  è ortogonale alla congiungente il centro del bullone con il centro di gravità e ha modulo ottenibile con la seguente espressione:

$$T''_i = \frac{M r_i}{\sum_N r_i^2} \tag{20.58}$$

essendo  $r_i$  la distanza tra il baricentro della sezione di ciascun bullone  $g_i$  dal baricentro  $G$  di tutti i bulloni. Le coordinate del baricentro  $G$  possono essere ottenute mediante le seguenti relazioni

$$x_G = \frac{\sum_N A_i x_{gi}}{\sum_N A_i} \quad y_G = \frac{\sum_N A_i y_{gi}}{\sum_N A_i} \tag{20.59,60}$$

nelle quali tutte le distanze sono riferite ad assi ortogonali scelti arbitrariamente,  $x_{gi}$  e  $y_{gi}$  sono le coordinate dei baricentri dei bulloni rispetto a tali assi ed  $A_i$  le sezioni di bulloni. La (58) può essere ricavata considerando che il momento  $M$  è dato dalla somma dei momenti  $T''r$  da parte di ciascun bullone e che la forza  $T''$  assorbita da ogni bullone è proporzionale alla sua distanza dal baricentro  $G$ , cioè

$$M = \sum_N T''_i r_i, \quad \frac{T''_i}{r_i} = \frac{T''_j}{r_j} = \text{cost} \quad (i,j=1..N; i \neq j), \quad M = \sum_N \frac{T''_i}{r_i} r_i^2 = \frac{T''_i}{r_i} \sum_N r_i^2 \tag{20.61,62,63}$$

Taglio primario e secondario devono essere sommati vettorialmente per ottenere il carico risultante  $T_i$  su ogni bullone. In alternativa, scelto un sistema di assi ortogonali con origine nel baricentro  $G$ , le componenti cartesiane di taglio primario (57) e secondario (58) sono date da

$$T'_{xi} = \frac{V_x}{N} \quad T'_{yi} = \frac{V_y}{N} \quad T''_{xi} = \frac{M y_i}{\sum_N r_i^2} \quad T''_{yi} = \frac{M x_i}{\sum_N r_i^2} \tag{20.64-67}$$

essendo  $V_x$  e  $V_y$  e  $x_i$  e  $y_i$  rispettivamente le componenti di  $V$  e di  $r_i$  rispetto agli assi. Lo sforzo complessivo sul bullone è dato da

$$T_i = \sqrt{\left( \frac{V_x}{N} + \frac{M y_i}{\sum_N r_i^2} \right)^2 + \left( \frac{V_y}{N} + \frac{M x_i}{\sum_N r_i^2} \right)^2} \tag{20.68}$$

Usualmente i bulloni o i chiodi hanno la stessa dimensione per cui è sufficiente considerare le condizioni di resistenza di quello che sopporta il carico maggiore. Osservando la (58) si nota che le sollecitazioni sui bulloni diminuiscono se aumenta la somma delle distanze dei bulloni da  $G$  posta a denominatore, mentre la (62) indica che il bullone più distante da  $G$  risulta quello più sollecitato. Tenuto conto di ciò risulta opportuno che i bulloni/chiodi vengano posti a distanza media  $r_i$  da  $G$  non troppo piccola e che le distanze dei singoli bulloni da  $G$  non siano troppo differenti tra loro.

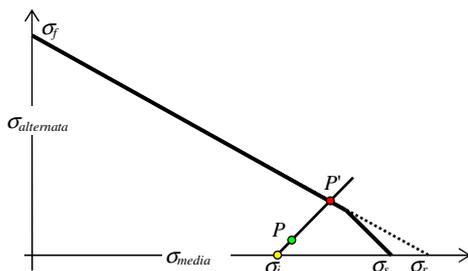


Fig.20.6 - Verifica sul diagramma di Haigh.

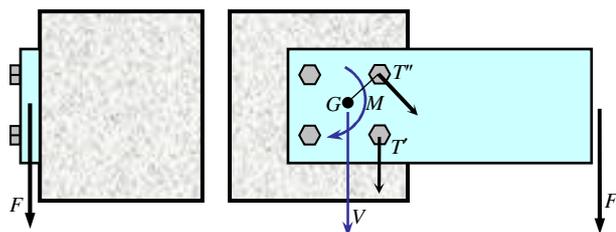


Fig.20.7 - Giunzione bullonata sollecitata a taglio e momento.

### Accorgimenti per la corretta configurazione dei collegamenti filettati

Come visto precedentemente, l'insieme bullone - elementi collegati costituisce un sistema elastico la cui rigidità dipende dalle rigidità di entrambi i componenti. In particolare, la rigidità degli elementi (20) è proporzionale all'ampiezza della zona interessata alla compressione, che nei calcoli è assunta pari a 3 volte il diametro nominale del bullone, e inversamente proporzionale all'altezza del collegamento. Affinché il collegamento risulti efficace questi parametri geometrici, insieme alla superficie di contatto tra gli elementi e all'eccentricità della forza agente rispetto all'asse del bullone, devono avere dimensioni opportune.

Con riferimento alla (fig.8a), nei collegamenti filettati è opportuno avere:

- altezza  $h$  del collegamento elevata,
- spazio attorno al bullone adeguato,  $2u \approx 1.5d+h$ ,
- superficie di appoggio adeguata allo spazio attorno al bullone  $s \geq 2u$ ,
- eccentricità  $e$  della retta d'azione del carico rispetto all'asse di simmetria del collegamento limitata.

Spesso le viti più esterne (con maggiore eccentricità) risultano inutili (fig.8b); inoltre è bene che le parti da collegare siano rigide.

Nei collegamenti a flangia, con riferimento alla fig.8c, inoltre:

- l'eccentricità  $e$  dei bulloni deve essere la minima possibile,
- l'altezza  $h$  del lembo deve essere circa pari all'eccentricità  $h \approx e$ ,
- la sporgenza  $u$  del lembo deve essere maggiore o uguale all'altezza  $u \geq h$ ,
- la superficie di appoggio non deve essere troppo estesa, meglio se  $s \approx 2u$ .

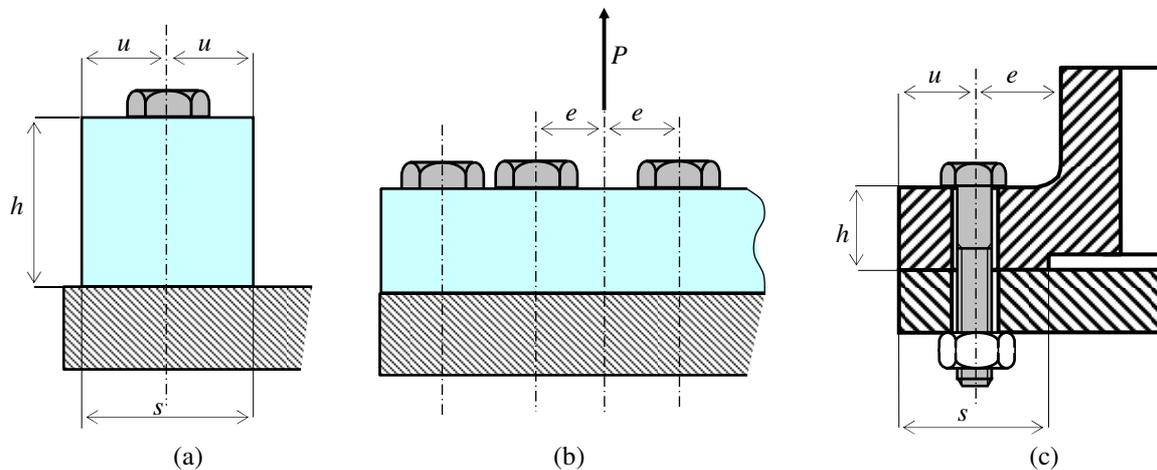


Fig.20.8 - Accorgimenti per la corretta configurazione dei collegamenti filettati.

COLLEGAMENTI BULLONATI				
<ul style="list-style-type: none"> <li><math>A_t</math> Sezione resistente del bullone</li> <li><math>d, d_r, d_m</math> diametro esterno, di nocciolo, medio</li> <li><math>E, E_e</math> modulo di Young materiale bul., elem.</li> <li><math>N</math> numero bulloni</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>F_i</math> precarico</li> <li><math>F_b, F_e</math> forza totale su bullone ed elementi</li> <li><math>P</math> carico totale esterno sul collegamento</li> <li><math>n</math> coefficiente di sicurezza</li> <li><math>n_s</math> coefficiente di sicurezza a separazione</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>P_b</math> incremento di carico del bullone,</li> <li><math>P_e</math> decremento di carico degli elementi,</li> <li><math>\sigma_p</math> tensione di lavoro del bullone,</li> <li><math>\sigma_e</math> tensione equivalente al serraggio.</li> </ul>		
<b>Prearico <math>F_i</math> <math>K=0.75+0.9</math></b>	<b>Tensione di prearico</b>	<b>Momento di serraggio <math>M_t</math></b>	<b>Resistenza al serraggio</b>	
$F_i = K A_t \sigma_p$	$\sigma_i = F_i / A_t = K \sigma_p$	$M_T = Q F_i d = 0.2 F_i d$	$\sigma_e = 1.22 K \sigma_p < \sigma_s$	
<b>Rigidezze bullone ed elementi <math>k_b - k_e</math></b>				
$k_b = \frac{F}{\delta} = \frac{AE}{l}$	$k_{bt} = \frac{A_t E}{l_t}$	$k_{bn} = \frac{A_n E}{l_n}$	$k_b = \frac{A_t A_n E}{A_t l_n + A_n l_t}$	$C = \frac{k_b}{k_e + k_b} \approx \frac{E}{8E_e + E}$
$k_e = \frac{8A}{l} E_e = \frac{2\pi d^2}{l} E_e$	$k_e = \frac{0.577\pi d \tan \alpha}{2 \ln \left( 5 \frac{0.577 l + 0.5d}{0.577 l + 2.5d} \right)} E_e$		$k_e = \frac{d^2 + 0.68 d l + 0.33 l^2}{l} E_e$	
<b>Forza sul bullone</b>	<b>Forza sugli elementi</b>	<b>Forza di separazione</b>	<b>Forza alternata bul.</b>	<b>Forza media bul.</b>
$F_b = F_i + C P$	$F_e = -F_i + (1-C) P$	$P_s = \frac{F_i}{1-C}$	$F_a = \frac{C P}{2}$	$F_m = F_i + \frac{C P}{2}$
$\sigma_b = \sigma_i + C \frac{P}{A_t}$	$\sigma_e = -\sigma_i + (1-C) \frac{P}{A_t}$	$\sigma_s = \frac{1}{1-C} \frac{F_i}{A_t}$	$\sigma_a = \frac{C P}{2 A_t}$	$\sigma_m = \sigma_i + \sigma_a$
<b>Dimensionamento e verifica a separazione</b>				
<b>1 bullone</b>		<b>N bulloni <math>P=F/N</math> <math>F=PN</math></b>		
$A_t = n_s \frac{1-C}{K} \frac{P}{\sigma_p}$	$n_s = \frac{1}{1-C} \frac{F_i}{P} = A_t \frac{K}{1-C} \frac{\sigma_p}{P}$	$N A_t = n_s \frac{1-C}{K} \frac{F}{\sigma_p}$	$n_s = N A_t \frac{K}{1-C} \frac{\sigma_p}{F}$	
<b>Dimensionamento e verifica statici</b>				
<b>1 bullone</b>			<b>Rapporto <math>n_s/n</math></b>	
$A_t = \frac{n C P + F_i}{\sigma_p} = n \frac{C}{1-K} \frac{P}{\sigma_p}$		$n = \frac{A_t \sigma_p - F_i}{C P} = A_t \frac{1-K}{C} \frac{\sigma_p}{P}$		$\frac{n_s}{n} = \frac{C}{1-C} \frac{K}{1-K}$
<b>N bulloni <math>P=F/N</math> <math>F=PN</math></b>			$\frac{n_s}{n} = 0.125 \frac{K}{1-K}$	
$N A_t = n \frac{C}{1-K} \frac{F}{\sigma_p}$	$N = n \frac{C F}{A_t \sigma_p - F_i}$	$n = N \frac{A_t \sigma_p - F_i}{C F} = N A_t \frac{1-K}{C} \frac{\sigma_p}{F}$		
<b>Dimensionamento e verifica a fatica</b>			<b>Spaziatura</b>	
<b>1 bullone</b>			<b>Verifica a snervamento</b>	
$A_t = n \frac{C P (1 + \sigma_r / \sigma_f)}{2 \sigma_r - K \sigma_p}$	$n = 2 \frac{A_t \sigma_r - \sigma_i}{C P \sigma_f + \sigma_r} \sigma_f$	$n = \frac{A_t}{C P} (\sigma_s - \sigma_i)$		<b><math>L_b</math> perimetro bullonato,</b> <b><math>R</math> coefficiente inverso di spaziatura</b>
<b>N bulloni <math>P=F/N</math> <math>F=PN</math></b>			$L_b / 10 \leq N d \leq L_b / 3$ $N \sqrt{A_t} = R L_b$ $N = R L_b / \sqrt{A_t}$	
$N A_t = n \frac{C F (1 + \sigma_r / \sigma_f)}{2 \sigma_r - K \sigma_p}$	$n = 2 \frac{N A_t \sigma_r - \sigma_i}{C F \sigma_f + \sigma_r} \sigma_f$	$n = \frac{N A_t}{C F} (\sigma_s - \sigma_i)$		$N_{\min} \rightarrow R=0.080$ $N_{\text{med}} \rightarrow R=0.173$ $N_{\max} \rightarrow R=0.266$
<b>Verifica filetti - <math>p</math> passo, <math>n</math> numero dei filetti in presa, <math>h</math> altezza della parte filettata in presa (<math>h=pn</math>).</b>			<b>Separazione</b>	
<b>Taglio sui filetti</b>		<b>Pressione superficiale filetti</b>	<b>Altezza madrevite</b>	$A_t = \left[ n \frac{1}{R L_b} \frac{1-C}{K} \frac{F}{\sigma_p} \right]^2$
$\tau = \frac{F}{\pi d_r (0.75 h)} = \frac{0.424 F}{d_r h} = \frac{0.424 F}{d_r p n}$		$\sigma = \frac{4F}{\pi (d^2 - d_r^2)} \frac{p}{h}$	$h = 0.47 d$ $h = 0.875 d$	
<b>Bulloni e chiodi soggetti a taglio - <math>T'</math> Taglio Primario, <math>T''</math> Taglio Secondario</b>				<b>Resistenza statica</b>
$T'_i = \frac{V}{N}$	$T'_{xi} = \frac{V_x}{N}$	$T'_{yi} = \frac{V_y}{N}$	$T''_i = \frac{M r_i}{\sum_N r_i^2}$	$T''_{xi} = \frac{M y_i}{\sum_N r_i^2}$
			$T''_{yi} = \frac{M x_i}{\sum_N r_i^2}$	$T''_{xi} = \frac{M x_i}{\sum_N r_i^2}$
<b>Composizione del taglio</b>				<b>Resistenza a fatica</b>
$T_i = \sqrt{\left( \frac{V_x}{N} + \frac{M y_i}{\sum_N r_i^2} \right)^2 + \left( \frac{V_y}{N} + \frac{M x_i}{\sum_N r_i^2} \right)^2}$		$x_G = \frac{\sum_N A_t x_{gi}}{\sum_N A_t}$	$y_G = \frac{\sum_N A_t y_{gi}}{\sum_N A_t}$	$A_t = \left[ n \frac{1}{R L_b} \frac{C F (1 + \sigma_r / \sigma_f)}{2 \sigma_r - K \sigma_p} \right]^2$