

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

TESI DI LAUREA

in
Costruzione di Macchine

IL RILASSAMENTO SPONTANEO NEI GIUNTI BULLONATI

CANDIDATO

Alessandro Olivieri

RELATORE:

Chiar.mo Prof. Dario Croccolo

CORRELATORE

Dott. Ing. Massimiliano De Agostinis

Anno Accademico 2015/16

Sessione I

INDICE

1 INTRODUZIONE.....	3
2 I GIUNTI BULLONATI.....	4
2.1 FORZE E TENSIONI AGENTI NEL GIUNTO E DIMENSIONAMENTO.....	4
2.2 EQUILIBRIO	6
2.2.1 PUNTO DI APPLICAZIONE SOTTO LA TESTA DELLA VITE E DEL DADO	7
2.2.2 PUNTO DI APPLICAZIONE ALL'INTERFACCIA TRA LE PIASTRE.....	8
2.2.3 PUNTO DI APPLICAZIONE IN POSIZIONE INTERMEDIA	8
2.2.4 PRESENZA DI GUARNIZIONI ELASTICHE NEL GIUNTO BULLONATO	9
3 STUDIO DEL SELF LOOSENING.....	10
3.1 INFLUENZA DEI PARAMETRI DIMENSIONALI DEL GIUNTO.....	10
3.2 INFLUENZA DELLA TORSIONE ELASTICA DEL GAMBO DELLA VITE.....	11
3.3 PRESENZA DI SLITTAMENTI PARZIALI TRA BULLONE E PIASTRE...	12
3.4 SISTEMI ANTISVITAMENTO PER CONTRASTARE IL SELF LOOSENING.....	16
4 ESTENSIMETRIA.....	19
4.1 FORMULE DI BASE.....	20
4.1.1 CORRELAZIONE TRA DEFORMAZIONE E RESISTENZA DELL'ESTENSIMETRO.....	20
4.1.2 RESISTENZA MASSIMA AMMISSIBILE.....	21
4.1.3 FATTORE DELL'ESTENSIMETRO.....	22
4.1.4 INFLUENZA DELLA TEMPERATURA.....	23

4.2 IL PONTE DI WHEATSTONE.....	24
5 PROVE SPERIMENTALI.....	28
6 ANALISI DEI RISULTATI.....	31
6.1 PROVINI IN ALLUMINIO.....	32
6.2 PROVINI IN ACCIAIO.....	42
7 BIBLIOGRAFIA.....	49

1 INTRODUZIONE

I collegamenti bullonati sono elementi di giunzione utilizzati in numerose applicazioni industriali e strutturali. Sono particolarmente apprezzati in quanto collegamenti smontabili, è possibile quindi disassemblarne le parti quando è necessario smontare il giunto senza danneggiare i componenti collegati.

Il loro studio è quindi molto importante per la progettazione di macchine e strutture.

Ad oggi esistono però ancora alcuni problemi legati al loro utilizzo e alla loro tenuta. In questa tesi verrà trattato uno di questi: il rilassamento spontaneo.

Esistono due tipologie di allentamento del bullone:

- Self relax: rilassamento spontaneo senza applicazione di forze esterne;
- Self loosening: allentamento del collegamento sottoposto a carico esterno ciclico e perpendicolare all'asse della vite.

Verranno inizialmente introdotte le caratteristiche di questo tipo di collegamento e il suo funzionamento, illustrando le forze che agiscono sul bullone, su tutti il precarico iniziale, il dimensionamento e le cause che portano all'autoallentamento. Saranno poi illustrati i risultati degli studi svolti da numerosi ricercatori sul fenomeno del self loosening, pubblicati in diversi articoli, e le loro conclusioni. Verranno infine esposte le modalità delle prove sperimentali svolte con la supervisione del prof. Dario Croccolo e dell'ing. Massimiliano De Agostinis, con uno sguardo sul metodo dell'estensimetria e con l'illustrazione dei risultati di tali prove e conclusioni finali.

2 I GIUNTI BULLONATI

I giunti bullonati sono collegamenti filettati che sfruttano il meccanismo vite-madrevite, composti da una vite e un dado che hanno il compito di porre in compressione gli elementi da unire affinché non si abbiano movimenti relativi di allontanamento o di slittamento (il collegamento lavora per attrito tra le piastre) ed affinché il sistema si comporti, elasticamente, in modo favorevole al bullone (elevate tensioni statiche e basse tensioni variabili dovute a carichi esterni).

I bulloni devono quindi sopportare carichi di trazione paralleli all'asse della vite (*tensile bolted joints*), di taglio perpendicolari all'asse (*shear bolted joints*), o più comunemente combinati (in tal caso classificati in base al maggiore dei due carichi).

Nel serraggio viene trasmesso il precarico iniziale, parte del lavoro della coppia di serraggio, che garantisce il contatto tra le due flange. Col passare del tempo però questa forza cala di intensità causando un rilassamento.

Il problema principale è quindi quello del calcolo del giusto precarico necessario a contrastare le azioni esterne, da cui si ricava il momento torcente con cui viene serrato il bullone e, per il dimensionamento, l'area resistente minima della vite in modo che la tensione sul gambo non superi quella di snervamento del materiale.

2.1 FORZE E TENSIONI AGENTI NEL GIUNTO E DIMENSIONAMENTO

Dato un collegamento bullonato che unisce due flange, costituito da un bullone e sottoposto a carichi esterni noti, sono indicate con ([7]):

- R_t risultante delle azioni esterne perpendicolari all'asse del bullone
- R_n risultante delle azioni esterne parallele all'asse del bullone
- F_i precarico iniziale necessario a contrastare le azioni esterne
- μ_p coefficiente di attrito tra le piastre
- μ_s coefficiente di attrito nel sottotesta
- μ_f coefficiente di attrito tra i filetti

Si può così calcolare il precarico come:

$$F_i = \frac{R_t}{\mu_p} + R_n \quad (2.1)$$

Da cui è ricavabile il momento torcente di serraggio:

$$M_s = M_{\text{gambo}} + M_{\text{sottotesta}} = F_i * (0.16 * p + 0.58 * \mu_f * d_2) + F_i * (0.5 * \mu_s * D_{m_{\text{sottotesta}}}) \quad (2.2)$$

Con:

- p passo del filetto
- d_2 diametro primitivo della filettatura
- $D_{m_sottotesta}$ diametro medio della superficie di contatto tra sottotesta e flangia

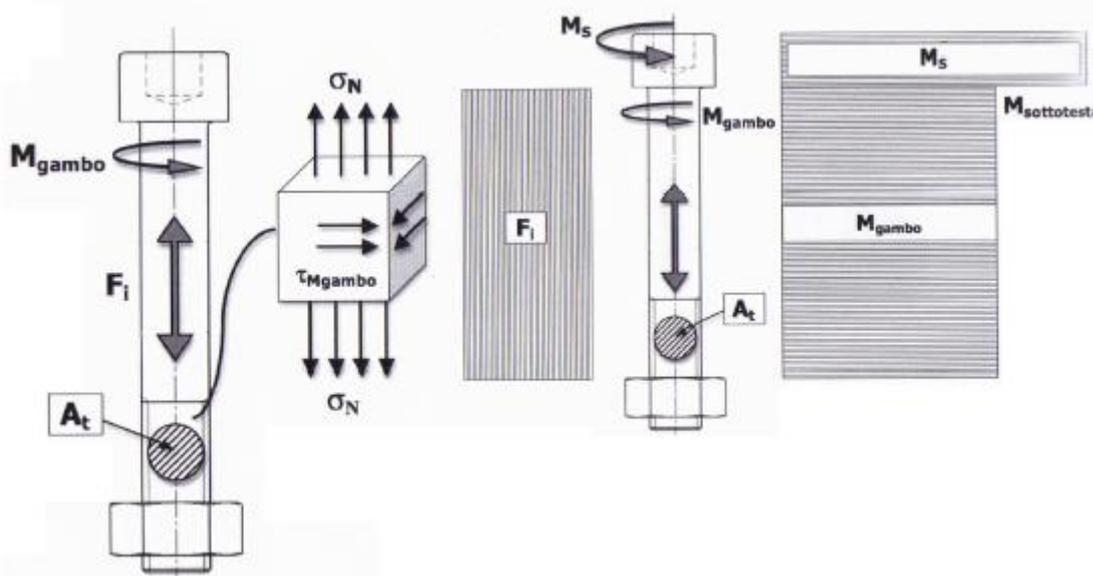


Figura 1: forze e tensioni nel bullone [7]

Si indicano poi le rigidzze corrispondenti a bullone e piastre (rispettivamente K_b e K_p) per calcolare la rigidzza equivalente del giunto

$$K_{eq_b} = \frac{K_b}{K_b + K_p} \quad (2.3)$$

e ricavare la forza massima

$$F_b = F_i + R_n * K_{eq_b} \quad (2.4)$$

Si passa quindi alla formulazione del carico assiale equivalente agente sul gambo della vite:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\left(\frac{F_b}{A_t}\right)^2 + 3\left(\frac{M_{gambo}}{W_t}\right)^2} = \frac{1}{A_t} \sqrt{\left(\frac{R_t}{\mu_p} + R_n * (1 + K_{eq_b})\right)^2 + 48 * \left(\left(\frac{R_t}{\mu_p} + R_n\right) * \frac{(0.16 * p + 0.58 * \mu_f * d_2)}{d_t}\right)^2} = \frac{F_{eq}}{A_t} \quad (2.5)$$

In cui A_t è la sezione resistente di diametro d_t , e W_t è il modulo d'inerzia torsionale. Tale tensione non deve superare la tensione limite di precarico S_p divisa per un opportuno coefficiente di sicurezza CS.

Si ricava infine la sezione minima di progetto

$$A_{t_progetto} = CS * \frac{F_{eq}}{S_p} \quad (2.6)$$

2.2 EQUILIBRIO

In fase di serraggio il sistema bullone-piastre può essere considerato come un sistema meccanico di rigidezze elastiche in serie, quindi attraversate dalla stessa forza (precarico) e deformazione totale data dalla somma della trazione del bullone e della compressione delle piastre.

$$\Delta s_{tot} = \Delta s_b + \Delta s_p = \frac{F_i}{K_b} + \frac{F_i}{K_p} = F_i * \left(\frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_p} \right) = F_i * \left(\frac{K_b + K_p}{K_b * K_p} \right) = \frac{F_i}{K_{eq}} \quad (2.7)$$

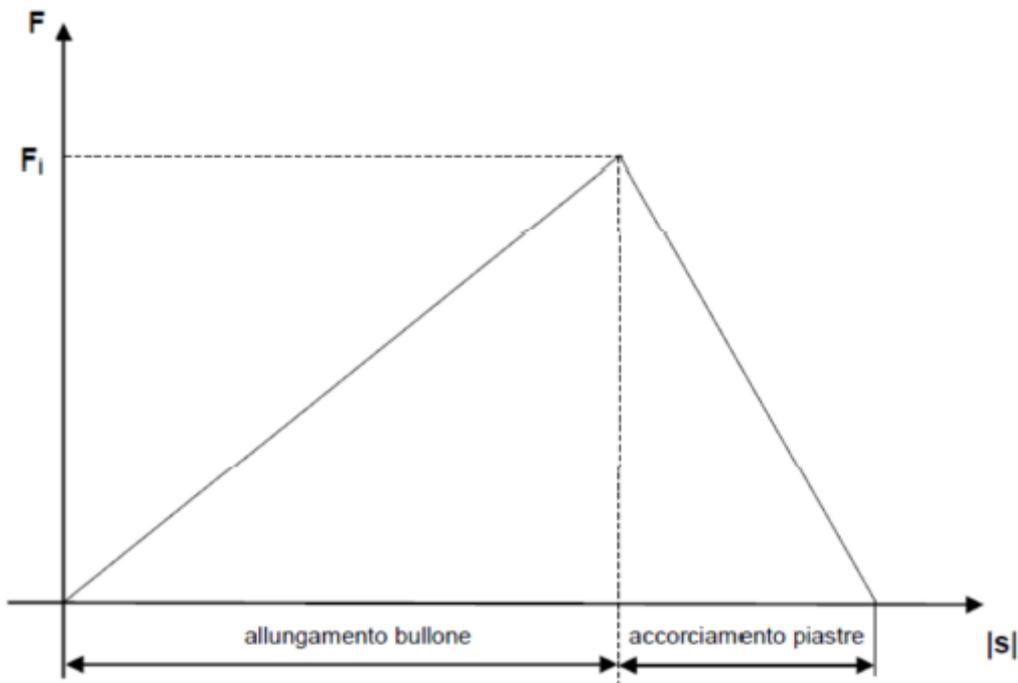


Figura 2: diagramma forza-allungamento [8]

La rigidezza del bullone è ricavabile dalla legge di Hooke

$$K_b = \frac{E_b * A_t}{L_{gambo}} \quad (2.8)$$

in cui E_b è il modulo di elasticità trasversale della vite. E' evidente l'influenza del rapporto d'aspetto della vite (rapporto tra sezione resistente e lunghezza del gambo).

Per calcolare la rigidità delle piastre la difficoltà è data dal volume efficace di esse che la influenza; normalmente la si stima in modo approssimato come il triplo di quella del bullone oppure si usa il cosiddetto cono di Röttscher:

$$K_f = \frac{\pi}{4} * \frac{E_p}{L} * \left(\left(D_a + \frac{L}{10} \right)^2 - D_i^2 \right) \quad (2.9)$$

in cui:

- D_a diametro del sottotesta
- D_i diametro del foro
- L spessore delle piastre
- E_p modulo di elasticità trasversale delle piastre

Attraverso l'impiego di viti estensimetriche e/o analisi numeriche è possibile ottenere risultati più precisi.

Una volta applicate le forze esterne al giunto, quelle perpendicolari all'asse del bullone tendono a fare scorrere le piastre tra di loro. Esse vengono contrastate dall'attrito tra le piastre e tra piastre e sottotesta. Nel caso tali forze vincessero l'azione d'attrito del giunto, esse si scaricano sul gambo come forze di taglio, situazione quest'ultima da evitare in quanto può essere dannosa per la vite stessa.

Le forze parallele all'asse della vite tendono invece ad allontanare fra loro le piastre. In tal caso il sistema si trasforma in un sistema di rigidità in parallelo, in cui bullone e piastre subiscono la stessa deformazione e la forza agente sul collegamento è data dalla somma delle forze sui due elementi.

La condizione di equilibrio è differente a seconda che il punto di applicazione delle azioni esterne:

- Sotto la testa della vite e del dado
- Interfaccia tra le due piastre
- Punto intermedio ai due precedenti

2.2.1 PUNTO DI APPLICAZIONE SOTTO LA TESTA DELLA VITE E DEL DADO

Il bullone e il dado subiscono lo stesso spostamento δ , mentre la forza esterna R_n si ripartisce sui due elementi del giunto in base alle loro rigidità

$$F_1 = R_n * \frac{K_b}{K_b + K_p} = R_n * K_{eq_b} \quad (2.10)$$

$$F_2 = R_n * \frac{K_p}{K_b + K_p} \quad (2.11)$$

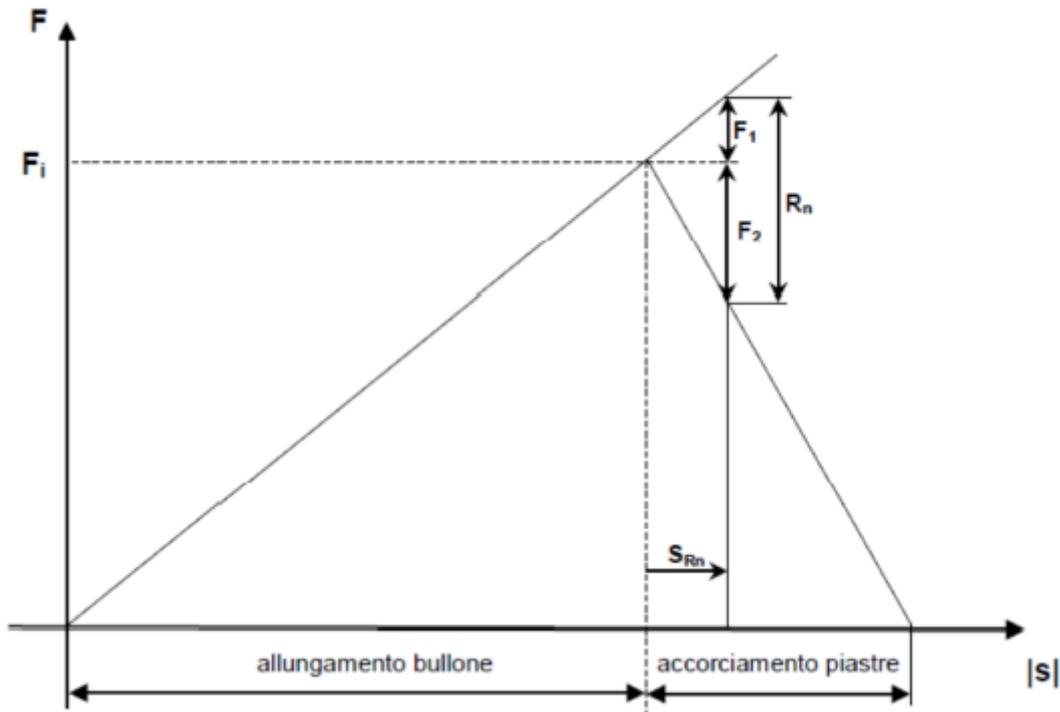


Figura 3: diagramma forza-allungamento in presenza di carico esterno sotto la testa della vite e del dado [8]

Il bullone subisce quindi un incremento della trazione pari a F_1 mentre le flange presentano una diminuzione della loro compressione di F_2 .

Questa condizione porta a una diminuzione delle azioni d'attrito che servono a contrastare le forze esterne perpendicolari all'asse del giunto, con un aumento del rischio che queste ultime possano prevalere sulle prime e possano portare ad azioni di taglio sulla vite.

2.2.2 PUNTO DI APPLICAZIONE ALL'INTERFACCIA TRA LE PIASTRE

In questo caso la forza esterna viene equilibrata dalla riduzione della pressione tra le piastre, che sono le uniche interessate da tale azione esterna. Infatti se R_n è inferiore al precarico F_i essa non ha effetti sul carico del bullone ($F_1 = 0$; $F_2 = R_n$).

Quando R_n raggiunge il valore del precarico si verifica il distacco delle flange.

2.2.3 PUNTO DI APPLICAZIONE IN POSIZIONE INTERMEDIA

La forza esterna si ripartisce tra piastre e bullone. La parte F_1 che va ad incrementare la trazione del bullone è funzione del rapporto tra la distanza x del punto di applicazione dall'interfaccia delle flange e l'altezza s di queste ultime

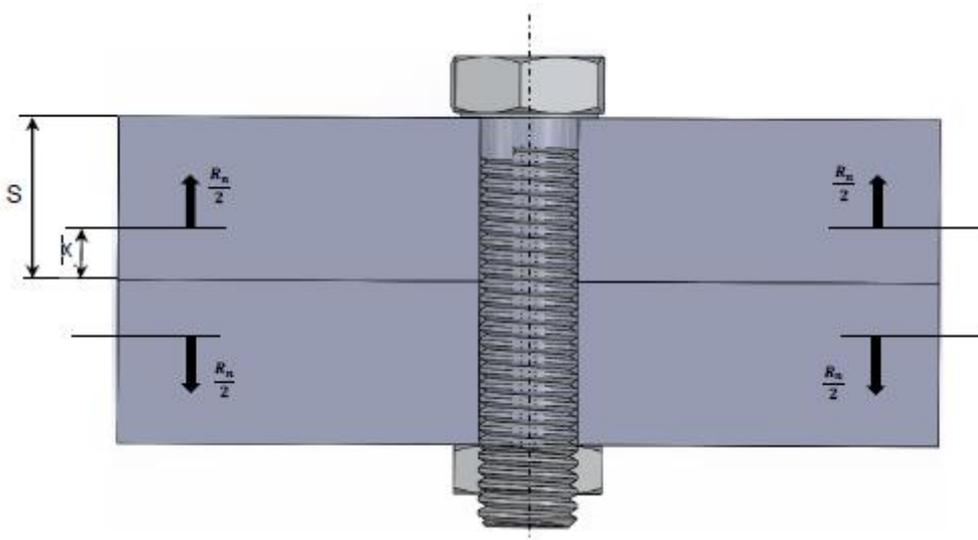


Figura 4: punto di applicazione della forza esterna in posizione intermedia [8]

$$F_1 = R_n * \frac{K_b}{K_b + K_p} * \frac{x}{s} \quad (2.12)$$

2.2.4 PRESENZA DI GUARNIZIONI ELASTICHE NEL GIUNTO BULLONATO

La presenza di un elemento elastico può avere diversi effetti sull'equilibrio del giunto in base al tipo e alla sua posizione.

Se la guarnizione interessa l'intera superficie di contatto tra le piastre, essa ha l'effetto di diminuire notevolmente la loro rigidità, che diventa quindi molto inferiore a quella del bullone ($K_p \ll K_b$). Al momento del serraggio quindi la guarnizione subisce una grande compressione, mentre il bullone si allunga in modo impercettibile. All'applicazione della forza esterna all'interfaccia, essa produce sul bullone un allungamento troppo piccolo affinché l'elemento elastico possa espandersi; di conseguenza il carico esterno si scarica completamente sulla vite, con un grande aumento delle tensioni interne ad essa, effetto ovviamente negativo.

Bisogna quindi adoperare guarnizioni disposte in modo tale che la rigidità delle piastre rimanga superiore a quella del bullone. In questo caso, come nel caso della forza esterna applicata all'interfaccia della flange senza elemento elastico, il carico esterno viene equilibrato dalla riduzione della forza di pressione tra le flange, e solo quando esso supera il precarico iniziale si trasferisce completamente sul bullone.

3 STUDIO DEL SELF LOOSENING

I giunti bullonati, se sottoposti a vibrazioni e forze esterne trasversali cicliche, tendono ad allentarsi per l'effetto che tali vibrazioni hanno sul contatto tra le superfici di contatto tra i filetti di vite e dado, tra bullone e giunto e tra le flange. Questo fenomeno, detto self loosening, va ovviamente limitato in quanto può essere dannoso per le macchine che presentano questi collegamenti.

Diversi ricercatori hanno svolto prove sperimentali, tramite macchine che simulano queste condizioni, come la macchina di Junker, e simulazioni con il metodo agli elementi finiti FEM, al fine di determinare le cause che portano al self loosening ed individuare i parametri su cui agire in fase di progettazione del giunto per limitarne l'effetto.

3.1 INFLUENZA DEI PARAMETRI DIMENSIONALI DEL GIUNTO

Tramite una simulazione FEM in [1] sono state determinate le influenze dei principali parametri di un giunto sotto vibrazione trasversale.

E' stato modellato un giunto, con bullone in acciaio ad alta resistenza e piastra in acciaio, precaricato con un algoritmo per raffreddamento in cui, una volta impostato il coefficiente di espansione termica, si abbassa la temperatura, causando un restringimento del bullone che viene contrastato dal giunto, simulando il precarico.

Lo spostamento trasversale è dato dalla formula $\delta_x = \delta_0 * \text{sen}(\omega t)$ [mm], in cui δ_0 [mm] è l'ampiezza (non superiore al gioco nel foro) e ω [rad/s] è la frequenza angolare. La variazione del carico di taglio in funzione dello spostamento trasversale può essere rappresentata da una curva, detta isteretica del carico di taglio. In base alla dimensione verticale della curva si può determinare la rigidità trasversale, poiché essa è pari al rapporto tra la più alta forza di taglio, pari alla metà della dimensione verticale della curva, e l'ampiezza della vibrazione δ_0 .

Variando l'ampiezza della vibrazione δ_0 si è osservato che al crescere di essa aumenta la perdita di precarico, incrementando il rischio di self loosening.

Al contrario, al crescere del precarico iniziale, la percentuale di esso che viene perso sotto vibrazione decresce, con un aumento della rigidità trasversale del giunto.

Valutando i coefficienti d'attrito, con diversi valori dovuti a lubrificazioni diverse, al diminuire dell'attrito tra i filetti (μ_1) aumenta la perdita di precarico, poiché la forza d'attrito diminuisce; stessa cosa si può dire per l'attrito tra bullone e flange (μ_2), ad eccezione dei valori più bassi (0.05) poiché per tali valori lo slittamento è lieve, rendendo più lento il verificarsi dell'autoallentamento; per quanto riguarda l'attrito all'interfaccia tra le piastre (μ_3) esso non ha effetti sulla perdita di precarico, ma influisce sulla rigidità trasversale, che aumenta al crescere di μ_3 , a differenza degli altri due coefficienti che non la influenzano.

Un filetto a passo fine garantisce una minore perdita di precarico, così come un piccolo gioco tra vite e foro, probabilmente poiché al diminuire di esso aumenta la superficie di contatto al sottotesta.

I parametri che più influiscono sull'auto allentamento e che vanno presi più in considerazione in fase di progetto sono quindi i coefficienti d'attrito di filetto e superficie di contatto bullone-giunto, cercando di dare il massimo precarico e aumentando l'attrito tra le superfici del giunto.

3.2 INFLUENZA DELLA TORSIONE ELASTICA DEL GAMBO DELLA VITE

E' stato verificato sperimentalmente in [2] che la torsione elastica del gambo della vite dovuto a uno spostamento relativo dei filetti di vite e dado ricopre un ruolo importante per il verificarsi dell'auto allentamento.

Sono indicati con:

- α il semiangolo del filetto
- β l'angolo d'elica
- r la posizione radiale dall'asse del bullone
- u lo spostamento lungo la circonferenza corrispondente alla torsione
- R_r la forza che muove il filetto della vite in alto o in basso lungo la superficie del filetto del dado
- F_a la forza che muove il filetto della vite lungo l'elica
- F_t la forza di richiamo lungo l'elica dovuta alla torsione.

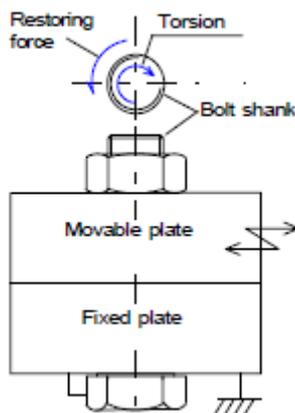


Figura 5: torsione del gambo

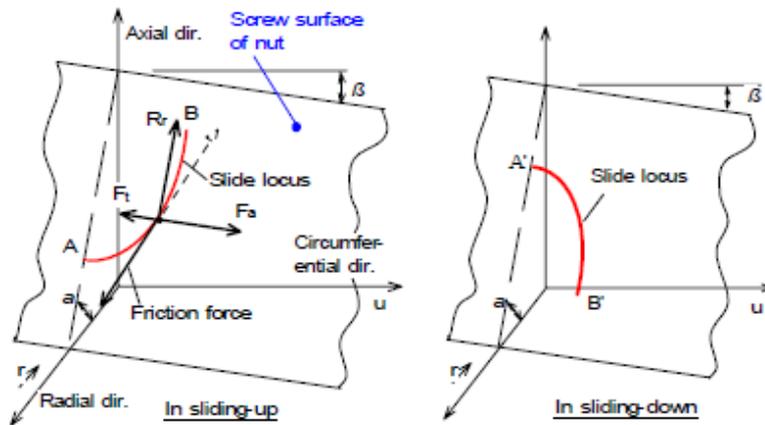


Figura 6: luogo dei punti di slittamento

La risultante delle forze R_r , F_a e F_t è tangenziale al luogo dei punti di slittamento del filetto della vite (slide locus in figura) ed opposta alla forza di attrito. Sulle superfici di contatto dei filetti parte degli slittamenti in alto e in basso coincidono, provocando un angolo di torsione $\theta_T = \frac{2u}{d_p}$, con d_p diametro primitivo della filettatura. Lo spostamento u può raggiungere un valore critico (con un angolo di torsione θ_T critico) nella condizione $F_a = F_t$. Una volta però che il dado slitta sulla superficie di contatto col giunto, si ha una rotazione di un unico corpo vite-dado, rilasciando la torsione. In questo caso non si ha allentamento, perché non vi è slittamento tra i filetti di vite e dado. Invece, finché il filetto della vite scorre lungo quello del dado, aumentando u e riducendo la tensione assiale F_f di una quantità corrispondente alla deformazione di $u \cdot \tan \beta$, tale rotazione si traduce in un allentamento.

3.3 PRESENZA DI SLITTAMENTI PARZIALI TRA BULLONE E PIASTRE

Tramite una simulazione FEM è stato dimostrato in [3] che l'allentamento inizia da uno slittamento trasversale lungo la superficie di contatto bullone-piastre e che esso avviene a causa di piccoli slittamenti parziali che avvengono prima dello slittamento totale della superficie.

E' stata riprodotta la macchina di Junker, in cui solo il piatto mobile della macchina è stato modellato, in quanto è trascurabile l'attrito con il piatto fisso, con un bullone M10 precaricato di 9.8 kN.

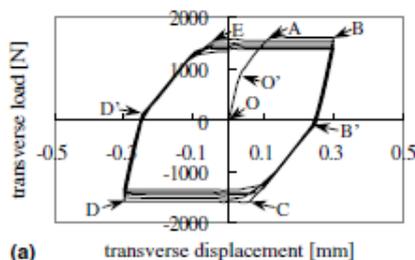


Figura 7: curva isteretica carico trasversale-spostamento

Il carico trasversale in funzione dello spostamento del piatto mobile, rappresentato in un grafico carico trasversale-spostamento da una curva detta isteretica, presenta 3 zone: una, subito dopo l'inizio dello spostamento del piatto verso una direzione (B-B',D-D'), in cui si ha slittamento localizzato sia sul dado che sui filetti, ma non si ha slittamento completo né trasversale né rotazionale tra dado e piatto, quindi lo spostamento trasversale è minimo; nella seconda (B'-C,D'-E) si ha uno slittamento completo tra le superfici dei filetti, che provoca una deformazione torsionale nel corpo della vite; nella terza regione (C-D,E-B) si ha uno slittamento completo anche tra dado e piatto, che provoca una forza trasversale costante data dal prodotto tra precarico e coefficiente di attrito.

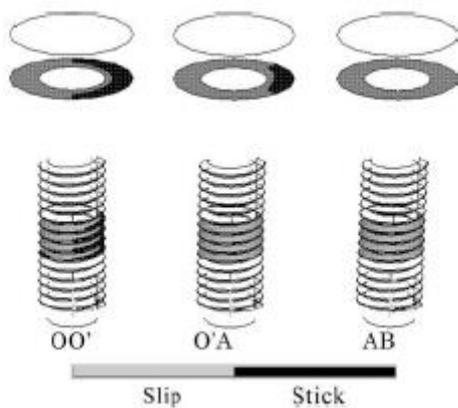


Figura 8: zone di slittamento e adesione sui filetti e nel sottotesta

Misurando l'angolo di rotazione del dado lungo l'arco del ciclo, è stato notato che un leggero allentamento avviene prima del completo slittamento del dado sul piatto. Queste piccole rotazioni causano un calo del precarico, che risulta poi nello slittamento del dado. Questo fenomeno ha origine nella variazione delle regioni di slittamento localizzato tra un punto morto e l'altro del moto del piatto mobile.

E' stata poi diminuita l'ampiezza dello spostamento del piatto mobile da 0.3 a 0.06 mm. In questo caso non si ha la prima regione (slittamento localizzato nel filetto e tra dado e piatto), e l'allentamento avviene quando il corpo della vite è deformato torsionalmente nella seconda zona. Questa deformazione non viene rilasciata neanche quando l'allentamento procede.

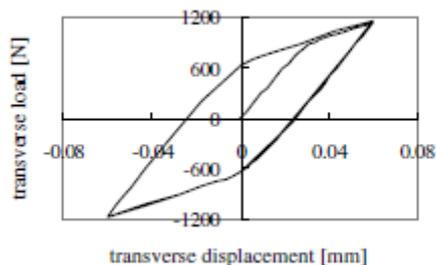


Figura 9: curva isteretica con spostamento di 0.06 mm

Misurando l'angolo di rotazione della testa del bullone lungo 3 cicli si ha la rotazione maggiore nel primo, in particolare nella prima fase di esso, prima del completo slittamento dado-piatto mobile.

I collegamenti filettati hanno una tendenza ad allentarsi a causa della forma elicoidale del filetto. La figura seguente tratta da [4] mostra le reazioni vincolari del filetto R_{pn} ($n=1, \dots, 4$) al precarico F_p in 4 punti della circonferenza; il momento di allentamento è dato dalle componenti in direzione circonferenziale R_{pnL} ($n=1, \dots, 4$) di tali reazioni.

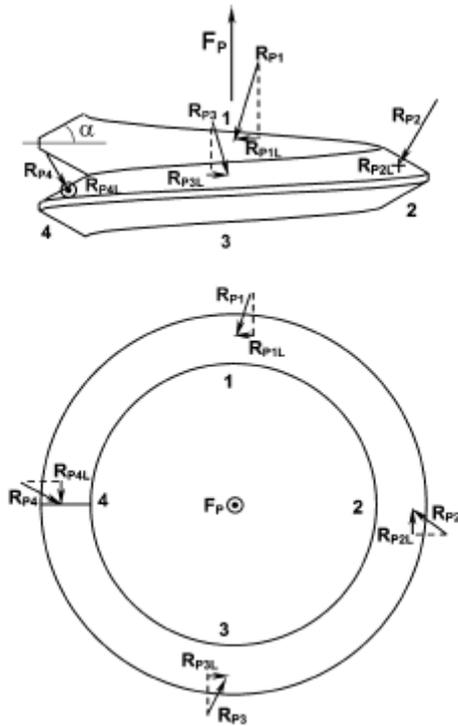


Figura 10: reazioni vincolari del filetto

In assenza di carichi esterni il giunto rimane fissato perché l'attrito sulle superfici del filetto si oppone al momento di allentamento generato dalle componenti lungo la circonferenza delle reazioni vincolari della filettatura. In presenza di carico di taglio invece le forze di attrito lungo la circonferenza del filetto diminuiscono mentre le forze di contatto variano dalla direzione circonferenziale a quella del carico di taglio per opporsi ad esso. Si genera quindi uno slittamento tra le superfici di filetto e testa della vite che provoca l'allentamento.

La fase iniziale del self loosening è caratterizzata da slittamento localizzato su entrambe le superfici, in seguito esso diventa completo nel filetto ed eventualmente nell'ultima fase anche il sottotesta scivola completamente. Nella prima fase l'allentamento è di piccola entità, per poi crescere nelle fasi successive. La prima fase è critica, perché può avvenire a carichi inferiori a quelli richiesti per lo slittamento completo, ad esempio simulazioni numeriche hanno determinato un allentamento per slittamento localizzato che avviene per carichi di taglio pari al 9% del precarico, mentre quello per slittamento completo si ha ad un carico pari al 16%.

Lo slittamento è funzione delle forze tangenziali alle superfici (che lo generano) e di quelle di contatto normali ad esse (che generano attrito). Il giunto ha un momento di

allentamento iniziale dovuto alla reazione del filetto al precarico. Il componente bloccato è poi soggetto a carico di taglio, che viene trasferito al bullone attraverso l'attrito nel sottotesta, oppure per contatto tra il componente bloccato e il corpo della vite, dovuto a slittamento completo del sottotesta e flessione della vite. La componente del carico tangenziale al fianco del filetto contribuisce al suo slittamento, mentre il resto modifica la distribuzione delle forze di contatto. Anche la flessione contribuisce allo scorrimento sul fianco del filetto, a causa della rotazione attorno all'asse del momento flettente, che causa una variazione della distribuzione delle forze di contatto, provocando lo slittamento in zone con una bassa reazione di contatto. Inoltre il momento flettente provoca una deformazione elastica della testa, con variazione della superficie di contatto, che provoca una variazione della distribuzione delle forze normali di contatto nel sottotesta.

Bulloni più lunghi presentano quindi self loosening ad un carico di taglio minore. Ma in caso di sistemi sottoposti a vibrazione trasversale, come la macchina di Junker, essi possono ridurre l'auto allentamento. Questo perché in tali situazioni la forza di taglio è funzione dello spostamento e della rigidità del bullone. Avendo un bullone lungo una minore rigidità a flessione, esso è soggetto ad un minore carico di taglio, e quindi è meno probabile l'allentamento.

La distribuzione del carico lungo il filetto è un altro fattore che influenza il self loosening, questo a causa del fatto che i primi passi sopportano la maggior parte del carico, il 73% i primi 3, quindi hanno una maggiore resistenza per attrito. Solo dopo che il carico ha superato la resistenza dei primi passi del filetto, allora anche quelli successivi iniziano a slittare. L'angolo di rotazione nei primi passi è quindi maggiore che in quelli successivi.

Per studiare il contatto tra le superfici e determinare le zone di slittamento in [5] sono stati introdotti tre coefficienti. Il coefficiente di trasferimento della forza d'attrito sulla forza normale e sul coefficiente d'attrito per il singolo nodo di contatto η_n fornisce il rapporto tra aree di non slittamento, aree di slittamento e aree di non contatto. E' ottenibile come

$$\eta_n = \frac{F_{taglio_n}}{F_{normale_n}} * 100 = \frac{\tau}{p * \mu} \quad (3.1)$$

con F_{taglio_n} la forza tangenziale dovuta ad attrito all'n-esimo nodo, $F_{normale_n}$ la forza di contatto normale all'n-esimo nodo, μ il coefficiente di attrito, τ la tensione tangenziale, p la pressione di contatto. Quando $\eta_n = 0\%$ non vi è contatto, se $0\% < \eta_n < 100\%$ si ha contatto senza slittamento, se $\eta_n = 100\%$ si ha slittamento.

Il coefficiente globale di trasferimento della forza d'attrito sulla forza normale e sul coefficiente d'attrito η_c è la somma su tutti i nodi di η_n :

$$\eta_c = \frac{\sum_{n=0}^{N_{tot}} F_{taglio_n}}{\left(\sum_{n=0}^{N_{tot}} F_{normale_n}\right) * \mu} * 100 \quad (3.2)$$

Dove N_{tot} è il numero totale dei nodi di contatto.

Il rapporto λ_c tra le aree di adesione e l'area totale è definito come

$$\lambda_c = \frac{\sum_{n=0}^{N_{stick}} A_n}{\sum_{n=0}^{N_{tot}} A_n} * 100 \quad (3.3)$$

In cui N_{stick} è il numero dei nodi di adesione e A_n è l'area di contatto dell'n-esimo nodo.

Variando lo spostamento trasversale S_q si ottiene una flessione e un'inclinazione del gambo della vite, che creano uno stato di contatto asimmetrico, con un aumento dell'area di contatto nel sottotesta A_h e una diminuzione dell'area di contatto nel filetto A_t .

Per lo spostamento critico, per cui si inizia ad osservare un angolo di allentamento significativo, solo il λ_c (circa 19%) del sottotesta è a contatto senza scorrimento, mentre il filetto slitta completamente; η_c è molto alto (circa 92%) anche nelle aree di adesione.

Nel passaggio da un punto morto della vibrazione all'altro le aree di adesione e di slittamento si invertono, provocando un piccolo angolo di rotazione della testa. L'accumulo di questi piccoli angoli di slittamento provoca un calo del precarico, fino al completo scorrimento trasversale del sottotesta dopo un certo numero di cicli.

3.4 SISTEMI ANTISVITAMENTO PER CONTRASTARE IL SELF LOOSENING

Per contrastare lo svitamento dei bulloni in [6] sono stati studiati diversi metodi di serraggio.

Uno dei più diffusi è quello con doppio dado. Per il serraggio si utilizza il metodo della rotazione inversa del dado inferiore (quello a contatto col piatto mobile), il cui filetto è in contatto con la superficie opposta rispetto al metodo di serraggio tradizionale, quindi la superficie inferiore del filetto del dado inferiore è in contatto con quella superiore della vite. L'interferenza tra i due dadi produce una forza sui filetti detta di bloccaggio.

Simulazioni hanno dimostrato come si abbia una bassissima perdita di precarico, a dimostrazione che il metodo con doppio dado, se il serraggio è fatto correttamente, impedisce il self loosening in maniera ottimale. Il problema risiede appunto nella difficoltà dell'attuazione della giusta operazione di serraggio. E' necessario un serio controllo della coppia di serraggio in tre momenti: serraggio del dado inferiore, serraggio di quello superiore e rotazione del dado inferiore nella direzione dell'allentamento.

Un altro sistema antisvitamento molto frequente è quello dell'utilizzo di una rondella elastica.

Confrontando l'angolo di rotazione della testa a causa del self loosening, esso è maggiore rispetto al bullone standard (un dado senza rondella). Questo aumento della

rotazione da allentamento è dato da due effetti: aumento della torsione del gambo a causa della maggiore lunghezza data dall'aggiunta della rondella; distribuzione delle pressioni nella rondella concentrata agli estremi di essa. Durante un ciclo dello spostamento del piatto mobile il giunto presenta quattro situazioni:

- slittamento parziale sia sul filetto che sulla superficie della rondella;
- slittamento completo sul filetto, alla fine di questa situazione le zone di contatto senza slittamento sulla rondella si riducono a tre/quattro punti alle estremità di essa;
- nel terzo momento esse sono ridotte a due;
- all'inizio del quarto e ultimo momento si ha completo slittamento anche per la rondella elastica, mentre alla fine si ritorna ad uno stato di contatto senza slittamento sul filetto.

Nella prima metà di ogni ciclo (spostamento del piatto mobile lungo le x positive) la testa con rondella elastica ruota nella direzione dell'allentamento, nella seconda metà (spostamento lungo le x negative) essa ruota nella direzione opposta, quella del serraggio. Questa differenza è causata dalla rotazione attorno a due punti di contatto della rondella. Nonostante ciò la rotazione nella direzione dell'allentamento è maggiore di quella opposta, in particolar modo nella situazione in cui i punti di contatto della rondella senza slittamento sono ridotti a due.

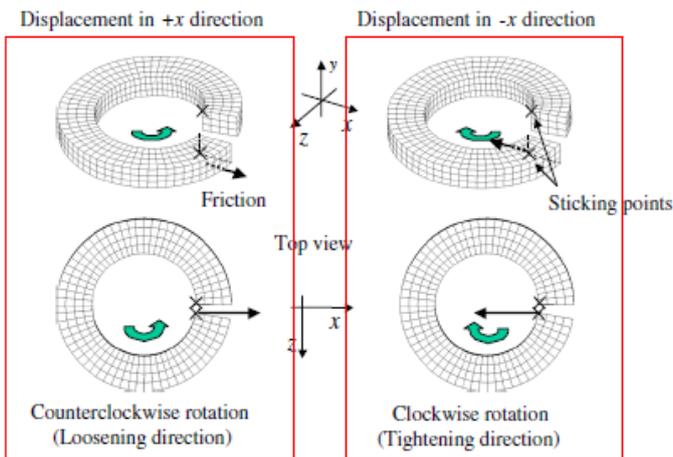


Figura 11: rotazione della rondella elastica

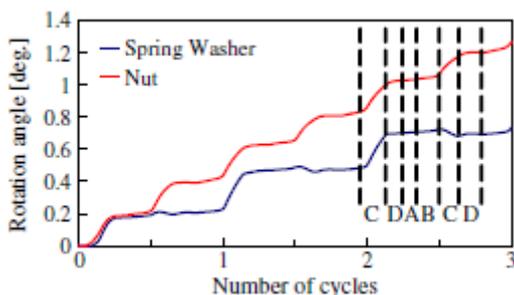


Figura 12: angolo di rotazione della rondella elastica

Il dado con rondella elastica quindi, nonostante non presenti le difficoltà di montaggio del doppio dado, non ha la stessa capacità di sopprimere il self loosening. In particolare la rondella elastica induce rotazioni da allentamento prima dello slittamento sulla superficie di contatto di essa.

4 ESTENSIMETRIA

Per lo studio del self relax sono state svolte prove sperimentali di estensimetria su provini cilindrici cavi (boccole) su cui vengono serrati dei bulloni, in modo da verificare lo stato deformativo delle boccole dal quale ricavare lo stato tensionale e quindi l'andamento del precarico esercitato dal bullone.

Lo strumento utilizzato per la misurazione della compressione dei provini è quindi un estensimetro elettrico a resistenza (ER) per ogni boccola.

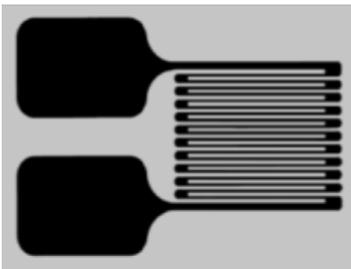


Figura 13: estensimetro elettrico [9]

Esso consiste di un conduttore elettrico incollato su un supporto di materiale plastico,, che viene reso solidale ad un'area ristretta all'elemento di cui si vuole misurare la deformazione tramite adesivo. In questo modo l'estensimetro subisce la stessa deformazione del provino. Deformandosi, il conduttore modifica la propria resistenza elettrica e, mediante un opportuno circuito detto "ponte di Wheatstone", è possibile misurare la conseguente variazione di tensione in uscita da tale circuito, che sarà proporzionale quindi alla deformazione dell'elemento in esame, e quindi anche il suo stato tensionale e la perdita di precarico del bullone.

Gli estensimetri sono disponibili in numerose configurazioni per adattarsi ad una vasta gamma di applicazioni.

L'estensimetro presenta quindi vantaggi come semplicità costruttiva, basso costo e buona precisione, per contro presenta la difficoltà di ottenere una buona adesione al provino nella giusta direzione per non ottenere valori errati della deformazione, e limitazioni dovute alla temperatura.

La relazione tra deformazione e tensione si ottiene dalle formule di Navier, ricavate dalla legge di Hooke, lungo le tre direzioni x, y, z.

Indicando con

- ε la deformazione dell'elemento lungo ciascuna delle tre direzioni ($\varepsilon = \frac{\Delta L [\mu m]}{L [m]}$ misurata in microepsilon [$\mu\varepsilon$])
- σ la tensione in ciascuna delle tre direzioni [MPa]
- E il modulo di elasticità trasversale [MPa]
- ν il coefficiente di Poisson

si hanno le equazioni di Navier

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{cases} \quad (4.1)$$

E le inverse

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)*(1-2\nu)} [\varepsilon_x(1-\nu) + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)] \\ \sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)*(1-2\nu)} [\varepsilon_y(1-\nu) + \nu(\varepsilon_z + \varepsilon_x)] \\ \sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)*(1-2\nu)} [\varepsilon_z(1-\nu) + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y)] \end{cases} \quad (4.2)$$

4.1 FORMULE DI BASE

4.1.1 CORRELAZIONE TRA DEFORMAZIONE E RESISTENZA DELL'ESTENSIMETRO

La legge di base dell'estensimetria mette in relazione la deformazione ε con la variazione di resistenza R [Ω] del conduttore

$$\varepsilon = \frac{1}{K} * \frac{\Delta R}{R} \quad (4.3)$$

In cui K è una costante caratteristica dell'estensimetro detta gage factor.

La resistenza è legata alle dimensioni del conduttore dalla seconda legge di Ohm:

$$R = \rho * \frac{L}{S} \quad (4.4)$$

- ρ resistività del conduttore [$\Omega \cdot m$]
- L lunghezza [m]
- $S = \pi r^2$ sezione [m^2]

L'ultima equazione può essere espressa in forma logaritmica

$$\log R = \log \rho + \log L - \log \pi - 2 \log r \quad (4.5)$$

Derivando rispetto al tempo t

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{L} \frac{dL}{dt} - \frac{2}{r} \frac{dr}{dt} \quad (4.6)$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - 2\frac{dr}{r} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} + 2\nu\frac{dL}{L} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L}(1 + 2\nu) = \frac{d\rho}{\rho} + \varepsilon(1 + 2\nu) \quad (4.7)$$

Essendo $\frac{dr}{r} = -\nu\frac{dL}{L}$; raccogliendo ε :

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon \left[\frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\varepsilon} + (1 + 2\nu) \right] \cong S_a \varepsilon \quad (4.8)$$

S_a è detta sensibilità del materiale del conduttore alla deformazione.

Uno dei materiali preferiti per i conduttori degli estensimetri è la costantana, una lega metallica composta per il 45% da nichel e per il 55% da rame, poiché ha una sensibilità costante al variare della deformazione e pari a 2.1, e presenta quindi un andamento lineare del rapporto $\frac{\Delta R}{R}$.

4.1.2 RESISTENZA MASSIMA AMMISSIBILE

Essendo l'estensimetro un conduttore percorso da corrente elettrica, al passaggio di tale corrente si hanno dissipazioni di potenza, dovuta alla resistenza del conduttore. Tale potenza viene dissipata per via termica (effetto Joule) portando quindi ad un innalzamento della temperatura.

Un vincolo è dato dalla massima potenza dissipabile per unità di superficie (P_D [mW/mm^2]) senza che l'elemento su cui è applicato l'estensimetro subisca danni, caratteristica del materiale del provino, dalla quale si può ricavare la massima potenza termica che il conduttore può liberare:

$$P_W^* = P_D * A \quad (4.9)$$

In cui A è l'area dell'estensimetro.

La potenza termica generata dall'estensimetro per effetto Joule è data da:

$$P_W = Ri^2 = \frac{e_0^2}{R} \quad (4.10)$$

Con

- R resistenza del conduttore
- i corrente elettrica che attraversa il conduttore
- e_0 tensione di alimentazione

La potenza termica generata dall'estensimetro deve ovviamente essere minore o uguale della massima potenza dissipabile P_W^* , da cui si ricava la massima resistenza consentita del conduttore

$$R \geq \frac{e_0^2}{P_W^*} \quad (4.11)$$

Dalla precedente formula () e sapendo che la variazione di tensione quando il provino (e quindi l'estensimetro) si deforma è proporzionale alla variazione di resistenza per mezzo di una costante C ($\frac{\Delta e}{e_0} = C \frac{\Delta R}{R}$) si ottiene:

$$R \geq \frac{\left(\frac{\Delta e}{C * S_a * \varepsilon}\right)^2}{P_W^*} \quad (4.12)$$

La resistenza elettrica ammissibile dell'estensimetro è quindi inversamente proporzionale alla capacità di dissipazione termica del materiale del provino.

4.1.3 FATTORE DELL'ESTENSIMETRO

Il gage factor K dell'estensimetro, che mette in relazione la deformazione con la variazione di resistenza del conduttore, è calcolato tramite prove sperimentali su provini campione sottoposti a deformazione nota.



Figura 14: schema di una prova per il calcolo del gage factor [9]

Essendo:

- S_a e S_t le sensibilità rispettivamente longitudinale e trasversale
- ε_a e ε_t le deformazioni rispettivamente longitudinale e trasversale
- $K_t = \frac{S_t}{S_a}$
- ν coefficiente di Poisson

Si ottiene:

$$\frac{\Delta R}{R} = S_a \varepsilon_a + S_t \varepsilon_t = S_a * (\varepsilon_a + K_t \varepsilon_t) = S_a * \varepsilon_a (1 - \nu * K_t) = K \varepsilon_a \quad (4.13)$$

Con il gage factor K definito quindi come

$$K = S_a * (1 - \nu K_t) \quad (4.14)$$

4.1.4 INFLUENZA DELLA TEMPERATURA

Una variazione di temperatura ΔT dell'ambiente in cui è impiegato l'estensimetro ha effetti soprattutto sulla variazione di resistenza elettrica ΔR (effetto interferente) e in misura minore sul fattore K (effetto modificante) quest'ultimo trascurabile rispetto al primo. Questi effetti producono una deformazione apparente che viene misurata dall'estensimetro che fornisce quindi valori falsi della deformazione che andranno corretti agendo sul ponte di Wheatstone.

La resistività ρ subisce una variazione pari a $\gamma\Delta T$, con γ costante che per il materiale più utilizzato, la costantana, vale $4 * 10^{-5}/K$.

La resistenza modifica quindi il suo valore di

$$\Delta R = \Delta\rho \frac{L}{S} = \rho_0 \gamma \Delta T \frac{L}{S} \quad (4.15)$$

La conseguente deformazione apparente dovuta alla variazione della resistività è pari a

$$\varepsilon_{a1} = \frac{\gamma \Delta T}{K} \quad (4.16)$$

Si ha una variazione anche delle lunghezze di conduttore dell'estensimetro e provino. Il conduttore in seguito alla variazione di temperatura assume una lunghezza

$$L_{T_est} = L_{0_est} * (1 + \alpha_{est} \Delta T) \quad (4.17)$$

A cui corrisponde una deformazione apparente

$$\varepsilon_{a2_est} = \frac{L_{T_est} - L_0}{L_0} = \alpha_{est} \Delta T \quad (4.18)$$

Per il provino:

$$L_{T_pro} = L_{0_pro} * (1 + \alpha_{pro} \Delta T) \quad (4.19)$$

$$\varepsilon_{a2_pro} = \frac{L_{T_pro} - L_{0_pro}}{L_{0_pro}} = \alpha_{pro} \Delta T \quad (4.20)$$

L'insieme di tutti questi effetti su resistività e lunghezza di conduttore e provino genera una deformazione apparente totale dovuta alla variazione della resistenza pari alla somma di quelle calcolate sopra

$$\varepsilon_{aR} = \varepsilon_{a1} + \varepsilon_{a2_est} + \varepsilon_{a2_pro} = \left[\frac{\gamma}{K} + (\alpha_{pro} - \alpha_{est}) \right] \Delta T \quad (4.21)$$

Dal confronto delle variazioni di lunghezza di estensimetro e provino:

- Se $\alpha_{pro} > \alpha_{est}$ si ottiene una ε_{aR} positiva, pari a una dilatazione apparente
- Se $\alpha_{pro} < \alpha_{est}$ si ottiene una ε_{aR} negativa, pari a una contrazione apparente

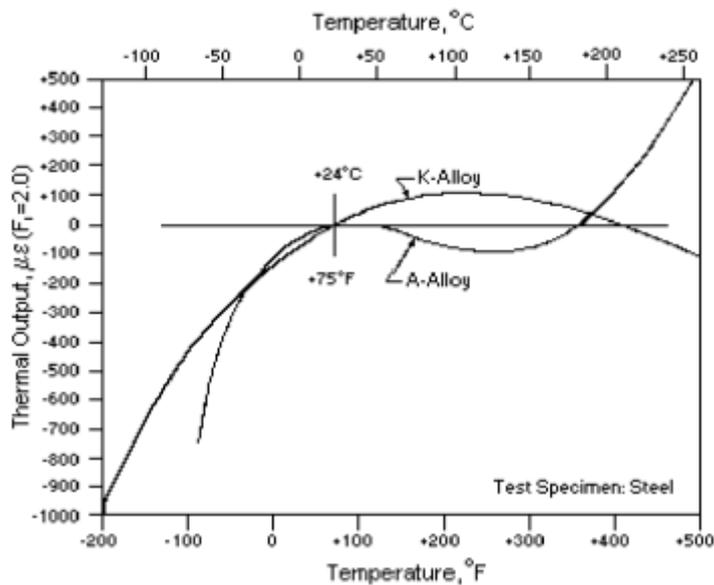


Figura 15: deformazione apparente [9]

Dalla (4.21) e dal grafico si nota che è possibile combinare i coefficienti di dilatazione termica α per compensare l'effetto del rapporto γ/K .

4.2 IL PONTE DI WHEATSTONE

Il ponte di Wheatstone è un circuito di misura utilizzato per convertire la grandezza misurata da un sensore (nel nostro caso la deformazione del provino misurata dall'estensimetro) in un segnale elettrico, che a sua volta verrà letto da un software e convertito in un valore numerico che corrisponde alla grandezza calcolata con la sua unità di misura (nel nostro caso la deformazione calcolata in $\mu\epsilon$).

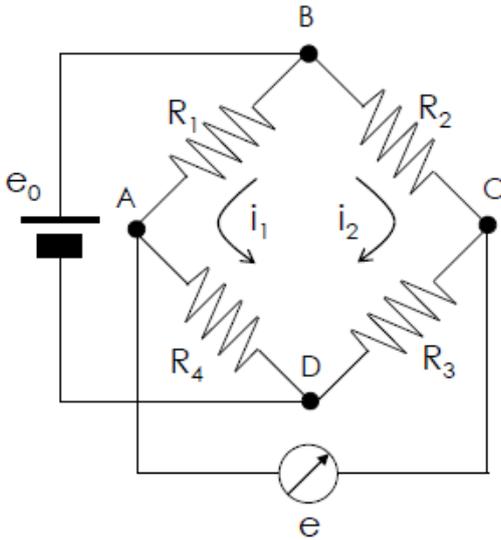


Figura 16: ponte di Wheatstone [9]

Il ponte di Wheatstone è composto da quattro resistenze; a due nodi opposti del circuito (B e D in figura) è collegato un generatore indipendente di tensione che eroga una tensione di alimentazione e_0 , agli altri due nodi (A e C) è collegato un misuratore della tensione in uscita e .

Il rapporto di queste due tensioni è funzione delle quattro resistenze

$$\frac{e}{e_0} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)} \quad (4.22)$$

All'inizio della prova il ponte va equilibrato, imponendo la tensione di uscita e uguale a 0, ottenendo

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (4.23)$$

Durante la prova, una delle quattro resistenze è rappresentata dall'estensimetro, di solito R_1 . Quando esso viene deformato, la sua resistenza subisce una variazione pari a ΔR_1 a cui corrisponde una variazione della tensione di uscita Δe . Il rapporto $\Delta e/e_0$ è calcolabile come

$$\frac{\Delta e}{e_0} = \frac{(R_1 + \Delta R_1)R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + \Delta R_1 + R_4)(R_2 + R_3)} = \frac{(R_1 R_3 - R_2 R_4) + \Delta R_1 R_3}{(R_1 + \Delta R_1 + R_4)(R_2 + R_3)} = \frac{\Delta R_1 R_3}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3) \left(1 + \frac{\Delta R_1}{(R_1 + R_4)}\right)} = \frac{\Delta R_1 \alpha}{R_m \left(1 + \frac{\Delta R_1}{R_m}\right)} \quad (4.24)$$

Avendo indicato con

- $R_m = R_1 + R_4$
- $\alpha = \frac{R_3}{R_2 + R_3}$

Ipotizzando tutte le resistenze uguali a R_1 , il rapporto $\Delta e/e_0$ sarà pari a $\frac{1}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1}$, mentre nel più generico caso in cui tutte le resistenze possono variare si ha

$$\frac{\Delta e}{e_0} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) = \frac{K}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (4.25)$$

Abbiamo quindi che deformazioni su lati adiacenti del ponte si sottraggono fra loro mentre quelle su lati opposti si sommano.

Come detto in precedenza l'estensimetro rappresenta una delle quattro resistenze; questa configurazione è detta a quarto di ponte.

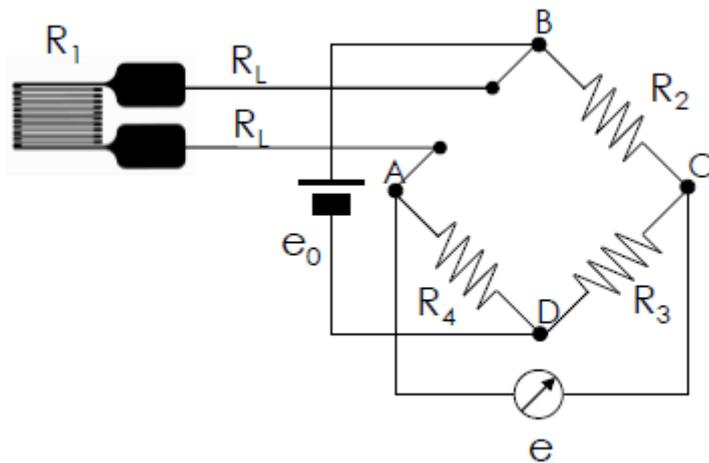


Figura 17: configurazione a quarto di ponte [9]

In questo caso abbiamo una relazione tra tensione e deformazione $\frac{\Delta e}{e_0} = \frac{K}{4} \varepsilon_1$.

Oltre all'estensimetro, sono presenti le resistenze R_L dei fili che lo collegano al ponte. Bilanciando si ottiene

$$\frac{R_1 + 2R_L}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \quad (4.26)$$

In presenza di una variazione di temperatura le resistenze dei fili presentano una variazione che porta alla lettura di una deformazione apparente che si somma a quella dell'estensimetro, fornendo risultati errati. Per eliminare questo errore si adotta la configurazione a mezzo ponte.

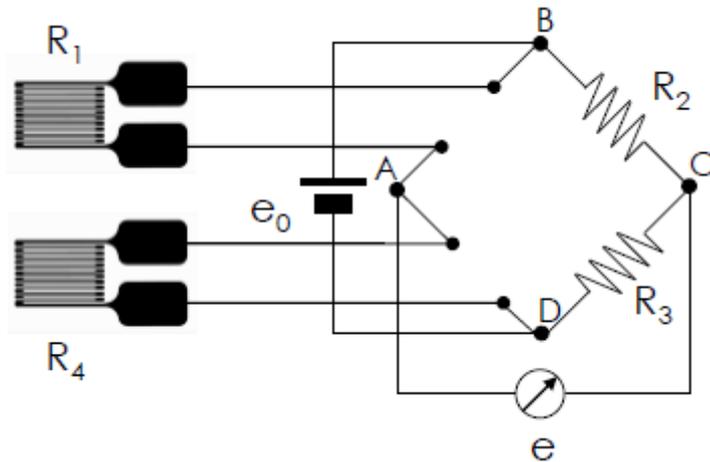


Figura 18: configurazione a mezzo ponte [9]

Poiché le deformazioni su due rami adiacenti si sottraggono, viene collegato un secondo estensimetro, detto compensatore o dummy, in corrispondenza di una delle resistenze adiacenti a quello di prova, normalmente R_4 .

Il dummy è scarico, non viene quindi sottoposto a deformazione ($\varepsilon_4 = 0$), ma è soggetto alla stessa variazione di temperatura dell'estensimetro di prova, quindi anche i suoi fili di collegamento al ponte subiscono la stessa ΔR_L e quindi la stessa deformazione apparente ($\varepsilon_{a1} = \varepsilon_{a4}$).

Si ottiene quindi

$$\frac{\Delta e}{e_0} = \frac{K}{4} (\varepsilon_1 + \varepsilon_{a1} - \varepsilon_4 - \varepsilon_{a4}) = \frac{K}{4} \varepsilon_1 \quad (4.27)$$

La deformazione apparente dei fili di collegamento dell'estensimetro al ponte è quindi compensata e non va a modificare la misurazione della deformazione del provino.

5 PROVE SPERIMENTALI

Per studiare il fenomeno del self relax sono state effettuate prove estensimetriche su boccole serrate da bulloni. Tali prove si sono svolte sotto la supervisione dell'ingegner De Agostinis.

In precedenza erano stati preparati dei provini cilindrici cavi (boccole) su cui andranno inseriti i bulloni da serrare. In totale sono stati preparati 24 provini in due diversi materiali: 12 in alluminio EN AW 6060-O, 12 in acciaio S235JR.

Ogni boccola è stata preventivamente carteggiata per eliminare gli ossidi superficiali poi pulita con alcol isopropilico. È stata in seguito segnata assialmente e trasversalmente con un truschino per un centraggio perfetto dell'estensimetro con l'asse longitudinale della griglia parallelo a quello della boccola. Sono poi stati centrati gli estensimetri sui provini ed incollati utilizzando un cianoacrilato a polimerizzazione rapida.

Le superfici di contatto tra bullone e boccola sono state protette dalle sbavature dell'adesivo con nastro adesivo, per non influenzarne i coefficienti di attrito.

I provini in alluminio sono stati indicati con le sigle A1,...,A12, mentre quelli in acciaio con le sigle S1,...,S12.

Le grandezze caratteristiche dei provini sono le seguenti:

- Diametro esterno $D_e = 14.50 \text{ mm}$
- Diametro del foro $d_f = 8.50 \text{ mm}$
- Area della superficie di contatto tra bullone e boccola $A_p = 108.38 \text{ mm}^2$
- Modulo elastico dell'alluminio EN AW 6060-O $E_{al} = 70000 \text{ MPa}$
- Modulo elastico dell'acciaio S235JR $E_{st} = 200000 \text{ MPa}$

Per le prove sono stati utilizzati bulloni M8 in acciaio con le seguenti caratteristiche:

- Diametro nominale $d = 8 \text{ mm}$
- Diametro medio $d_2 = 7.19 \text{ mm}$
- Diametro resistente $d_t = 6.83 \text{ mm}$
- Area resistente della vite $A_t = 36.61 \text{ mm}^2$
- Diametro esterno del sottotesta $D = 13 \text{ mm}$
- Diametro medio del sottotesta $D_m = 10.75 \text{ mm}$
- Passo della filettatura $p = 1.25 \text{ mm}$
- Angolo di avvolgimento $\lambda = 3.17^\circ$
- Semiangolo del filetto $\alpha_n = 30^\circ$
- Coefficiente di attrito medio $\mu_m = 0.28$
- Tensione limite di precarico $S_p = 640.00 \text{ MPa}$

Le estremità dei conduttori degli estensimetri di ciascun provino sono stati saldati a dei fili elettrici utilizzando lo stagno come materiale di apporto. L'estensimetro e i relativi fili costituiranno un ramo del ponte di Wheatstone.

Il software utilizzato per le misurazioni e i campionamenti è Labview.

I bulloni sono stati inseriti nei fori coassiali alle boccole e serrati manualmente tramite una chiave dinamometrica. La coppia di serraggio T è stata impostata in modo che ogni bullone presenti un precarico iniziale F_v di circa 13000 N.

In questo modo il provino presenta una tensione normale σ_{N_p} di circa 120 MPa.

Sia per le 12 boccole in alluminio sia per le 12 in acciaio le prove sono state effettuate in due diverse condizioni di lubrificazione. In 6 provini in alluminio e 6 in acciaio il bullone è stato serrato a secco, negli altri provini è stata applicata pasta ceramica come lubrificante nel sottotesta della vite e nei filetti a contatto tra vite e dado.

Le boccole sono state collegate ai rispettivi ponti di Wheatstone e tenute ferme da una morsa in modo che non vi siano possibili movimenti che possano alterare i risultati della prova.

Per ciascun provino estensimetrato è stata adottata la configurazione a mezzo ponte, utilizzando quindi un secondo provino non serrato (dummy) per eliminare gli effetti della variazione di temperatura sulla lettura della deformazione come visto in precedenza.

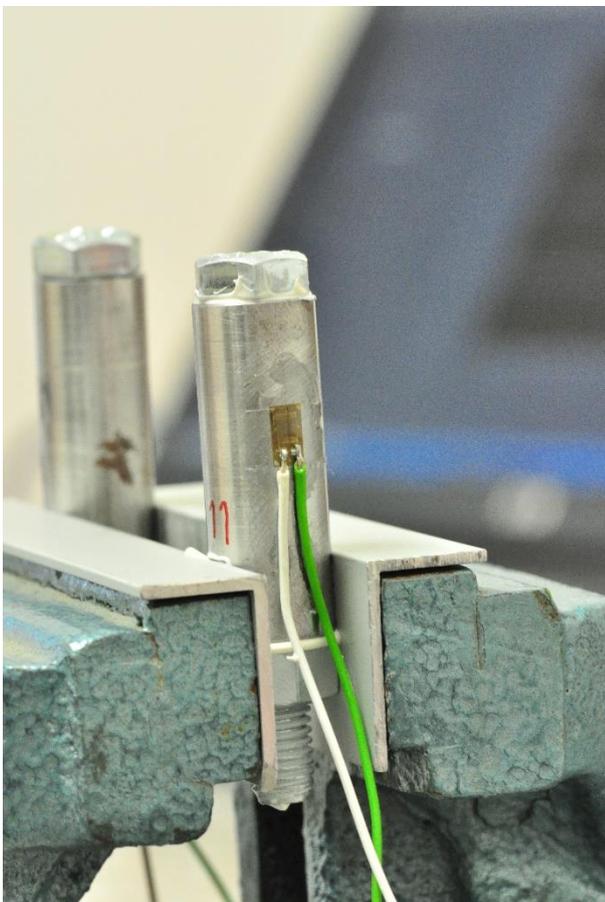


Figura 19: provino estensimetrato con bullone e pasta ceramica

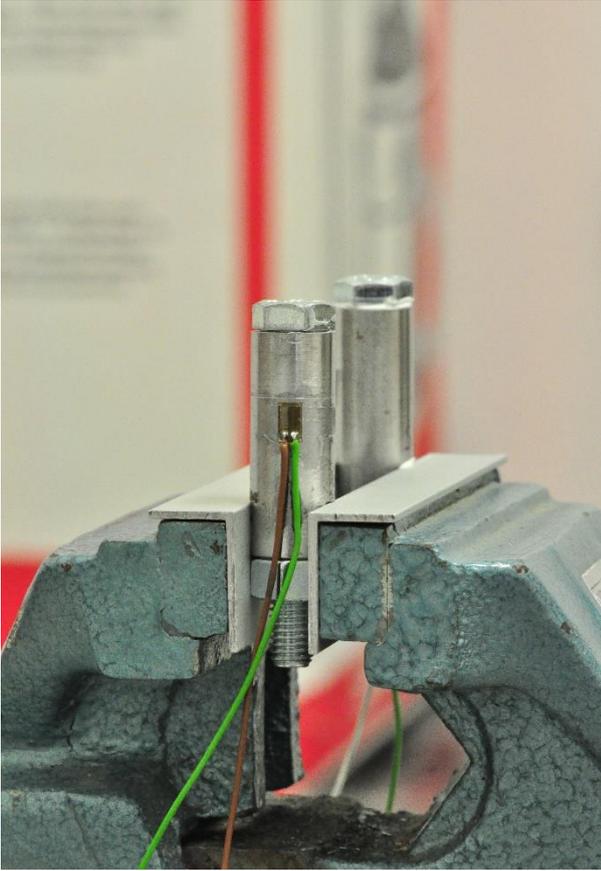


Figura 20: provino estensimetrato con bullone serrato a secco

Una volta serrato il bullone con il giusto momento di serraggio, esso è stato lasciato in quella condizione per circa un'ora. In questo intervallo di tempo il software labview ha misurato l'andamento della deformazione per compressione della boccola e campionato tale valore ad intervalli di due decimi di secondo circa, per un totale di circa 18000 campionamenti nell'arco della prova.

In questo modo si è potuto notare quanto è calata la compressione del provino e il corrispondente precarico del bullone nell'ora di prova e confrontare questo andamento nelle varie condizioni di materiale della boccola (alluminio o acciaio) e di lubrificazione (a secco o con pasta ceramica), deducendo l'efficienza di tali giunti nel mantenere il precarico anche nelle normali applicazioni.

Al termine della prova ciascun bullone è stato disserrato con un coppia T_{rel} calcolabile nel modo seguente

$$T_{rel} = F_v * \left(\frac{d_2}{2} * \frac{\mu_g * \cos(\lambda) - \cos(\alpha_n) * \sin(\lambda)}{\cos(\alpha_n) * \cos(\lambda) + \mu_g * \sin(\lambda)} + \frac{D_m}{2} * \mu_k \right) \quad (5.1)$$

con:

- μ_g coefficiente di attrito tra i filetti
- μ_k coefficiente di attrito tra sottotesta e boccola

6 ANALISI DEI RISULTATI

Dai valori della deformazione di ciascuna boccola è possibile determinare la tensione normale σ_{N_p} e quindi il carico assiale sul giunto P_v ad ogni istante di campionamento. Riportando l'andamento del carico F_v [N] in un grafico, si nota che per tutti i provini tale andamento presenta un massimo in corrispondenza del momento in cui è stata raggiunta la coppia di serraggio voluta.

Una volta rilasciata la coppia, il carico assiale presenta un rapido decadimento negli istanti immediatamente successivi. Tale decadimento rallenta dopo pochi istanti, ma continua ad essere presente. Il carico infatti continua a decrescere anche per lunghi periodi, con una rapidità che dipende principalmente dal materiale del provino e dal tipo di lubrificazione, ma anche da altri fattori come condizioni del provino, finitura superficiale, tensionamenti.

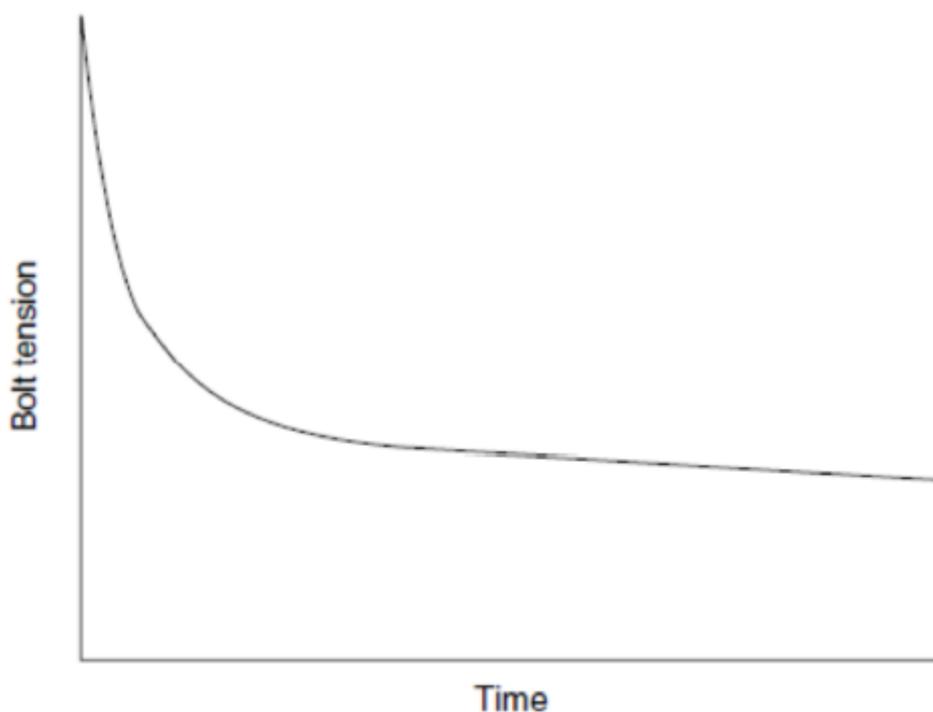


Figura 21: andamento del carico nel bullone in funzione del tempo

Inoltre, essendo i bulloni serrati a mano, la coppia, e quindi il carico F_v , non vengono ottenuti con precisione, per questo non si raggiunge esattamente il precarico desiderato di 13000 N, ma un valore compreso tra 9000 N e 18000 N.

Per tutti questi motivi l'andamento del carico assiale presenterà delle differenze per ciascun provino, ma tutti con la stessa caratteristica illustrata sopra.

Il rapido decadimento del precarico negli istanti immediatamente successivi al serraggio è detto “rilassamento spontaneo a breve termine” (*short-term relaxation*). E’

determinato principalmente da fenomeni di assestamento a causa di locali tensionamenti oltre il limite di snervamento del materiale. Tali deformazioni plastiche si verificano sulle superfici di contatto tra i filetti e tra boccola e bullone, a causa del fatto che tali superfici non sono perfettamente lisce e quindi il contatto avviene su una superficie minore di quella nominale. Il contatto avviene quindi nei picchi superficiali, che quindi sono sottoposti ad una tensione maggiore di quella nominale, e che supera quella di snervamento provocando un appiattimento della superficie rugosa.

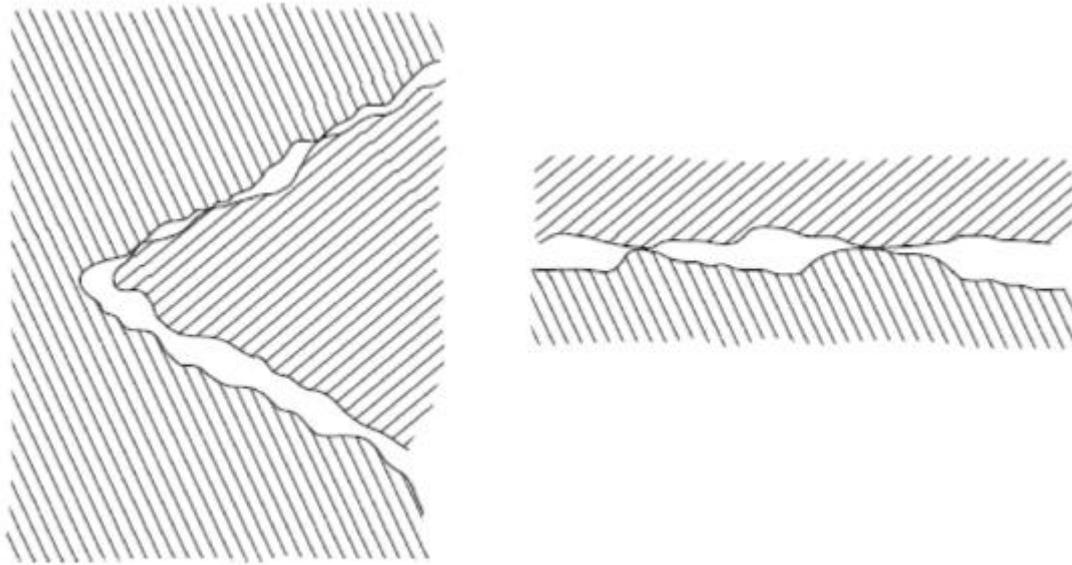


Figura 22: contatti tra le superfici dei filetti e tra sottotesta e boccola

Il metallo inizia così a deformarsi plasticamente fino a quando l'area di contatto sarà abbastanza grande da sopportare le forze in gioco senza ulteriori deformazioni. Al termine del serraggio si ha uno scorrimento del materiale che si assesta laddove il carico è eccessivo, provocando il calo del carico assiale nei primi istanti.

6.1 PROVINI IN ALLUMINIO

I provini in alluminio sono stati indicati con le sigle A1, ..., A12. In particolare i bulloni dei provini A1, A4, A6, A8, A10 e A12 sono stati serrati a secco, quelli dei provini A2, A3, A5, A7, A9 e A11 con pasta ceramica lubrificante.

Tutti i bulloni presentano un decadimento a breve termine del precarico iniziale, ma con modalità differenti. Infatti i bulloni lubrificati con pasta ceramica presentano un calo più continuo, mentre quelli a secco presentano un'oscillazione del carico P_v al termine di tale decadimento.

Ciò può essere spiegato col fatto che in assenza di lubrificante c'è maggiore aderenza delle superfici di contatto tra filetti e tra bullone e boccola, quindi lo scorrimento tra queste superfici avviene a scatti e non in maniera continua come nel caso della pasta ceramica, con l'oscillazione del carico in corrispondenza di tali scatti.

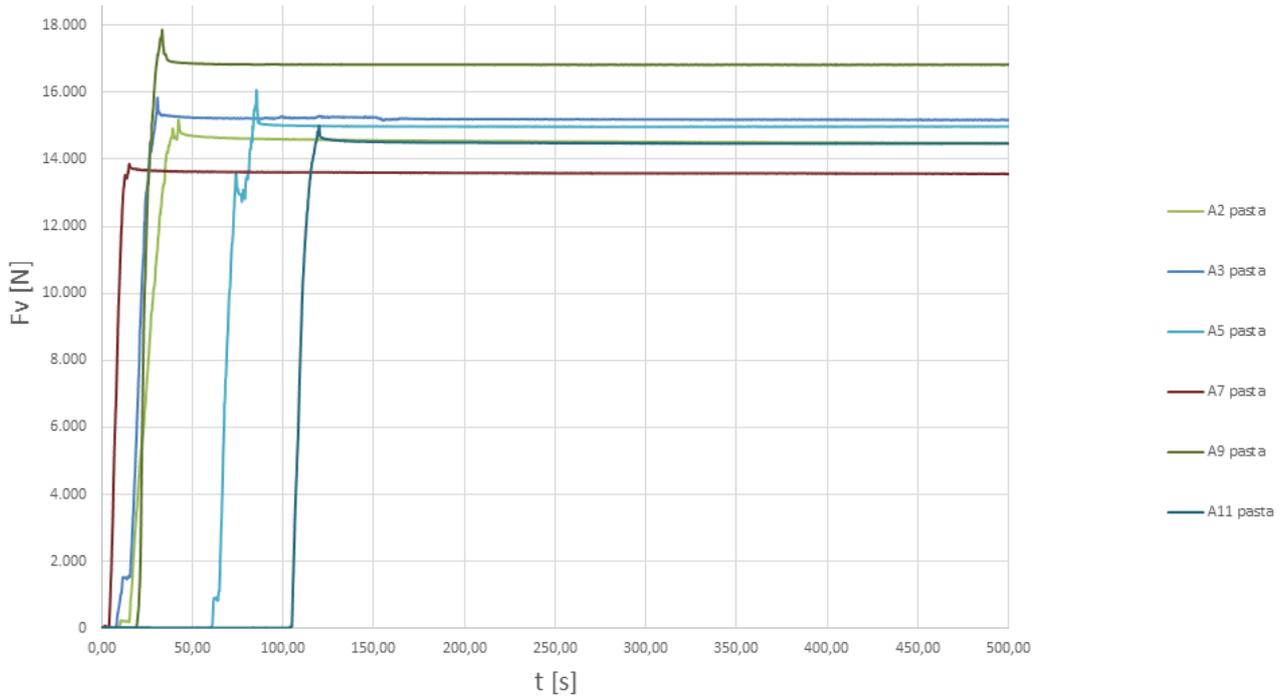


Figura 23: andamento del carico assiale per i provini in alluminio lubrificati con pasta ceramica

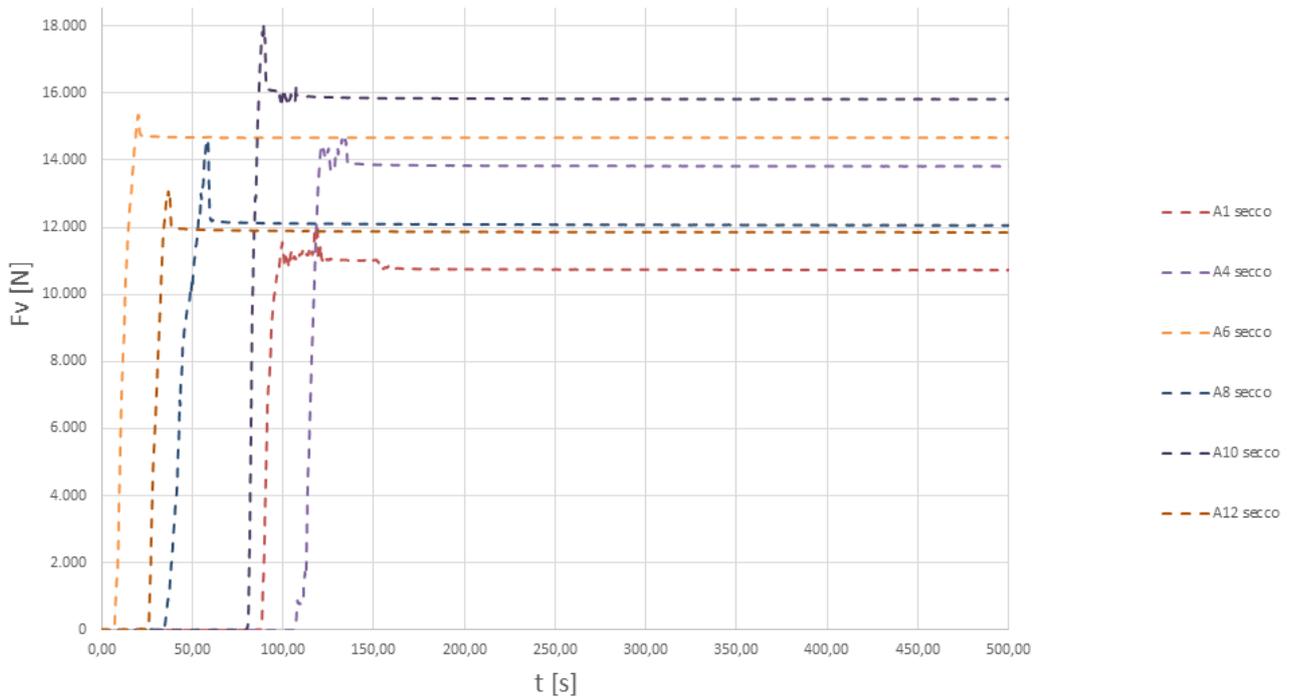


Figura 24: andamento del carico assiale per i provini in alluminio senza lubrificante

Per osservare la perdita di carico assiale per ogni provino, sono stati presi in esame i valori di tale carico in determinati istanti di tempo dopo il rilascio della coppia di serraggio:

- Ogni mezzo secondo circa per i primi 10 secondi
- Ogni 5 secondi dopo i primi 10 e fino a 1 minuto dal serraggio
- Ogni 5 minuti fino ad 1 ora dal serraggio

Per il provino A1 (senza lubrificante):

- carico massimo al serraggio di 12078.42 N
- calo nel primo mezzo secondo poi oscillazione in un range tra 11479.05 N e 11031.42 N nei primi 4 secondi;
- decadimento lento fino a stabilizzarsi a 10705.18 N dopo 20 minuti

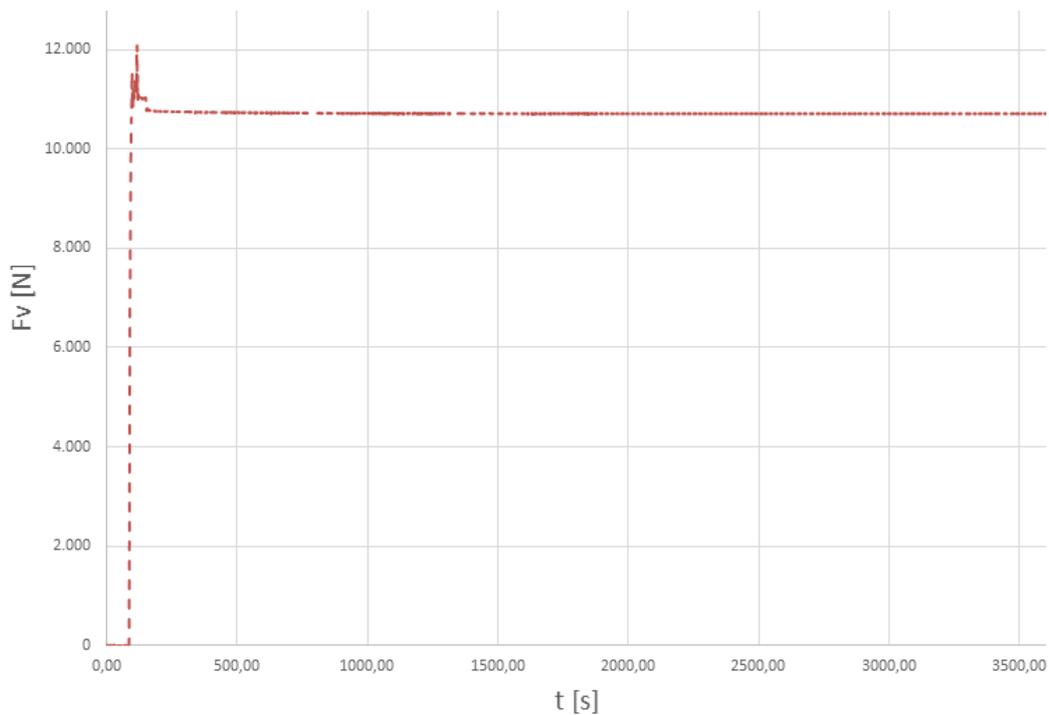


Figura 25: A1

Per il provino A2 (lubrificato con pasta ceramica):

- carico massimo al serraggio di 15181.48 N
- decadimento rapido nel primo secondo fino a circa 14800 N
- calo lento e progressivo fino al termine della prova, arrivando al valore di 14369.68 N dopo un'ora dal serraggio

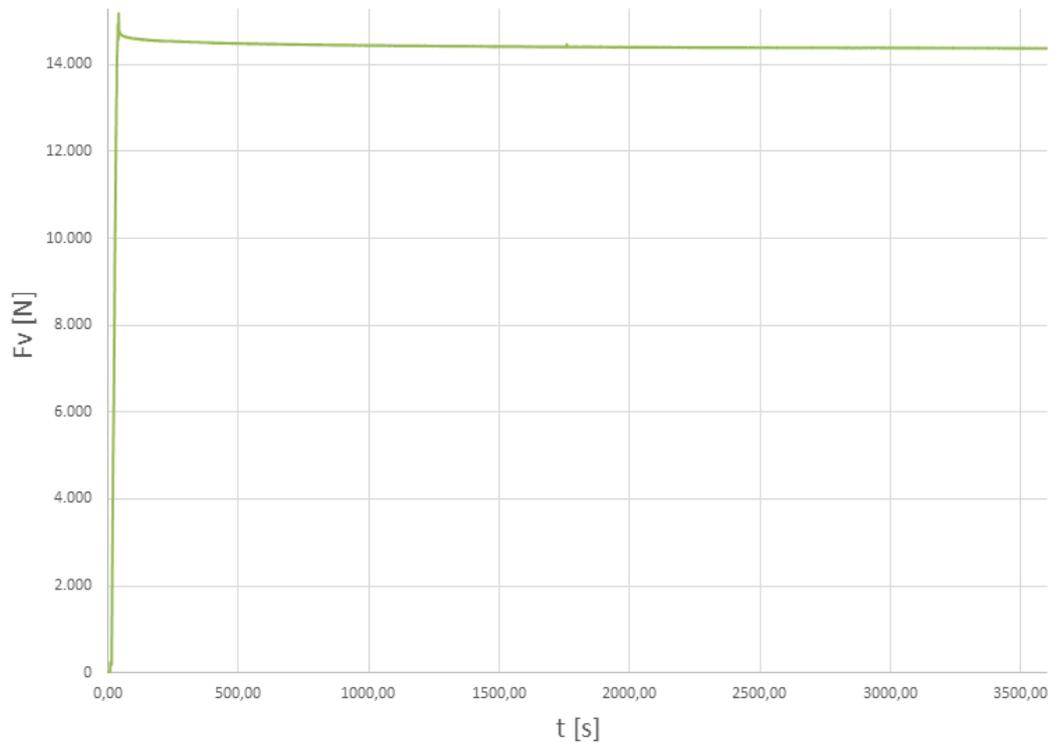


Figura 26: A2

Per il provino A3 (lubrificato con pasta ceramica):

- carico massimo al serraggio di 15841.54 N
- decadimento rapido nei primi 2 secondi fino a circa 15325.63 N
- calo lento e progressivo fino a stabilizzarsi 15158.72 N dopo 35 minuti

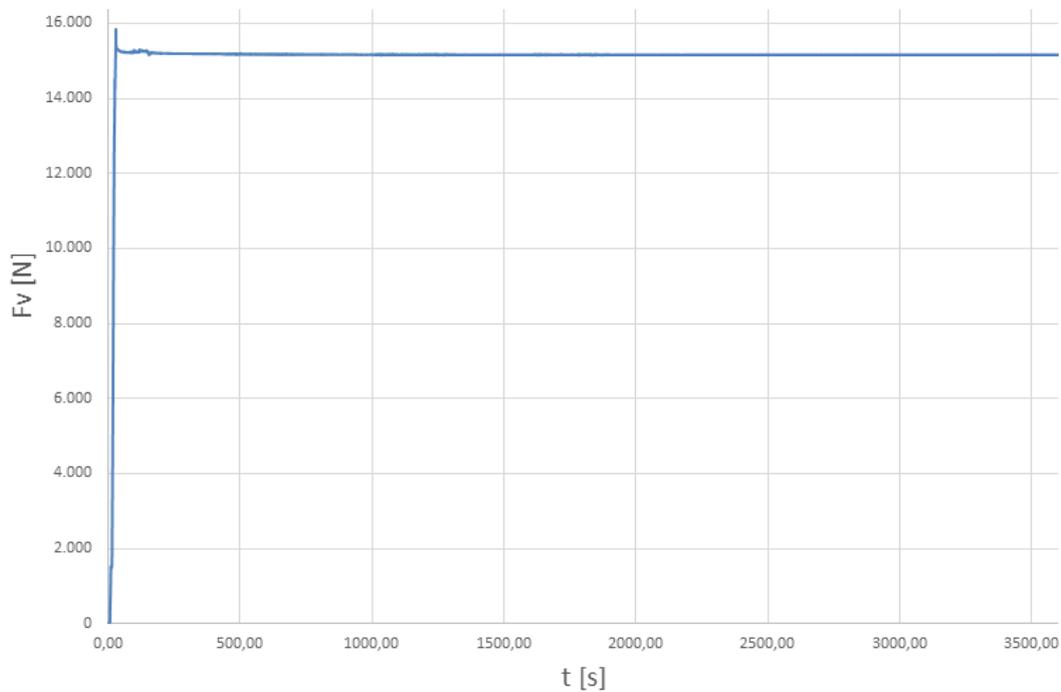


Figura 27: A3

Per il provino A4 (senza lubrificante):

- carico al serraggio di 14468.31 N

- forte oscillazione nei primi 10 secondi, compresa tra i 13700 N e i 14400 N
- decadimento molto lento fino a stabilizzarsi sui 13823.42 N dopo 10 minuti

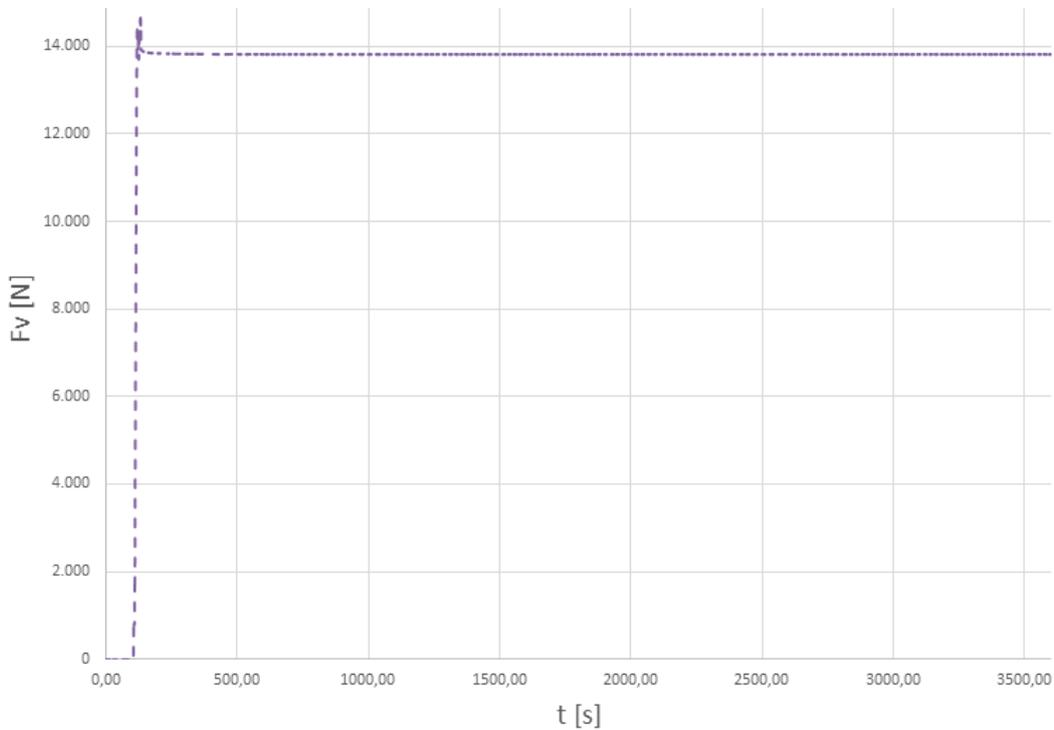


Figura 28: A4

Per il provino A5 (lubrificato con pasta ceramica):

- carico massimo al serraggio di 16069.15 N
- decadimento rapido nel primo secondo fino a 15090.44 N
- decadimento lento fino al valore di 14984.22 N dopo 10 minuti
- leggero aumento per stabilizzarsi a 15029.74 N

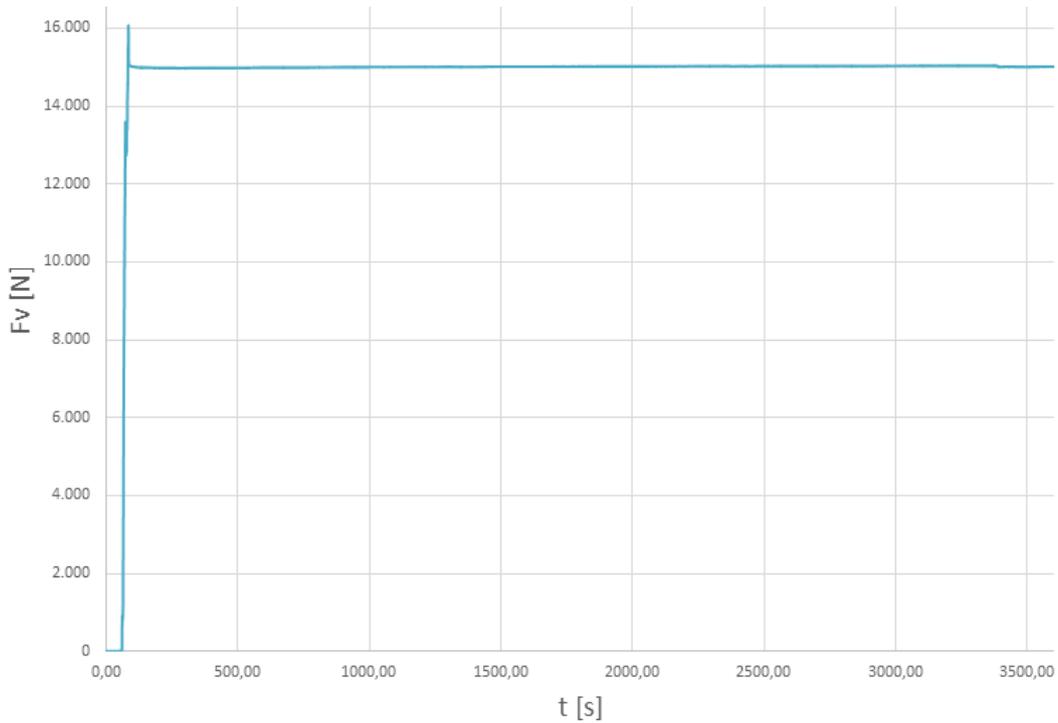


Figura 29: A5

Per il provino A6 (senza lubrificante):

- carico massimo al serraggio di 15333.22 N
- decadimento rapido nei primi 2 secondi fino a raggiungere i 14718.68 N
- variazione tra i 14718.68 N e i 14711.09 N fino a 5 secondi
- calo lento fino a 5 minuti raggiungendo il valore di 14657.98 N
- leggero aumento fino ad un valore finale di 14703.5 N dopo un'ora

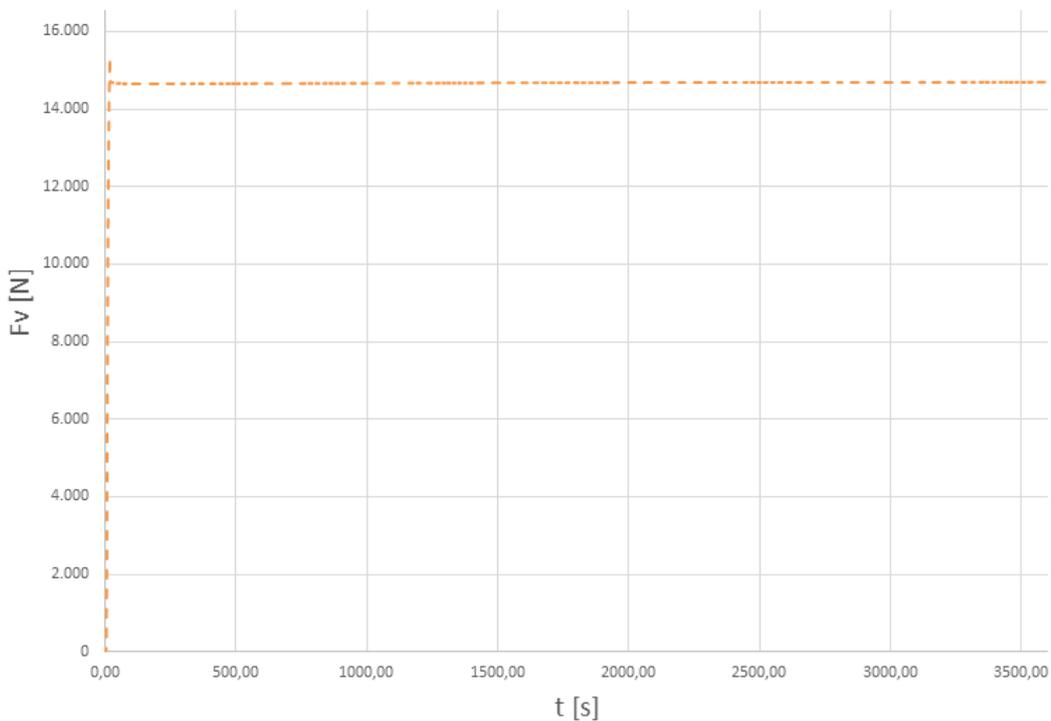


Figura 30: A6

Per il provino A7 (lubrificato con pasta ceramica):

- carico massimo al serraggio di 13868,94 N
- calo nei primi 2 secondi fino a raggiungere i 13717,2 N
- decadimento lento fino a raggiungere i 13519,94 N dopo un'ora

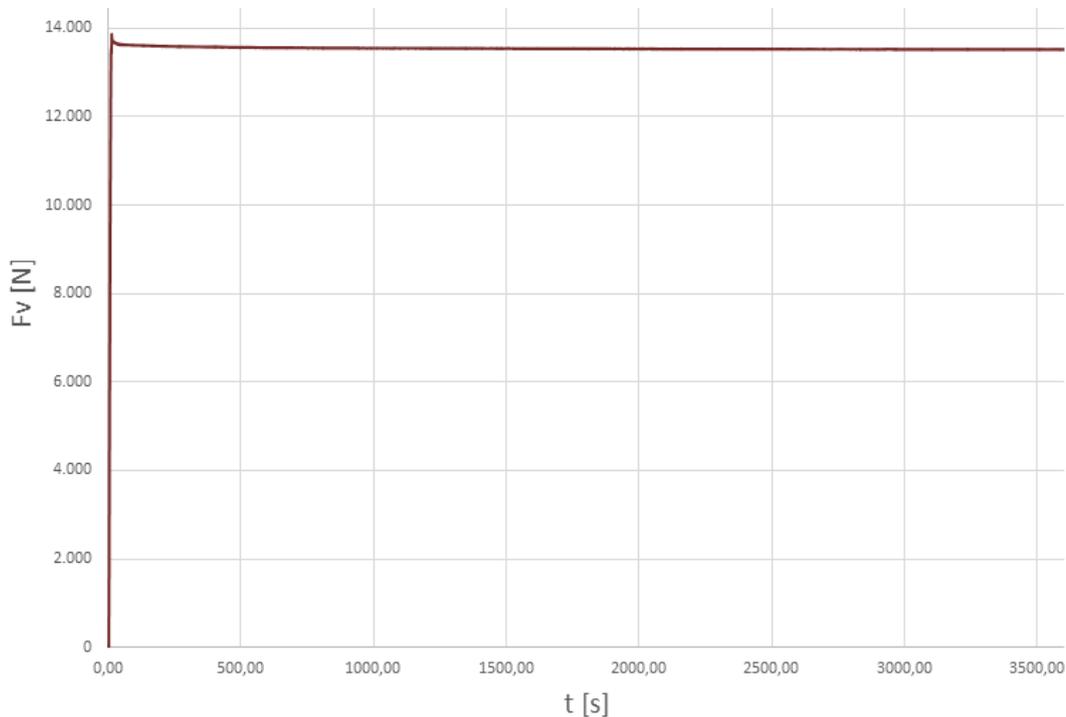


Figura 31: A7

Per il provino A8 (senza lubrificante):

- carico massimo al serraggio di 14612,46 N
- decadimento rapido nei primi 2.5 secondi fino a raggiungere i 12230,16 N
- decadimento lento fino a raggiungere i 12040,48 N al termine della prova

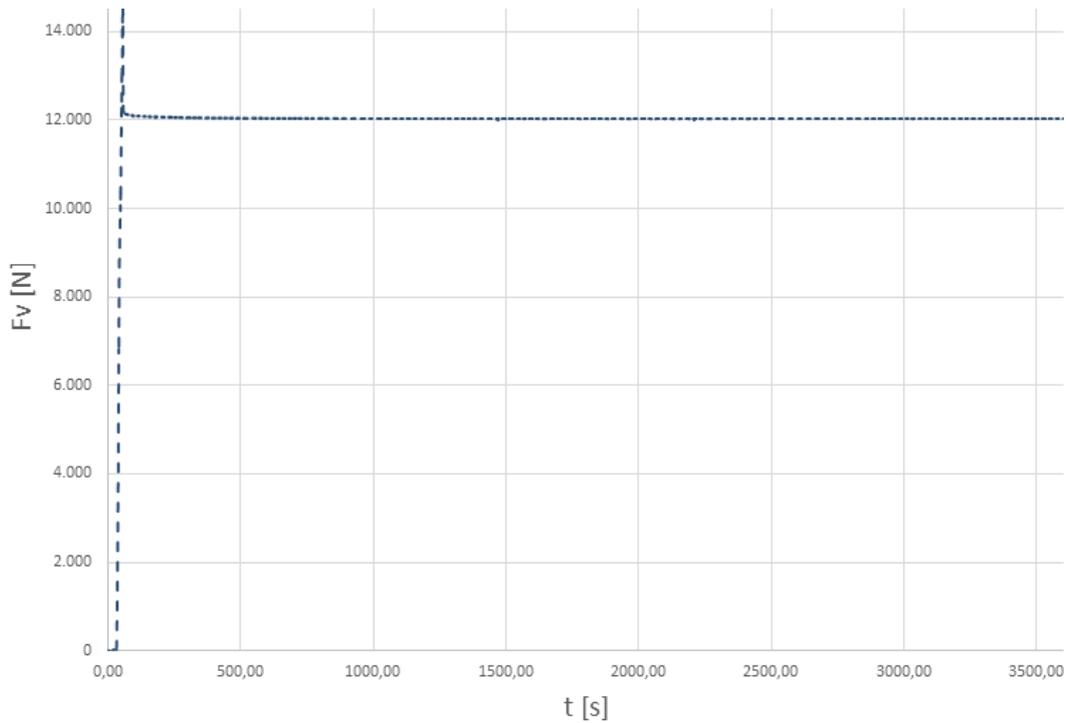


Figura 32: A8

Per il provino A9 (lubrificato con pasta ceramica):

- carico massimo al serraggio di 17874,85 N
- decadimento rapido nel primo secondo fino a raggiungere i 17184,43 N
- decadimento lento fino a raggiungere i 16820,26 N dopo 5 minuti per poi assestarsi sui 16858,19 N

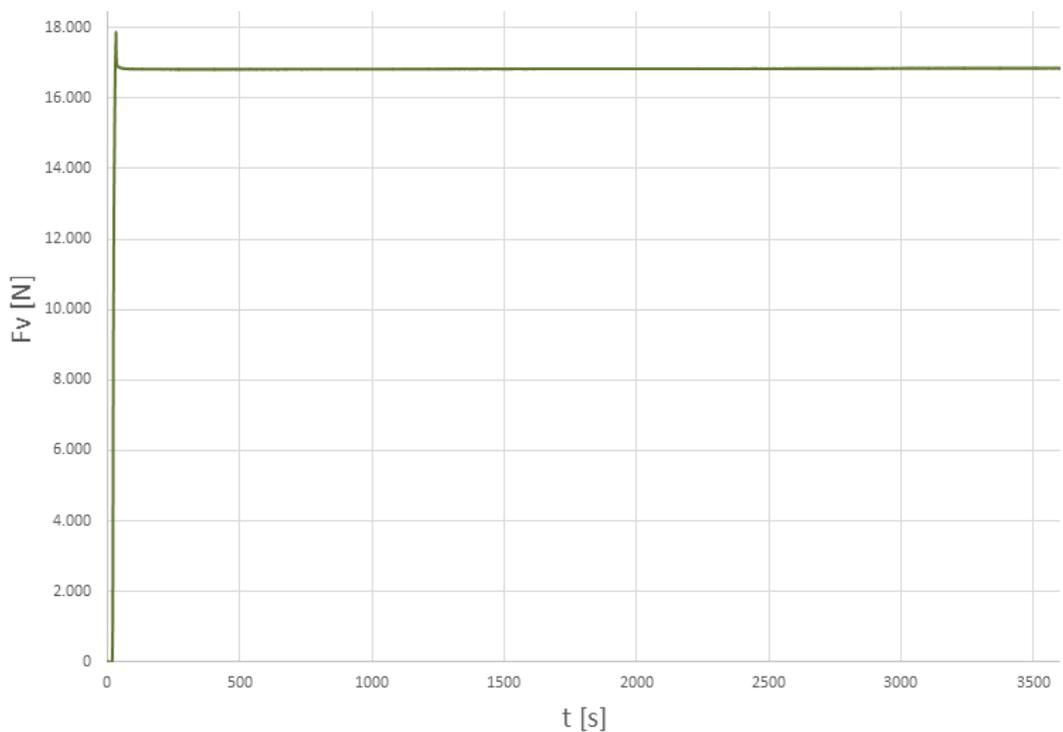


Figura 33: A9

Per il provino A10 (senza lubrificante):

- carico massimo al serraggio di 18011.41 N
- decadimento rapido nei primi 2.5 secondi fino a raggiungere i 16099,5 N
- decadimento lento fino a raggiungere i 15811,2 N dopo 15 minuti per poi assestarsi sui 15887,07 N al termine della prova

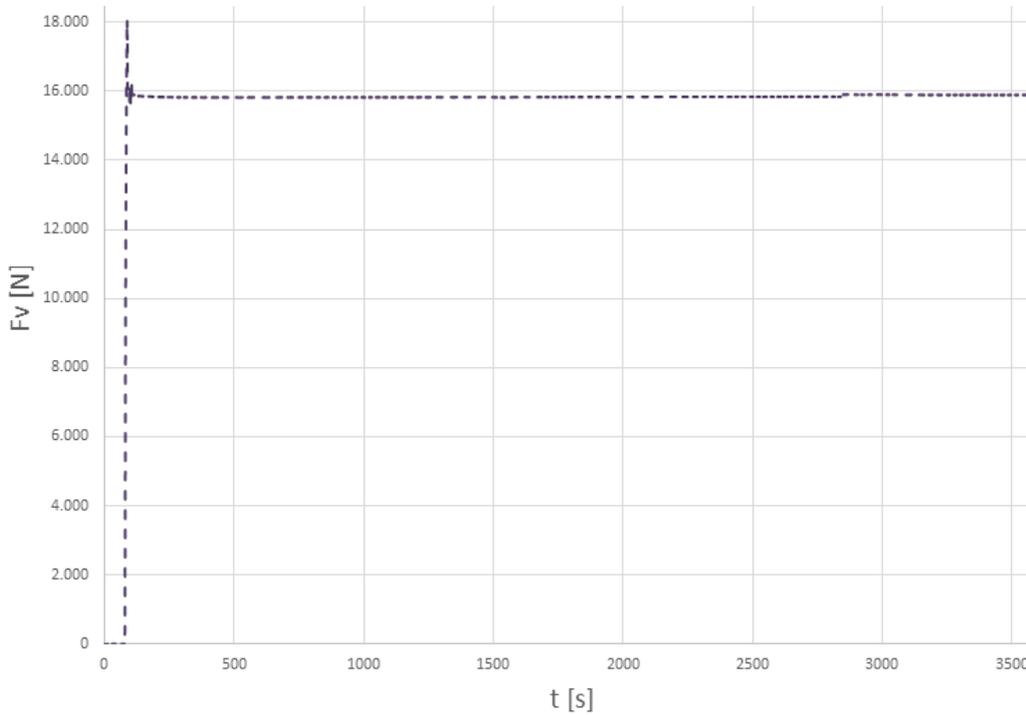


Figura 34: A10

Per il provino A11 (lubrificato con pasta ceramica):

- carico massimo al serraggio di 14999.39 N
- decadimento rapido nel primo secondo fino a raggiungere i 14665,567 N
- decadimento lento fino a stabilizzarsi sui 14460,72 N dopo 20 minuti

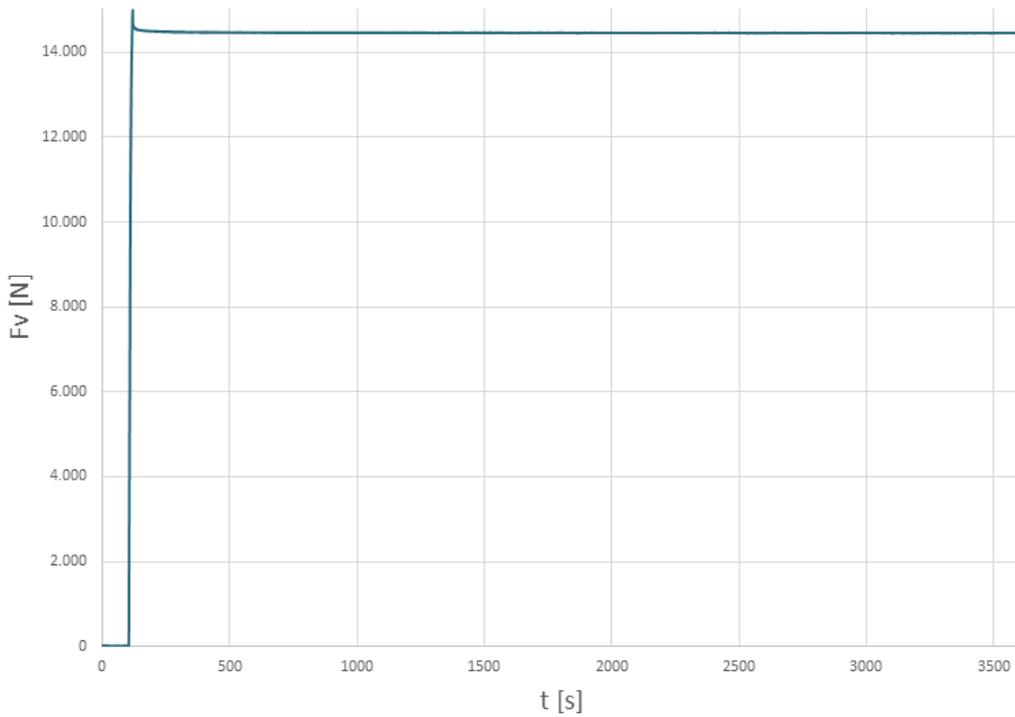


Figura 35: A11

Per il provino A12 (senza lubrificante):

- carico massimo al serraggio di 13087.48 N
- decadimento rapido nei primi 2 secondi fino a raggiungere i 12002,55 N
- decadimento lento fino a raggiungere i 11835,64 N dopo un'ora

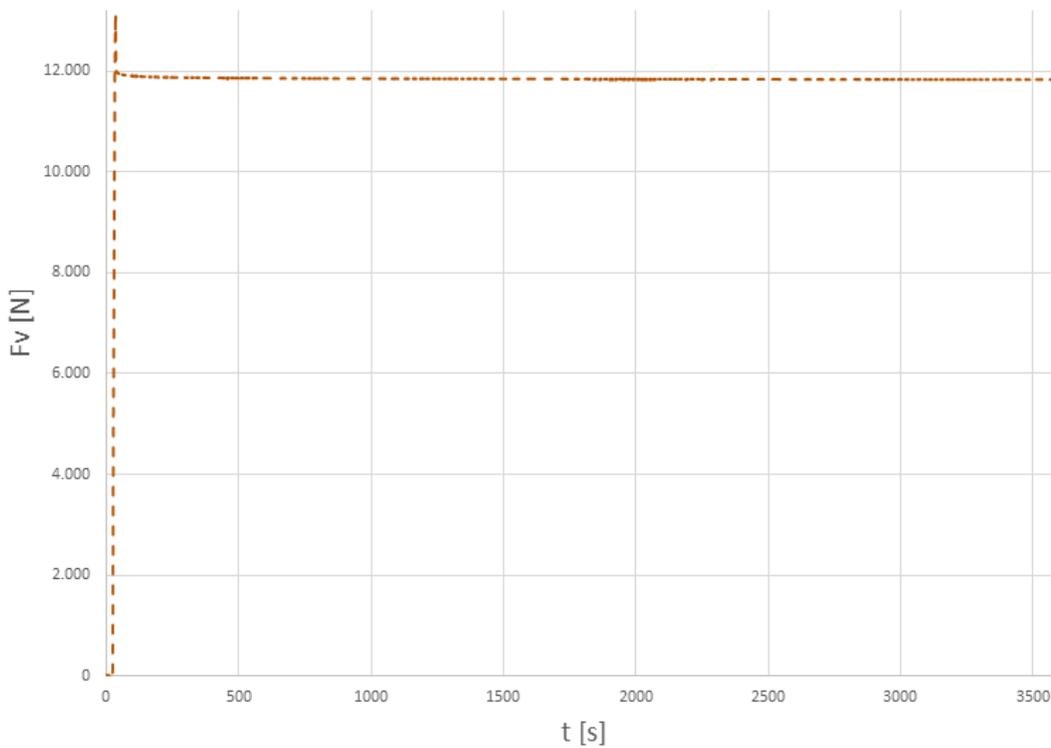


Figura 36: A12

6.2 PROVINI IN ACCIAIO

I provini in acciaio sono stati indicati con le sigle S1,...,S12. In particolare i bulloni dei provini S2, S4, S6, S8, S10 e S12 sono stati serrati a secco, quelli dei provini S1, S3, S5, S7, S9 e S11 con pasta ceramica lubrificante.

Per questi provini vale lo stesso discorso sull'andamento del carico assiale F_v , fatto per quelli in alluminio, con la differenza che per i provini serrati a secco l'oscillazione del carico al termine del decadimento a breve termine è quasi assente.

Fanno eccezione i provini S1 (con pasta) e S4 (secco) per i quali non è stato riscontrato un decadimento a breve termine, ma subito un calo progressivo.

Anche l'esame dei valori del carico assiale è stato fatto con lo stesso criterio usato per le boccole in alluminio.

Per il provino S1 (lubrificato con pasta ceramica):

- carico al serraggio di 9060,98 N
- oscillazione e poi aumento fino a raggiungere un valore massimo di 9234,397 N dopo 45 secondi
- decadimento fino a 8844,212 N al termine della prova

Questo caso è il più particolare, per l'oscillazione del carico e successivo aumento (inusuale per un bullone con pasta lubrificante).

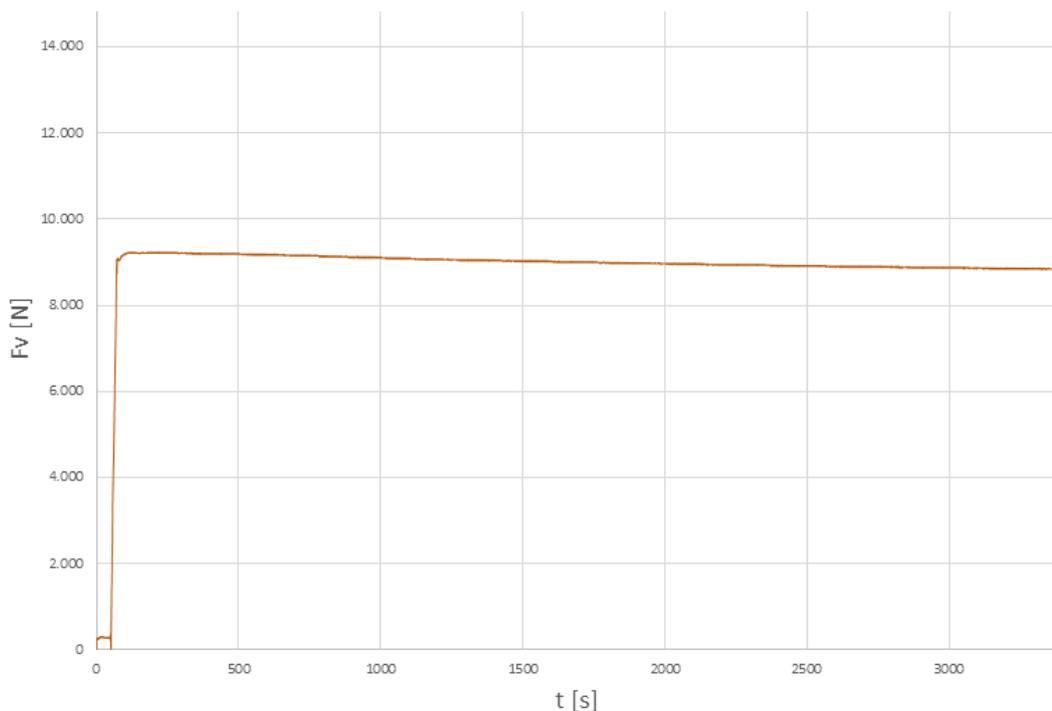


Figura 37: S1

Per il provino S2 (senza lubrificante):

- carico massimo al serraggio di 9624,58 N
- oscillazione nei primi 1.5 secondi
- decadimento rapido in 1.5 secondi circa fino a 8454,026 N
- calo lento fino a stabilizzarsi sui 8323,964 N dopo 35 minuti

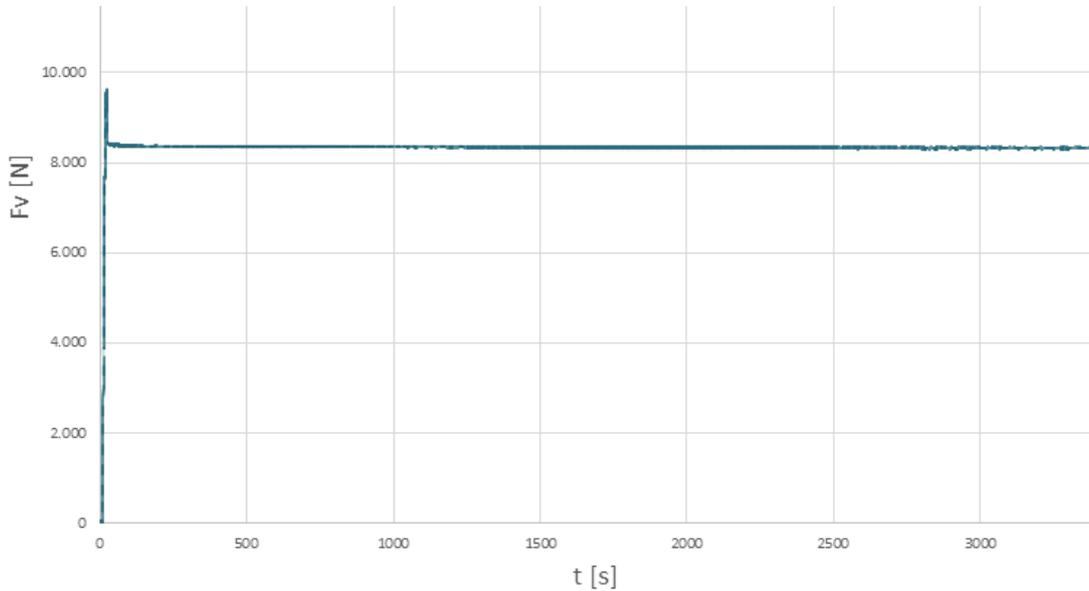


Figura 38: S2

Per il provino S3 (lubrificato con pasta ceramica):

- carico massimo al serraggio di 10253,22 N
- decadimento rapido nel primo secondo fino a 9754,645 N
- decadimento lento fino a 9559,552 N dopo un'ora

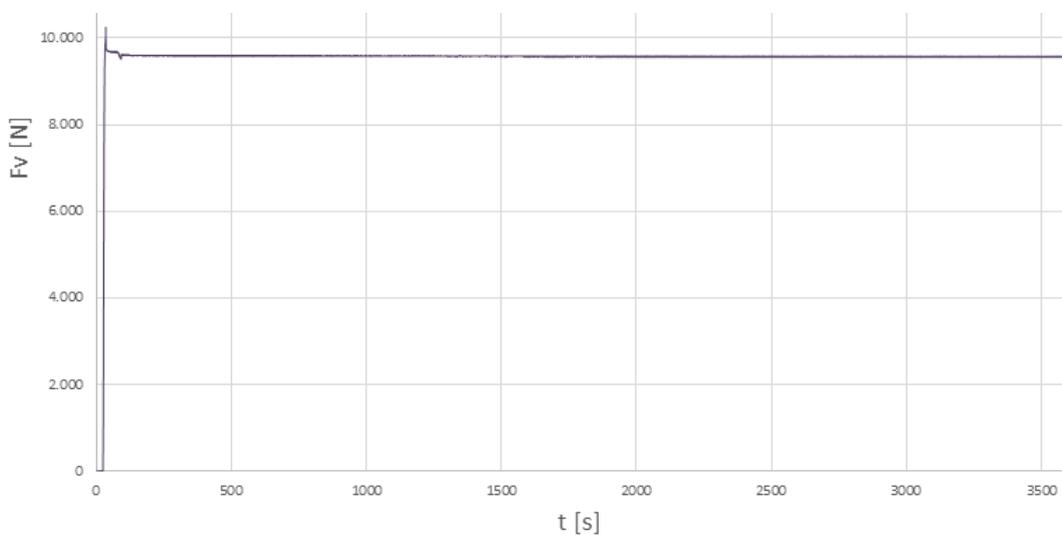


Figura 39: S3

Per il provino S4 (senza lubrificante):

- carico massimo al serraggio di 9906,38 N
- decadimento lento fino a 9732,968 N

Caso particolare, non presenta un forte decadimento iniziale nel primo mezzo secondo, passando da 9906,38 N a 9863,03 N nel primo mezzo secondo

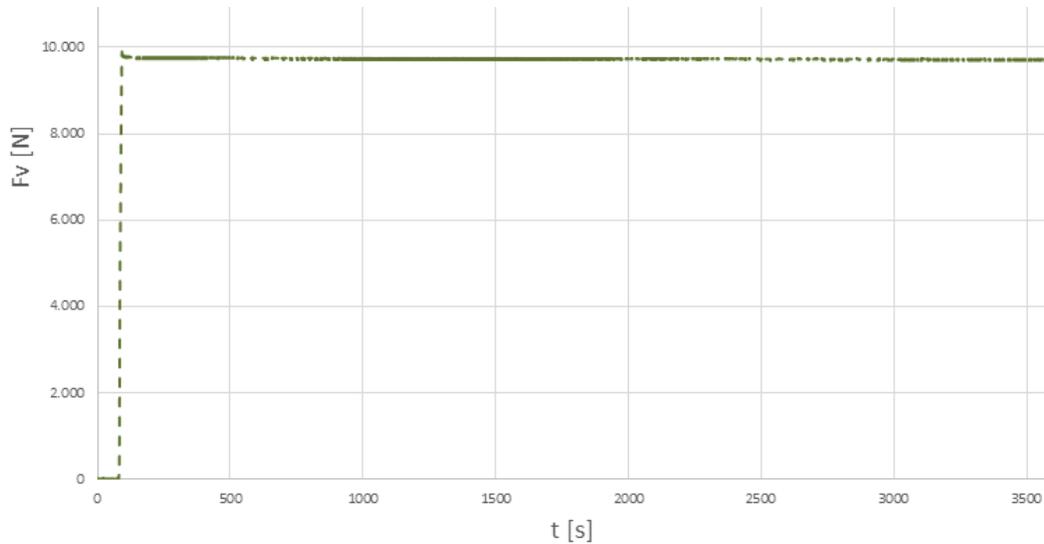


Figura 40: S4

Per il provino S5 (lubrificato con pasta ceramica):

- carico massimo al serraggio di 10296,57 N
- decadimento rapido nei primi due secondi fino a 9732,968 N
- decadimento lento e progressivo fino a stabilizzarsi a 9624,583 N dopo 15 minuti

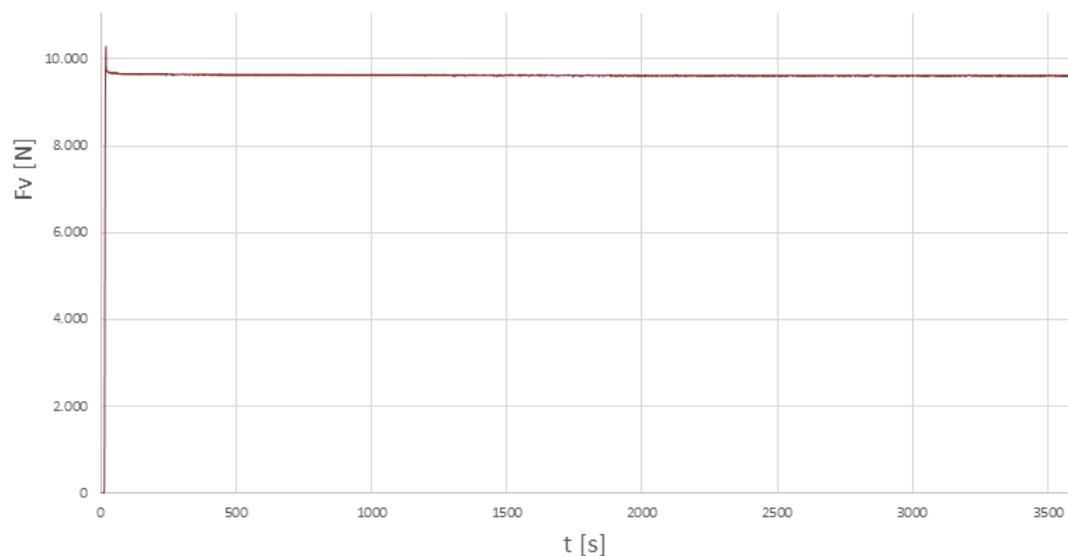


Figura 41: S5

Per il provino S6 (senza lubrificante):

- carico massimo al serraggio di 9711,29 N
- decadimento rapido nei primi 1.5 secondi fino a 9017,628 N
- decadimento lento fino a stabilizzarsi a 8909,243 N dopo 35 minuti

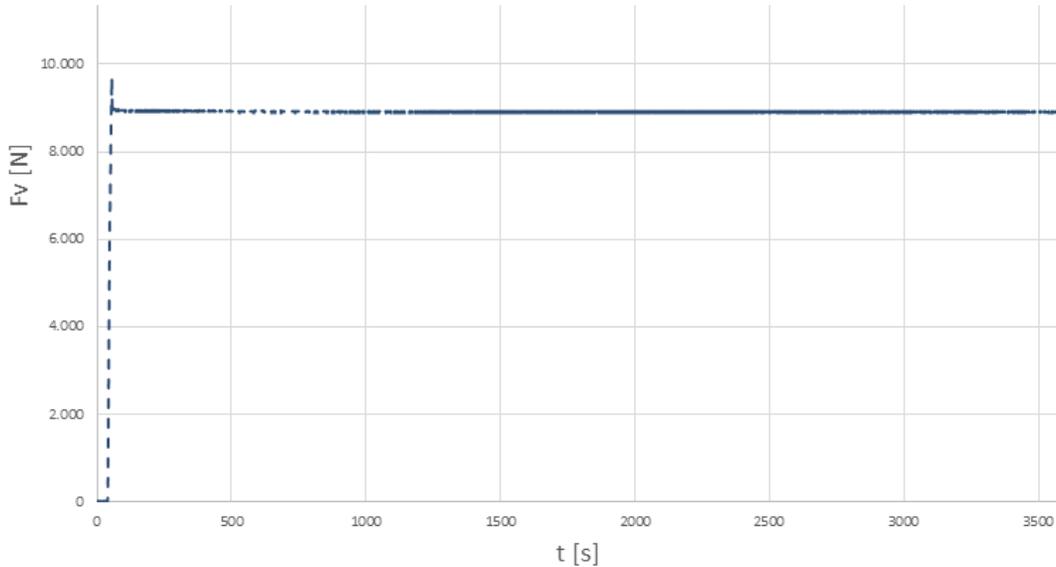


Figura 42: S6

Per il provino S7 (lubrificato con pasta ceramica):

- carico al serraggio di 10318,25 N
- oscillazione fino ad un valore massimo di 10361,6 N
- breve decadimento rapido nel secondo e mezzo successivo fino a 10253,22 N
- decadimento lento fino a stabilizzarsi a 10166,51 N dopo 15 minuti

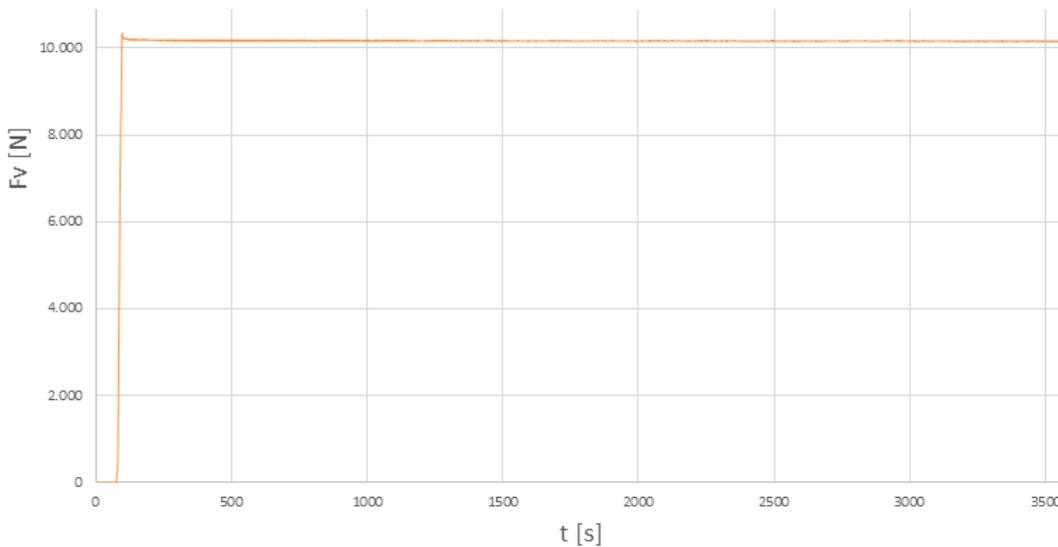


Figura 43: S7

Per il provino S8 (senza lubrificante):

- carico massimo al serraggio di 10491,66 N
- decadimento rapido nel secondo successivo fino a 9863,03 N
- decadimento lento fino a 9667,937 N dopo un'ora

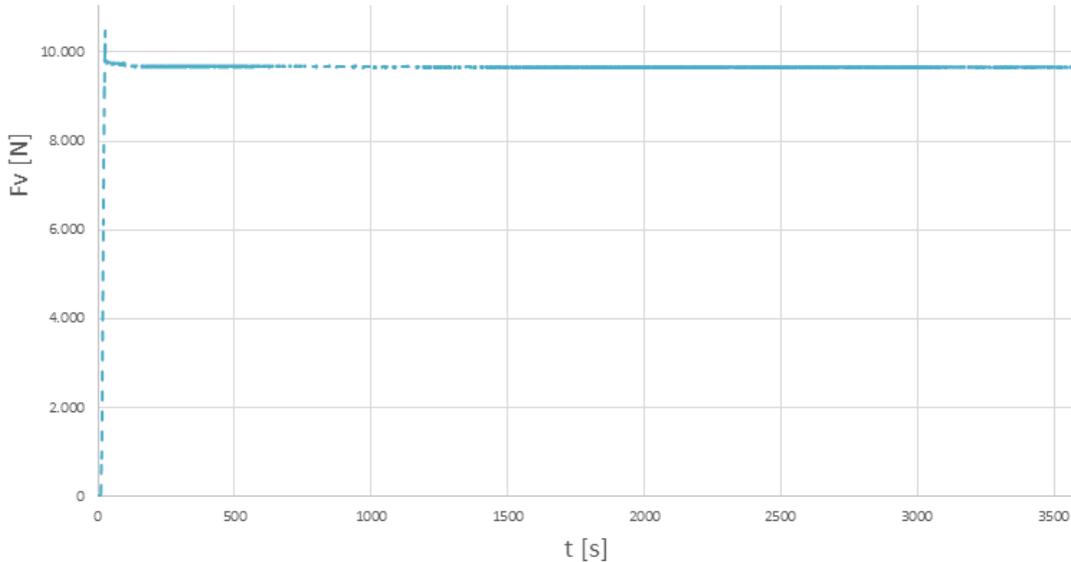


Figura 44: S8

Per il provino S9 (lubrificato con pasta ceramica):

- carico massimo al serraggio di 13439,73 N
- decadimento rapido nel secondo e mezzo successivo fino a 12637,68 N
- decadimento lento fino a 12485,95 N, dopodiché oscilla tra 12485,95 N e 12464,27 N

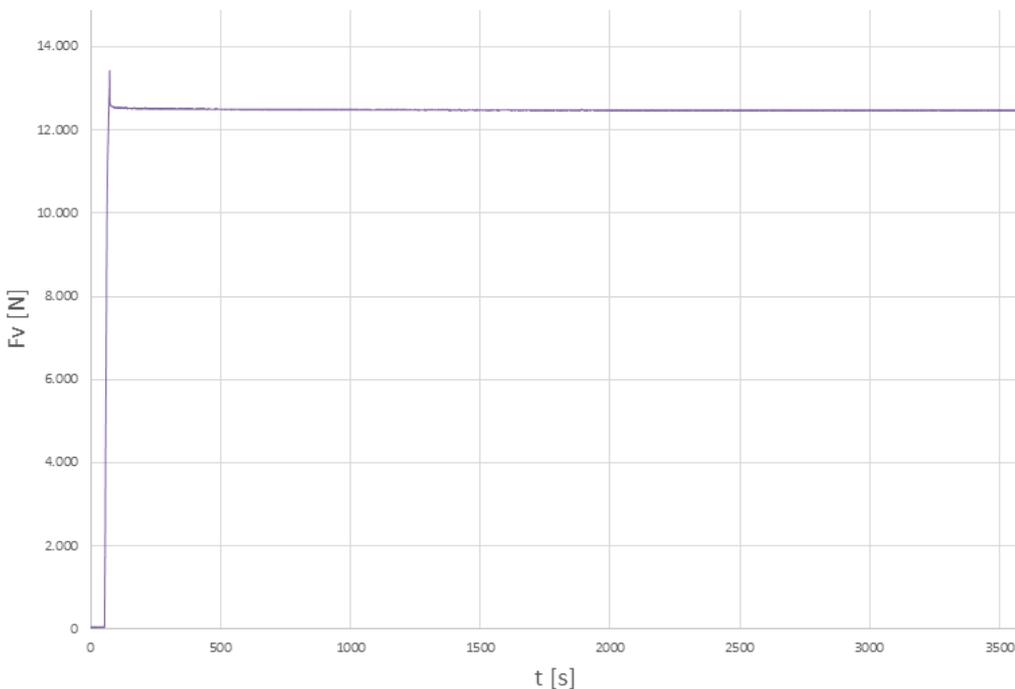


Figura 45: S9

Per il provino S10 (senza lubrificante):

- carico massimo al serraggio di 11683,9 N
- decadimento rapido nel secondo e mezzo successivo fino a 10708,43 N
- decadimento lento e progressivo fino a 10578,37 N dopo un'ora

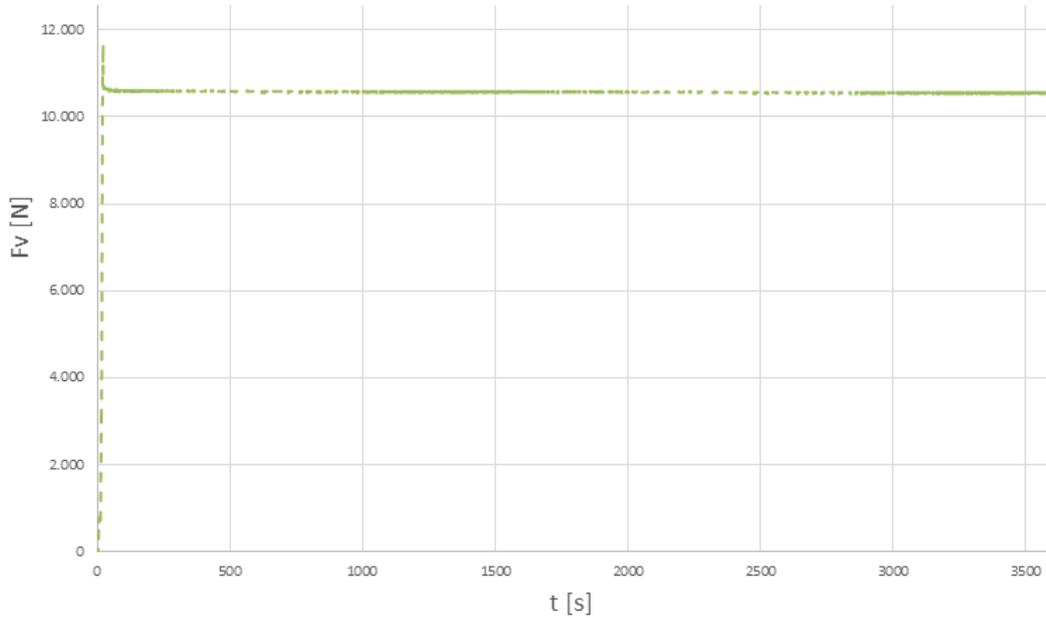


Figura 46: S10

Per il provino S11 (lubrificato con pasta ceramica):

- carico massimo al serraggio di 12074,08 N
- decadimento rapido nei due secondi successivi fino a 11857,31 N
- decadimento lento fino a stabilizzarsi a 11640,54 N dopo 30 minuti

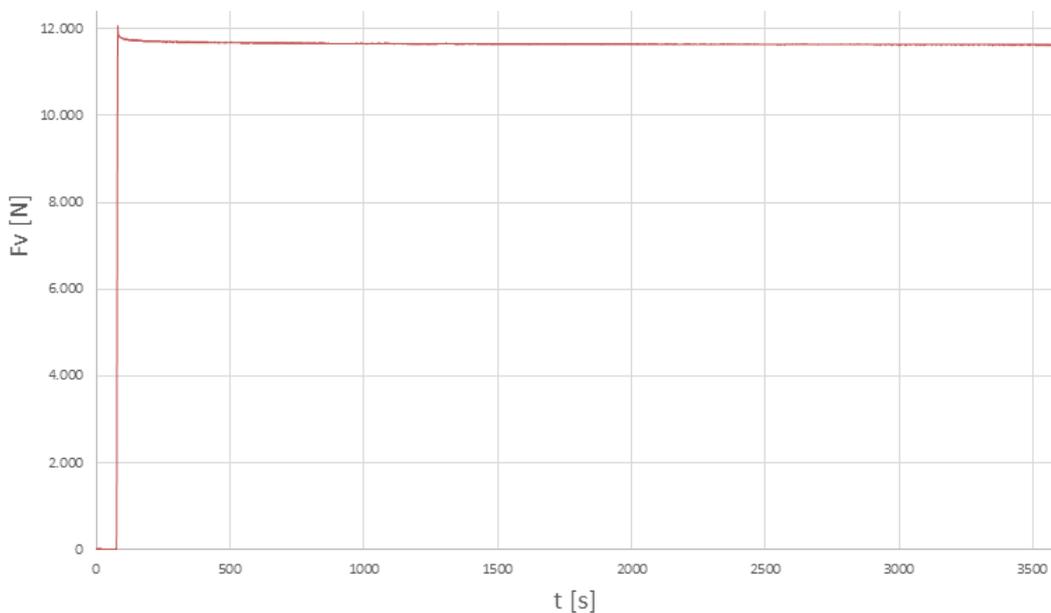


Figura 47: S11

Per il provino S12 (senza lubrificante):

- carico massimo al serraggio di 12724,39 N
- decadimento rapido nei tre secondi successivi con piccole oscillazioni fino a 11163,65 N
- decadimento lento e progressivo fino a stabilizzarsi a 10990,23 N dopo 30 minuti

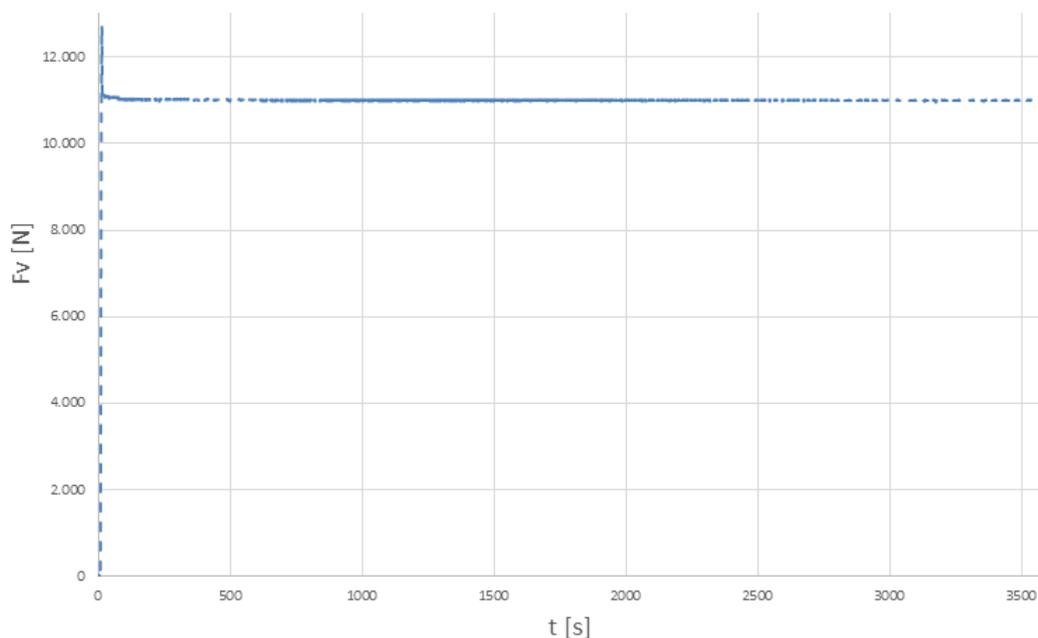


Figura 48: S12

In generale nei bulloni serrati su provini in acciaio la perdita di carico assiale successiva a quella a breve termine è di minore entità, il più delle volte compresa tra i 100 e i 200 N, indipendentemente dal precarico e dal decadimento a breve termine, rispetto a quella nei provini in alluminio, fatta eccezione per 2 boccole su 12.

In compenso per alcuni provini in alluminio si è verificato un aumento del carico dopo diversi minuti in cui esso è calato. Ciò può essere spiegato da fenomeni di assestamento dipendenti dalle condizioni di quei provini, essendosi verificato solo in 4 delle 12 boccole, e indipendentemente dal tipo di lubrificazione.

Per quanto riguarda la lubrificazione, oltre agli effetti già illustrati sul decadimento a breve termine, le perdite di carico assiale a lungo termine non sembrano essere dipendenti da essa. Infatti le quantità di tali perdite hanno valori diversi da provino a provino, specie in quelli in alluminio, ma senza una relazione con il tipo di lubrificazione.

In generale si può supporre che giunti bullonati in acciaio abbiano minori decadimenti del precarico iniziale e che quindi abbiano un rilassamento spontaneo di minore entità rispetto a quelli in alluminio, ad eccezione di quelle particolari condizioni, nei giunti in alluminio, in cui vi è un recupero del carico dopo un determinato periodo di tempo.

7 BIBLIOGRAFIA

1. W. Wang, Q. Wang, S. Zheng, X. Liu, H. Liu – *Research on Self-Loosening Mechanism of Bolted Joints Under Transversal Vibration*
2. S. Kasei – *A Study of Self-Loosening of Bolted Joints Due to Repetition of Small Amount of Slippage at Bearing Surface*
3. S. Izumi, T. Yokoyama, A. Iwasaki, S. Sakai – *Three-Dimensional Finite Element Analysis of Tightening And Loosening Mechanism of Threaded Fastener*
4. N. G. Pai, D. P. Hess – *Three-Dimensional Finite Element Analysis of Threaded Fastener Loosening Due to Dynamic Shear Load*
5. G. Dinger, C. Friedrich – *Avoiding Self-Loosening Failure of Bolted Joints With Numerical Assessment of Local Contact State*
6. S. Izumi, T. Yokoyama, M. Kimura, S. Sakai – *Loosening-Resistance Evaluation of Double-Nut Tightening Method And Spring Washer by Three-Dimensional Finite Element Analysis*
7. D. Croccolo, N. Vincenzi – *Lezioni di Fondamenti e Tecnica della Progettazione Meccanica*, Società editrice Esculapio, 2013
8. L. Leone – *Prove Estensimetriche del Rilassamento Spontaneo del Precarico Assiale in Giunzioni Bullonate*
9. M. De Agostinis – *Estensimetria*