POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Unioni bullonate ad attrito in acciaio inossidabile

Relatore:
prof. Fabio Manzone
Corelatore:
prof. Paolo Castaldo

Candidato:
Simone Barra

24 Marzo 2021

Indice

Abstract 5

Abstract in italiano 6

1. Introduzione 7

1.1. Obiettivi 8

1.2. Contenuto dell'elaborato 9

2. Che cos'è l'acciaio inossidabile 11

2.1. Tipologie di acciai inossidabili 12

2.1.1. Acciai inossidabili austenitici 12

2.1.2. Acciai inossidabili ferritici 13

2.1.3. Acciai inossidabili martensitici 13

2.1.4. Acciai inossidabili duplex 14

2.1.5. Acciai inossidabili indurenti per precipitazione 14

2.2. Vantaggi dell'acciaio inossidabile nell'ingegneria civile 15

2.2.1. Resistenza alla corrosione 15

2.2.2. Caratteristiche meccaniche 16

2.2.3. Resistenza al fuoco 19

2.2.4. Tenacità e strappi lamellari 21

2.2.5. Duttilità e capacità di assorbire energia 22
2.2.6. Completa riciclabilità 22
2.2.7. Estetica 23
2.3. Svantaggi dell'acciaio inossidabile nell'ingegneria civile 24
2.3.1. Costo attuale 24
2.3.2. Fluttuazioni nel prezzo 24
2.4. Life cycle costing 25
2.5. Storia dell'acciaio inossidabile in campo strutturale 26
3. Proprietà dei profili e dei bulloni in acciaio inossidabile 29
3.1. Profilati e lastre 31
3.1.1. Resistenze meccaniche secondo UNI EN 10088 32
3.1.2. Resistenze a corrosione 34
3.1.3. Verifiche degli elementi 35
3.2. Bulloni 36
3.2.1. Resistenze meccaniche 38
3.2.2. Resistenze a corrosione 40
3.2.3. Dimensioni secondo normative 42
4. Giunzioni bullonate in acciaio inossidabile 47
4.1. Giunzioni bullonate senza precarico 49
4.1.1. Resistenza a trazione 49
4.1.2. Resistenza a taglio 51
4.1.3. Resistenza a taglio e trazione 51
4.1.4. Resistenza a rifollamento 52
4.2. Giunzioni bullonate ad attrito 53
4.2.1. Comportamento dell'unione ad attrito 55

4.2.2. Resistenze delle unioni ad attrito categorie B, C 58
5. Stato dell'arte delle unioni bullonate ad attrito in acciaio inossidabile 61
5.1. Serraggio dei bulloni 62
5.1.1. Metodi di serraggio 64
5.1.2. Test di precarico secondo UNI EN ISO 16047 66
5.1.3. Idoneità al precarico secondo UNI EN 14399-2 69
5.1.4. Fattore k 73
5.1.5. Studi precedenti: serraggio di unioni in acciaio inossidabile 76
5.2. Attrito dell'unione bullonata con precarico 81
5.2.1. Slip factor μ 81
5.2.2. Modalità di test secondo normativa 83
5.2.3. Studi precedenti: slip factor per superfici in acciaio inossidabile 86
5.3. Rilassamento e creep 89
5.3.1. Studi precedenti: rilassamento e creep dell'acciaio inossidabile 90
5.4. Il fenomeno del galling 93
5.4.1. Studi precedenti: galling in unioni in acciaio inossidabile 94
6. Prove di laboratorio: idoneità al precarico 97
6.1. Modalità e strumenti di prova 98
6.2. Trattamento dei dati 102
6.3. Commenti e confronti con studi SIROCO 110
6.3.1. Fattore k 112
6.3.2. Precarico F_{pc} 113
6.3.3. Precarico F_{bimax} 114
6.3.4. Duttilità dell'unione bullonata 114
7. Prove di laboratorio: galling 117

7.1. Modalità di prova 117
7.2. Trattamento dei dati 118
7.3. Commenti e confronti con studi SIROCO 127
8. Prove di laboratorio: scorrimento 129
8.1. Modalità e strumenti di prova 129
8.2. Trattamento dei dati 134
8.3. Confronti con valori teorici 141
8.4. Prove di rilassamento 142
9. Proposte sull'utilizzo di bulloni precaricati senza lubrificante in acciaio inox 143
9.1. Precarico di progetto 143
9.1.1. Tabelle fornite dai produttori e calcolo di μ_{tot} 143
9.1.2. Ricerca del precarico caratteristico delle prove di laboratorio 148
9.1.3. Formula per il precarico di progetto 154
9.2. Fattore k 157
10. Conclusioni 159
Bibliografia 162

Abstract

Preloaded bolted connections made of stainless steel are not commonly used as Eurocodes and Standards state that preloaded stainless steel bolts can only be used if tests are performed to determine their sliding resistance. This involves a great limitation, since it is not always convenient to carry out laboratory tests in order to design with this material. This restriction is due to the fact that exhaustive tests on friction joints in stainless steel have never been carried out, except in recent years, such as the tests carried out by SIROCO in 2019. Before these it was thought that stainless steel, due to the different viscoplastic behavior compared to carbon steel, it underwent a greater loss of preload over time, moreover it was thought to be able to run into the problem of "galling", streaks that arise during tightening and that involve low reliability of the preloads during the tightening. Therefore in this document the use of bolted joints in stainless steel is explored, starting from the advantages in using this material up to searching, based on laboratory tests, formulations valid in design for the obtainable preload in the bolts and the consequent sliding resistance of the bolted connections. Using non-lubricated bolts with non-specific geometries for the use of preload, as is the case for the HR and HV of carbon steel, tests were carried out on the suitability for preloading, on the possible presence of galling and on sliding resistances of the joints, treating the data with the current standards for carbon steel. The most important conclusion is that it is possible to use these preload bolted connections made of stainless steel, using a design preload equal to 50% compared to that defined in the case of carbon steel, paying particular attention to obtaining the k factor through test to avoid over-tightening or having a too low preload.

Abstract in italiano

Le giunzioni ad attrito in acciaio inossidabile non sono comunemente utilizzate poiché gli Eurocodici e le Normative sostengono che i bulloni in acciaio inossidabile precaricati possono essere utilizzati solamente se vengono svolti dei test in grado di determinare la loro resistenza a scorrimento. Questo comporta una grande limitazione, poiché non sempre risulta conveniente svolgere test di laboratorio per poter progettare con tale materiale. Tale restrizione è dovuta dal fatto che non sono mai stati svolti dei test esaustivi sulle unioni ad attrito in acciaio inossidabile, se non negli ultimi anni, quali i test svolti da SIROCO nel 2019. Prima di questi si pensava che l'acciaio inossidabile, a causa del diverso comportamento viscoplastico rispetto all'acciaio al carbonio, subisse una maggiore perdita di precarico nel tempo, inoltre si pensava di poter incorrere nel problema del "galling", ovvero striature che nascono durante il serraggio e che comportano bassa attendibilità dei precarichi raggiungibili con l'applicazione della coppia. In questo documento si va dunque ad approfondire l'utilizzo di giunzioni bullonate in acciaio inossidabile, a partire dai vantaggi nell'utilizzo di tale materiale fino a ricercare, basandosi su test di laboratorio, formulazioni valide in progetto per il precarico ottenibile nei bulloni e la conseguente resistenza a scorrimento dell'unione. Utilizzando bulloni non lubrificati e con geometrie non specifiche per l'utilizzo del precarico, come avviene invece per gli HR e HV dell'acciaio al carbonio, sono stati svolti test sull'idoneità al precarico, sulla possibile presenza di galling e sulle resistenze a scorrimento delle giunzioni, trattando i dati con le normative presenti per l'acciaio al carbonio. La più importante conclusione è che risulta possibile l'utilizzo di tali bulloni ad attrito, utilizzando un precarico di progetto pari al 50% rispetto a quello definito nel caso dell'acciaio al carbonio, ponendo però particolare attenzione ad ottenere il fattore *k,* che necessita di test per non incorrere in un sovra serraggio del bullone o viceversa, ad un precarico troppo basso.

Capitolo 1

1. Introduzione

L'acciaio inossidabile è comunemente conosciuto per l'ampio utilizzo in diversi settori industriali come il petrolchimico, minerario, energetico, nucleare ed alimentare. In particolar modo è molto noto per oggetti di uso comune di piccole dimensioni come ad esempio elettrodomestici e utensili da cucina. Tuttavia, l'acciaio inossidabile viene sempre più utilizzato anche nelle strutture civili in carpenteria metallica, a partire da elementi di grandi dimensioni come possono essere i profili di acciaio per formare lo scheletro della struttura portante, agli elementi più piccoli quali viti, dadi e rondelle.

Proprio per quanto riguarda l'acciaio inossidabile in ambito strutturale, il suo utilizzo è in espansione poiché presenta importanti vantaggi soprattutto per la durabilità, di gran lunga maggiore di altri materiali metallici. Tuttavia, essendo ancora un materiale innovativo, talvolta le normative non sono completamente sviluppate, frenando così il suo utilizzo perché diviene dispendioso e complesso progettare senza una precisa linea guida, dovendo fare campagne sperimentali ogni volta che il materiale viene impiegato.

Un esempio chiaro di tutto questo sono le unioni bullonate ad attrito in acciaio inossidabile, che non presentano una norma specifica in grado di accompagnare il progettista nel calcolo, poiché nelle normative viene solamente riportato di seguire le linee presenti per il normale acciaio al carbonio, affiancandole però da un'approfondita indagine sperimentale per testare l'utilizzo dei bulloni con precarico. In questo modo si ha un materiale, ovvero l'acciaio inossidabile, con ottime proprietà e vantaggi da un lato, ma dall'altro spese per effettuare i test insostenibili o comunque troppo elevate in rapporto al progetto totale, in particolar modo per cantieri medio piccoli. Un miglior studio

nell'ambito delle unioni bullonate ad attrito in acciaio inossidabile e sviluppo delle normative, faciliterebbe di gran lunga il loro utilizzo da parte dei progettisti, espandendo maggiormente il loro impiego, sia nelle più grandi che nelle più piccole strutture.

1.1. Obiettivi

Visto il vuoto normativo presente sulle unioni bullonate ad attrito in acciaio inossidabile, l'obiettivo di questo elaborato è incrementare le conoscenze nell'impiego di questo materiale attraverso una campagna sperimentale svoltasi in due laboratori: presso il Politecnico di Torino nel 'Dipartimento di ingegneria strutturale, edile e geotecnica - Laboratorio sperimentale materiali e strutture' e presso l'Istituto Italiano della Saldatura IIS a Genova. I test svolti sono risultati utili e indispensabili per l'avanzamento dei lavori del cantiere 'Sostituzione facciate ventilate in granito rosso Balmoral del fabbricato TO_CIT11 Manica d'approdo sul cortile interno del Politecnico di Torino' dove è stato fatto ampio utilizzo delle unioni bullonate ad attrito in acciaio inossidabile.

Attraverso la campagna sperimentale effettuata, in questo elaborato si cerca in primo luogo di mettere in evidenza che i precarichi che si possono raggiungere in bulloni in acciaio inossidabile non lubrificati e con geometrie secondo norme EN ISO 4014 e EN ISO 4017 sono di gran lunga differenti rispetto al precarico standard utilizzato nel caso di unioni bullonate in acciaio al carbonio. Successivamente, utilizzando sia i dati provenienti dai test sia i dati forniti da due diversi produttori, si ricerca un valore di precarico caratteristico da utilizzare per tali unioni bullonate e un intervallo del fattore k, parametro che lega la coppia di serraggio al precarico che si raggiunge nel gambo della vite. Nella ricerca di questi valori si pone grande attenzione sia alla coppia di serraggio sia alla possibile presenza di striature di danneggiamento. Inoltre, i risultati ottenuti vengono confrontati con studi precedenti, in particolare lo studio "SIROCO", in cui si sono svolti test sull'idoneità al precarico di bulloni in acciaio inossidabile, con la differenza che in tal caso sono stati impiegati specifici lubrificanti per migliorarne l'efficienza.

1.2. Contenuto dell'elaborato

L'elaborato vuole dunque affrontare l'utilizzo nella carpenteria metallica dell'acciaio inossidabile, concentrandosi in particolar modo sulle unioni bullonate ad attrito in acciaio inossidabile senza l'utilizzo di lubrificante specifico. Nel prossimo capitolo viene presentata una panoramica generale sull'acciaio inossidabile soffermandosi sulle sue possibili composizioni, sui suoi utilizzi e soprattutto sui vantaggi e svantaggi nel suo impiego. Nel terzo capitolo si affrontano invece le caratteristiche dei bulloni e dei profili/lastre in acciaio inossidabile, in particolar modo trattando delle resistenze meccaniche, delle resistenze a corrosione e delle dimensioni geometriche. Nel successivo capitolo si entra in merito alle due possibili tipologie di giunzioni in acciaio inossidabile, come avviene anche per l'acciaio al carbonio: giunzioni a taglio o a trazione senza precarico e giunzioni ad attrito, ovvero con precarico. Nel quinto capitolo si introduce un'ampia panoramica sullo stato dell'arte sulle giunzioni bullonate ad attrito in acciaio inossidabile, trattando dell'idoneità al precarico, dell'attrito delle superfici in acciaio inossidabile e infine del rilassamento e creep delle giunzioni ad attrito. Nei tre capitoli successivi vengono presentati e analizzati i dati ottenuti dai test svolti nei laboratori, dando sempre importanza ai confronti con studi precedenti. In particolare, si studia l'idoneità al precarico nel sesto capitolo, la presenza di striature dette 'galling' nel settimo e infine lo scorrimento a taglio di una giunzione composta da un bullone nell'ottavo capitolo. Negli ultimi due capitoli si cerca di ottenere, basandosi sulla procedura fornita dall'Eurocodice 0 (UNI EN 1990:2006) per il calcolo del valore caratteristico, un valore di precarico di progetto e un intervallo del fattore k, specificatamente per le unioni bullonate ad attrito in acciaio inossidabile senza lubrificanti.

Capitolo 2

2. Che cos'è l'acciaio inossidabile

Gli acciai inossidabili sono una famiglia di acciai resistenti alla corrosione e alle elevate temperature, caratterizzati da una composizione chimica contenente almeno il 10,5 % di cromo 'libero' [1], ovvero non legato al carbonio, con cui formerebbe invece dei carburi di cromo, non utili a dare le caratteristiche tipiche dell'acciaio inossidabile per la corrosione. Infatti, la capacità di resistere alla corrosione è data proprio dalla presenza del cromo 'libero' che è in grado di passivarsi, cioè di ricoprirsi di uno strato sottile e aderente di ossidi, praticamente invisibile, dello spessore pari a pochi strati atomici (0,3 – 5,0 nm) ma molto stabile, che protegge superficialmente la lega sottostante dall'azione dell'ossigeno e degli agenti chimici esterni. Generalmente si trovano valori tra 12 e 18% di cromo nella lega, ma nell'acciaio inossidabile possono essere utilizzati anche altri elementi per aumentare la resistenza alla corrosione in modo tale da ottenere un ampio range di differenti caratteristiche di resistenza alla corrosione e livelli di resistenza meccanica. Ma è da sottolineare che, affinché si possa ancora parlare di acciaio, la percentuale di elementi leganti deve essere sempre inferiore al 50% [2].

Il sottile strato di ossido di cromo non è poroso e, quando l'acciaio inossidabile è appropriato all'ambiente in cui è installato, non reagisce chimicamente con l'atmosfera e per questo motivo tale strato protettivo viene anche detto film passivo. La stabilità del film passivo dipende dalla composizione dell'acciaio inossidabile, dalla condizione superficiale e dalla corrosività dell'ambiente. In particolare, il film passivo è tanto più stabile quanto maggiore è il contenuto di cromo, e viene migliorato se si aggiungono elementi di lega quali molibdeno e azoto [1].

2.1. Tipologie di acciai inossidabili

In base alla composizione, resistenza alla corrosione e altre caratteristiche specifiche gli acciai inossidabili possono essere suddivisi in cinque macro categorie: acciai austenitici, acciai ferritici, acciai duplex, acciai martensitici e acciai indurenti per precipitazione. Le principali peculiarità di questi acciai vengono riassunte nei paragrafi successivi.

2.1.1. Acciai inossidabili austenitici

Gli acciai inossidabili austenitici sono i più diffusi e utilizzati. Presentano una percentuale di cromo 'Cr' che si aggira tra il 15 e il 23 % e una percentuale di nichel 'Ni' tra 8 e 20 %, ma la composizione base è 18 % di Cr e l'8 % di Ni, espressa con la sigla 18/8. In funzione di come varia la percentuale di tali due leganti si ottengono diverse tipologie di acciaio austenitico, che nella classificazione AISI (American Iron and Steel Institute - Istituto di unificazione statunitense per ferro e acciaio) costituisce la serie 3XX, come si può vedere nella **Tabella 2.1**.

Tabella 2.1 Classificazione acciai inossidabili austenitici più utilizzati.

% Cr	% Ni	% C	%Mo	AISI	Designazione alfanumerica	Designazione numerica
18-20	8-11	<0,08	-	304	X5CrNi 18 10	1.4301
18-20	8-11	<0,03	-	304 L*	X2CrNi 18 11	1.4306
16-18	11-14	<0,08	2-3	316	X5CrNiMo17-12	1.4401
16,5-18,5	10,5-13,5	<0,02	2	316 L*	X2CrNiMo17-12	1.4404

* la lettera "L" indica la bassa percentuale di carbonio (*Low Carbon*) presente. Questa caratteristica fa sì che, in caso di superamento della temperatura di sensibilizzazione, la precipitazione di carburi sia più limitata evitando l'infragilimento del materiale.

La loro struttura cristallina cubica a facce centrate conferisce elevata duttilità, ancor più del comune acciaio al carbonio, rendendoli immuni alla transizione duttile-fragile ed infine anche elevata saldabilità. Due caratteristiche che invece non sono presenti negli altri acciai inossidabili. Inoltre, rispetto agli acciai al carbonio, gli acciai austenitici presentano tenacità significativamente maggiore su un ampio range di temperature poiché la

dimensione dei grani è maggiore e ciò li rende resistenti allo scorrimento viscoso anche a temperature più elevate (600°C). Tali acciai austenitici hanno però alcune limitazioni. A bassa temperatura la resistenza alla corrosione diminuisce drasticamente, rendendo così il materiale privo della sua migliore caratteristica. Nei giunti delle strutture o in piccole fessure la quantità di ossigeno può non essere sufficiente alla conservazione della pellicola di ossido, con conseguente corrosione interstiziale. Infine, la presenza di cloro all'interno del materiale può provocare pitting corrosion o la rottura da tensocorrosione (Stress Corrosion Cracking, SCC) [2].

2.1.2. Acciai inossidabili ferritici

Gli acciai inossidabili ferritici hanno un contenuto di cromo tra 10,5 % e 18 % mentre il contenuto di nichel è circa pari a zero. Presentano struttura cubica a corpo centrato come il comune acciaio al carbonio. Sono generalmente meno duttili e meno saldabili degli acciai austenitici, tuttavia a parità di resistenza alla corrosione sono meno costosi degli acciai austenitici e hanno buona resistenza alla tensocorrosione. Importante inoltre non scaldarlo oltre gli 850°C per non ingrossare i grani e non sostare tra i 400 e i 570°C nel raffreddamento per non incorrere nella rottura fragile del materiale al suo utilizzo [2]. La loro lavorabilità e formabilità è molto simile a quella dell'acciaio al carbonio S355 per impieghi strutturali, ma è generalmente impiegato per spessori minori o uguali a 4 mm [1]. Nella classificazione AISI viene denominato, assieme ai martensitici, con la serie 4XX.

2.1.3. Acciai inossidabili martensitici

Gli acciai inossidabili martensitici hanno struttura cubica a corpo centrato simile a quella degli acciai inossidabili ferritici e degli acciai al carbonio, ma la loro resistenza può essere innalzata tramite trattamento termico a causa del loro alto contenuto di carbonio. Gli acciai inossidabili martensitici sono utilizzati soprattutto per la loro elevata resistenza superficiale all'abrasione e durezza, tuttavia la loro saldabilità è estremamente critica e necessita un preriscaldamento e dopo la saldatura devono essere eseguiti alcuni trattamenti termici. Inoltre, la loro resistenza alla corrosione è minore rispetto a quella dell'acciaio ferritico e dell'austenitico e risultano anche meno duttili [2]. Nella

classificazione AISI viene denominato, assieme ai ferritici, con la serie 4XX o con la serie 5XX.

2.1.4. Acciai inossidabili duplex

Gli acciai inossidabili duplex hanno una struttura ibrida di austenite e ferrite. Il tenore di cromo generalmente è tra il 18 e 26 % e nichel tra 1 e 8 % in modo tale da non avere una struttura totalmente austenitica che si ottiene quando si inserisce una percentuale di nichel superiore all'8 %. Inoltre, presentano una percentuale di molibdeno tra 0,05 e 5 %, e azoto tra 0,05 e 0,3 % [1]. Nella condizione ricotta hanno una resistenza che è il doppio rispetto agli austenitici permettendo un'importante riduzione delle sezioni delle strutture, ma il costo del materiale tende ad essere generalmente più elevato. Le caratteristiche di tale acciaio sono [2]:

- struttura microcristallina peculiare nota come duplex, austenitica e ferritica, che conferisce più resistenza alle rotture per tensocorrosione;
- maggior grado di passivazione per il più alto tenore di cromo (e la presenza del molibdeno) e quindi miglior resistenza alla corrosione puntiforme (pitting) rispetto agli acciai 18/8;
- saldabilità e forgiabilità buone.

Nella classificazione AISI viene denominato con le serie 22XX, 23XX. Il più utilizzato risulta essere il 2205 composto da 22% Cr, 5% Ni, 3% Mo e <0,03 C, che nella designazione numerica è denominato 1.4462.

2.1.5. Acciai inossidabili indurenti per precipitazione

Gli acciai indurenti per precipitazione possono innalzare notevolmente la loro resistenza meccanica tramite trattamenti termici e si distinguono in tre sottogruppi microstrutturali: martensitici, semi-austenitici e austenitici. Normalmente non sono utilizzati in strutture saldate. La loro resistenza a corrosione è migliore di quella di martensitici ed è simile a quella degli austenitici 18/8. Viene utilizzato in elementi in cui è richiesta elevata resistenza meccanica e moderata protezione dalla corrosione [1].

2.2. Vantaggi dell'acciaio inossidabile nell'ingegneria civile

L'acciaio inossidabile nell'ingegneria civile è un piccolo settore rispetto alle tipiche strutture in acciaio al carbonio, ma è sicuramente in espansione. Questo perché presenta alcuni grandi vantaggi che portano tale materiale ad essere preferito al comune acciaio, soprattutto se si considera l'intero ciclo di vita e dunque durabilità, manutenzione e costi in un'unica valutazione. Non vi sono infatti problemi con la corrosione, punto debole invece di qualsiasi struttura realizzata con acciaio al carbonio. Inoltre, altra importante caratteristica, tipica anche del normale acciaio, è l'elevato rapporto resistenza/peso di tale materiale che permette di avere strutture snelle con pesi molto contenuti. Ma vi sono anche altri vantaggi, quali la resistenza al fuoco più elevata e una duttilità maggiore rispetto al normale acciaio. Vengono elencati nei paragrafi successivi i vantaggi che si ottengono dall'utilizzo dell'acciaio inossidabile nel campo dell'ingegneria civile.

2.2.1. Resistenza alla corrosione

Come già riportato nell'introduzione di questo capitolo, gli acciai inossidabili sono in grado di creare un film passivo sottile sulla superficie grazie al fenomeno della passivazione, reazione che avviene tra il metallo e l'ambiente esterno ossidante come aria, acqua e altre possibili soluzioni. Ovvero, il cromo libero presente nel metallo si lega all'ossigeno formando uno strano compatto e non poroso che blocca il fenomeno della corrosione. Il fenomeno può essere ben descritto dalla **Figura 2.1**.

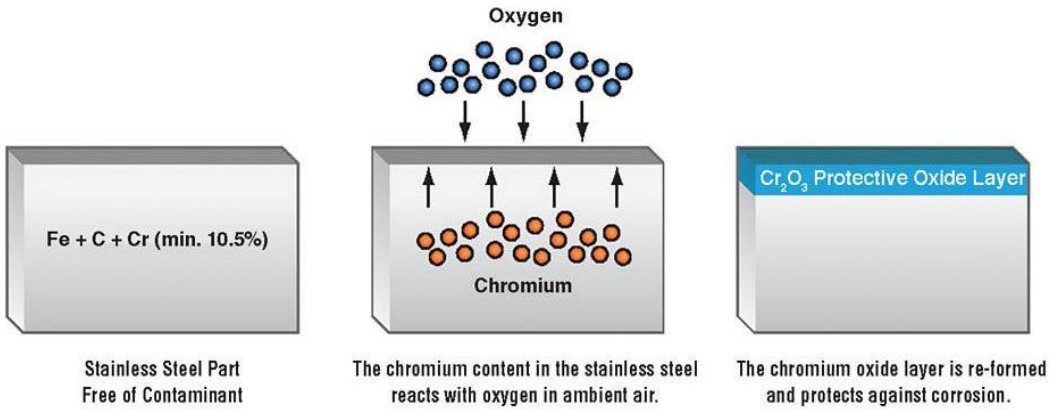

Figura 2.1 Creazione dello strato passivante. Fonte: [www.thefabricator.com]

Il termine anglosassone *stainless* è molto appropriato in quanto significa letteralmente *'senza macchia'* e deriva dalla capacità di questi materiali di ossidarsi o passivarsi senza però arrugginirsi a contatto con aria e umidità. In particolare, il film passivo può essere più o meno resistente in funzione della concentrazione di cromo nella lega e in relazione all'eventuale presenza di altri elementi leganti quali il nichel, il molibdeno e il titanio. Esiste quindi una classificazione degli acciai inossidabili in funzione della loro resistenza alla corrosione, in particolare alla vaiolatura, detta pitting, cioè una corrosione localizzata a causa della rottura dello strato passivante. Questa classificazione si basa sull'indice Pitting Resistance Equivalent Number (P.R.E.N.); più questo indice è elevato, maggiore risulterà la resistenza alla vaiolatura. Gli acciai inossidabili possono quindi essere suddivisi in quattro categorie [3]:

- Acciai Inossidabili Magri: non contengono molibdeno e il valore tipico del loro indice P.R.E.N. si attesta intorno a 25;
- Acciai Inossidabili Standard: sono caratterizzati da un indice P.R.E.N. tra 25 e 40;
- Acciai Inossidabili Super: possiedono un indice P.R.E.N. ≥ 40;
- Acciai Inossidabili Iper: contengono elevate percentuali di cromo > 30% in peso e il valore dell'indice P.R.E.N. può raggiungere 50.

Dunque, è fondamentale la composizione dell'acciaio e l'aggiunta di molibdeno, come altri leganti, ne aumenta la resistenza alla vaiolatura superficiale in ambienti molto aggressivi.

2.2.2. Caratteristiche meccaniche

Gli acciai inossidabili presentano ottime caratteristiche meccaniche, che dipendono però dalla composizione chimica e dai trattamenti termomeccanici effettuati. La resistenza è dell'ordine di quella degli acciai al carbonio ma vi è un'importante differenza sul diagramma sforzo deformazione. Mentre gli acciai al carbonio mostrano un comportamento elastico lineare fino al limite di snervamento ed una zona costante prima di giungere all'incrudimento, l'acciaio inossidabile presenta un andamento più arrotondato, con un limite di snervamento non ben definito. Pertanto, il limite di

snervamento dell'acciaio inossidabile è generalmente indicato come la tensione che dà luogo ad uno scostamento dalla linea di proporzionalità dello 0,2% durante la prova di trazione [4]. Vengono riportate nella **Figura 2.2** alcune curve sperimentali su materiali quali 1.4301 ovvero il AISI 304 (austenitico), 1.4318 ovvero AISI 301L (austenitico) e 1.4462 ovvero AISI 2205 (duplex). Da sottolineare però che tali curve danno una rappresentazione verosimile del comportamento di alcuni materiali allo stato di fornitura e non sono quelle da utilizzare in fase di progetto.

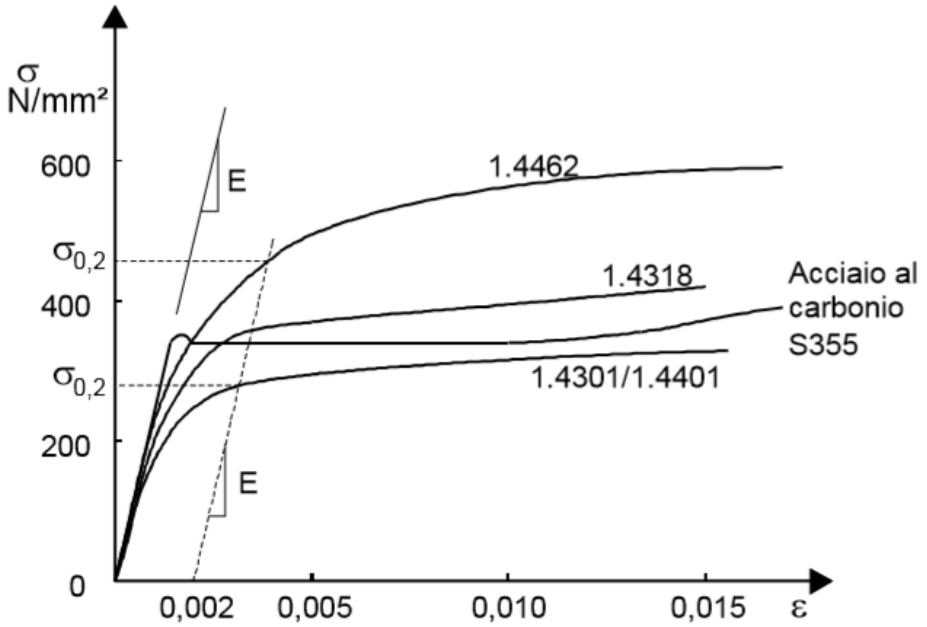

Figura 2.2 Curve sforzo-deformazione di alcuni acciai inossidabili Fonte: [1]

Un migliore confronto tra la curva sforzo deformazione dell'acciaio al carbonio e di alcuni acciai inossidabili può essere visualizzato nel grafico in **Figura 2.3**.

Di particolare rilievo per l'acciaio austenitico è la capacità di avere grandi deformazioni prima della rottura, di gran lunga maggiori del comune acciaio al carbonio. Infatti, secondo la norma UNI EN-10088-2 gli acciai austenitici hanno una deformazione a rottura pari al 40-45% mentre i duplex hanno una deformazione inferiore, ovvero 20-25%. Le differenze tra i vari acciai inossidabili e l'acciaio S355 si possono vedere nel grafico in **Figura 2.4.**

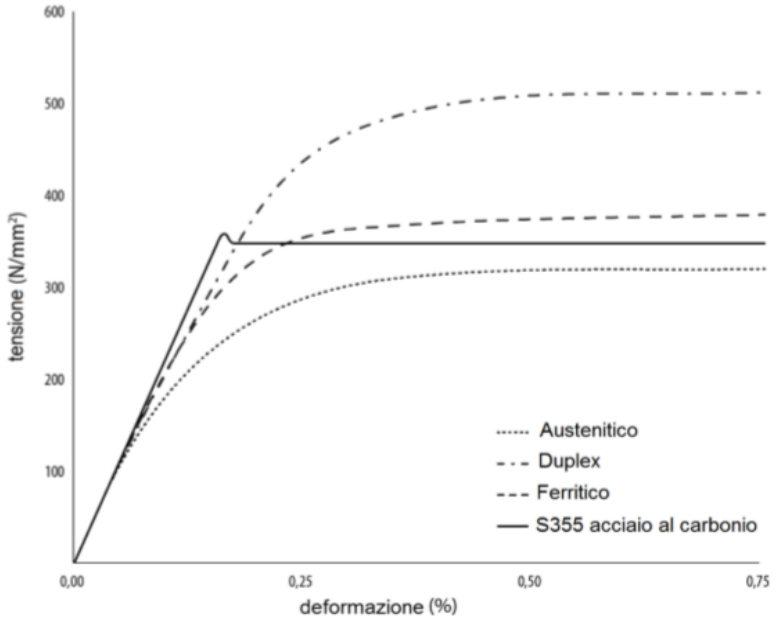

Figura 2.3 Curve sforzo-deformazione a confronto. Fonte: [1]

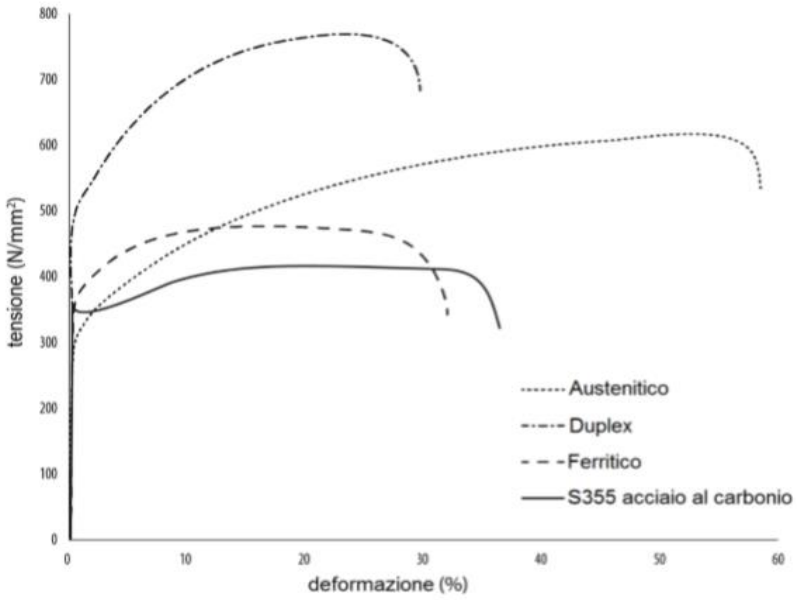

Figura 2.4 Confronti deformazioni ultime degli acciai inossidabili e S355. Fonte: [4]

2.2.3. Resistenza al fuoco

L'acciaio inossidabile possiede buone caratteristiche per quanto riguarda il comportamento con il fuoco. Presenta infatti una minore conducibilità rispetto agli acciai al carbonio, minor degrado della resistenza e della rigidezza per temperature superiori a 500°C [5] e infine una minore emissività, ovvero una maggiore capacità di riflettere le radiazioni (circa 0,4 contro i 0,5 dell'acciaio al carbonio [6]). Il comportamento dipende poi dalla tipologia e composizione dell'acciaio inossidabile stesso ma in generale si ha:

- La conducibilità termica degli austenitici e dei duplex è circa pari al 30% del normale acciaio al carbonio, mentre per i ferritici si ha circa un 50% del comune acciaio. Dunque, l'acciaio inossidabile conduce molto di meno garantendo periodi più lunghi di resistenza al fuoco.
- La resistenza degli austenitici sopra i 500 – 550°C risulta essere superiore rispetto al normale acciaio, infatti tale materiale tende a conservare la sua rigidezza, seguendo un incrudimento anziché avere un calo nella resistenza. Invece, i duplex non possono essere impiegati per temperature superiori a circa 250-300°C per la possibilità di infragilimento [1].
- Il coefficiente di dilatazione termica degli acciai austenitici è più alto di quello dell'acciaio al carbonio di circa il 30%, e dunque questo non risulta essere un vero vantaggio. Nel caso in cui questi due acciai siano impiegati insieme bisogna tenere conto, nel progetto, del differenziale di dilatazione termica delle diverse parti [1].

Alcune peculiarità sul comportamento dell'acciaio inossidabile austenitico al calore possono essere meglio comprese grazie alcuni test [7] condotti da Y. Sakumoto, T. Nakazato e A. Matsuzaki in cui si confronta l'acciaio AISI 304 e AISI 316 (chiamati SUS304 e SUS316 nei grafici seguenti) con un comune acciaio SS400, che è l'equivalente di un S235J2. Per essere resistenti alla corrosione, tali materiali contengono nichel e cromo che vanno così anche ad aumentare la resistenza al fuoco. I risultati di tali test, come riportato in **Tabella 2.2**, dimostrano che il calore specifico dell'AISI 304 è simile a quello dell'acciaio comune alle temperature di 50-100°C ma tende a decrescere a 550-600°C poiché a tale temperatura vi è precipitazione di carburi. L'AISI 304 è caratterizzato da una conducibilità

che cresce con il crescere della temperatura tuttavia, come già detto, il suo valore è di gran lunga inferiore rispetto all'acciaio convenzionale. Il coefficiente di espansione termica tende a crescere con la temperatura ed è superiore rispetto all'acciaio normale.

Tabella 2.2 Calore specifico, conducibiilità e deformazioni dell'AISI 304. Fonte: [7]

Temperature (°C) (1)	SUS304 (2)	Conventional steel (3)	(2)/(3) (4)
(*a*) Specific Heat (cal/g°C)			
50 ~ 100°C	0.111 ~ 0.116	0.116	—
(0 ~ 100°C)	(0.12)	—	—
550 ~ 600°C	0.136–0.138	0.179	—
(*b*) Heat Transfer Rate (cal/cm · sec · °C)			
RT	0.034	0.124	0.27
(100°C)	(0.039)	(0.122)	0.32
400°C	0.049	0.102	0.48
(500°C)	(0.052)	(0.094)	0.55
600°C	0.056	0.085	0.66
(*c*) Thermal Expansion Rate (/°C)			
20 ~ 100°C	17.0×10^{-6}	11.7×10^{-6}	1.45
(0 ~ 100°C)	(17.3×10^{-6})	—	—
20 ~ 600°C	18.7×10^{-6}	14.4×10^{-6}	—
0 ~ 649°C	(18.8×10^{-6})	—	—

Inoltre, si ha che sia l'AISI 304 che l'AISI 316 hanno un miglior comportamento a temperature di 500-700°C rispetto all'acciaio al carbonio (riquadro rosso nella **Figura 2.5**). In particolare, l'AISI 316 presenta resistenze ancora maggiori dovute al fatto della presenza in esso di molibdeno che ne migliora le caratteristiche al fuoco. Altro aspetto importante è il comportamento al fuoco sotto carico dei provini di acciaio inossidabile: vi sono minori deformazioni e dunque un effetto di creep meno accentuato rispetto all'acciaio al carbonio. In generale, l'impiego di acciaio inossidabile in strutture leggere (coperture e pareti, ad esempio) con carico di incendio non eccessivo (temperature dell'ordine di 300-400°C), è particolarmente vantaggioso, tenendo anche conto delle bassissime richieste di manutenzione [5].

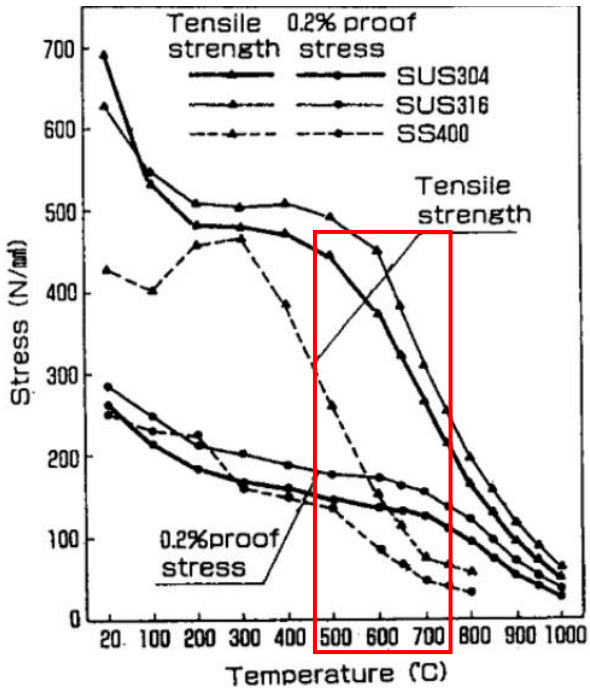

Figura 2.5 Resistenze a snervamento e ultime al variare della temperatura a confronto. Fonte: [7]

2.2.4. Tenacità e strappi lamellari

Il comportamento a basse temperature è un altro importante vantaggio degli acciai inossidabili. La tenacità, ovvero la capacità di assorbire energia in un impatto, risulta non essere un problema per gli acciai austenitici che infatti non hanno transizione duttile-fragile. Invece, gli acciai duplex e ferritici mostrano la transizione duttile-fragile. Ma in generale tutti presentano tenacità adeguata in impieghi a temperature di servizio fino a -40°C [1]. Tuttavia, per alcuni ferritici vi sono delle limitazioni con temperature più stringenti e delle limitazioni sullo spessore massimo, infatti all'aumentare dello spessore la tenacità tende a ridursi.

Non c'è evidenza della possibilità che l'acciaio inossidabile possa soffrire di strappo lamellare nello spessore [1].

2.2.5. Duttilità e capacità di assorbire energia

Le elevate deformazioni ultime dell'acciaio inossidabile conferiscono all'edificio una maggiore duttilità. Tale duttilità può essere valutata con il fattore di comportamento della struttura (Behaviour Factor *q*) che, se maggiore, permette di avere azioni sismiche minori a parità di sito di costruzione. Se in una struttura viene utilizzato l'acciaio inossidabile come scheletro portante si ottiene un incremento di *q*, che dipende dalla percentuale dell'acciaio inossidabile sul totale dell'acciaio utilizzato. Il fattore di comportamento di struttura dunque cresce al crescere della percentuale di acciaio presente. Alcuni studi [8] su telai semplici e simmetrici sostengono che si possa ottenere anche un incremento del 30% del parametro *q* se la struttura è realizzata interamente in acciaio inossidabile.

Inoltre, l'acciaio inossidabile è caratterizzato da una buona capacità di assorbire energia, infatti viene usato nei dissipatori sismici, come i pioli, ovvero dissipatori isteretici in acciaio inossidabile che dissipano energia mediante la loro plasticizzazione [5].

2.2.6. Completa riciclabilità

Come il normale acciaio al carbonio, anche l'acciaio inossidabile risulta al 100% riciclabile. Il riciclo di tale materiale è molto importante poiché permette di ridurre di gran lunga la quantità di energia impiegata per la produzione. Secondo i dati raccolti da ISSF (International Stainless Steel Forum), ogni oggetto in acciaio inossidabile contiene il 60% di materiale riciclato. Inoltre, una ricerca condotta nel 2007 [9], sostiene che nei primi anni del XXI secolo, grazie al riciclaggio, l'utilizzo di energia nella produzione di acciaio inossidabile si è ridotto del 33% e le emissioni di CO_2 del 32%. Infatti, considerando una produzione di una tonnellata di acciaio austenitico (composto da 18% Cr, 8% Ni, e 74% Fe) nei primi anni 2000 si aveva che l'energia utilizzata era pari a 53 GJ e l'anidride carbonica prodotta pari a 3,6 tonnellate. Invece, se si tenesse conto di riciclabilità pari a zero si avrebbe che l'energia utilizzata sarebbe pari a 79 GJ e l'anidride carbonica pari a 5,3 tonnellate. L'obiettivo sarebbe di poter utilizzare solamente acciaio riciclato per la produzione di nuovi pezzi, tuttavia questo è reso impossibile dal fatto che l'utilizzo di acciaio inossidabile è in continua crescita e dunque non è sufficiente la quantità di materiale riciclato per coprire la domanda. In questa ipotesi di totale riciclaggio si avrebbe

che l'energia utilizzata diminuirebbe del 67% e l'anidride carbonica prodotta del 70% [9], come si può osservare nella **Figura 2.6**.

L'acciaio inossidabile è comunque uno dei materiali più sostenibili in commercio anche per il fatto che risulta essere uno dei materiali da costruzione più durevole: ciò porta ad avere un basso tasso di materiale da demolire e smaltire.

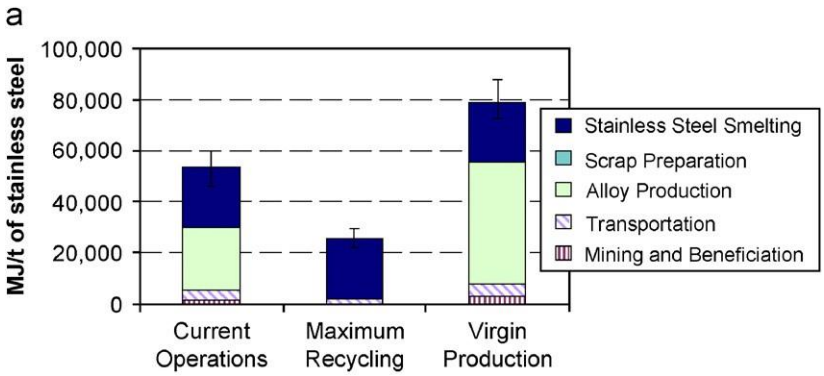

Figura 2.6 Risparmio di energia grazie al riciclo dell'acciaio inossidabile. Fonte: [9]

2.2.7. Estetica

L'acciaio inossidabile grazie alla sua resistenza alla corrosione presenta un aspetto che si mantiene inalterato nel tempo. Risulta liscio, lucido ed è facilmente pulibile. Proprio per queste caratteristiche generalmente soddisfa ogni richiesta in campo estetico. Si riesce dunque ad unire scopi strutturali a quelli architettonici ed è infatti utilizzato in molte realizzazioni, soprattutto in rifiniture esterne ed interne in cui l'acciaio resta visibile.

Figura 2.7 Estetica dell'acciaio inossidabile. Fonte: projectstrutture.it

2.3. Svantaggi dell'acciaio inossidabile nell'ingegneria civile

Se confrontato all'acciaio al carbonio, per proprietà fisico meccaniche l'acciaio inossidabile non presenta alcun svantaggio. Tuttavia, il problema di tale materiale è il suo costo, molto più elevato rispetto al comune acciaio. Inoltre, le fluttuazioni del prezzo nel tempo sono più accentuate.

2.3.1. Costo attuale

Negli ultimi decenni il prezzo della materia prima ha subito un notevole aumento con ripercussioni anche sui prodotti finiti. Nell'ambito dei tipici acciai inossidabili, per esempio del 1.4301 (AISI 304) o del 1.4571 (AISI 316 con Titanio), il prezzo ha subito un notevole incremento. Infatti, nel 2002 il costo per una tonnellata di materiale era di 200$ per il 1.4301 e di 300$ per il 1.4571, mentre nel 2007 si è raggiunto un prezzo molto superiore, rispettivamente tra 500 e 3500$ per il primo e tra 1000 e 6000$ per il secondo. L'elevato costo rispetto all'acciaio comune è in particolar modo conferito dalla presenza di elementi legati quali nichel, cromo e molibdeno che aumentano il costo del materiale in modo esponenziale [10]. Per esempio, una tonnellata di materiale con 10% nichel e 2% molibdeno ha un costo di 1000$ superiore, solamente per tali due elementi presenti nella lega [11].

2.3.2. Fluttuazioni nel prezzo

Oltre ad avere un prezzo più elevato, l'acciaio inossidabile presenta anche una fluttuazione nel tempo molto forte. La causa risiede sempre nella presenza degli elementi legati, i quali variano di molto il loro costo anche nei mesi, dunque in tempi molto brevi. Proprio per questo motivo, il mercato si basa su contratti che distinguono una componente di base e una di extra lega chiamata anche AAF (Alloy Adjustment Factor) [12]. Il prezzo della componente di base è definito direttamente dal produttore in fase di contrattazione mentre la componente extra lega AAF è calcolata di consegna in consegna facendo riferimento agli indici extra lega relativi alle diverse tipologie di acciai che vengono forniti e aggiornati generalmente di mese in mese. L'extra lega presenta un costo che è dettato dunque da quotazioni ufficiali ad esempio la 'London Metal Exchange' [13]. Nella **Figura**

2.8 si può notare come la variazione dell'AAF sia mensile (dati di tre diversi produttori P1, P2, P3 che seguono le quotazioni ufficiali del mercato), modificando così di continuo il prezzo dell'acciaio inossidabile, senza permettere di poter svolgere un calcolo certo sui costi di una struttura da realizzare.

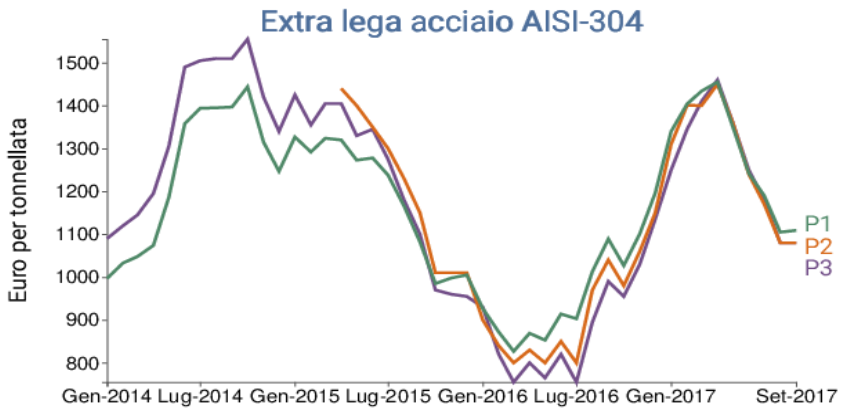

Figura 2.8 Variazione AAF per l'AISI 304 dal 2014 al 2017. Fonte: [13]

2.4. Life cycle costing

Nonostante l'elevato costo dell'acciaio inossidabile, si possono fare alcune migliori valutazioni sull'intero ciclo di vita del materiale per avere un confronto più robusto con l'acciaio comune al carbonio. Infatti, c'è una crescente consapevolezza sul fatto che alla base della scelta dei materiali ci devono essere i costi del ciclo di vita della struttura, e non solo i costi iniziali, che prendono in considerazione [4]:

- *Costi iniziali per la costruzione dell'opera:* il costo iniziale dei prodotti strutturali in acciaio inossidabile è approssimativamente quattro volte [6] quello dell'equivalente prodotto in acciaio al carbonio perciò questo fa pensare all'acciaio inossidabile come un materiale molto costoso. Tuttavia, la resistenza alla corrosione permette di avere risparmi dalla mancanza di operazioni di rivestimento superficiale iniziali.
- *Costi operativi per la manutenzione ordinaria, straordinaria e gestione:* l'eccellente resistenza alla corrosione dell'acciaio inossidabile offre molti

vantaggi, tra cui: minore frequenza di ispezioni, minori costi di manutenzione e lunga vita in servizio.

- *Valore residuo, ovvero valore della struttura alla fine del suo ciclo di vita*: l'acciaio inossidabile ha un elevato valore residuo, anche se questo parametro è di rado un fattore decisionale per una struttura con una lunga vita di progetto (50 o 100 anni).

Il Life Cycle Costing utilizza un principio standard in modo da riportare i costi che si hanno nell'intera vita utile a valori attuali. Questo consente un confronto realistico sulla base delle opzioni disponibili e dei vantaggi potenziali a lungo termine nell'utilizzo dell'acciaio, da valutarsi rispetto alla selezione di altri materiali. Basandosi dunque sul Life Cycle Costing, in alcune strutture l'acciaio inossidabile risulta di gran lunga conveniente rispetto all'acciaio comune al carbonio.

2.5. Storia dell'acciaio inossidabile in campo strutturale

L'invenzione dell'acciaio inossidabile risale all'inizio del 1900, molti decenni dopo rispetto al comune acciaio al carbonio. La scoperta, nel 1912-1913, si deve all'inglese Harry Brearly in Gran Bretagna e quasi contemporaneamente a Maurer e Strauss in Germania. Scoprirono che provini di acciaio con il 13-14% di cromo e con un tenore di carbonio relativamente alto (pari circa a 0,25%) non arrugginivano quando erano esposti all'atmosfera [2]; [6]. I successivi progressi della metallurgia nell'ambito dell'acciaio inossidabile fra gli anni '40 e '60 hanno ampliato il loro sviluppo e le loro applicazioni. Un primo esempio di utilizzo dell'acciaio inossidabile nelle costruzioni è il tetto del grattacielo Chrysler Building (1930), rivestito di lamiere in acciaio AISI 302 [14]. Tuttavia, per un vero utilizzo nell'ambito della carpenteria metallica si è dovuto attendere ancora alcuni decenni, soprattutto per l'elevato costo della materia prima rispetto all'acciaio comune.

Le prime normative dedicate all'acciaio inossidabile entrarono infatti in vigore solo negli anni '70 in America dove l'istituto AISI (American Iron and Steel Institute) pubblicò lo standard "Specification for the Design of Light Gauge Cold-formed Stainless Steel Structural Members" [6]. Venne poi pubblicata una revisione di tale documento nel 1974. Maggiori ricerche sul settore vennero effettuate dalla ASCE (American Society of Civil

Engineers) che pubblicò nuove norme nel 1991 e poi nel 2002. Nel 1988 venne fondato un progetto industriale capitanato dall'istituzione SCI (Steel Construction Institute) che portò alla scrittura del primo manuale sull'acciaio inossidabile nel 1994 "Design Manual for Structural Stainless Steel". Questo manuale venne poi pubblicato in una seconda edizione nel 2002, in una terza nel 2006 e in una quarta edizione nel 2017. È proprio da questi manuali che gli Eurocodici prendono spunto per l'acciaio inossidabile. Nel 1996 venne infatti pubblicata una bozza dell'Eurocodice 3 Parte 1.4, diventato poi definitivo nel 2006 (EN 1993-1-4) [15] allineandosi con le disposizioni presenti sul terzo manuale di progettazione per l'acciaio inossidabile [10].

Figura 2.9 Sanomatalo Building, Helsinki. Fonte: [14]

Figura 2.10 Ponte pedonale, Siena Fonte: [14]

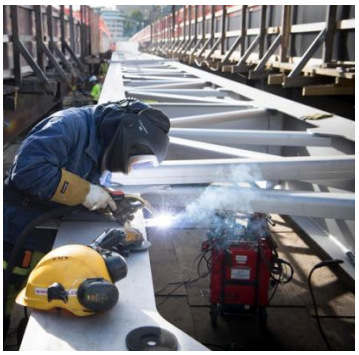

Figura 2.11 Soderstrom Railway Bridge, Stockolm Fonte: [16]

Prima del 1980 l'utilizzo dell'acciaio inossidabile era limitato soprattutto a piccole parti degli edifici, quali pavimenti e rivestimenti. Successivamente, vi è stata una crescita costante nel suo utilizzo anche a livello strutturale, sia sotto forma di barre da annegare nel calcestruzzo sia profili per la carpenteria metallica. L'utilizzo degli acciai inossidabili nelle strutture civili ha avuto un grande incremento a partire dagli anni 2000. Essendo ampiamente utilizzato soprattutto in ambienti in cui l'azione della corrosione è il problema principale, gran parte delle strutture che vedono il suo utilizzo sono ponti pedonali, stradali, ferroviari e dighe. Viene invece generalmente utilizzato in altre strutture soprattutto per la sua estetica.

Al giorno d'oggi l'impiego di acciaio inossidabile in campo strutturale è ancora una percentuale relativamente bassa sul totale, ma vi è un andamento ascendente. In

particolare, restando a dati riportati nel 2017 al congresso di Milano organizzato dal Centro Inox, in Italia l'impiego di acciai inossidabili nel campo dell'edilizia e delle infrastrutture è del 9%, valore quasi allineato con quello europeo (11%) ma sensibilmente inferiore al valore globale che è del 17% [5]. C'è spazio quindi per una espansione dell'impiego dell'acciaio inossidabile a fronte dei reali vantaggi offerti in certe condizioni di impiego, come può essere nelle centrali nucleari, nelle centrali solari, a biomassa e in edifici sostenibili [10].

Nella **Tabella 2.3** si riportano le strutture più importanti in cui si è fatto ampio uso degli acciai inossidabili e nelle **Figura 2.9; 2.10; 2.11** si riportano foto di alcune di queste strutture.

Tabella 2.3 Esempi di usi strutturali dell'acciaio inossidabile. Fonti: [5] [10] [12] [16]

Struttura	Tipologia	Data	Materiale utilizzato
Stadium San Nicola, Bari	Roof	1990	316L
Sanomatalo Building, Helsinki	Bracing system	1999	-
Millennium Bridge, York	Footbridge	2001	1.4462
The Likholefossen Bridge, Norway	Footbridge	2004	1.4162 (LDX2101)
Siena Bridge	Road Bridge	2004	1.4462
San Pio Church, San Giovanni Rotondo	Roof	2004	316L
Cala Galdana, Menorca	Road Bridge	2005	1.4462
US Air Force Memorial, Washington DC	Memorial	2006	316L
Westchester Memorial, New York	Memorial	2006	304L
Holyhead Bridge	Footbridge	2007	1.4462
Siena, Italy	Footbridge	2007	1.4162 (LDX2101)
Stonecutters Bridge Towers	Road Bridge	2009	1.4462
Helix, Singapore	Footbridge	2010	1.4462
Sluice gate, Japan	Dam	-	Lean duplex ASDSS
Fort Worth, Texas	Road Arch Bridge	2013	1.4462
Bridge of the port, San Diego	Footbridge	2017	S31803 / 317L
Hong Kong, Zhuhai, Macau	Road Bridge	2018	1.4462
Trumpf, Germany	Footbridge	2018	1.4462
Champlain, Montreal	Road Bridge	2019	1.4362
Soderstrom railway bridge, Stockolm	Railway bridge	oggi	1.4662

Capitolo 3

3. Proprietà dei profili e dei bulloni in acciaio inossidabile

Gli acciai più comunemente utilizzati nell'ingegneria civile per realizzare profili, lastre e unioni bullonate sono gli acciai austenitici e gli acciai duplex. In particolare, quest'ultimi non erano molto conosciuti fino a pochi anni fa, ma stanno subendo una forte crescita. Gli acciai ferritici invece tendono ad essere meno impiegati nelle strutture civili.

Acciai inossidabili austenitici nell'ingegneria civile

Gli acciai inossidabili austenitici generalmente sono utilizzati in applicazioni strutturali che richiedono buona resistenza meccanica, resistenza alla corrosione, formabilità, eccellente saldabilità in officina e in campo e, per applicazioni sismiche, un significativo allungamento prima della rottura. I gradi 1.4301 (ovvero AISI 304) e 1.4307 (ovvero AISI 304L) sono quelli più comunemente utilizzati, soprattutto adatti ad ambienti rurali, urbani e moderatamente industriali. I gradi 1.4401 (316) e 1.4404 (316L) hanno una maggiore resistenza a corrosione grazie all'aggiunta di molibdeno. Vengono perciò utilizzati in ambienti più aggressivi ovvero ambienti marini e industriali. Gradi ad alto tenore di cromo (circa 20 %), come il 1.4420, sono stati resi recentemente disponibili e saranno introdotti nelle future versioni della UNI EN 10088. Consentono di avere una resistenza alla corrosione simile a quella del 1.4401 ma hanno anche una resistenza meccanica superiore a quella dei gradi austenitici standard, con 390 N/mm^2 di resistenza di progetto in

confronto ai 240 N/mm^2, sebbene mantengano elevata duttilità [1]. Il grado 1.4318 è un acciaio inossidabile a basso tenore di carbonio ed elevato contenuto di azoto che incrudisce molto rapidamente quando lavorato a freddo. Ha una resistenza meccanica ben maggiore rispetto a quella del 1.4301 [1], dunque è utile dove le sezioni sarebbero molto massicce con i gradi austenitici tipici. Tuttavia, generalmente gli acciai austenitici sono utilizzati quando è importante la resistenza alla corrosione e non tanto la resistenza meccanica che risulta infatti non essere troppo elevata. Quando si vuole un'elevata resistenza meccanica per un risparmio di materiale si passa all'utilizzo di acciai duplex.

Acciai inossidabili duplex nell'ingegneria civile

Gli acciai inossidabili duplex sono molto adatti agli impieghi in cui sia richiesta elevata resistenza meccanica, ma anche resistenza alla corrosione e in particolare alla tensocorrosione. La sua resistenza meccanica, circa doppia degli austenitici, permette di costruire strutture più snelle, con minore ingombro di spazi e minore utilizzo di materiale. Viene quindi spesso utilizzato in applicazioni dove la quantità di materiale è grande e risulta necessario ottimizzare le caratteristiche dell'acciaio. Come si può vedere infatti nella **Tabella 2.3** del paragrafo 2.5, l'acciaio maggiormente utilizzato nelle opere più recenti è proprio il duplex 1.4462. Tale grado è estremamente resistente a corrosione, adatto all'utilizzo in ambiente marino e altri tipi di ambienti aggressivi. Tuttavia, risulta più costoso rispetto agli acciai austenitici e per questo negli ultimi anni si sono sviluppati nuovi gradi duplex chiamati "lean" più economici. Infatti, hanno un ridotto contenuto di nichel e molibdeno che li rende meno costosi poiché sono i leganti più cari in un acciaio inossidabile, ma allo stesso tempo hanno proprietà meccaniche comparabili a quelle del 1.4462 e resistenza alla corrosione simile a quella dei gradi austenitici standard [1]. Di particolare importanza sono i gradi "lean" duplex 1.4162, 1.4062 e 1.4362 che presentano un indice P.R.E.N mediamente superiore rispetto agli altri acciai ferritici e austenitici. Si può perciò concludere che i duplex "lean" sono ottimi materiali da costruzione perché hanno resistenze ben maggiori degli austenitici, mantenendo infatti una resistenza meccanica pari al duplex 1.4462, ma con anche migliori proprietà alla corrosione rispetto agli austenitici e con un costo più competitivo [11]; [12].

Acciai inossidabili ferritici nell'ingegneria civile

I due gradi ferritici adatti all'impiego strutturale e abbastanza facilmente reperibili, sono il 1.4003 che contiene circa l'11 % di cromo e il 1.4016 che contiene il 16,5 % circa di cromo [1]. Tuttavia, sono per lo più utilizzati per rivestimenti e coperture di edifici e non per realizzare la struttura portante dell'edificio come per gli acciai austenitici e duplex. Sebbene attualmente non siano molto usati nelle costruzioni, rappresentano un'alternativa economica interessante all'acciaio zincato per applicazioni dove serva resistenza meccanica ed estetica, in ambienti moderatamente aggressivi, poiché la loro durabilità è di gran lunga superiore dell'acciaio zincato.

3.1. Profilati e lastre

Gli elementi realizzati in acciaio inossidabile presentano geometrie del tutto simili a quelli realizzati in acciaio comune al carbonio. Si utilizza la laminazione a caldo e la laminazione a freddo per creare profilati come per esempio IPE e HE, per sezioni cave di forma circolare anche fino a larghi diametri, per lastre e rivestimenti.

La NTC-2018 sugli elementi in acciaio inossidabile riporta [17]:

> *§ 11.3.4.8: "E' consentito l'impiego di acciaio inossidabile per la realizzazione di strutture metalliche e composte. Si dovranno utilizzare acciai conformi alle norme armonizzate UNI EN 10088-4 e UNI EN 10088-5, recanti la Marcatura CE e per i quali si rimanda a quanto specificato al punto A del § 11.1."*

Dunque la norma di riferimento per i prodotti piani e lunghi in acciaio inossidabile è la UNI EN 10088:4,5-2014. Per le sezioni circolari cave in acciaio inossidabile invece, pur potendosi avvalere della norma appena citata, è meglio basarsi sulla UNI EN 10296-2:2006 (Tubi saldati di acciaio di sezione circolare per utilizzi meccanici e ingegneristici generali. Parte 2: Tubi di acciaio inossidabile) e la UNI EN 10297-2:2006 (Tubi senza saldatura di acciaio per utilizzi meccanici e ingegneristici generali. Parte 2: Tubi di acciaio inossidabile) [1]. I dati che vengono riportati di seguito fanno riferimento alla UNI EN 10088.

3.1.1. Resistenze meccaniche secondo UNI EN 10088

Le resistenze degli acciai inossidabili, come per gli acciai al carbonio, si riducono all'aumentare dello spessore ma subiscono già importanti diminuzioni se lo spessore è superiore a 8 mm. Invece, per gli acciai al carbonio, secondo la norma UNI EN 10025, la riduzione di resistenza viene applicata solamente quando lo spessore supera i 40 mm. Nel caso dell'acciaio inossidabile la diminuzione è dovuta anche al fatto che si sfruttino due processi differenti per ottenere il prodotto: generalmente laminazione a freddo se lo spessore è inferiore agli 8 mm, laminazione a caldo se è superiore. Le resistenze vengono riportate nella **Tabella 3.1**.

Tabella 3.1 Resistenze acciai inossidabili secondo UNI EN 10088-4,5. Valori in N/mm². Fonte: [1]

	Numero di acciaio	Forme di prodotto							
		nastri laminati a freddo		nastri laminati a caldo		lamiere laminate a caldo		Prodotti lunghi e travi profilate	
		Spessore nominale t							
		$t \leq 8$ mm		$t \leq 13{,}5$ mm		$t \leq 75$ mm		t or $\phi \leq 250$ mm	
		f_y	f_u	f_y	f_u	f_y	f_u	f_y	f_u
Austenitici	1.4301	230	540	210	520	210	520	190	500
	1.4307	220	520	200	520	200	500	175	500
	1.4318	350	650	330	650	330	630	-	-
	1.4401	240	530	220	530	220	520	200	500
	1.4404	240	530	220	530	220	520	200	500
	1.4541	220	520	200	520	200	500	190	500
	1.4571	240	540	220	540	220	520	200	500
Duplex	1.4062	530 [1]	700 [1]	480 [2]	680 [2]	450	650	380 [3]	650 [3]
	1.4162	530 [1]	700 [1]	480 [2]	680 [2]	450	650	450 [3]	650 [3]
	1.4362	450	650	400	650	400	630	400 [3]	600 [3]
	1.4462	500	700	460	700	460	640	450 [3]	650 [3]
	1.4482	500 [1]	700 [1]	480 [2]	660 [2]	450	650	400 [3]	650 [3]
	1.4662	550 [1]	750 [1]	550 [4]	750 [4]	480	680	450 [3]	650 [3]
Ferritici	1.4003	280	450	280	450	250 [5]	450 [5]	260 [6]	450 [6]
	1.4016	260	450	240	450	240 [5]	430 [5]	240 [6]	400 [6]
	1.4509	230	430	-	-	-	-	200 [7]	420 [3]
	1.4521	300	420	280	400	280 [8]	420 [8]	-	-
	1.4621	230 [5]	400 [9]	230 [8]	400 [8]	-	-	240 [7]	420 [7]

I valori nominali di f_y e f_u riportati in questa tabella possono essere utilizzati per il progetto di strutture senza tenere ulteriormente in considerazione gli effetti dell'anisotropia o dell'incrudimento. Per gli acciai ferritici la, EN 10088-4 riporta valori di f_y sia in direzione longitudinale che in direzione trasversale. In questa tabella sono riportati i valori in direzione longituninale che generalmente sono inferiori a quelli trasversali di circa 20 N/mm^2.

1.4621, 1.4482, 1.4062 e 1.4662 sono considerate solo nelle EN 10088-2 e 3.

Barre in 1.4509 sono considerate in EN 10088-3.

[1]	$t \leq 6{,}4$ mm	[4]	$t \leq 13$ mm	[7]	t o $\phi \leq 50$ mm
[2]	$t \leq 10$ mm	[5]	$t \leq 25$ mm	[8]	$t \leq 12$ mm
[3]	t o $\phi \leq 160$ mm	[6]	t o $\phi \leq 100$ mm	[9]	$t \leq 6$ mm

Inoltre, la EN 1993-1-4:2015, seguendo la UNI EN 10088, presenta una tabella aggiuntiva che tratta l'incrudimento dell'acciaio inossidabile. La EN 1993-1-4 consente di progettare con acciaio inossidabile incrudito nelle sole condizioni CP350 e CP500 [15] con le seguenti caratteristiche di resistenza:

Tabella 3.2 Resistenze acciai inossidabili incruditi secondo UNI EN 10088. Valori in N/mm^2. Fonte: [1]

Numero dell'acciaio	Grado di lavorazione a freddo			
	CP350		CP500	
	f_y N/mm^2	f_u [1] N/mm^2	f_y N/mm^2	f_u [1] N/mm^2
1.4301	350	600	460	650
1.4318	[2]	[2]	460	650
1.4541	350	600	460	650
1.4401	350	600	460	650
1.4571	350	600	460	650

[1] Secondo la EN 10088, la classificazione CP definisce solo il valore di resistenza allo snervamento proporzionale allo 0,2 %, f_y. Qualora si utilizzi uno di questi acciai bisogna richiedere in aggiunta una dichiarazione sulle altre proprietà meccaniche che devono essere in accordo con i valori minimi (conservative) qui riportati di resistenza ultima, f_u. In alternativa è possible ricorrere a test su campioni di materiale.

[2] Il grado 1.4318 ha resistenza allo snervamento proporzionale allo 0,2 % pari a 350 N/mm^2 allo stato ricotto, cfr. Tabella 2.2.

È da ricordare che, quando l'acciaio inossidabile è lavorato a freddo, tende a manifestare un comportamento a trazione e compressione non-simmetrico con differenti caratteristiche di sforzo-deformazione nelle direzioni longitudinale e trasversale rispetto a quella di laminazione, ovvero un'anisotropia. La resistenza a compressione longitudinale nel verso di laminazione è inferiore rispetto a quella a trazione sia longitudinale che trasversale, ed è per questo che la condizione CP500 viene ridotta da 500 a 460 N/mm^2.

Per quanto riguarda invece il modulo elastico la EN 1993-1-4:2015 e la UNI EN 10088-1 forniscono i seguenti valori [15]:

- E = 200 000 N/mm^2 per gli austenitici e i duplex;
- E = 220 000 N/mm^2 per i ferritici.

Il modulo di Poisson nel campo elastico risulta essere pari a v = 0,3.

Tuttavia, le prove sperimentali svolte sugli acciai ferritici hanno mostrato che un valore del modulo di elasticità pari a 200 000 N/mm^2 è più appropriato e verrà proposto probabilmente nella prossima revisione della EN 1993-1-4 [1].

3.1.2. Resistenze a corrosione

La resistenza a corrosione dei prodotti piani e lunghi quali profilati e lastre segue l'indice P.R.E.N e dunque la composizione del materiale. Infatti, in funzione della percentuale dei leganti presenti, l'acciaio inossidabile risulta avere differenti resistenze alla corrosione. L'indice P.R.E.N è utile per definire la resistenza a corrosione per pitting e può essere così valutato (% è la percentuale in peso) [11]:

$$P.R.E.N = \% Cr + 3{,}3 \% Mo + x \% N \quad \textbf{(3.1)}$$

Con: x = 0 per austenitici/ferritici

x =16 per i duplex

Nella **Tabella 3.3** viene presentata la composizione degli acciai inossidabili secondo UNI EN 10088. Tuttavia, esistono altri tipi di corrosione non specificatamente collegati alla composizione del materiale. Si parla appunto di corrosione interstiziale che dipende per lo più dalla geometria della struttura, corrosione galvanica se vi sono due diversi tipi di metallo a contatto e tensocorrosione. Per quanto riguarda quest'ultima, gli acciai inossidabili duplex presentano in genere una maggior resistenza alla corrosione sotto stress rispetto agli austenitici [4].

Tabella 3.3 Composizione acciai inossidabili secondo UNI EN 10088. Fonte: [1]

	Numero di acciaio	Contenuto leganti (max. o intervallo ammissibile) in % sul peso				
		C	Cr	Ni	Mo	Altro
Austenitici	1.4301	0,07	17,5 – 19,5	8,0 – 10,5		
	1.4307	0,03	17,5 – 19,5	8,0 – 10,5		
	1.4401	0,07	16,5 – 18,5	10,0 – 13,0	2,0 – 2,5	
	1.4318	0,03	16,5 – 18,5	6,0 - 8,0		N: 0,1 – 0,2
	1.4404	0,03	16,5 – 18,5	10,0 – 13,0	2,0 – 2,5	
	1.4541	0,08	17,0 – 19,0	9,0 – 12,0		Ti: 5xC – 0,7 [1]
	1.4571	0,08	16,5 – 18,5	10,5 – 13,5	2,0 – 2,5	Ti: 5xC – 0,7 [1]
Duplex	1.4062	0,03	21,5 – 24,0	1,0 – 2,9	0,45	N: 0,16 – 0,28
	1.4162	0,04	21,0 – 22,0	1,35 – 1,7	0,1 – 0,8	N: 0,2 – 0,25 Cu: 0,1 – 0,8
	1.4362	0,03	22,0 – 24,0	3,5 – 5,5	0,1 – 0,6	N: 0,05 – 0,2 Cu: 0,1 – 0,6
	1.4462	0,03	21,0 – 23,0	4,5 – 6,5	2,5 – 3,5	N: 0,1 – 0,22
	1.4482	0,03	19,5 – 21,5	1,5 – 3,5	0,1 – 0,6	N: 0,05 – 0,2 Cu: 1,0
	1.4662	0,03	23,0 – 25,0	3,0 – 4,5	1,0 – 2,0	N: 0,2 – 0,3 Cu: 0,1 – 0,8
Ferritici	1.4003	0,03	10,5 – 12,5	0,3 – 1,0	-	
	1.4016	0,08	16,0 – 18,0	-	-	
	1.4509	0,03	17,5 – 18,5	-	-	Ti: 0,1 – 0,6 Nb: [3xC+0,3] – 1,0
	1.4521	0,025	17,0 – 20,0	-	1,8 – 2,5	Ti: [4x(C+N)+0,15] – 0,8 [2]
	1.4621	0,03	20,0 – 21,5	-	-	N: 0,03 Nb: 0,2 – 1,0 Cu: 0,1 – 1,0

3.1.3. Verifiche degli elementi

Le verifiche di profili in acciaio inossidabile vengono svolte in modo similare a quella degli elementi in acciaio al carbonio e in questo elaborato non si affronta nel particolare questo argomento. È importante però sottolineare la suddivisione in classi delle sezioni e la presenza di coefficienti parziali di sicurezza proprio come avviene per il comune acciaio.

I coefficienti di sicurezza sono pari a γ_{M0} = 1,1 (resistenza della sezione trasversale compresa instabilità locale), γ_{M1} = 1,1 (resistenza ad instabilità dell'elemento) e γ_{M2} = 1,25 (per sezioni in tensione e per bulloni, saldature e piastre) [15]. La classe di appartenenza della sezione è invece definita dal rapporto dimensionale tra larghezza e spessore delle parti componenti della sezione, dello stato di sollecitazione e della classe di resistenza del materiale. Nel caso di acciaio inossidabile il parametro ε viene definito nel seguente modo:

Tabella 3.4 Parametro ε per definire la classe di una sezione in acciaio inossidabile. Fonte: [1]

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y}\frac{E}{210\,000}\right]^{0,5}$$

Grado	1.4301	1.4401	1.4462
f_y (N/mm^2)	210	220	460
ε	1,03	1,01	0,698

Le possibili classi risultano essere [18]:

- Classe 1 Sezioni trasversali in grado di sviluppare completamente una cerniera plastica, con capacità rotazionale richiesta per l'analisi plastica;
- Classe 2 Sezioni trasversali in grado di sviluppare completamente il proprio momento resistente plastico, ma con capacità rotazionale limitata;
- Classe 3 Sezioni trasversali nelle quali le fibre compresse possono raggiungere la tensione di snervamento, ma l'instabilità locale impedisce lo sviluppo del momento resistente plastico;
- Classe 4 Sezioni trasversali in cui si manifesta l'instabilità locale prima ancora che sia raggiunto il limite di snervamento in uno o più punti delle sezioni.

In caso di parti diverse con classi differenti, la classe finale della sezione è quella della zona con classe più alta.

3.2. Bulloni

Come avviene per i prodotti piani e lunghi, anche per gli elementi di collegamento sono presenti norme apposite che trattano sia la resistenza meccanica, sia la resistenza a corrosione che le dimensioni delle viti, dei dadi e delle rondelle in acciaio inossidabile. È importante sottolineare che nel caso dell'acciaio inossidabile per avere corrette proprietà

di anticorrosione, devono essere non solo scelti i giusti materiali in base all'ambiente in cui verranno installati ma è fondamentale anche porre attenzione alle geometrie dei giunti bullonati per non incorrere in corrosioni localizzate. Infatti, i giunti possono inumidirsi in caso di maltempo, spruzzi, immersione, formazione di condense ed altro ancora. È necessario quindi considerare con attenzione la possibilità di collocare i giunti lontano da fonti di umidità al fine di evitare o ridurre i problemi di corrosione connessi [1].

In particolare, la NTC-2018 sulle unioni bullonate in acciaio inossidabile riporta [17]:

> *§ 11.3.4.6: "Gli elementi di collegamento, costituiti dagli assiemi vite/dado/rondella in acciaio inossidabile resistente alla corrosione devono essere conformi alle prescrizioni di cui alla UNI EN ISO 3506-1:2010 (Viti e viti prigioniere), UNI EN ISO 3506-2:2010 (Dadi), UNI EN ISO 3506-3:2010 (Viti senza testa e particolari similari non soggetti a trazione), UNI EN ISO 3506-4:2010 (Viti autofilettanti)."*

La norma UNI EN ISO 3506 "Mechanical properties of corrosion resistant stainless steel fasteners" dichiara quali sono i materiali e le loro caratteristiche utilizzabili per gli elementi di collegamento in acciaio inossidabile. La specifica indica la composizione chimica e le proprietà per gli elementi di collegamento di acciai austenitici, martensitici, ferritici e duplex. Ma sono ammessi materiali alternativi, anche se non presenti nella specifica, se rispettano i requisiti per le caratteristiche fisiche e meccaniche ed hanno una resistenza equivalente alla corrosione. Nella UNI EN ISO 3506 del 2010 i materiali contemplati per i bulloni erano solamente gli acciai austenitici, acciai martensitici e acciai ferritici. Tuttavia, l'utilizzo degli acciai martensitici e ferritici è poco adatto al campo dei collegamenti rispetto agli acciai austenitici poiché presentano minore duttilità. Ma molto importanti risultano essere anche gli acciai duplex, non ancora nemmeno presenti nella norma del 2010. Nei paragrafi seguenti vengono perciò riportati i materiali contemplati dalla norma più aggiornata, la UNI EN 3506:2020, che sostituisce quella del 2010.

Il materiale per viti e dadi è caratterizzato dalla lettera "A" per gli austenitici, dalla "F" per i ferritici, dalla "C" per i martensitici e dalla "D" per i duplex. La lettera è seguita da un numero che si riferisce al livello di resistenza alla corrosione e più alto è il numero e più cresce la resistenza a corrosione.

3.2.1. Resistenze meccaniche

Per quanto riguarda la resistenza meccanica anche l'Eurocodice UNI EN 1993-1-4 [19] dedica un paragrafo apposito e riporta le caratteristiche di resistenza per i bulloni in acciaio inossidabile in acciaio austenitico e duplex come da **Tabella 3.5**.

Tabella 3.5 Classi di resistenza riportate su EN 1993-1-4. Fonte: [19]

Material groups	Property class to EN ISO 3506	Range of sizes	Yield strength f_{yb} N/mm^2	Ultimate tensile strength f_{ub} N/mm^2
Austenitic and austenitic-ferritic	50	≤ M 39	210	500
	70	≤ M 24	450	700
	80	≤ M 24	600	800

Gli elementi di collegamento vengono dunque generalmente caratterizzati da tre livelli di resistenza ovvero classi di resistenza (50, 70 e 80) ma possono essere anche prodotti bulloni con caratteristiche superiori cioè con resistenze ultime che superano gli 800 Mpa per arrivare a 1000 Mpa. La norma UNI EN 3506 risulta infatti più aggiornata e viene riportata nella **Tabella 3.6** e nelle **Figura 3.1, 3,2.** Tra quelli presentati, gli elementi per il collegamento più utilizzati sono quelli in acciaio austenitico di classe 70 [1].

I bulloni con classe di proprietà 50 sono non magnetici, quelli delle classi 70 e 80 possono mostrare invece qualche caratteristica magnetica.

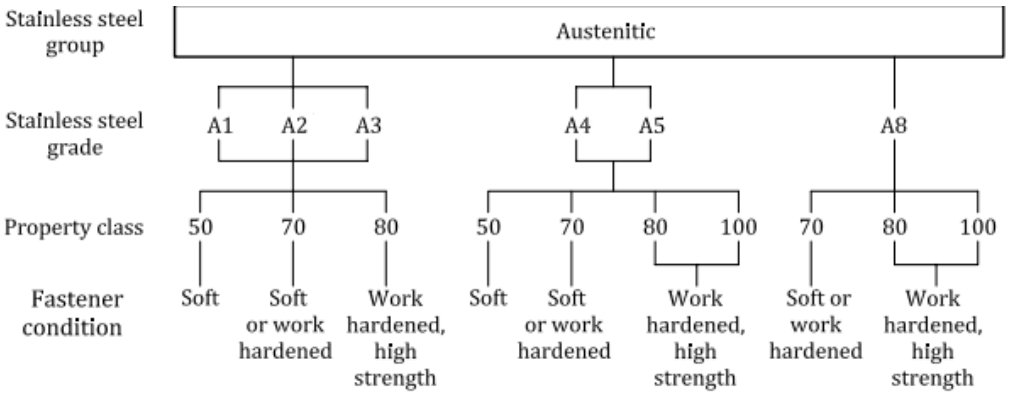

Figura 3.1 Sistema di designazione, classi e condizione dei bulloni in acciaio inossidabile austenitici. Fonte: [20]

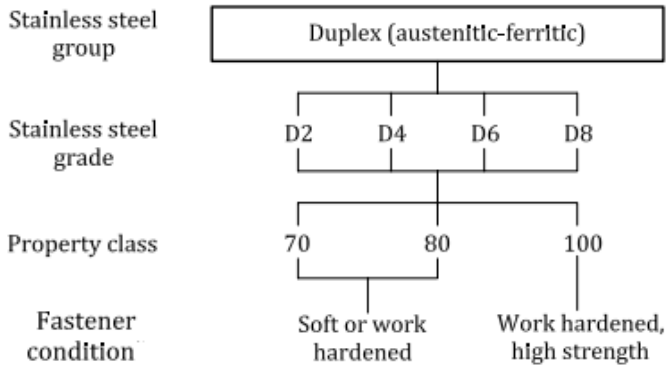

Figura 3.2 Sistema di designazione, classi e condizione dei bulloni in acciaio inossidabile duplex. Fonte: [20]

Gli elementi di collegamento possono essere fabbricati con diverse tecniche che conferiscono una condizione soft oppure incrudita al materiale (**Figura 3.1, 3.2**). Ovvero la classe 50 è generalmente in condizione ricotta mentre le classi superiori sono lavorate a freddo per ottenere una maggiore resistenza grazie all'incrudimento. Inoltre, filettature ottenute per laminazione sono più resistenti di quelle ottenute mediante utensili, a causa dell'incrudimento causato dalle operazioni di laminazione. Lo stato di compressione superficiale indotto sulle filettature laminate innalza anche la resistenza a fatica-corrosione e alla tensocorrosione.

Nel caso in cui i bulloni abbiano una finitura superficiale particolare, un rivestimento o siano stati lubrificati, nella designazione vengono inserite anche le lettere "Lu" appena dopo il numero che va ad indicare la classe di resistenza. Un esempio può essere A4-80Lu. L'impiego di un bullone lubrificato può essere infatti utile per ottenere in modo affidabile la relazione tra la coppia di serraggio e la forza di precarico all'interno del gambo della vite quando viene utilizzato nelle unioni bullonate ad attrito [20].

Tabella 3.6 Gradi e classi di resistenza delle viti e dei dadi in acciaio inossidabile. Fonte: [20] [21]

Stainless steel grade		Property class	Tensile strength R_{mf} min. MPa	Stress at 0,2 % non-proportional elongation R_{pf} min. MPa	Elongation after fracture A min. mm
Austenitic	A1 A2 A3	50	500	210	0,6d
		70	700	450	0,4d
		80	800	600	0,3d
	A4 A5	50	500	210	0,6d
		70	700	450	0,4d
		80	800	600	0,3d
		100	1 000	800	0,2d
	A8	70	700	450	0,4d
		80	800	600	0,3d
		100	1 000	800	0,2d
Duplex	D2 D4 D6 D8	70	700	450	0,4d
		80	800	600	0,3d
		100	1 000	800	0,2d

3.2.2. Resistenze a corrosione

La resistenza a corrosione è la caratteristica fondamentale dei bulloni in acciaio inossidabile. Proprio per questo, come accennato all'inizio del paragrafo 3.2, la normativa suddivide i bulloni in acciaio inossidabile secondo le proprietà di anticorrosione. Viene perciò fornito un numero, posto appena dopo la lettera che indica il materiale di cui è composto il bullone, che indica la resistenza a corrosione. Più è elevato e più l'elemento di collegamento resisterà agli ambienti aggressivi. Essendo la condizione dell'acciaio degli elementi di collegamento nella classe di proprietà 50 ricotta, è più facile ottenere una elevata resistenza alla corrosione. Invece, per le classi di proprietà 70 e 80 la lavorazione a freddo può influire leggermente sulla resistenza alla corrosione [4] ma l'utilizzo di un grado specifico del materiale va ad eliminare tale problematica.

Nella **Tabella 3.7** vengono riportate le classi di resistenza a corrosione dei bulloni, i gradi utilizzati per ottenere tale resistenza (austenitici base o con molibdeno, super austenitici, lean duplex o super duplex) e anche i materiali dei profili da accoppiare.

Da sottolineare come in genere il materiale più usato risulti essere l'austenitico base A2, mentre l'A1 deve essere usato solo in ambienti ben definiti in cui la corrosione non sia il problema principale. Infatti, gli acciai A1, a causa del loro alto contenuto in zolfo, hanno una resistenza alla corrosione più bassa rispetto a quelli con un normale tenore di zolfo. Gli acciai di tipo A2 hanno invece resistenza alla corrosione equivalente a quella del tipo 1.4301 [4] e per questo possono essere utilizzati con profili e piastre di grado 1.4301. Il grado A3 ha proprietà molto simili al grado A2 ma ha una maggiore resistenza al fuoco (tipicamente più di 350°C). Il grado A4 invece è conosciuto come "l'acciaio resistente agli acidi" ma non ad ambienti in cui sia presente del cloro quali le piscine. Per ottenere una buona resistenza anche al cloro si deve passare al grado A8 che è conosciuto per la sua elevata percentuale di molibdeno presente (6%) che lo rende adatto anche ad ambienti marini, resistendo a qualsiasi forma di corrosione. Per quanto riguarda invece gli acciai duplex i gradi D2 e D4 posseggono una maggiore resistenza alla tensocorrosione rispetto ai gradi austenitici fino all'A4. Il D6 ha una migliore resistenza a pitting oltre che alla tensocorrione, mentre il D8 è confrontabile con l'austenitico A8 [22].

Tabella 3.7 Classi di resistenza a corrosione per gli acciai inossidabili austenitici e duplex per bulloni. Fonte: [1]

gruppo	ISO 3506 classe	Gradi di acciaio inossidabile utilizzati nei collegamenti bullonati	Commenti
Austenitico	A1	1.4570, 1.4305	Per impieghi nei macchinari [1]
	A2	1.4301, 1.4307	Austenitici base
	A3	1.4541, 1.4550	Austenitici base stabilizzati
	A4	1.4401, 1.4404	Austenitici aggiunti al molibdeno
	A5	1.4571	Austenitici stabilizzati al molibdeno
	A8	1.4529, 1.4547	Super austenitici
Duplex	D2	1.4482, 1.4362	Lean duplex
	D4	1.4162, 1.4062	Lean duplex
	D6	1.4462	Standard duplex
	D8	1.4410, 1.4501, 1.4507	Super duplex
[1] l'alto contenuto di zolfo abbassa la resistenza a corrosione rispetto ai gradi equivalenti con contenuto normale di zolfo. Questi gradi vanno utilizzati con cautela			

Per ottenere proprietà anticorrosive è importante non solo l'accoppiamento di materiale tra bulloni e profili, ma anche tra viti, dadi e rondelle. Essi devono essere dello

stesso grado di acciaio inossidabile. Altre combinazioni sono ammesse ma si deve porre attenzione a [21]:

- L'elemento con minore resistenza a corrosione deve essere tenuto in conto nella resistenza a corrosione di progetto;
- Si deve evitare il galling (proprio per questo i dadi e le rondelle non possono avere resistenze meccaniche inferiori rispetto alle viti, ma solo pari o maggiori).

3.2.3. Dimensioni secondo normative

Nel caso dell'acciaio comune si distinguono due tipologie di bulloni: l'assieme 'non precaricato' e quello 'precaricato'. Le due tipologie sono differenti non solo per le resistenze meccaniche, ma anche nelle geometrie delle viti, dadi e rondelle stesse. Nel caso dell'acciaio inossidabile invece non risulta una distinzione apposita per le due tipologie di bulloni. Ovvero è presente un vuoto normativo, poiché non vengono specificate particolari classi di resistenze per l'utilizzo nel precarico e non sono fornite geometrie apposite dei bulloni che li rendano adatti al precarico come succede per gli assiemi di bulloneria HR o HV per le classi 8.8 e 10.9 in acciaio al carbonio. Questo fa sì che i bulloni prodotti seguendo le normative sulla geometria UNI EN ISO 4014 e 4017 [23]; [24] possano essere utilizzati non solo per connessioni non precaricate ma anche nelle unioni bullonate ad attrito, eseguendo specifici test di laboratorio.

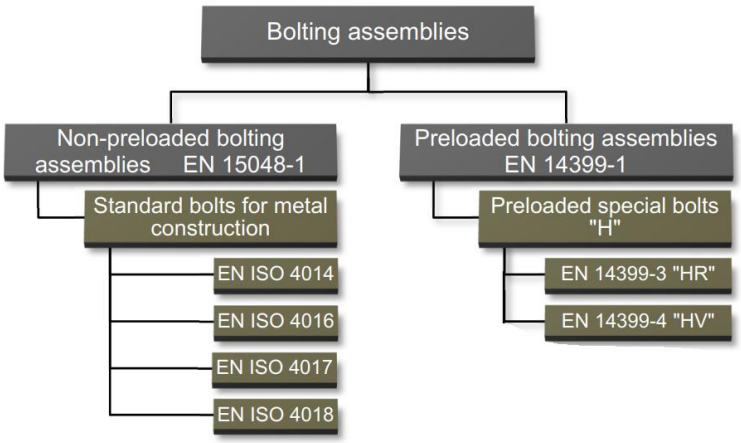

Figura 3.3 Normative che regolano le unioni bullonate precaricate e non. Fonte: [25]

Dunque, nell'acciaio inossidabile non esistono standard di prodotto per i bulloni precaricati e si fa riferimento alle norme UNI EN ISO 4014 e 4017 per le viti, alla UNI EN ISO 4032 per i dadi esagonali e alla UNI EN ISO 7089 per le rondelle, valide anche per gli acciai al carbonio. Per le viti a testa con gambo parzialmente filettato si utilizza la UNI EN ISO 4014, mentre per le viti a testa esagonale con gambo interamente filettato la 4017. Le dimensioni delle viti vengono valutate seguendo quanto descritto nella **Figura 3.4**, che riporta in questo caso una rappresentazione di una vite parzialmente filettata, ma la designazione di ogni parte della vite avviene nello stesso modo anche per quelle interamente filettate.

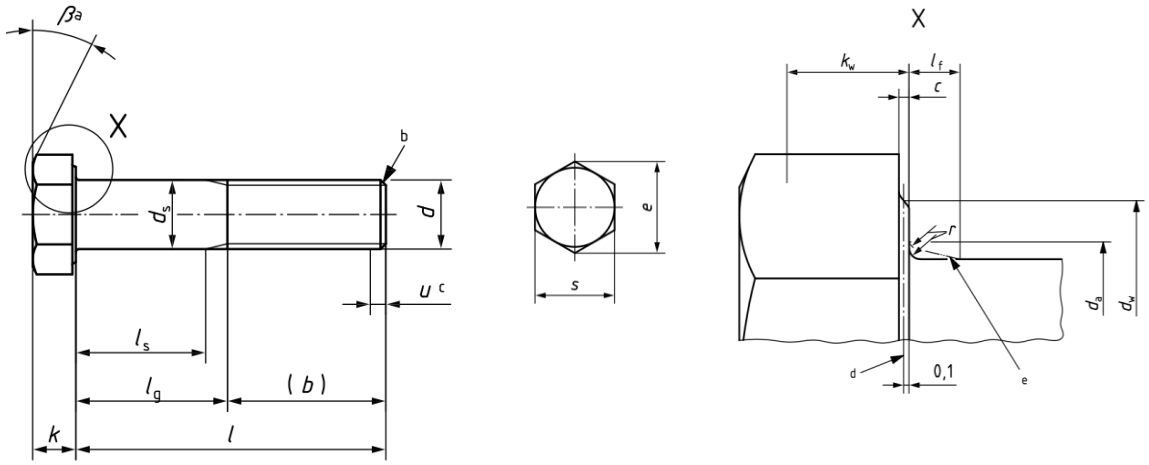

Figura 3.4 Designazione delle dimensioni di una vite secondo UNI EN 4014. Fonte: [23]

Le tipologie di bulloni HR e HV (secondo norma UNI EN 14399-1 [26]) sono specifiche per l'acciaio al carbonio e, come già detto, sono adatte al precarico. Si differenziano dai bulloni secondo norme UNI EN ISO 4014 e 4017 per alcune dimensioni geometriche come si può notare nelle **Tabella 3.8, 3.9, 3.10, 3.11**. La più importante risulta essere la maggiore dimensione della testa della vite e del dado che fa così ridurre la pressione esercitata dalla vite sui profili poiché il precarico inserito si distribuisce su un'area più grande. Inoltre, si fa particolare attenzione ad avere un'elevata duttilità, che nel caso dell'unione HR è ottenuta con un'altezza del dado $\geq 0{,}9\ d$ e la filettatura della vite molto lunga in modo che si abbia

un allungamento plastico della vite, mentre per l'unione HV è fornita dalla deformazione plastica dei filetti con il dado che risulta pari a $0{,}8\ d$.

Tabella 3.8 Panoramica sulle dimensioni delle viti senza precarico secondo norma EN 15048-1 Fonte: [25]

Designation	Product standard	Thread length	Shank diameters	Wrench width	Product class	Strength class
Standard bolts for metal construction	EN ISO 4014	medium long: b ≈ (2.2 to 2.5) · d	normal: d_{sh} = d	normal: s ≈ (1.5 to 1.6) · d	A/B[1)]	5.6, 8.8, 10.9
	EN ISO 4016				C	4.6
	EN ISO 4017	long: b ≈ 1	normal: d_{sh} = d	normal: s ≈ (1.5 to 1.6) · d	A/B[1)]	5.6, 8.8, 10.9
	EN ISO 4018				C	4.6

1) ≤ M24 / > M24

Tabella 3.9 Panoramica sulle dimensioni dei dadi per unioni non precaricate. Fonte: [25]

Designation	Product standard	Height of the nut	Wrench width	Product class	Strength class
Standard bolts for metal construction	EN ISO 4032	medium: m ≈ 0.9 · d	normal: s ≈ (1.5 to 1.6) · d	A/B[1)]	6, 8, 10
	EN ISO 4034	medium: m ≈ 0..9 · d	normal: s ≈ (1.5 to 1.6) · d	C	4, 5
	EN ISO 4033	medium: m ≈ 1.0 · d	normal: s ≈ (1.5 to 1.6) · d	A/B[1)]	9, 12

1) ≤ M16 / > M16

Tabella 3.10 Panoramica sulle dimensioni delle viti per il precarico secondo norma UNI EN 14399-1. Fonte: [25]

Designation	Product standard	Thread length	Shank diameter	Wrench width	Product class	Strength class
Preloaded special bolts "H"	EN 14399-4 "HV"	short: b ≈ (1.4 to 1.9) · d	normal: d_{sch} = d	large: s ≈ (1.6 to 1.7) · d	B	10.9
	EN 14399-8 "HVP"	extremly short: b ≈ (1.2 to 1.5) · d	Pass-: d_{sch} = d + 1	large: s ≈ (1.6 to 1.7) · d	B	10.9
	EN 14399-3 "HR "	medium: b ≈ (2.2 to 3.3) · d	normal: d_{sch} = d	large: s ≈ (1.6 to 1.7) · d	B	8.8, 10.9

Tabella 3.11 Panoramica sulle dimensioni dei dadi per unioni con precarico. Fonte: [25]

Designation	Product standard	Height of the nut	Wrench width	Product class	Strength class
Preloaded special bolts "H"	EN 14399-4 "HV"	small: m ≈ 0.8 · d	large: s ≈ (1.6 to 1.7) · d	B	10
	EN 14399-3 "HR"	medium: m ≈ 0.9 · d	large: s ≈ (1.6 to 1.7) · d	B	8, 10

Tuttavia, secondo lo studio [27], il precarico in bulloni con geometria da UNI EN ISO 4014 e 4017 crea una pressione sulla testa della vite e sul dado che non risulta problematica per i profili di acciaio su cui è esercitata. Infatti, è vero che la pressione data da tali bulloni è leggermente maggiore rispetto ai bulloni secondo UNI EN 14399-1, però non si avvicina mai alle resistenze meccaniche dei profili, sia nel caso di acciaio al carbonio sia nel caso di acciaio inossidabile. Infatti, la pressione limite esercitata da un bullone (p_G) a cui può resistere un profilo di acciaio non risulta essere pari alla resistenza a snervamento di esso bensì ben superiore. Per esempio, per un acciaio austenitico 1.4301, che presenta una resistenza a snervamento di 210 N/mm^2, la pressione limite p_G risulta essere di 630 N/mm^2, ovvero circa tre volte maggiore (secondo normativa tedesca VDI 2230-1). La pressione p_G viene definita come la pressione che crea una deformazione plastica minore di 20 µm, senza avere effetti di creep marcati ed incontrollabili [27]. Come si può vedere nelle **Figura 3.5, 3.6**, le resistenze meccaniche a snervamento dell'acciaio S235 e dell'austenitico 1.4301 vengono superate dalla pressione causata dal precarico dei bulloni con geometrie UNI EN ISO 4014 e 4017 (con precarichi pari a $F_{p,C} = 0.7\ f_{ub}\ A_s$ and $F_{p,C}^* = 0.7\ f_{yb}\ A_s$) ma se comparate alle pressioni limite si è molto lontani dal valore massimo applicabile. Perciò tali bulloni in classe 8.8 e 10.9 secondo UNI EN ISO 4014 e 4017 possono essere utilizzati anche con il precarico, se si guarda solamente alla pressione superficiale esercitata [27].

Dunque, in assenza di normativa specifica nel caso dell'acciaio inossidabile, l'utilizzo di bulloni con geometrie UNI EN ISO 4014 e 4017 in classe 70, 80 o 100 come bulloni per il precarico non crea alcuna problematica particolare dal punto di vista della pressione esercitata sui profili. Restano invece da affrontare le tematiche riguardanti la duttilità, il galling e i precarichi raggiungibili con questa tipologia di bulloni, argomenti presenti nei capitoli 5, 6 e 7.

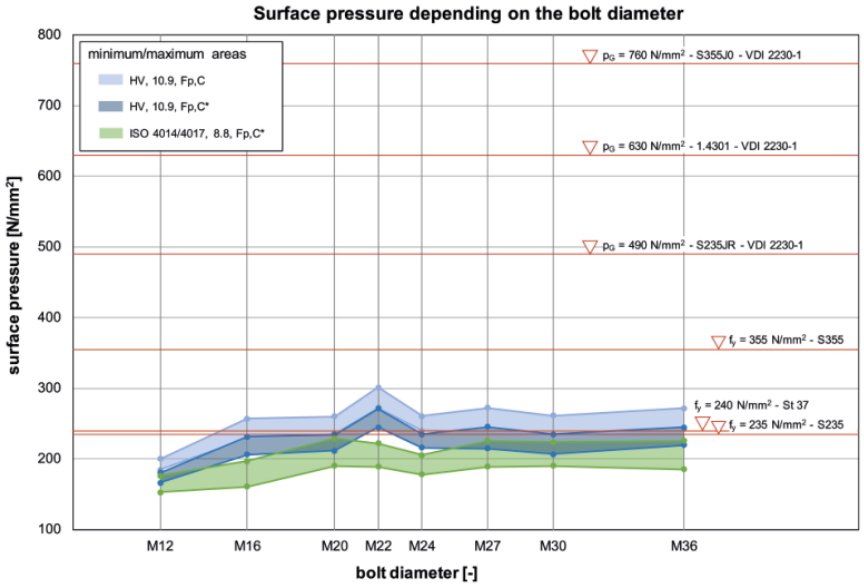

Figura 3.5 Confronti tra la pressione esercitata dai bulloni e la pressione limite delle superfici S235, S355, 1.4301 – tipologie e precarico bulloni: a) $F_{p,C}$ classe 10.9 e sistema HV; b) $F_{p,C}$ classe 10.9 e sistema HV; c) $F_{p,C}$ classe 8.8 e sistema 4014/4017. Fonte: [27]*

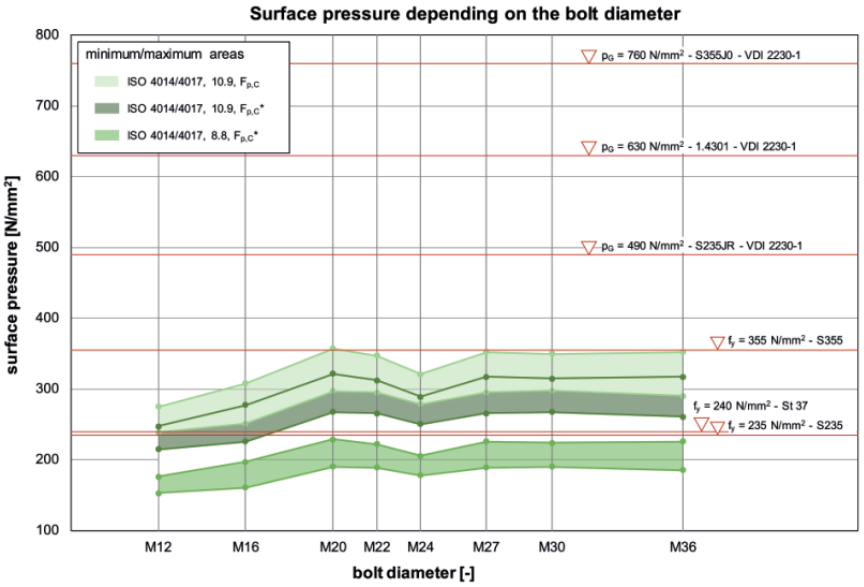

Figura 3.6 Confronti tra la pressione esercitata dai bulloni e la pressione limite delle superfici S235, S355, 1.4301 – tipologie e precarico bulloni: a) $F_{p,C}$ classe 10.9 e sistema 4014/4017; b) $F_{p,C}$ classe 10.9 e sistema 4014/4017; c) $F_{p,C}$ classe 8.8 e sistema 4014/4017. Fonte: [27]*

Capitolo 4

4. Giunzioni bullonate in acciaio inossidabile

Nei seguenti paragrafi vengono riassunte brevemente le verifiche sulla resistenza che devono essere effettuate nel caso in cui la giunzione bullonata in acciaio inossidabile venga utilizzata senza precarico oppure ad attrito. In particolare, l'Eurocodice EN 1993-1-8 [19] suddivide le connessioni bullonate in cinque categorie, in funzione della presenza o meno di precarico e della resistenza a taglio o a trazione fornita come si può vedere nella **Tabella 4.1**. Questa suddivisione risulta valida non solo per l'acciaio al carbonio ma anche per l'acciaio inossidabile, ma se nel caso dell'acciaio al carbonio vengono specificate le classi di resistenza che possono essere utilizzate per ogni categoria, per l'acciaio inossidabile non c'è alcuna prescrizione.

L'NTC 2018 non dedica paragrafi specifici in cui spieghi come affrontare le verifiche riguardanti le unioni in acciaio inossidabile, perciò suggerisce di seguire quelle per l'acciaio comune o rifarsi all'Eurocodice EN 1993-1-4 [15], norma di comprovata validità. Nelle pagine successive vengono perciò riportate le formule suggerite dall'Eurocodice EN 1993-1-4, considerando anche ciò che viene riportato nel "Manuale di progettazione per strutture in acciaio inossidabile quarta edizione" [1] . Tali verifiche sono comunque molto simili a quelle utilizzate per l'acciaio al carbonio comune, tranne alcune differenze sulla definizione delle resistenze e dei parametri utilizzati nella verifica a rifollamento dei piatti.

Tabella 4.1 Categorie di connessioni bullonate.

Categoria	Tipologia	Criteri di verifica
Connessioni a taglio		
A (resistente a taglio)	Non precaricata	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$
B (resistente allo scorrimento allo stato limite di servizio)	Precaricata	$F_{v,Ed,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$ $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$
C (resistente allo scorrimento allo stato limite ultimo)	Precaricata	$F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ $\sum F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$
Connessioni a trazione		
D	Non precaricata	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$
E	Precaricata	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$

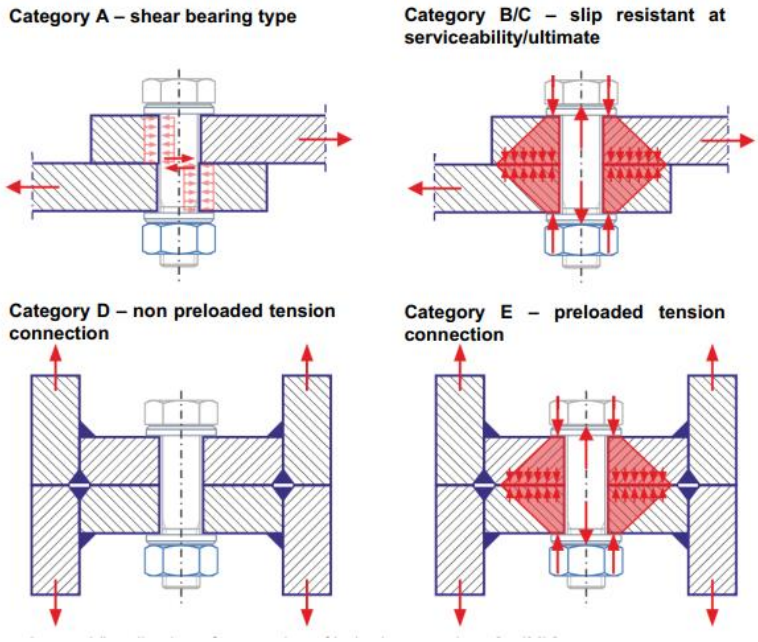

Figura 4.1 Categorie e funzionamento delle giunzioni bullonate. Fonte: [25]

4.1. Giunzioni bullonate senza precarico

La verifica deve essere effettuata sia sul bullone sia sul piatto, per questo si hanno queste quattro verifiche:

- Resistenza a trazione;
- Resistenza a taglio;
- Resistenza a trazione e taglio;
- Resistenza a rifollamento.

La verifica di un giunto bullonato non precaricato avviene seguendo le stesse formulazioni dell'acciaio al carbonio. Tuttavia, con l'acciaio al carbonio le connessioni non precaricate vengono soltanto verificate allo stato limite ultimo SLU mentre si ritiene che lo stato limite di servizio SLE sia implicitamente soddisfatto. Questo è giustificato dal fatto che l'acciaio al carbonio presenta un comportamento praticamente bilineare con un ramo elastico e poi un ramo plastico in cui l'incrudimento può essere spesso trascurato perché vi è un rapporto tra resistenza allo snervamento e resistenza ultima che è basso, tipicamente tra 1,1 e 1,5. Nel caso di acciai inossidabili invece si ha che tale rapporto risulta essere molto più elevato e la resistenza ultima può superare il doppio della resistenza allo snervamento. Inoltre, la curva sforzo deformazione è non lineare quindi per raggiungere elevati valori di resistenza l'acciaio inossidabile richiede più deformazione rispetto all'acciaio al carbonio. Perciò il progetto e la verifica allo SLU non sempre può garantire che non ci siano eccessive deformazioni allo SLE [28]. Nella EN 1993-1-4 vengono dunque poste alcune limitazioni quando la deformazione è un fattore critico, in particolar modo nelle verifiche a rifollamento.

4.1.1. Resistenza a trazione

Come nel caso di giunti bullonati in acciaio al carbonio, la resistenza a trazione del bullone è data da ($\gamma_{M2} = 1{,}25$ coefficiente di sicurezza):

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \, f_{ub} \, A_s}{\gamma_{M2}} \qquad \textbf{(4.1)}$$

In cui - A_s è l'area resistente (cioè filettata) a trazione;
- f_{ub} è la resistenza ultima del bullone;
- k_2 è pari a 0,9.

Ad essa si accompagna la resistenza a punzonamento dei piatti pari a:

$$B_{p,Rd} = \frac{0{,}6\,\pi\, d_m t_p\, f_{u,red}}{\gamma_{M2}} \qquad \textbf{(4.2)}$$

In cui - d_m è il minimo diametro misurabile sul dado o sulla testa del bullone;
- t_p è lo spessore del piatto;
- $f_{u,red}$ e la resistenza del piatto ridotta, data da:

$$f_{u,red} = 0{,}5 f_y + 0{,}6 f_u \leq f_u \qquad \textbf{(4.3)}$$

La rottura a trazione generalmente può avvenire in tre modi differenti in base alla presenza o meno della filettatura su tutto il gambo o solo in parte. Se il gambo risulta completamente filettato la rottura avviene dove è presente la filettatura senza creare danneggiamenti nella zona della testa della vite ("type I" nella figura **Figura 4.2**). Se il gambo invece risulta parzialmente filettato la rottura può avvenire sulla parte filettata ("type II") oppure sulla parte liscia e in quest'ultimo caso la rottura avviene con una deformazione maggiore conferendo una duttilità più elevata a rottura della vite ("type III") [28].

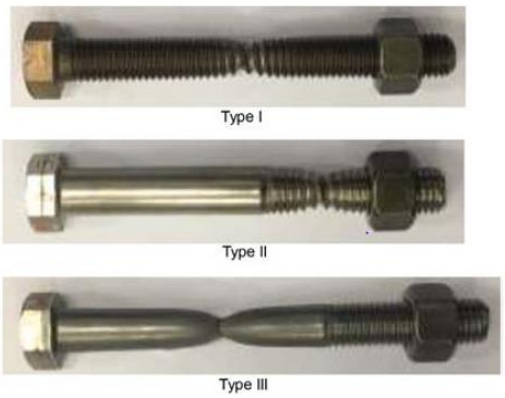

Figura 4.2 Diverse tipologie di rotture in trazione. Fonte: [28]

4.1.2. Resistenza a taglio

Come nel caso di giunti bullonati in acciaio al carbonio, la resistenza a taglio del bullone è data da:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha\, f_{ub}\, A_s}{\gamma_{M2}} \qquad \textbf{(4.4)}$$

In cui: - A_s è l'area netta della vite se il piano di taglio passa per una parte non filettata del gambo o l'area resistente a trazione se il piano di taglio passa per una parte filettata del gambo;
- f_{ub} è la resistenza ultima del bullone;
- α = 0,5 se il piano di taglio passa per la sezione filettata, 0,6 se invece passa dove la sezione non è filettata.

4.1.3. Resistenza a taglio e trazione

Da normativa EN 1993-1-4, come nel caso di giunti bullonati in acciaio al carbonio, la resistenza combinata a trazione e taglio del bullone è data da:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1{,}4\, F_{t,Rd}} \leq 1{,}0 \qquad \textbf{(4.5)}$$

Alcuni recenti studi hanno dimostrato come tale dominio di interazione sia troppo restrittivo e troppo a favore di sicurezza rispetto alla reale resistenza dei bulloni in acciaio inossidabile. Attraverso test di trazione, di taglio e test combinati con diverse angolature in modo da avere diverse possibili interazioni tra taglio e trazione sono state proposte nuove curve di interazione meno stringenti, valide sia per bulloni in acciaio inossidabile di resistenza normale (classi 50, 70 e 80), sia per alte resistenze ovvero superiori a 800 Mpa di resistenza ultima come si può vedere nella **Figura 4.3** [28].

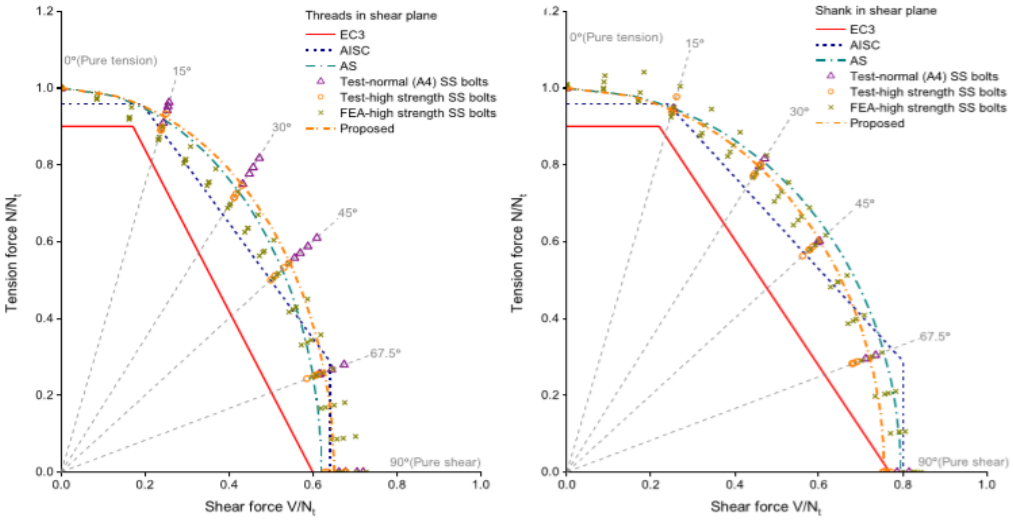

Figura 4.3 Domini di interazioni proposti e a confronto con le normative. [28]

4.1.4. Resistenza a rifollamento

La verifica a rifollamento per l'acciaio inossidabile è simile a quella per l'acciaio al carbonio ma deve tenere in considerazione non solo esigenze legate alla resistenza ma anche quelle legate alla deformazione. Inoltre, le connessioni bullonate sono classificate a seconda dello spessore delle parti da collegare: definite spesse se le parti da collegare hanno spessori maggiori di 4 mm, sottili se le parti da collegare hanno spessori minori o uguali a 4 mm. La capacità a rifollamento è data da:

$$F_{b,Rd} = \frac{2{,}5\ \alpha_b\ k_t\ t\ d\ f_{u.red}}{\gamma_{M2}} \qquad \textbf{(4.6)}$$

In cui: - α_b è il coefficiente di rifollamento nella direzione di trasferimento del carico;
- k_t è il coefficiente di rifollamento nella direzione perpendicolare a quella di trasferimento del carico;
- *d* è il diametro della vite;
- *t* è lo spessore dell'elemento da collegare;
- $f_{u.red}$ è la resistenza ridotta dei piatti come riportato al paragrafo 4.1.1.

Coefficienti di rifollamento nelle connessioni spesse

Se la deformazione non è un fattore critico si utilizza:

$$\alpha_b = \min\left(1{,}0;\ \frac{e_1}{3d_0}\right) \qquad k_t = \begin{cases} 1{,}0 & se\ \ \frac{e_2}{d_0} > 1{,}5 \\ 0{,}8 & se\ \ \frac{e_2}{d_0} \leq 1{,}5 \end{cases} \tag{4.7}$$

Se la deformazione è un fattore critico:

$$\alpha_b = \min\left(1{,}0;\ \frac{e_1}{2d_0}\right) \qquad k_t = 0{,}5 \tag{4.8}$$

In cui: - e_1, e_2 sono le eccentricità del foro;
- d_0 è il diametro del foro.

Coefficiente di rifollamento nelle connessioni sottili

Se la deformazione non è un fattore critico e per lamiera interna in un collegamento con due piani di taglio, si utilizzano le stesse formulazioni precedenti. Invece, per una connessione con singolo piano di taglio e per la lamiera esterna di una connessione a doppio piano di taglio, il coefficiente α_b risulta uguale a quello delle connessioni spesse mentre k_t= 0,64. Se la deformazione è un fattore critico invece si ha k_t= 0,50 [1].

4.2. Giunzioni bullonate ad attrito

La normativa EN 1993-1-4 [15] per quanto riguarda i bulloni precaricati in acciaio inossidabile è veramente poco esaustiva, infatti sostiene che i bulloni precaricati possono essere utilizzati solamente se vengono svolti dei test in grado di determinare la loro resistenza a scorrimento. La nota riportata sull'Eurocodice è la seguente:

> *§ 2.2.2: "High strength bolts made of stainless steel should not be used as preloaded bolts designed for a specific slip resistance, unless their acceptability in a particular application can be demonstrated from test results."*

L'utilizzo di bulloni precaricati in acciaio inossidabile è stato piuttosto limitato in passato a causa di scarse conoscenze in tale ambito, in particolare per:

- Il metodo più adatto di applicazione del precarico, per evitare il grippaggio;
- L'impatto delle caratteristiche di rilassamento dell'acciaio inossidabile sul comportamento nel tempo dei bulloni precaricati;
- I coefficienti di attrito tra le superfici di acciaio inossidabile a contatto.

Tuttavia, un esteso programma di attività sperimentali denominato SIROCO [29] ha mostrato i seguenti risultati:

- I bulloni in acciaio inossidabile austenitico e duplex possono essere precaricati in maniera soddisfacente ma devono essere giustamente selezionati: grado dell'acciaio, metodo di serraggio e tipo di lubrificante;
- La perdita di precarico nel tempo, dovuta al rilassamento, che si osserva nelle connessioni in acciaio inossidabile è comparabile a quella nota per l'acciaio al carbonio;
- I coefficienti di attrito misurati tra superfici di acciaio inossidabile sabbiate sono almeno equivalenti a quelli delle superfici di Classe B (0,4).

Il calcolo e le verifiche dei bulloni in acciaio inossidabili utilizzati ad attrito si basano sulle formule utilizzate per gli acciai al carbonio ad alta resistenza. Nei paragrafi successivi viene dunque riportata la normativa per gli acciai ad alta resistenza EN 1993-1-8 [19]. Secondo tale normativa sull'acciaio al carbonio, i bulloni che possono essere precaricati sono solamente i bulloni ad alta resistenza, ovvero le classi 8.8 e 10.9, che presentano una resistenza ultima e a snervamento più elevata rispetto ai bulloni di classi inferiori.

Tabella 4.2 Acciai al carbonio ad alta resistenza (riquadro rosso). Fonte: [18]

Classe bullone	A.B	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} [MPa]	10×A×B	240	320	300	400	480	640	900
f_{ub} [MPa]	100×A	400	400	500	500	600	800	1000

4.2.1. Comportamento dell'unione ad attrito

Nel caso di giunti bullonati classici il bullone lavora a taglio, invece per un bullone con il precarico il meccanismo di resistenza risulta completamente differente, ovvero lavora ad attrito. Il bullone viene infatti preventivamente serrato e preme le piastre del collegamento tra di loro. La resistenza di un'unione ad attrito è funzione dell'attrito tra le lamiere, del trattamento eseguito sulle superfici a contatto e del grado di serraggio fornito.

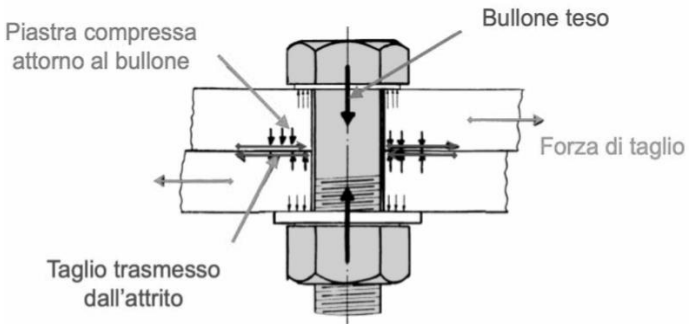

Figura 4.4 Schema di bullone precaricato. Fonte: [18]

Dunque, nel caso di connessioni ad attrito il carico viene trasferito per attrito statico tra i piatti con scorrimento nullo come mostrato in **Figura 4.4**. Perciò le curve sforzo spostamento differiscono dalle curve di un semplice bullone a taglio, infatti nel caso di quest'ultimo lo sforzo viene trasferito fin dal primo momento con degli spostamenti in fase elastica mentre nel caso del bullone precaricato lo sforzo deve essere trasferito con spostamento nullo. Questa differenza è ben visibile nella **Figura 4.5,** in cui si mettono a confronto due bulloni precaricati (curva *b* e *c*) e uno non precaricato (curva *a*). La curva *a* presenta uno scorrimento proporzionale al carico, dunque elastico, fino alla plasticizzazione del materiale e quindi scorrimenti sempre maggiori sino alla rottura per il carico ultimo. Invece le curve *b* e *c* presentano un primo tratto di curva coincidente con l'asse delle ordinate (l'azione esterna è appunto assorbita inizialmente dall'attrito senza spostamenti relativi delle lamiere) quindi un tratto pseudo-orizzontale, dato dallo scorrimento per il superamento dell'attrito, e il raggiungimento della curva *a* con l'incremento del carico, in cui il bullone va a lavorare a taglio e non più ad attrito.

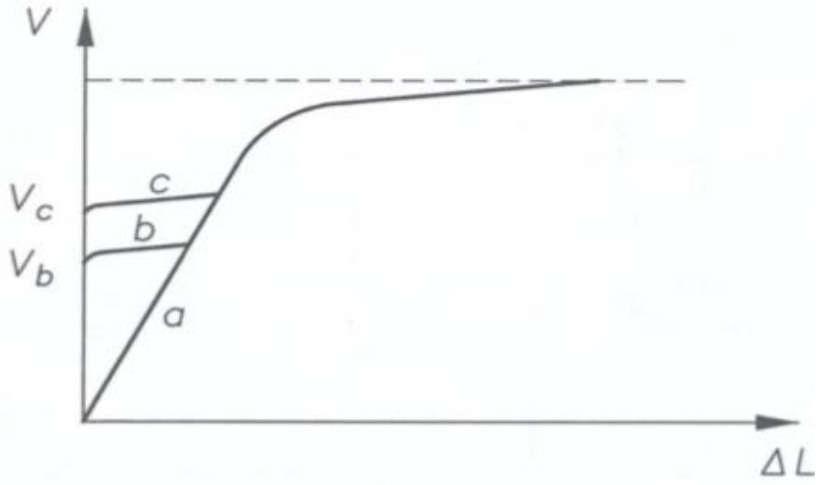

Figura 4.5 Curve sforzo deformazioni di bulloni precaricati e non a confronto. Fonte: [18]

Questo comportamento è ben visibile nelle curve forza-spostamento della **Figura 4.6** relativa a test svolti su bulloni M8 in acciaio inossidabile al laboratorio del Politecnico di Torino nel 2017 (Fonte: Prove Politecnico Torino, protocollo 26637).

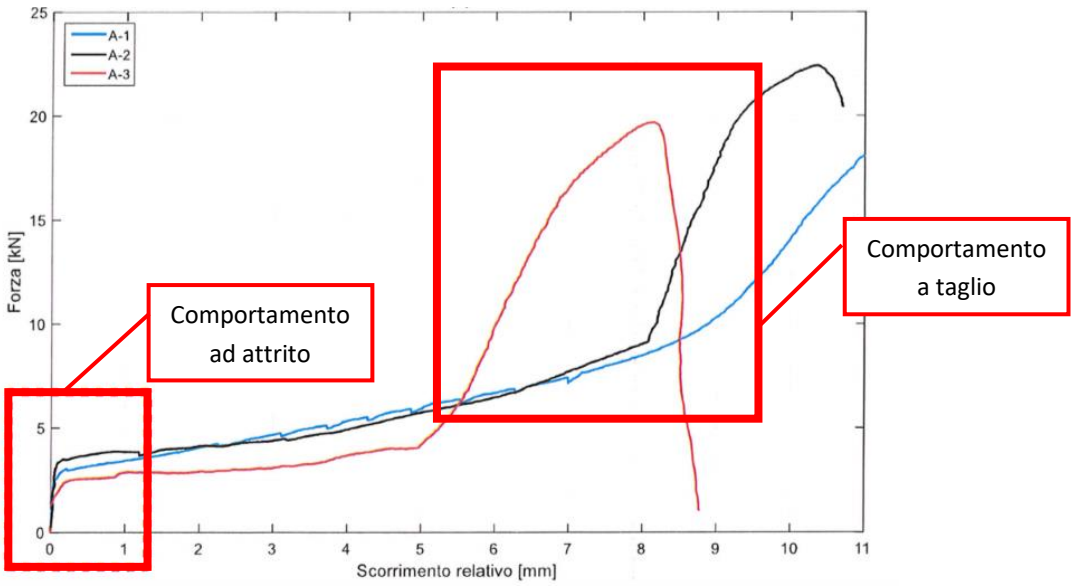

Figura 4.6 Curve sforzo deformazioni bulloni M8 precaricati. Fonte: Prove Politecnico Torino protocollo 26637

Di fondamentale importanza per le connessioni ad attrito è il precarico che deve essere inserito nel bullone tramite la coppia di serraggio. Tale precarico deve essere ben calibrato, poiché se è troppo piccolo non si riesce a sfruttare a pieno la resistenza a scorrimento, mentre se è troppo elevato si perde resistenza, cioè la resistenza del bullone a trazione diviene minore di quella che avrebbe avuto in assenza di serraggio. Ovvero, se nel precarico si supera l'allungamento ΔL_2 (**Figura 4.7**), quando la forza di trazione aumenta e supera il precarico la curva che si seguirà sarà la curva *b,* che non riesce infatti a raggiungere il carico massimo ottenibile da un bullone non precaricato (curva *1*) o precaricato in modo corretto (curva *2* + curva *a)* [18]. Nella **Figura 4.7** vengono presentate, per comprendere il fenomeno, tali curve:

- Curva *1*: legame N-ΔL bullone sottoposto a trazione (senza alcun serraggio);
- Curva *2*: legame N-ΔL applicando la coppia di serraggio (N_{max} per allungamento ΔL_2);
- Curva *a*: transizione per serraggio che comporta $\Delta L<\Delta L_2$;
- Curva *b*: transizione per serraggio che comporta $\Delta L>\Delta L_2$.

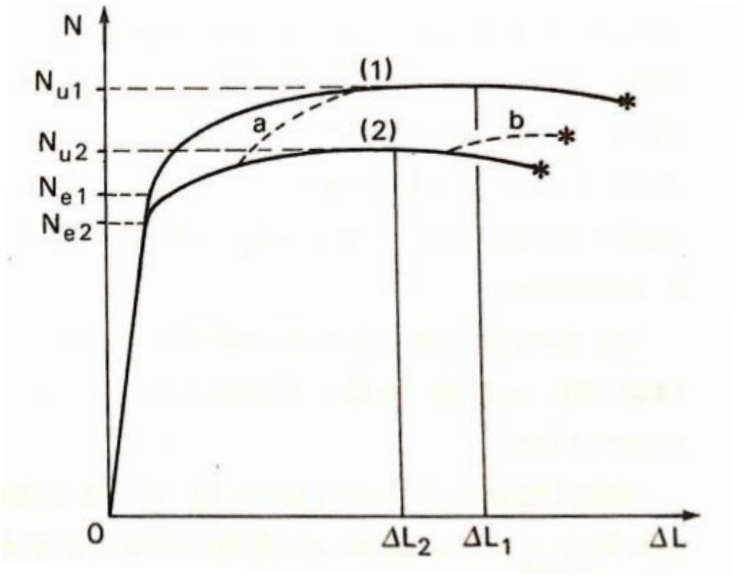

Figura 4.7 Influenza del precarico sulla resistenza ultima a trazione. Fonte: [18]

Dunque, vengono definiti specifici valori di precarico e di coppia di serraggio da applicare al bullone per poter evitare la rottura del bullone e il fenomeno appena sopra

spiegato, ma allo stesso tempo per ottenere una buona resistenza a scorrimento. Le formule, rispettivamente secondo EN 1993-1-8 [19] e UNI EN 11399-2:2015 [30], sono le seguenti:

Forza di precarico

$$F_{pC} = 0{,}7\ f_{ub}\ A_{res} \tag{4.9}$$

In cui: - f_{ub} è la resistenza ultima del bullone;
- A_{res} è l'area resistente del bullone.

Coppia di serraggio

$$M_s = k\ d\ F_{pC} \tag{4.10}$$

In cui: - d è il diametro del bullone;
- k è il coefficiente che lega il precarico alla coppia di serraggio (dato generalmente dal produttore, oppure ottenibile attraverso test di serraggio).

4.2.2. Resistenze delle unioni ad attrito categorie B, C

Le verifiche per le categorie B e C ad attrito, come riportato nella **Tabella 4.1**, sono le seguenti:

Stato limite ultimo scorrimento a taglio

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s\ n\ \mu}{\gamma_{M3}}\ F_{pC} \tag{4.11}$$

Stato limite di servizio scorrimento a taglio

$$F_{s,Rd,serv} = \frac{k_s\ n\ \mu}{\gamma_{M3,serv}}\ F_{pC} \tag{4.12}$$

Stato limite ultimo scorrimento a taglio e trazione

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s\, n\, \mu\, (F_{pC} - 0{,}8F_{t,Ed})}{\gamma_{M3}} \qquad \textbf{(4.13)}$$

Stato limite di servizio scorrimento a taglio e trazione

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s\, n\, \mu\, (F_{pC} - 0{,}8F_{t,Ed,serv})}{\gamma_{M3}} \qquad \textbf{(4.14)}$$

In cui: - F_{pC} forza di precarico applicata al bullone come riportato precedentemente;

- γ_{M3} = 1,25 coefficiente parziale di sicurezza allo SLU;
- $\gamma_{M3,serv}$ = 1,10 coefficiente parziale di sicurezza allo SLE;
- $F_{t,Ed}$ e $F_{t,Ed,serv}$ sollecitazione di progetto di trazione SLU e SLE rispettivamente;
- n numero di superfici resistenti ad attrito;
- k_s coefficiente funzione del tipo di foro. Secondo UNI EN 1993-1-8 si hanno i valori espressi nella **Tabella 4.3**.
- μ coefficiente di attrito in funzione del trattamento delle superfici. La norma sull'acciaio al carbonio al riguardo riporta i valori della **Tabella 4.4**, che però non possono essere utilizzati per l'acciaio inossidabile come specificato nella UNI EN 1090-2:2018 [31], poiché secondo normativa sono necessari test che certificano il coefficiente di attrito nel caso dell'acciaio inossidabile. Comunque, nei capitoli successivi si presenteranno valori appositi per l'acciaio inossidabile forniti dallo studio SIROCO [29].

Le classi di attrito per le superfici in acciaio al carbonio vengono così designate:

- 0,5 classe A → sabbiate meccanicamente o a graniglia, esenti da incrostazioni di ruggine e da vaiolature;
- 0,4 classe B → sabbiate meccanicamente o a graniglia e verniciate a spruzzo con prodotti a base di alluminio o zinco / sabbiate meccanicamente o a graniglia e verniciate con silicato di zinco alcalino;
- 0,3 classe C → superfici pulite mediante spazzolatura o alla fiamma, esenti da incrostazioni di ruggine;
- 0,2 classe D → superfici non trattate.

Tabella 4.3 Coeffienti in funzione del tipo di foro. Fonte: [19] Table 3.6

Description	k_s
Bolts in normal holes.	1,0
Bolts in either oversized holes or short slotted holes with the axis of the slot perpendicular to the direction of load transfer.	0,85
Bolts in long slotted holes with the axis of the slot perpendicular to the direction of load transfer.	0,7
Bolts in short slotted holes with the axis of the slot parallel to the direction of load transfer.	0,76
Bolts in long slotted holes with the axis of the slot parallel to the direction of load transfer.	0,63

Tabella 4.4 Coeffienti di attrito in funzione del trattamento delle superfici. Fonte: [19] Table 3.7

Class of friction surfaces (see 1.2.7 Reference Standard: Group 7)	Slip factor μ
A	0,5
B	0,4
C	0,3
D	0,2

Capitolo 5

5. Stato dell'arte delle unioni bullonate ad attrito in acciaio inossidabile

Le unioni bullonate ad attrito in acciaio inossidabile non sono comunemente utilizzate poiché sono stati pochi gli studi che nel passato hanno trattato tale tema e le normative stesse quindi sono vaghe e per nulla specifiche. In particolare, come già riportato nel capitolo precedente, sia gli Eurocodici EN 1993-1-4, EN 1993-1-8 sia la norma UNI EN 1090-2, sostengono che l'utilizzo di bulloni in acciaio inossidabile con precarico possa avvenire solo nel caso in cui si faccia una approfondita campagna sperimentale a supporto della progettazione e realizzazione della struttura. I motivi di tale restrizioni sono molti, a partire dalla possibilità che il rilassamento sia maggiore rispetto all'acciaio comune a causa del diverso comportamento viscoplastico del materiale, alla scelta del metodo di serraggio, al fatto di non avere specifiche geometrie di bulloni adatti al precarico, ai coefficienti di attrito da utilizzare per le superfici, e infine a causa della possibilità di incorrere in striature di danneggiamento del bullone durante il serraggio, ovvero galling, che porterebbero a resistenze minori a scorrimento. Per tutti questi motivi la normativa fa ricadere le giunzioni bullonate ad attrito in acciaio inossidabile nella sezione "special fasteners" ovvero *bulloni speciali*, per i quali è necessario svolgere una campagna di indagine prima dell'utilizzo o avere dei dati che attestino la possibilità di utilizzo dal produttore che fornisce i materiali.

Nei paragrafi seguenti si vanno perciò a presentare le norme utilizzate per l'acciaio al carbonio, con le quali si andranno a valutare i test eseguiti in laboratorio che vengono presentati nei capitoli 6, 7, 8 e con le quali anche lo studio SIROCO ha valutato i dati ottenuti dalla campagna sperimentale svolta sui bulloni in acciaio inossidabile, riportata in sunto nei successivi paragrafi.

5.1. Serraggio dei bulloni

Il serraggio dei bulloni avviene fornendo una coppia che va a creare un carico assiale all'interno del bullone, il quale risulta in tal modo in trazione e va a comprimere le piastre che collega. Per fare ciò vengono utilizzati strumenti appositi, quali per esempio chiavi dinamometriche o avvitatori specifici, in modo da controllare la coppia che viene immessa per non incorrere in sovraccarichi del bullone o, viceversa, precarichi troppo bassi. La norma prescrive di applicare il momento torcente al dado del bullone e non alla testa della vite, perciò i valori che vengono dichiarati dal produttore sono basati sul serraggio dalla parte del dado, poiché serrare dalla parte della testa potrebbe portare a minore precisione e causare problemi. Tuttavia, la norma sottolinea anche che, nel caso in cui sia certificato dal produttore o vengano svolti dei test in condizioni locali, è possibile anche applicare la coppia alla testa della vite.

In particolare, solo una piccola parte della coppia totale di serraggio va a creare il precarico all'interno del bullone poiché una grande percentuale viene persa negli attriti. Secondo [25], la coppia totale di serraggio M_A è composta da:

- M_{Gst} che è la coppia che fornisce il precarico ed è circa solo il 10% della coppia di serraggio totale;
- M_{Gr} che è la coppia assorbita a causa dell'attrito dalla filettatura (M_{Gst}+M_{Gr}= M_G, nominato T_{th} nella **Figura 5.1** e nei capitoli successivi);
- M_{Kr} che è la coppia assorbita a causa dell'attrito dalle superfici tra piatto dado e testa del bullone (nominata T_b nella **Figura 5.1** e nei capitoli successivi).

$$M_A = M_{Gst} + M_{Gr} + M_{Kr} = M_G + M_{Kr} \quad \textbf{(5.1)}$$

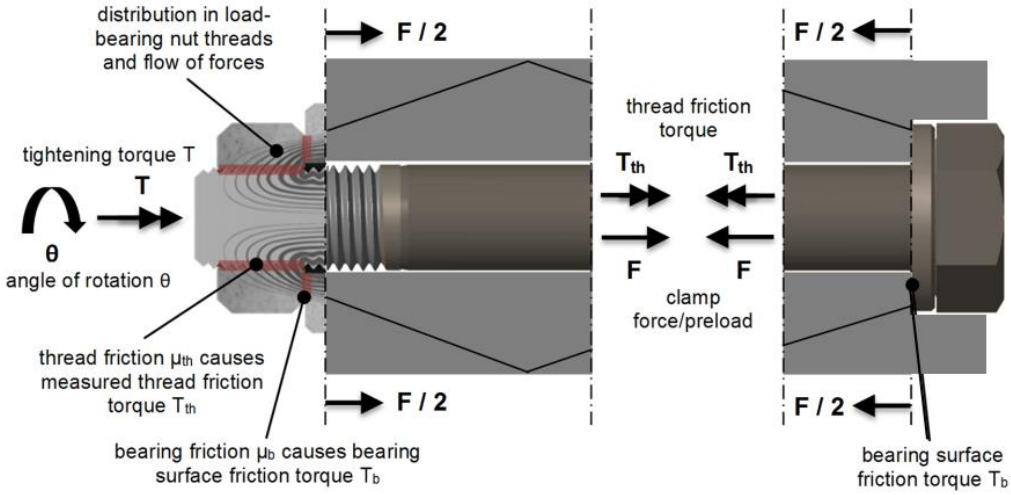

Figura 5.1 Forze, coppie e attriti in una connessione bullonata ad attrito durante il serraggio. Fonte: [25]

Inoltre, è da sottolineare che, nonostante gli sforzi all'interno del bullone vengano ipotizzati costanti al fine del calcolo in cui si utilizzano infatti le resistenze ultime o a snervamento del materiale, gli sforzi locali che si raggiungono sono anche di gran lunga superiori rispetto a quelli che si possono ottenere facendo il rapporto tra precarico e area resistente del bullone (σ_0 nella **Figura 5.2**). Vi sono dunque zone che hanno un'elevata concentrazione di stress, per esempio dove si ha il contatto tra i filetti della vite e del dado e sotto la testa del bullone. Perciò si ottengono delle zone plasticizzate anche con precarichi ben lontani dalle resistenze ultime del bullone.

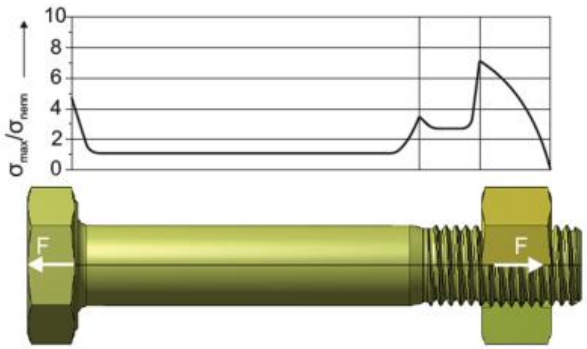

Figura 5.2 Concentrazione degli sforzi in un bullone sottoposto a precarico. Fonte: [25]

5.1.1. Metodi di serraggio

I metodi di serraggio accettati dalla UNI EN 1090-2 [31], come riportato nella **Tabella 2.1**, sono quattro e dipendono dalla tipologia del coefficiente K che viene fornito dal produttore e che verrà meglio descritto nel paragrafo 5.1.4.

Tabella 5.1 Metodi di serraggio e rispettive classi K. Fonte: [31]

Tightening method	***k*-classes**
Torque method (see 8.5.3)	K2
Combined method (see 8.5.4)	K2 or K1
HRC tightening method (see 8.5.5)	K0 with HRD nut only or K2
Direct tension indicator (DTI) method (see 8.5.6)	K2, K1 or K0

I metodi riportati in **Tabella 5.1** presentano le seguenti caratteristiche:

- **Metodo della coppia (Torque method)**

  Il metodo della coppia secondo normativa può essere utilizzato solamente per i bulloni che presentano una classe K2, ed è in genere il più utilizzato anche perché il più semplice da mettere in atto. La chiusura, che presenta due fasi, deve avvenire con l'ausilio di una chiave dinamometrica manuale o elettrica, ma nella prima fase è anche permesso di servirsi di un avvitatore a percussione. Gli step di chiusura sono i seguenti [31]:

  Tabella 5.2 Step di serraggio per il metodo della coppia.

1°fase	Serraggio al 75% della coppia M_r di tutti i bulloni
2°fase	Serraggio al 110% della coppia M_r

  L'accuratezza delle chiavi deve essere $\pm\ 4\%$ e devono essere effettuati controlli sui bulloni dopo il secondo serraggio, assicurandosi di avere una coppia di chiusura almeno di 1,05 M_r, senza incorrere in una rotazione maggiore di 15°.
  È da notare come l'applicazione di 1,10 M_r porti ad ottenere uno sforzo normale all'interno del bullone molto vicino allo snervamento poiché:

Classe 8.8 $$1{,}1 * 0{,}7 * \left(\frac{f_{yb}}{0{,}8}\right) = 0{,}96\, f_{yb} \quad \textbf{(5.2)}$$

Classe 10.9 $$1{,}1 * 0{,}7 * \left(\frac{f_{yb}}{0{,}9}\right) = 0{,}86\, f_{yb} \quad \textbf{(5.3)}$$

- **Metodo combinato (Combined method)**

  Il metodo combinato secondo normativa può essere utilizzato sia per i bulloni che presentano una classe K2 che per la K1.

Tabella 5.3 Step di serraggio per il metodo combinato.

1°fase	Serraggio al 75% della coppia M_r di tutti i bulloni
2°fase	Rotazione controllata del dado di un angolo secondo la **Tabella 5.4.**

Anche in questo caso, la chiusura viene effettuata in due step, ma nella seconda fase si va ad applicare una rotazione e non una coppia, ovvero si contrassegna il bullone e poi lo si va a ruotare in modo da misurare l'angolo a partire dal contrassegno. Gli step dunque sono riportati in **Tabella 5.3.**

Tabella 5.4 Angoli da applicare al secondo step del metodo combinato. Fonte: [31]

Total nominal thickness "t" of parts to be connected (including all packs and washers) d **= bolt diameter**	**Further rotation to be applied, during the second step of tightening**	
	Degrees	**Part turn**
$t < 2d$	60	1/6
$2d \le t < 6d$	90	1/4
$6d \le t \le 10d$	120	1/3
NOTE Where the surface under the bolt head or nut (allowing for taper washers, if used) is not perpendicular to the bolt axis, the required angle of rotation should be determined by testing		

L'accuratezza delle chiavi in questo caso può salire fino al $\pm\, 10\%$, ma devono sia essere effettuati controlli dopo la prima fase, sia assicurarsi della presenza di tutti i contrassegni utili al secondo step, e dopo questo controllare che

l'angolo applicato non sia minore di 15° o maggiore di 30° rispetto al prescritto. Tale angolo da applicare nella seconda fase dipende dal rapporto tra lo spessore delle parti connesse t (anche detta clamp length $\sum t$) e il diametro del bullone come riportato nella **Tabella 5.4**.

- **Metodo HRC**

  Il metodo HRC è un metodo più sofisticato e prevede che la chiusura avvenga con un avvitatore apposito a coppie contrapposte, portando a rottura il codolo nella sezione calibrata prevista come da **Figura 5.3**. In questo modo il serraggio viene controllato dalla sola rottura del codolo.

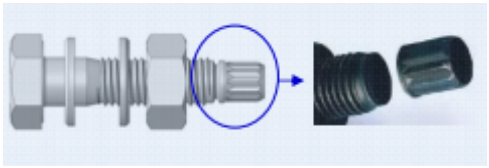

Figura 5.3 Distacco del codolo secondo metodo HRC. Fonte: [32]

- **Metodo DTI (Direct Tension Indicator)**

  Il metodo DTI può essere utilizzato per tutte le classi K ma è anche il più costoso in quanto deve avvenire misurando costantemente il carico che si raggiunge all'interno della vite [31]. Anche in questo caso avviene in due step. Nel primo si serrano tutti i bulloni fino a che si raggiunge una prima deformazione del DTI e successivamente si procede con la seconda fase seguendo norma UNI EN 14399-9.

5.1.2. Test di precarico secondo UNI EN ISO 16047

I test per l'idoneità al precarico vengono descritti sia nella norma UNI EN ISO 16047 [33] che nella norma UNI EN 14399-2 [30]. La prima è una norma valida per gli acciai al carbonio e per acciai legati mentre la seconda è specifica per gli assiemi HR e HV che sono in acciaio al carbonio. Tuttavia, la prima non descrive appositamente i limiti dei parametri per poter utilizzare un bullone a precarico come invece viene fatto nella seconda, che

risulta per questo più completa. La norma UNI EN ISO 16047 che verrà utilizzata, come anche la UNI EN 14399-2, per trattare i dati sperimentali nei capitoli successivi, descrive come ottenere i seguenti parametri:

- fattore k;
- coefficiente di attrito totale μ_{tot};
- coefficiente di attrito tra filetti μ_{th};
- coefficiente di attrito tra le superfici di appoggio μ_b;
- coppia di serraggio assorbita dalla zona filettata T_{th};
- coppia di serraggio assorbita tra le superfici di appoggio T_b;
- precarico di serraggio allo snervamento F_y;
- coppia di serraggio allo snervamento T_y;
- precarico di serraggio ultimo F_u;
- coppia di serraggio ultima T_u.

Alcuni di questi parametri vengono direttamente misurati durante il test e da essi possono essere ricavati gli altri parametri come descritto in **Tabella 5.5**.

Tabella 5.5 Caratteristiche da misurare e da ricavare in un test di precarico secondo UNI EN ISO 16047. Fonte: [33]

Tightening characteristics which may be determined	Parameters to be measured				
	Clamp force F	Tightening torque T	Thread torque T_{th}	Bearing surface friction torque T_b	Rotation angle Θ
Torque coefficient, K	O	O	—	—	—
Coefficient of total friction, μ_{tot}	O	O	—	—	—
Coefficient of friction between threads, μ_{th}	O	—	O	—	—
Coefficient of friction between bearing surfaces, μ_b	O	—	—	O	—
Yield clamp force, F_y	O	—	—	—	O
Yield tightening torque, T_y	O	O	—	—	O
Ultimate clamp force, F_u	O	—	—	—	—
Ultimate tightening torque, T_u	O	O	—	—	—

Le caratteristiche $F_y, T_y, F_u,$ e T_u possono essere ricavate direttamente dai grafici precarico – coppia mentre gli altri parametri vengono così definiti [33]:

- fattore *k*:

$$\mathrm{k} = \frac{T}{F * d} \tag{5.4}$$

In cui - F forza ≥ 75% del precarico massimo raggiunto durante la prova;
- T coppia corrispondente ad F nel grafico carico – coppia;
- d diametro della vite.

- coefficiente di attrito totale μ_{tot}:

$$\mu_{\mathrm{tot}} = \frac{\frac{T}{F} - \frac{P}{2\pi}}{0{,}578\ d_2 + 0{,}5\ D_b} \tag{5.5}$$

In cui - $\mathrm{D_b} = (\mathrm{d_w} + \mathrm{d_h})/2$;
- P passo della filettatura;
- d_2 diametro di base (ovvero medio) della zona filettata;
- d_w diametro della testa della vite della zona a contatto con la rondella;
- d_h diametro del vuoto della rondella.

- coefficiente di attrito tra filetti μ_{th}:

$$\mu_{\mathrm{th}} = \frac{\frac{T_{th}}{F} - \frac{P}{2\pi}}{0{,}577\ d_2} \tag{5.6}$$

In cui - T_{th} coppia misurata, assorbita dai filetti.

- coefficiente di attrito tra le superfici di appoggio μ_b:

$$\mu_b = \frac{T_b}{0{,}5\ D_b\ F} \tag{5.7}$$

5.1.3. Idoneità al precarico secondo UNI EN 14399-2

Un bullone in acciaio al carbonio per essere adatto al precarico deve rispettare precisi parametri descritti nella norma UNI EN 14399-2 [30]. È importante infatti che si raggiungano specifici valori di precarico e di rotazione per avere rispettivamente resistenza e duttilità dell'unione bullonata sufficienti. La norma prescrive anche come svolgere i test sul serraggio e i parametri da controllare, utili per la trattazione dei dati. È da sottolineare però che tale norma è definita solamente per i bulloni in acciaio al carbonio, e non menziona mai i bulloni in acciaio inossidabile. Tuttavia, viene riportata e decritta qui di seguito poiché è stata utilizzata per la trattazione dei dati sperimentali fatti sui bulloni in acciaio inossidabile, in modo tale da basarsi su una norma di comprovata validità per vedere se risultasse valida anche per l'acciaio inossidabile o proporre nuove formulazioni adatte all'acciaio inossidabile.

I parametri da misurare durante il serraggio, secondo UNI EN 14399-2 [30], sono:

- Il precarico nel gambo della vita;
- La rotazione relativa tra dado e vite;
- La coppia fornita;
- L'allungamento del bullone, se richiesto.

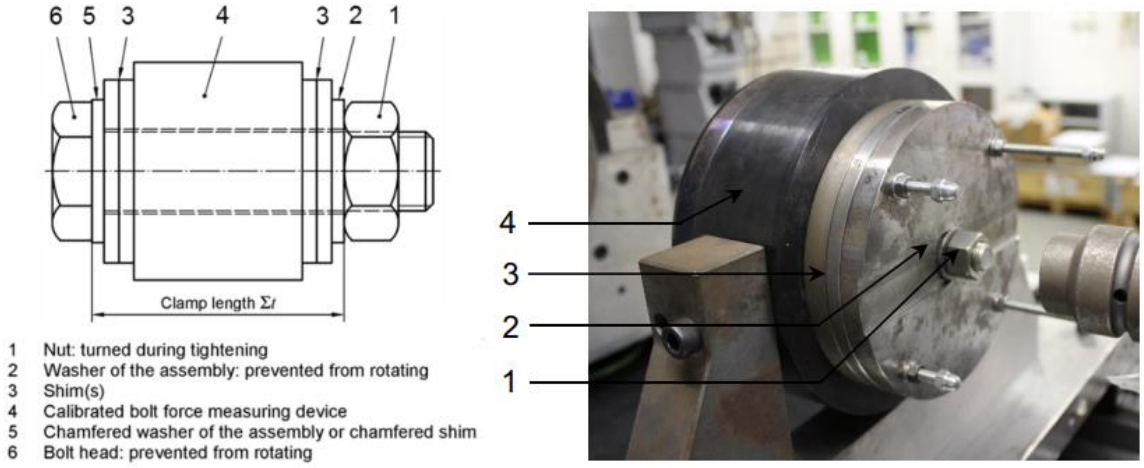

Figura 5.4 Set-up del test per l'idoneità al precarico. Fonte: [25]

Il test viene svolto con un assieme di prova completamente in acciaio, compresa la cella di carico utile alla misura del precarico, la quale viene posta attorno al gambo di quest'ultimo. In particolare, si deve avere che la lunghezza del morsetto $\sum t$ (clamp length) sia la minima consentita per lo specifico prodotto, che né il bullone né la rondella sotto il dado ruotino durante la prova, che una rondella sia posta dal lato del dado e una dal lato della testa della vite [25]. Inoltre, per poter raggiungere la lunghezza $\sum t$ prevista, possono essere utilizzati dei dischi in acciaio con spessore maggiore o uguale a 2 mm come visibile nella **Figura 5.4**.

La prova consiste nel bloccare la testa del bullone ed assoggettare il dado ad una coppia di serraggio, per farlo ruotare sulla rondella e generare una forza di precarico nel bullone con conseguente compressione delle lamiere connesse. Si va quindi a caricare assialmente l'assieme e a misurare la forza sviluppata durante la prova. La UNI EN 14399-2 definisce anche le modalità di rottura dell'assieme, prevedendo che il cedimento si abbia per rottura in corrispondenza della parte filettata e che non si verifichi in corrispondenza dell'attacco tra il gambo della vite e la testa. Per gli acciai inossidabili invece, seguendo la normativa UNI EN 15048-2 per i sistemi non adatti al precarico, è accettata anche la rottura per strappamento del gambo.

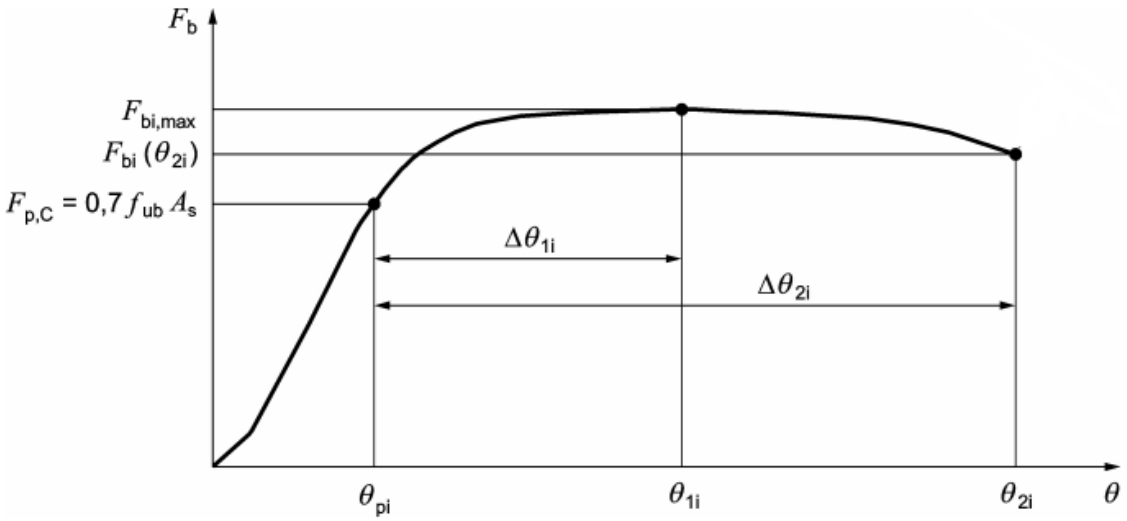

Figura 5.5 Grafico precarico-rotazione ottenibile dal test sul serraggio e relativi parametri da valutare. Fonte: [30]

Gli esiti della prova vengono valutati diagrammando il precarico in funzione dell'angolo di rotazione del dado (θ) come da **Figura 5.5**. I valori che vengono valutati nella prova sono i seguenti:

- Precarico $F_{p,C}$:

$$F_{p,C} = 0{,}7\, f_{ub}\, A_s \qquad \textbf{(5.8)}$$

In cui - f_{ub} resistenza ultima a rottura del materiale del bullone;
- A_s area resistente del gambo della vite.

$F_{p,C}$ è dunque il valore di precarico che viene utilizzato in progetto corrispondente al limite di proporzionalità, convenzionalmente assunto pari al 70% del valore nominale di rottura della vite.

- Precarico $F_{p,C}^{*}$:

$$F_{p,C}^{*} = 0{,}7\, f_{yb}\, A_s \qquad \textbf{(5.9)}$$

In cui - f_{yb} resistenza a snervamento del materiale del bullone;
$F_{p,C}^{*}$ è dunque un valore di precarico cautelativo che può essere utilizzato in progetto in sostituzione del valore dato dalla relazione **(5.8)**.

- Precarico $F_{bi,max}$:

$$F_{bi,max} \geq 0{,}9\, f_{ub}\, A_s \qquad \textbf{(5.10)}$$

- Rotazione $\Delta\theta_{1i}$:

$$\Delta\theta_{1i} \geq \Delta\theta_{1,min} = 90°/120°/150° \qquad \textbf{(5.11)}$$

$\Delta\theta_{1i}$ è l'angolo compreso tra il valore di precarico $F_{p,C}$ e il valore massimo di precarico raggiunto $F_{bi,max}$. Il valore minimo dell'angolo dipende dalla lunghezza $\sum$t (clamp length), ovvero se lo spessore $\sum$t risulta minore di due volte il diametro

del bullone, il valore minimo prescritto dell'angolo risulta pari a 90°, per spessori compresi tra 2*d* e 6*d*, pari a 120° e per spessori fino a 10*d* pari a 150°.

- Rotazione $\Delta\theta_{2i}$:

$$\Delta\theta_{2i} \geq \Delta\theta_{2,min} = 180°/210°/240°/270° \quad \textbf{(5.12)}$$

$\Delta\theta_{1i}$ è l'angolo compreso tra il valore di precarico $F_{p,C}$ e il valore a rottura. Il valore minimo dell'angolo dipende dalla lunghezza $\sum$t, ovvero se lo spessore $\sum$t risulta minore di due volte il diametro del bullone, il valore minimo prescritto di deformazione plastica è pari a 180° per i sistemi HV (UNI EN 14399-4) e 210° per i sistemi HR (UNI EN 14399-3 [34]), per spessori compresi tra 2*d* e 6*d*, pari a 210° per i sistemi HV e pari a 240° per i sistemi HR; infine, per spessori fino a 10*d* risulta pari a 240° per i sistemi HV e 270° per i sistemi HR [35].

- fattore k:

$$\mathrm{k} = \frac{T_i}{F_{p,C} * d} \quad \textbf{(5.13)}$$

In cui - T_i coppia corrispondente ad $F_{p,C}$ nel grafico carico – coppia;

Come si può vedere oltre alla modalità di rottura che deve essere quella prescritta da norma, i parametri da controllare sono tre [27]: il precarico massimo $F_{bi,max}$ che deve rispettare la relazione **(5.10)**, l'angolo $\Delta\theta_{1i}$ secondo la relazione **(5.11)** e l'angolo $\Delta\theta_{2i}$ secondo la relazione **(5.12)**. Ciò viene richiesto al fine di assicurare che a seguito dell'applicazione di una determinata coppia di serraggio si ottenga la corretta chiusura della giunzione bullonata, con una elevata attendibilità di applicazione del precarico voluto, e la contestuale conservazione di un adeguato margine di sicurezza rispetto allo sforzo di trazione applicato nella vite che altrimenti potrebbe comportare la possibilità di deformazione plastica della stessa. Non vi sono invece limitazioni sul k anche se, come

descritto nel prossimo paragrafo, vi sono differenti intervalli secondo i quali i bulloni vengono classificati.

5.1.4. Fattore k

La conversione della coppia applicata con la chiave dinamometrica in sforzo di trazione indotto nella vite dipende dal cosiddetto fattore *k*, regolato dai vari attriti che si sviluppano tra le componenti (principalmente attrito sulla filettatura ed attrito all'appoggio del dado), oltre che dalle deformazioni elastiche che si sviluppano all'interno dell'assieme. Tali attriti dipendono da una serie di fattori specifici che non sono tutti di semplici controllo, quali la rugosità delle superfici a contatto, le tolleranze di accoppiamento, gli eventuali trattamenti termici e superficiali applicati, la distribuzione delle pressioni di contatto sotto dado, ma anche le velocità del serraggio e il recupero delle deformazioni dovute al rilassamento [35]. Dunque, il fattore *k* rappresenta bene l'attrito presente sulle filettature e sulle superfici, infatti maggiore è l'attrito e maggiore sarà il valore *k*. Tuttavia, non è soltanto un coefficiente di attrito, ma un fattore globale perché dipende anche dalla geometria della connessione bullonata e dalla sua elasticità.

Tabella 5.6 Suddivisione dell'energia introdotta applicando la coppia in attriti e energia elastica utile. Fonte: [32]

	$k * F_p * d$		
Coppia $T_i =$	45 – 55% Lavoro di attrito per la rotazione del dado sulla rondella	35 – 45% Lavoro di attrito per il contatto tra filetti dado/vite	circa 10 % Energia elastica allungamento vite/dado

Come si può vedere in **Tabella 5.6**, in termini di energia il fattore k è composto da una percentuale pari circa al 45-55% legata all'attrito tra superficie del dado e rondella dalla parte in cui si applica il serraggio, un 35-45% legata all'attrito tra i filetti e infine circa un 10% alle deformazioni elastiche che avvengono durante l'applicazione del precarico

all'unione. Questi sono valori standard per bulloni in acciaio al carbonio comune ma dipende molto dalla lubrificazione applicata. Per bulloni non specificamente adatti al precarico e dunque non lubrificati, le percentuali che compongono il fattore *k* possono risultare un po' diverse, con un incremento dell'attrito sia delle superfici che soprattutto dei filetti. È da rimarcare comunque come solo una piccola percentuale della coppia applicata venga realmente trasformata in precarico, mentre la rimanente venga persa negli attriti.

La valutazione del fattore *k* avviene tramite la prova di idoneità al precarico descritta nel paragrafo **5.1.3** e si basa sulla formula **(5.13)** che fornisce la valutazione del k_i*-esimo* della singola prova. Con almeno cinque prove (numero prove *n=5*) si va poi a determinare il fattore $\mathrm{k_m}$ medio, lo scarto quadratico medio s_k ed il suo coefficiente di variazione o indice di dispersione V_k, in accordo con le seguenti relazioni:

$$\mathrm{k_m} = \frac{\sum k_i}{n} \qquad \textbf{(5.14)}$$

$$s_k = \sqrt{\frac{\sum (k_i - k_m)^2}{n-1}} \qquad \textbf{(5.15)}$$

$$V_k = \frac{s_k}{k_m} \qquad \textbf{(5.16)}$$

Tale valore viene perciò dichiarato dal produttore che stabilisce il valore del fattore *k* dell'assieme in ottemperanza ad una delle tre classi k di serraggio definite in base ai criteri della UNI EN 14399-1 [26]. La norma definisce, infatti, tre classi funzionali di serraggio (indicate con K0, K1 e K2). Il produttore deve certificare il fattore *k* dell'assieme in base ad una tra tre differenti modalità, scelta in funzione della classe funzionale dell'assieme. In particolare, per la classe K0 non sono prescritte limitazioni per i valori di *k* determinati dalle prove effettuate ma è possibile utilizzarli solo quando si usano rondelle a controllo di carico in cui il raggiungimento della $F_{p,C}$ si nota dallo schiacciamento della rondella o quando si usano bulloni HRC. Per raggiungere una classificazione K1, invece, è necessario che i singoli valori k_i determinati per almeno cinque assemblaggi siano tutti

compresi nell'intervallo $0{,}10 \leq k_i \leq 0{,}16$. Per la classe K2, infine, si deve avere che il valore medio k_m di almeno cinque bulloni testati ricada all'interno dell'intervallo $0{,}10 \leq k_m \leq 0{,}23$ ed inoltre va controllato che il fattore di dispersione sia $V_k \leq 0{,}06$ [32] come si può vedere in **Tabella 5.7**.

Tabella 5.7 Classificazione del fattore k secondo UNI EN 14399-1. Fonte: [26]

Table 1 — *k*-class and *k*-factor

k-class	*k*-factor
K0	—
K1	$0{,}10 \leq k_i \leq 0{,}16$
K2	$0{,}10 \leq k_m \leq 0{,}23$ $\quad V_k \leq 0{,}06$

Per un montaggio a secco o con bassa lubrificazione generalmente il fattore *k* risulta pari o superiore a 0,20, mentre se vengono utilizzate viti ingrassate o lubrificate il *k* si abbassa a valori intorno a 0,10 – 0,15. La bulloneria a serraggio controllato, pertanto, risulta molto sensibile alle differenze di fabbricazione e lubrificazione. Per tale ragione è importante che l'assieme sia fornito in confezioni sigillate da un unico produttore e che lo stato di lubrificazione non venga per nulla modificato in cantiere.

Confrontando le due classi risulta evidente l'approssimazione permessa e prevista dalla norma per la classe K1 e all'opposto la precisione richiesta per la classe K2. Ciò fa sì che ci possa essere una variazione del 50% nel valore del k e sia difficile definire una precisa coppia di serraggio ed è per questo che con la classe K1 non si può utilizzare il metodo della coppia per il serraggio. Per rimediare a ciò, i fornitori cercano di puntare al valore medio di 0,13 limitando il campo di variabilità del fattore k per poter superare il formalismo della norma e poter sfruttare ugualmente il metodo della coppia per il serraggio. Ma ancor di più, tendono a fornire lotti di bulloni in classe K2 che comportano maggior precisione nella fabbricazione, ma l'affidabilità del *k* fornito permette di utilizzare il metodo della coppia per il serraggio velocizzando il lavoro in cantiere. Per raggiungere tale affidabilità è importante utilizzare una lubrificazione particolare, tipo a base di polimeri ben aderente e resistente, e non a base di oli grassi o paste che porterebbero a valori più dispersi [32].

5.1.5. Studi precedenti: serraggio di unioni in acciaio inossidabile

Importanti studi sono stati svolti da parte di "SIROCO", terminati con la pubblicazione nel 2019 del report finale "Execution and reliability of slip resistant connections for steel structures using CS and SS". Tale documento contiene i risultati di molti test effettuati sia sulle giunzioni in acciaio al carbonio sia su quelle in acciaio inossidabile. Riguardo a queste, sono stati indagati: il comportamento al serraggio che viene descritto in questo paragrafo, il rilassamento, il galling e l'attrito fornito da diverse tipologie di superfici in acciaio inossidabile trattate [29].

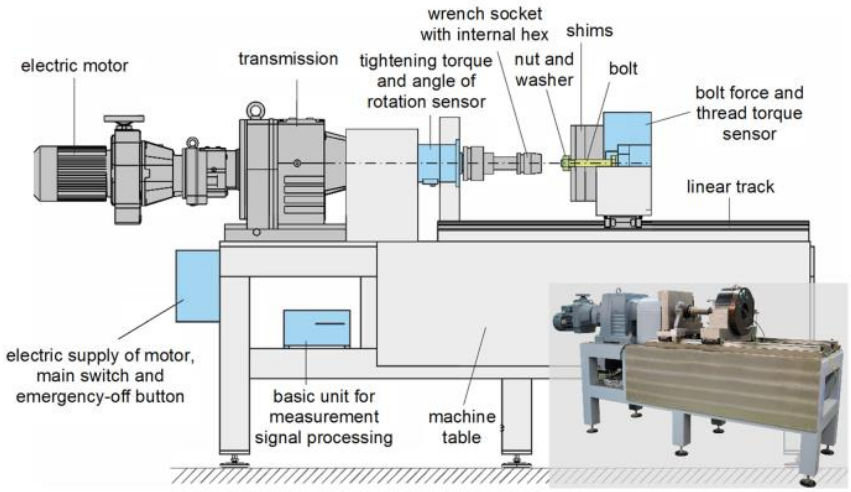

Figure 15 Tightening torque testing machine of Institute for Metal and Lightweight Structures of University of Duisburg-Essen

Figura 5.6 Macchina dell'Institute for Metal and Lightweight Structures per il serraggio dei bulloni. Fonte: [25]

Per quanto riguarda il comportamento delle giunzioni in acciaio inossidabile al serraggio in tale studio sono stati utilizzati particolari bulloni ad alta resistenza, i Bumax 88 e i Bumax 109 che hanno resistenza al pari dei bulloni 8.8 e 10.9 in acciaio al carbonio. Dunque, le prove non sono state basate su normali bulloni da normativa, quali la classe 50, 70, e 80, tuttavia il Bumax 88 ha una resistenza ultima al pari della classe 80 anche se la resistenza a snervamento è un po' superiore, 640 MPa contro i 600 MPa della classe 80. È da sottolineare che tali bulloni però non sono specifici per il precarico e non seguono le normative UNI EN 14399-1 e 2 che definiscono le dimensioni degli HR e HV, ma hanno

dimensioni secondo le UNI EN 4014 e 4017. Sono stati utilizzati dei bulloni M12, M16, M20 e M24 con diverse lunghezze e in quattro tipologie di materiale: austenitico, duplex (Bumax DX), lean duplex (Bumax LDX) e super duplex (Bumax SDX). Inoltre, i bulloni utilizzati nei test sono stati lubrificati con differenti prodotti, quali il Gleitmo®1952V, lo spray Molykote, la pasta Molykote e anche lubrificanti a base di ceramica, quest'ultimi non riportati in tale documento. I bulloni testati vengono riassunti in **Tabella 5.8**.

Per l'applicazione della coppia è stata sfruttata una macchina motorizzata come rappresentata in **Figura 5.6**, in grado di dare una velocità di rotazione costante senza avere mai dei salti e non una chiave dinamometrica manuale. Il serraggio è stato eseguito seguendo la UNI EN 14399-2, ovvero la normativa vigente per i bulloni in acciaio al carbonio ad alta resistenza adatti al precarico, mentre le valutazioni sul serraggio sono state fatte con la UNI EN 14399-3 seguendo le direttive per i bulloni HR, poiché i bulloni Bumax di dimensioni secondo UNI EN 4014 e 4017 sono più simili agli HR, e non agli HV.

Tabella 5.8 Bulloni utilizzati da SIROCO per i test di serraggio. Fonte: [25]

Steel grade	Grade	Type of stainless steel	Lubrication	Bolt dimension			
				M12	M16	M20	M24
STEP 1: Tightening tests with standard lubrication							
Bumax 88	bolts: EN 1.4432 nuts: EN 1.4436	Austenitic	gleitmo 1952V[1)]	4014[4)]	4017[5)]	4017	4017
Bumax 109		Austenitic	gleitmo 1952V	4014	4017	4014	-
Bumax LDX	EN 1.4162	Lean Duplex	gleitmo 1952V	-	4017	4017	-
Bumax DX	EN 1.4462	Duplex	gleitmo 1952V	-	4017	4017	-
Bumax SDX	EN 1.4410	Super Duplex	gleitmo 1952V	4017	-	-	-
STEP 2: Tightening tests with alternative lubrication							
Bumax 88	bolts: EN 1.4432 nuts: EN 1.4436	Austenitic	Molykote 1000 Spray[2)]	-	4017	4017	-
			Molykote 1000 Paste[2)]	-	-	4017	-
			Molykote P-74 Paste[2)]	-	-	4017	-
			Molykote D-321R Spray[2)]	-	-	4017	-
Bumax 109		Austenitic	Molykote 1000 Spray	-	4017	4014	-
			Molykote P-74 Paste	-	-	4014	-
			Molykote D-321R Spray	-	4017	4014	-
Bumax LDX	EN 1.4162	Lean Duplex	Molykote 1000 Spray	-	4017	4017	-
Bumax DX	EN 1.4462	Duplex	Molykote 1000 Spray	-	4017	4017	-
Bumax SDX	EN 1.4410	Super Duplex	Molykote 1000 Spray	4017	-	-	-

STEP 1: Serraggio di bulloni con lubrificante Gleitmo®1952V

Il serraggio dei bulloni con il lubrificante tradizionale Gleitmo®1952V ha fornito dei valori poco soddisfacenti, che verranno meglio presentati quando si confronteranno con i risultati dei test sperimentali trattati in questo documento, ma che possono essere così riassunti:

- Il 100% dei bulloni testati ha raggiunto sia il precario $F_{p,C}^{*}$ che il precarico $F_{p,C}$, come definiti da UNI EN 14399-2;
- Il precarico $F_{bi,max}$ per circa il 60% dei provini non viene raggiunto;
- La duttilità dell'unione, espressa dai parametri $\Delta\theta_{1i}$ $\Delta\theta_{2i}$, è ottenuta per solo circa il 50% dei test, ovvero il plateau plastico nel diagramma precarico-rotazione è poco pronunciato;
- Il fattore k può rientrare nella classificazione K1 per circa il 60% dei provini testati, ma mai in classe K2 a causa di valori poco attendibili e troppo dispersi, che non fanno rispettare il vincolo sul coefficiente di variazione V_k.

Dunque, sebbene il lubrificante Gleitmo®1952V sia utilizzato come lubrificante speciale per l'acciaio inossidabile, i risultati del test hanno fornito intervalli elevati sia nel fattore k che nei coefficienti di attrito μ_{tot}, μ_{th} e μ_b. Quindi, una costante di attrito non è stata raggiunta nelle prove di serraggio della bulloneria in acciaio inossidabile. Inoltre, l'attrito tende a variare anche molto se il precarico cambia e questo non permette di modificare il precarico a piacimento.

Lo studio SIROCO ha proposto anche un confronto dei test sull'acciaio inossidabile con quelli svolti sull'acciaio al carbonio. Dall'inizio della prova di serraggio fino ai livelli di precarichi $F_{p,C}^{*}$ e $F_{p,C}$ i due gruppi di bulloneria mostrano un quasi simile e approssimativo comportamento lineare, con una dispersione delle curve trascurabile, differenziato solo dalla pendenza della linea. Ma una grande differenza si nota nei carichi massimi raggiunti e nel plateau plastico, come visibile nella **Figura 5.7**. Inoltre, il range di coppia da applicare per raggiungere $F_{p,C}$ nel caso dell'acciaio al carbonio è molto ristretto mentre risulta piuttosto ampio per i bulloni in acciaio inossidabile, rendendo così complesso fornire valori precisi di coppia da applicare per il serraggio.

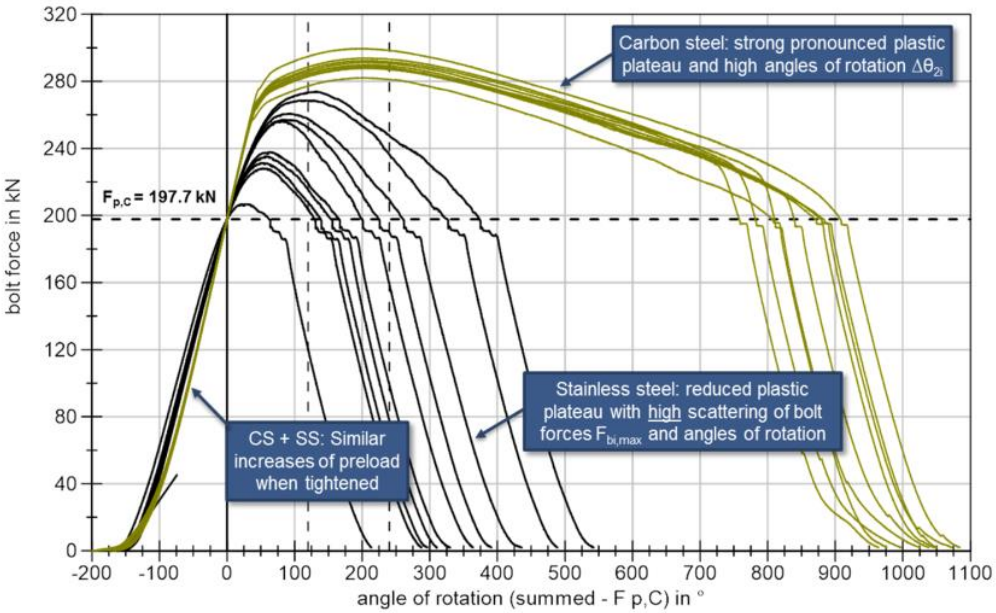

Figura 5.7 Confronto di grafici precarico-angolo di bulloni Bumax con GleitmoV1952 M24x100 in acciaio inossidabile e bulloni HR M24x100 in acciaio al carbonio. Fonte: [25]

STEP 2: Serraggio di bulloni con lubrificanti Molykote

Il serraggio dei bulloni con i lubrificanti innovativi Molykote ha fornito invece dei valori più soddisfacenti, e considerando i più approfonditi test sui due migliori lubrificanti della Molykote, ovvero i Molykote 1000 e Molykote D-321R spray, i risultati ottenuti da SIROCO [29] possono essere in breve riassunti:

- Il 100% dei bulloni testati ha raggiunto sia il precarico $F_{p,C}^{*}$ che il precarico $F_{p,C}$ come definiti da UNI EN 14399-2;
- Il precarico $F_{bi,max}$ solo per circa il 30% dei provini non viene raggiunto;
- La duttilità dell'unione, espressa dal parametro $\Delta\theta_{1i}$ $\Delta\theta_{2i}$, è ottenuta in più del 90% dei test;
- Il fattore k rientra nella classificazione K1 quasi per tutti i provini e talvolta viene anche raggiunta la classe K2.

Il miglioramento che si ottiene si può vedere a titolo di esempio nelle **Figura 5.8 e 5.9**, in cui vengono rappresentate curve precarico-rotazione di bulloni M16 e M20.

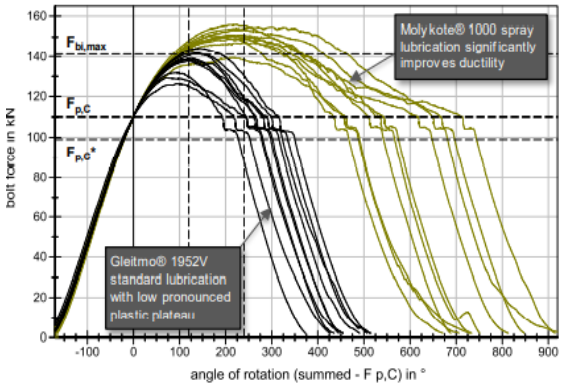

Figura 5.8 Confronti di test di serraggio con differenti lubrificanti applicati su Bumax LDX M16. Fonte: [25]

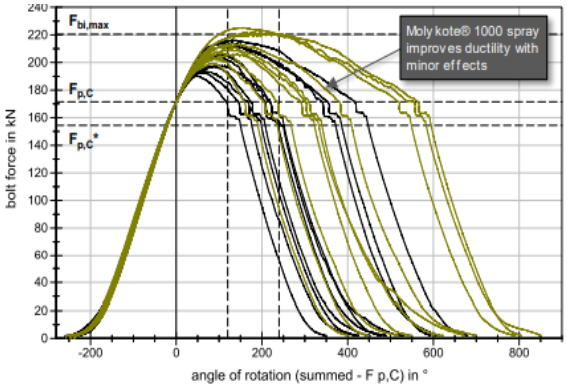

Figura 5.9 Confronti di test di serraggio con differenti lubrificanti applicati su Bumax DX M20. Fonte: [25]

Perciò SIROCO conclude che utilizzare il precarico nei bulloni di acciaio inossidabile è possibile, ma si devono scegliere giusti lubrificanti per poter applicare la normativa degli acciai al carbonio, rispettando i parametri presenti in essa. Inoltre, consiglia una procedura per valutare la possibilità di utilizzare i bulloni in acciaio inossidabile anche con precarico. Tale procedura, nominata BTQP "Bolt Tightening Qualification Procedure", suggerisce di seguire la norma UNI EN 14399-2 e 3 per la valutazione sul serraggio e successivamente procedere con dei test per valutare il metodo di serraggio e i parametri corretti di serraggio, eventualmente prevedendo migliori lubrificanti come descritto in **Figura 5.10**.

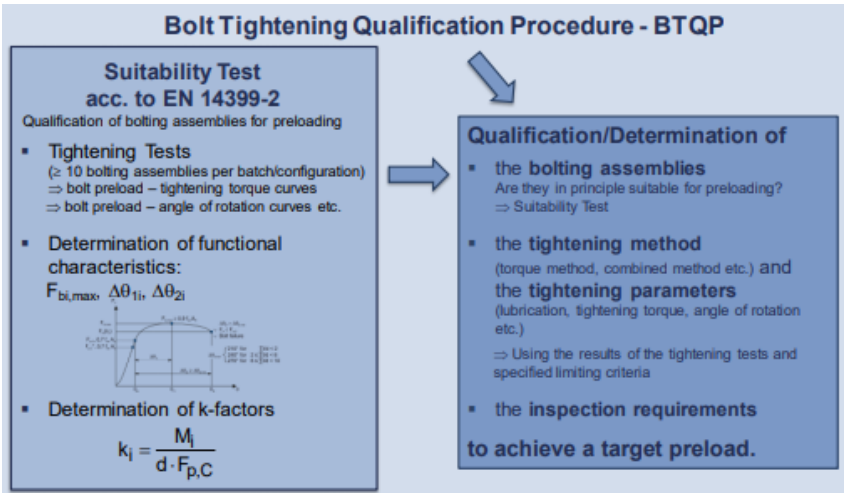

Figura 5.10 "Bolt Tightening Qualification Procedure" proposta da SIROCO. Fonte: [29]

5.2. Attrito dell'unione bullonata con precarico

Le normative esistenti non specificano i valori del coefficiente di attrito per le piastre in acciaio inossidabile. I valori specificati infatti sono esclusivamente per l'acciaio al carbonio, e non trattano in alcun modo i possibili trattamenti superficiali dell'acciaio inossidabile per incrementare l'attrito delle unioni bullonate con precarico. Sull'acciaio inossidabile si riteneva che il rilassamento e il creep fossero un grande problema per le unioni ad attrito in quanto, se il precarico nel tempo diminuisse, il valore del coefficiente di attrito conseguentemente si ridurrebbe senza poter conferire affidabilità alla giunzione. Tale comportamento è però stato smentito, osservando valori di attrito che diminuiscono nel tempo circa al pari dell'acciaio al carbonio [36].

5.2.1. Slip factor μ

L'attrito, che viene valutato con il cosiddetto "slip factor μ" o coefficiente d'attrito, è dato da una combinazione di due fattori [37]:

- È in funzione delle asperità delle superfici in contatto e loro durezza superficiale;
- Dipende dal meccanismo di adesione tra le due superfici, ovvero la formazione di saldature a freddo ("cold welding") che fan sì che in alcuni punti della superficie il materiale tenda a saldarsi insieme. Questo può avvenire sia durante il serraggio a causa dell'applicazione del precarico, sia durante il test di scorrimento per il carico di taglio imposto.

Questa teoria viene detta "Teoria dell'adesione" [38], ed è la teoria più evoluta per spiegare il fenomeno di attrito tra due superfici metalliche. La precedente teoria, "Teoria meccanica", sosteneva infatti che l'attrito dipendesse solamente dalla rugosità superficiale del materiale. Invece, con la teoria dell'adesione entra in gioco anche la durezza, ovvero l'aratura data dalle asperità presenti sulle superfici dipende non solo dalla rugosità ma anche dalla resistenza allo snervamento del materiale. Inoltre, l'effetto di adesione tra le superfici è fondamentale e spiega come superfici trattate in modi diversi possano avere coefficienti di attrito molto più elevati. Quando infatti si serra il bullone o quando esso va

a lavorare a taglio, le asperità superficiali cedono e si deformano provocando un improvviso aumento di temperatura e si crea una saldatura a freddo.

Un esempio di tali saldature a freddo viene proposto nella **Figura 5.11**, in cui le frecce rosse vanno ad indicare delle protuberanze causate da saldature a freddo che si sono create sulla superficie. In particolare, il materiale risulta essere un acciaio inossidabile che nel caso 1D non è stato trattato, mentre negli altri due test ha subito un trattamento superficiale, nello specifico "Shot Blasted SB" e "Grit Blasted GB". Questi trattamenti incrementano la possibilità di avere delle saldature a freddo con aumento dell'adesione tra le superfici, infatti i valori di attrito sono maggiori per le due superfici trattate. Il trattamento che più innalza lo slip factor è il grit blasted poiché in questo caso la superficie viene colpita con delle particelle Grittal, ovvero particelle di dimensioni tra i 0,2 e 0,4 millimetri in acciaio inossidabile con spigoli taglienti, mentre per lo shot blasted si utilizzano delle particelle Crhonital sferiche di maggiori dimensioni [39]. Nel caso della superficie non trattata, invece, le saldature a freddo non compaiono o sono rare, mentre sono molto più frequenti delle zone lisce di contatto come indicato dalle frecce nere e blu in **Figura 5.11**, che però non conferiscono capacità di resistenza allo scorrimento.

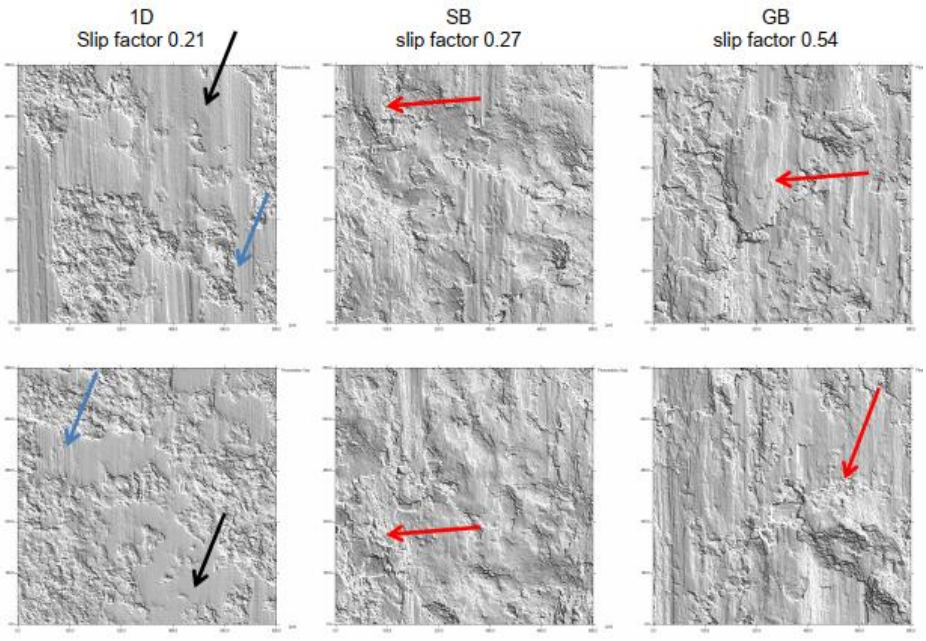

Figura 5.11 Superfici in acciaio inossidabile al microscopio dopo la prova a scorrimento. Fonte: [40]

Dunque, la quantità di punti di contatto isolati dove avviene lo scivolamento diminuisce, mentre le saldature a freddo aumentano seguendo tale ordine: superfici come laminate (1D) a shot blasted (SB) a grit blasted (GB). Il fattore di attrito aumenta con la stessa tendenza ed è dovuto maggiormente alla adesione e non alla rugosità che risulta invece simile per tutti e tre i provini della **Figura 5.11.**

5.2.2. Modalità di test secondo normativa

Per determinare il coefficiente di attrito di una superficie la normativa prevede una precisa procedura di test e di valutazione dei risultati. Questo perché è fondamentale non solo determinare l'attrito fornito dal materiale ma anche la capacità di rimanere inalterato nel tempo, ovvero che il rilassamento non porti a una decrescita pronunciata dell'attrito presente. Perciò vengono svolti sia dei test statici di breve durata sia dei test di creep di durata maggiore e, se non è sufficiente, anche dei test di lunga durata, detti "extended creep test". Questi test vengono descritti in modo specifico nell'Annex G della UNI EN 1090-2:2018 [31], fissando precise regole sia sulle dimensioni dei provini, sia sul posizionamento della strumentazione di misura, sia sulla valutazione dei risultati.

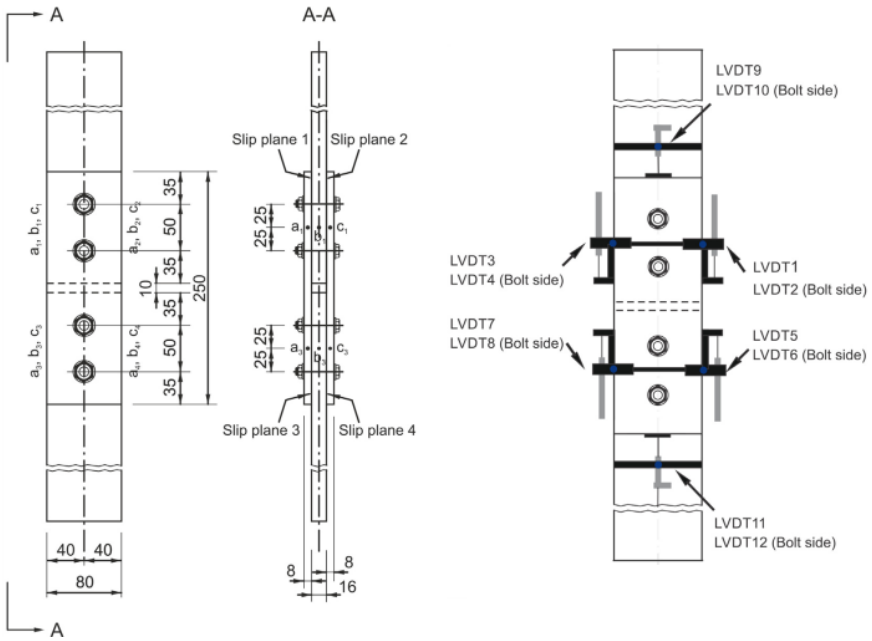

Figura 5.12 Provino standard con bulloni M16 con LVDT per la prova di scorrimento secondo UNI EN 1090-2. Fonte: [41]

I bulloni che possono essere utilizzati sono bulloni M16 o M20 e devono essere precaricati al valore di $F_{p,C}$. È importante prevedere un metodo per misurare in tempo reale il precarico all'interno del bullone e ciò generalmente viene fatto attraverso un calibro impiantato all'interno del gambo del bullone o una cella di carico posta attorno al gambo della vite. Tali bulloni vanno a collegare insieme due lamiere con il contributo di due piatti di dimensioni secondo la **Figura 5.12**. I trasduttori di spostamento LVDT devono essere posizionati come in **Figura 5.12**, ed è fondamentale che misurino lo spostamento al centro di ogni coppia di bullone e non al centro del collegamento.

La procura di test consta di tre step, come visibile anche nello schema riassuntivo della **Figura 5.13**:

- *Primo step*: vengono svolti quattro test statici della durata di 10 - 15 minuti e lo scorrimento viene misurato come spostamento relativo tra punti della lamiera interna (b) e delle due piastre di copertura esterne (a e c). Gli otto trasduttori di spostamento previsti sono utili ad ottenere due valori di scorrimento, poiché lo scivolamento può avvenire sulle superfici di scivolamento 1 e 2 o 3 e 4 oppure in diagonale 1 e 4 o 2 e 3. Per ogni test si ottengono perciò due grafici forza-spostamento dai quali è possibile ricavare il coefficiente di attrito. In particolare, la forza di scorrimento di cui tenere conto risulta essere la forza a 0,15 mm di spostamento, oppure a spostamento minore se si ha un picco nel grafico forza-scorrimento precedente.
- *Secondo step*: viene effettuata una prova di creep della durata di 3 ore. È una prova di scorrimento con un livello di carico costante di 0,9 F_{sm} (90% del carico di slittamento medio F_{sm} delle prime quattro prove statiche) e può ritenersi superata se la differenza tra lo scorrimento a 5 minuti e 3 ore non supera i 0,002 mm.
- *Terzo step*: se la prova di creep precedente non viene superata devono essere svolte tre prove di lunga durata (anche più di un anno di durata) con un livello di carico costante, minore del precedente e in modo da far sì che lo scorrimento estrapolato a 50 anni sia inferiore di 0,3 mm. In questo caso il coefficiente di attrito da attribuire al materiale sarà quello ottenuto da tali prove.

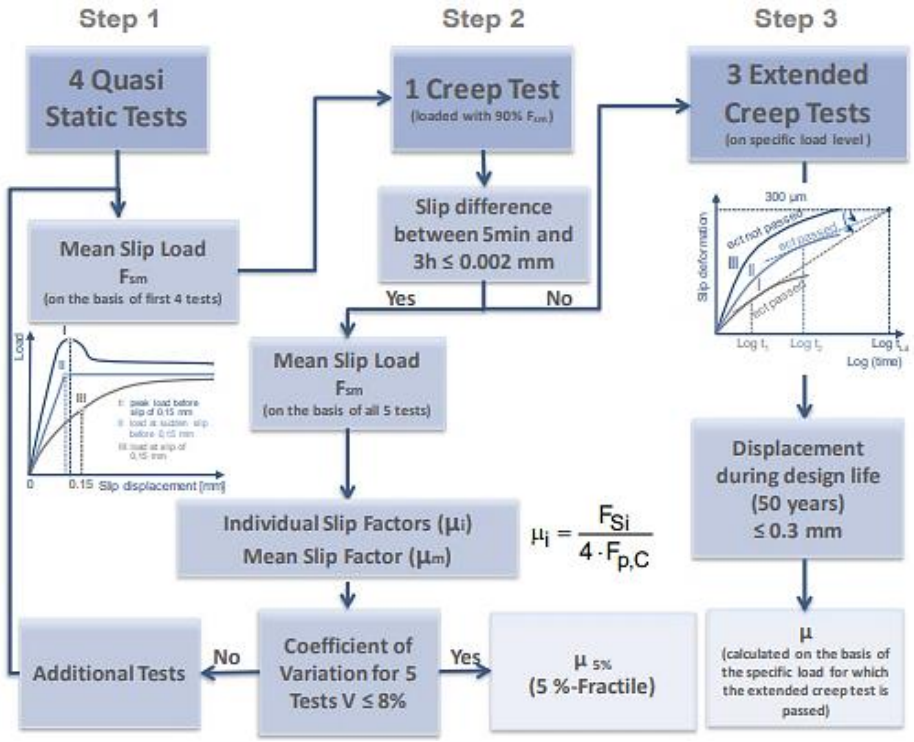

Figura 5.13 Procedura di test per la determinazione dello slip factor secondo UNI EN 1090-2. Fonte: [29]

I valori di scorrimento dal test secondo l'Annex G devono essere ottenuti con le seguenti relazioni [31]:

- Valori singoli dello slip factor μ_i:

$$\mu_i = \frac{F_{Si}}{4\ F_{p,C}} \qquad \textbf{(5.17)}$$

In cui - F_{Si} è il valore della forza a scorrimento (a 0,15 mm o al picco del grafico forza-scorrimento se prima di 0,15 mm);
- $F_{p,C}$ precarico inserito nei bulloni.

In totale si hanno 10 valori di μ_i, considerando due valori per ogni prova delle quattro del primo step e del test di creep.

- Forza media di scorrimento F_{Sm}:

$$F_{Sm} = \frac{\sum F_{Si}}{n} \quad \textbf{(5.18)}$$

In cui - n numero dei test moltiplicato per due;

- Slip factor medio μ_m:

$$\mu_m = \frac{\sum \mu_i}{n} \quad \textbf{(5.19)}$$

- Deviazione standard dello slip factor s_μ:

$$s_\mu = \sqrt{\frac{\sum (\mu_i - \mu_m)^2}{n-1}} \quad \textbf{(5.20)}$$

- Coefficiente di variazione dello slip factor s_μ:

$$V_\mu = \frac{s_\mu}{s_m} \quad \textbf{(5.21)}$$

Nel caso in cui il coefficiente di variazione sia minore dell'8% si procede a calcolare il frattile $\mu_{5\%}$. Nel caso in cui invece debbano essere fatte le prove di lunga durata il frattile 5% dovrà essere ricavato da queste prove applicando le stesse formule sopra riportate.

5.2.3. Studi precedenti: slip factor per superfici in acciaio inossidabile

Importanti studi sono stati condotti da SIROCO [25] in cui sono stati utilizzati diversi trattamenti delle superfici in acciaio inossidabile e bulloni Bumax 88 e Bumax 109 in acciaio inossidabile. Sono stati condotti test statici, di creep e di lunga durata, anche quando non necessario poiché la prova di creep rispettava i valori limiti da normativa.

In generale, SIROCO ha ottenuto risultati molto simili all'acciaio al carbonio che dipendono ovviamente dai trattamenti superficiali svolti sulle superfici: nella **Figura 5.14** 1D è la superficie non trattata, SB è la superficie trattata con lo shot blasted e la GB con la grit blasted. Oltre ai trattamenti con graniglie sono state considerate anche delle superfici spruzzate con alluminio per incrementare ancor più lo slip factor. I valori trovati vengono presentati nelle **Figura 5.14 e 5.15** e si può vedere quanto sia importante trattare le superfici o applicare dei sottili strati su di essa. In particolare, è da notare un'importante differenza tra le superfici di puro acciaio inossidabile e quelle trattate in alluminio: nel caso del puro acciaio si ha che incrementando il precarico, ovvero passando dai Bumax 88 ai Bumax 109, si ha che il coefficiente di attrito aumenta. Questo è dato dal fatto che più il precarico è elevato e più le saldature a freddo sono presenti, aumentando così l'attrito fornito dalla superficie [39]. Invece, nel caso in cui si abbia uno strato sottile di alluminio applicato, tale comportamento delle saldature a freddo non avviene e si ha che l'attrito tende a diminuire quando il precarico aumenta, proprio come avviene nel caso dell'acciaio al carbonio. La saldatura a freddo è quindi un fenomeno molto importante per l'acciaio inossidabile, meno invece per l'acciaio al carbonio.

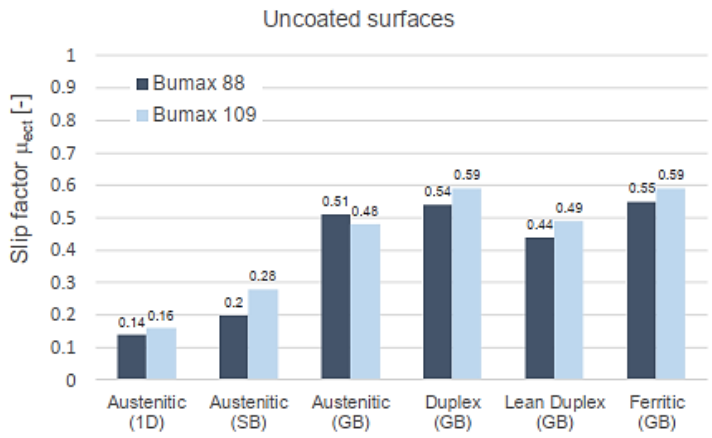

Figura 5.14 Slip factor ottenuti da SIROCO per superfici 1D, SB e GB in acciaio inossidabile. Fonte: [25]

Inoltre, lo studio parametrico con modelli teorici, ha fatto notare che, se il rapporto tra la clamp length $\sum t$ e il diametro della vite scende sotto il valore 2, si hanno valori minori di attrito, con anche un maggiore rilassamento dell'unione bullonata [42].

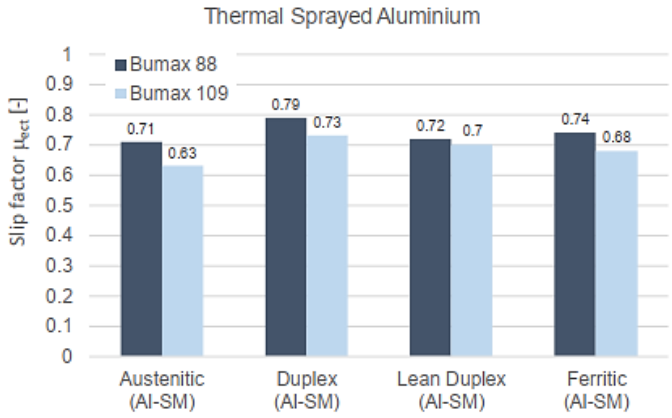

Figura 5.15 Slip factor ottenuti da SIROCO per superfici in acciaio inossidabile spruzzate con alluminio. Fonte: [25]

Con i test effettuati e i modelli teorici costruiti, SIROCO ha proposto dei valori utili in progetto per le piastre in acciaio inossidabili, sottolineando però che è consigliato utilizzarli solo nel caso in cui il serraggio avvenga a $F_{p,C}$. I valori proposti vengono presentati nella **Tabella 5.9**.

Tabella 5.9 Coefficienti di attrito per diverse superfici trattate e non in acciaio inossidabile secondo SIROCO. Fonte: [43]

Class of friction surfaces	**Stainless steel grade**	**Surface condition**		Slip factor μ
		Surface finish	**Rz [μm]**	
A++	Duplex 1.4462/ Lean Duplex 1.4162	Aluminium spray metallized (measured dry film thickness (DFT) = 100 μm ± 20 μm)	≥ 40 (before coating application)	0.7
A+	Austenitic 1.4404/ Ferritic 1.4003			0.6
A	Duplex 1.4462	Surfaces blasted with grit	≥ 50	0.5
	Ferritic 1.4003		≥ 45	
B	Austenitic 1.4404	Surfaces blasted with grit	≥ 45	0.4
	Lean Duplex 1.4162		≥ 40	
C	-	-	-	0.3
D	Austenitic 1.4404	Surfaces blasted with shot	≥ 35	0.2
E	Austenitic 1.4404	Surfaces as rolled	≥ 25	0.15

5.3. Rilassamento e creep

La perdita di precarico dell'unione bullonata, come già accennato nei paragrafi e capitoli precedenti, deve essere sempre precisamente studiata in qualsiasi tipo di giunzione ad attrito. Questo perché una decrescita del precarico all'interno dei bulloni porta direttamente ad una minore resistenza a scorrimento, sia per una minore forza sulle piastre sia per coefficienti di attrito minori. Fino a pochi anni fa, si pensava che per l'acciaio inossidabile il rilassamento e il creep fossero un grande problema, ma con i recenti studi di SIROCO [29] è stato provato che il comportamento non differisce di molto dall'acciaio al carbonio.

Indagando meglio le cause di perdita di precarico, si può dire che esse siano dovute da vari fattori, anche se alcuni più importanti e altri meno, per l'apporto che hanno nella decrescita di precarico nel tempo. Possono essere così riassunti [25]; [42]; [44]:

- Rilassamento dei bulloni;
- Deformazione viscoplastica, ovvero creep, nelle piastre a causa del precarico dei bulloni;
- Deformazione viscoplastica, ovvero creep, nelle piastre a causa delle forze di taglio presenti nella giunzione bullonata;
- Ingranamento tra le superfici con zone che si deformano plasticamente (setting effect)
- Altre minori cause, quali perdite a causa di carichi di fatica o tensioni assiali.

In una formula si ha [45]:

$$\Delta F_{p,C} = \Delta F_{p,C\ Rilass} + \Delta F_{p,C\ Creep\ precarico} + \Delta F_{p,C\ Creep\ taglio} + \Delta F_{p,C\ Sett} + \Delta F_{p,C\ Fat,Tens} \quad \textbf{(5.22)}$$

Di questi, l'apporto maggiore è dato dal rilassamento del bullone. Il creep delle piastre tende ad essere trascurabile, anche se nel caso dell'acciao inossidabile è un po' maggiore rispetto all'acciaio al carbonio. L'apporto dato dai setting effect è generalmente ininfluente nel tempo, poiché l'ingranamento tra le superfici avviene generalmente al momento del serraggio, ed è dunque controllabile per mezzo delle ispezioni che devono

essere effettuate per il controllo del serraggio delle giunzioni secondo la modalità di applicazione della coppia. In realtà, anche gli altri apporti sono di gran lunga superiori nei minuti appena dopo il serraggio, ad esempio circa il 50% del rilassamento del bullone avviene nella prima ora dopo il serraggio [29].

5.3.1. Studi precedenti: rilassamento e creep dell'acciaio inossidabile

Approfonditi studi sono stati condotti da SIROCO [29] sia per quanto riguarda i singoli componenti, ovvero lo studio a creep delle singole piastre e lo studio del rilassamento di barre filettate in acciaio inossidabile, ma anche della giunzione bullonata nella sua completezza.

Gli studi [46]; [47] sui singoli componenti hanno confermato un comportamento dell'acciaio inossidabile molto simile a quello del comune acciaio al carbonio. Per quanto riguarda le piastre il creep risulta essere meno trascurabile rispetto all'acciaio al carbonio, ove invece poteva essere completamente posto pari a zero. Inoltre, l'acciaio austenitico tende ad avere una predisposizione maggiore al creep rispetto agli acciai duplex e lean duplex. Anche per le barre filettate si nota come quelle fabbricate in acciaio austenitico abbiano valori di rilassamento superiori, con percentuali di sfruttamento del materiale verso il 60% (resistenza a snervamento del materiale $R_{p,02}$) mentre per valori che si attestano al 100% della resistenza del materiale si ha un'inversione di tendenza. Tuttavia, le piastre in un'unione bullonata con precarichi $F_{p,C}$ vengono sfruttate a percentuali che si attestano vicino a 0,7$R_{p,02}$ per l'austenitico e soli 0,4-0,5$R_{p,02}$ nel caso di duplex, perciò il migliore per contrastare la perdita di precarico risulta essere il duplex [29].

Passando invece agli studi effettuati sull'intera giunzione bullonata svolti da SIROCO, essi sono di due tipologie: nel primo caso si sfruttano dei piatti e dei bulloni con delle celle di carico senza un precarico di taglio, come visibile nella **Figura 5.16**, mentre nel secondo caso si possono ritenere valide come prove di rilassamento quelle svolte per definire gli slip factor. In quest'ultimo caso entra in gioco anche il carico di taglio, che può influire leggermente nella perdita di precarico per il creep causato dalla deformazione trasversale delle piastre. Tuttavia, i valori forniti dai due differenti test sono molto simili, quindi nelle pagine seguenti vengono presentati i test svolti senza carico di taglio, in cui sono stati approfonditi diversi materiali e diverse clamp length.

I materiali utilizzati per le piastre sono l'acciaio austenitico (1.4404), il ferritico (1.4003), il duplex (1.4462) e il lean duplex (1.4162). Ad essi sono stati combinati diverse tipologie di bulloni Bumax di differenti acciai inossidabili e resistenze come visibile in **Figura 5.17**.

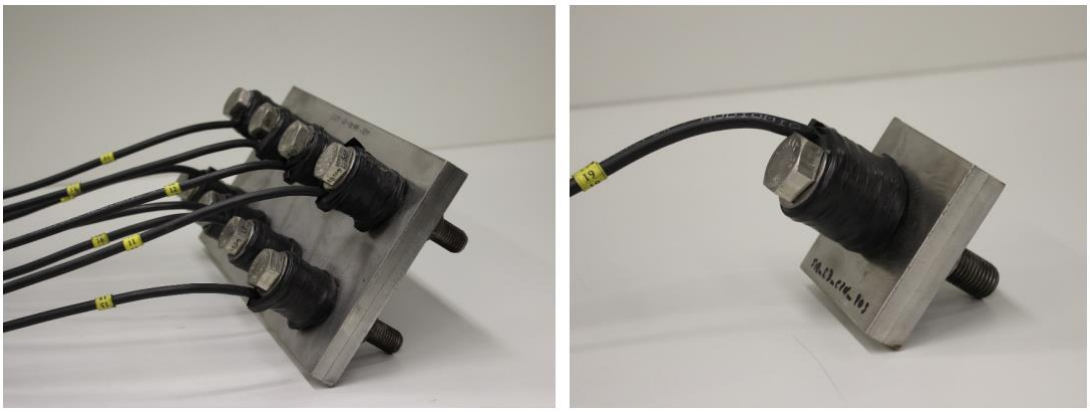

Figura 5.16 Test di rilassamento svolti da SIROCO. A sinistra piastra con 8 bulloni M20, a destra piastra con singolo bullone M20 precaricato. Fonte: [25]

Inoltre, sono state usate anche delle piastre in acciaio al carbonio S355 con bulloni in acciaio inossidabile, per vedere quanto la caduta di precarico fosse dovuta ai bulloni o alle piastre, poiché il creep dell'acciaio al carbonio è completamente trascurabile. Come visibile in **Figura 5.17,** la differenza rispetto ai test in cui tutta la giunzione è in acciaio inossidabile è minima, dunque la quota parte di perdita di carico per creep delle piastre è quasi trascurabile rispetto al rilassamento del bullone, ma un po' maggiore rispetto all'acciaio al carbonio.

I risultati estrapolati a 50 anni sulla perdita di precarico sono i seguenti:

- Il più alto valore di perdita di carico è circa 10%, e in generale la caduta di precarico è di 6-10% come si vede in **Figura 5.17,** simile ai bulloni al carbonio che si attestano a 7-8 %;
- Nel caso di giunzioni bullonate la differenza tra acciaio inossidabile austenitico e duplex non è rimarcata come per i singoli componenti e non si notano importanti differenza tra i vari materiali;

- Se si utilizzano bulloni di reimpiego o se si riserra la giunzione dopo alcuni anni, la perdita di precarico tende a diminuire anche del 50% rispetto ai valori presentati nel primo punto;
- Un rapporto di lunghezza di serraggio $\sum t/d$ minore porta ad una maggiore perdita di carico, in particolar modo se si scende sotto il rapporto di 2 si ha un incremento esponenziale delle perdite di precarico, come visibile nella **Figura 5.18**, grafico ricavato da modelli numerici dello studio SIROCO [42].

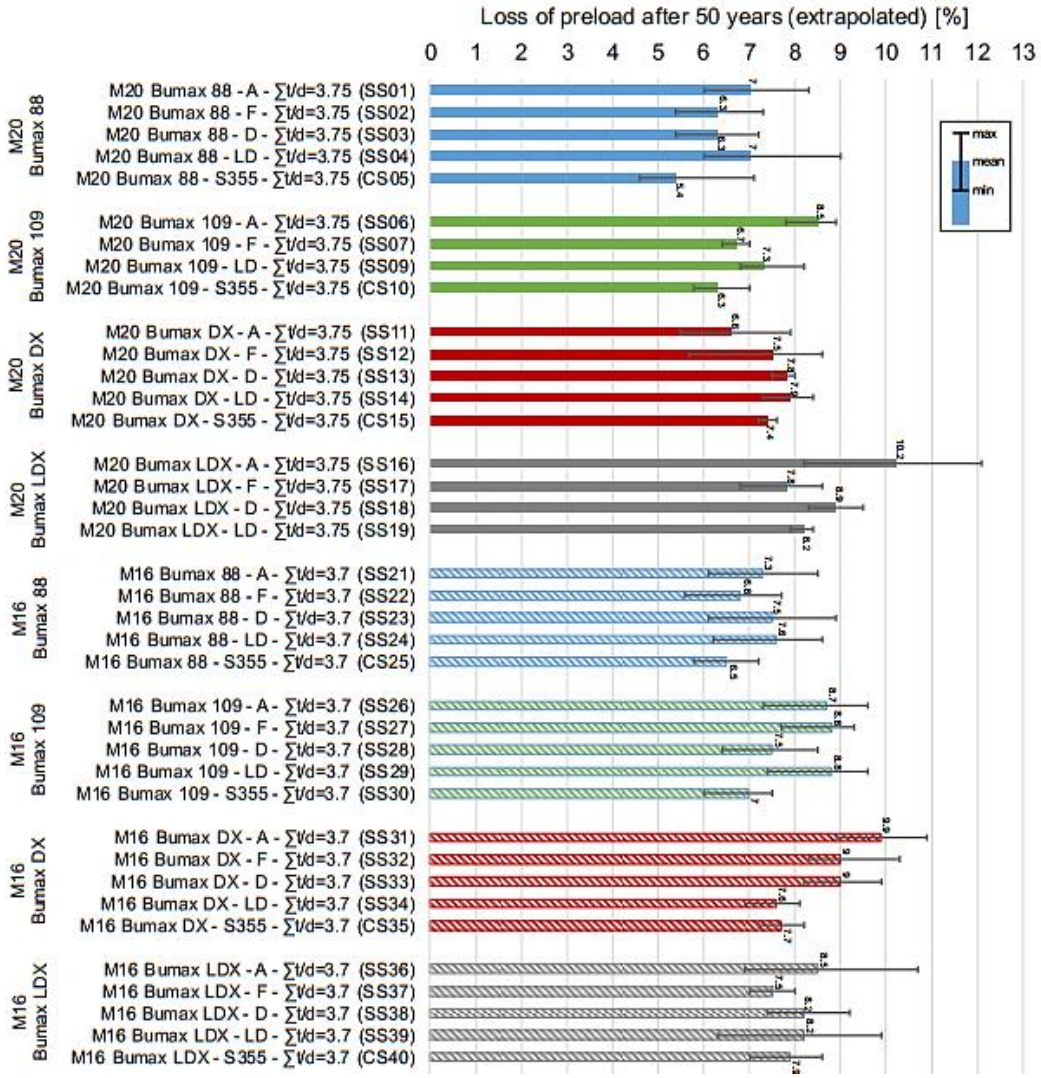

Figura 5.17 Risultati della perdita di carico delle giunzioni in acciaio inossidabile secondo SIROCO. Fonte: [25]

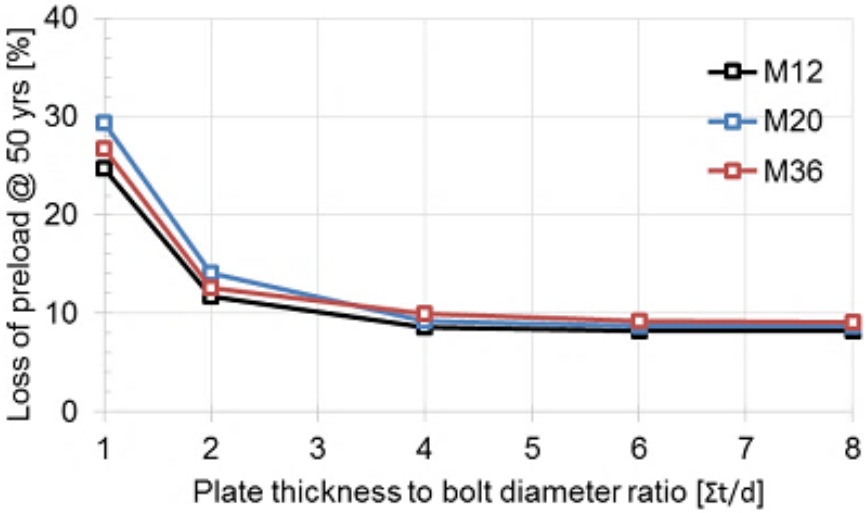

Figura 5.18 Perdita di precarico a 50 anni di unioni bullonate in acciaio inossidabile da modello numerico. Fonte: [42]

5.4. Il fenomeno del galling

Con il termine "galling" si vanno ad indicare le striature che si possono formare durante il serraggio dei bulloni. Esse possono poi essere distinte in linee continue e protuberanze vere e proprie, quest'ultime causate da adesione tra le superfici di serraggio con delle saldature a freddo. In particolare, il galling tende ad avvenire tra il dado e la rondella poiché è la parte in cui avviene il serraggio, e si ha dunque maggiore applicazione delle forze. Dunque, è bene evitare il più possibile la presenza di galling nelle giunzioni a precarico in quanto riduce l'affidabilità del serraggio, portando ad avere difficoltà nella definizione della relazione tra precarico e coppia applicata. La normativa UNI EN 1090-2:2018 [31], consiglia di utilizzare i seguenti metodi per evitare il galling nel caso di unioni in acciaio inossidabile:

- Si possono utilizzare combinazioni vite-dado in cui il dado presenti una maggiore resistenza in modo da contrastare il galling;
- Può essere utilizzata, nei casi più complessi, una lega di acciaio ad alto incrudimento per alcuni componenti quali i dadi e le rondelle o applicare un rivestimento superficiale con durezza elevata;

- Si possono usare dei lubrificanti come spray a secco (PTFE per esempio) ma in tal caso si deve porre attenzione al fatto che la lubrificazione può causare una contaminazione da sporcizia degli elementi, poiché fatta in cantiere, e ci possono essere problemi riguardo lo stoccaggio dopo la lubrificazione;
- Si possono utilizzare gradi di acciaio inossidabili antiusura per una o entrambe le superfici di accoppiamento.

Per uniformare l'utilizzo dei bulloni in acciaio inossidabile ad attrito tuttavia non ci si può basare su particolari accoppiamenti vite-dado o su particolari gradi di acciaio per avere maggiore durezza. Pur avendo importanti controindicazioni, il metodo che più si adatta risulta essere la lubrificazione degli elementi che vengono in contatto, come succede anche per i bulloni in acciaio comune al carbonio, in cui però la lubrificazione viene controllata direttamente in stabilimento di produzione per fornire lotti con precisi valori di fattore k.

5.4.1. Studi precedenti: galling in unioni in acciaio inossidabile

Negli studi sul serraggio già presentati al paragrafo 5.1.5, SIROCO [29] ha posto anche un'elevata attenzione al problema del galling. I test sono stati tutti svolti con precisi lubrificanti, come il Gleitmo®1952V e i Molykote in pasta e in spray e hanno fornito risultati incoraggianti per quanto riguarda il galling.

Nei test svolti infatti il galling avviene solo quando i bulloni vengono serrati nelle zone plastiche, ovvero ben oltre il tipico precarico di serraggio $F_{p,C}$. Non può quindi risultare un problema quando il serraggio avviene in modo corretto fermandosi al precarico di progetto. Tali striature sono visibili nelle superfici di contatto tra rondella e dado ma anche tra l'accoppiamento dei filetti.

Il serraggio di bulloni lubrificati con il Gleitmo®1952V ha visto una ricorrenza del galling quasi in tutti i provini, tranne in due lotti in cui si sono ottenute striature solo nel 20 e 30% dei casi. Tuttavia, il galling è avvenuto solo dopo il raggiungimento del picco della forza nel bullone, ovvero in fase plastica e anche discendente della curva precarico-coppia, come visibile nella **Figura 5.19**. Il galling risulta riconoscibile nel grafico proprio grazie a dei salti nella coppia, cioè a delle zone in cui la curva precarico-coppia torna indietro e poi balza

nuovamente in avanti, proprio a causa delle protuberanze che si vanno a formare sulle superfici a contatto.

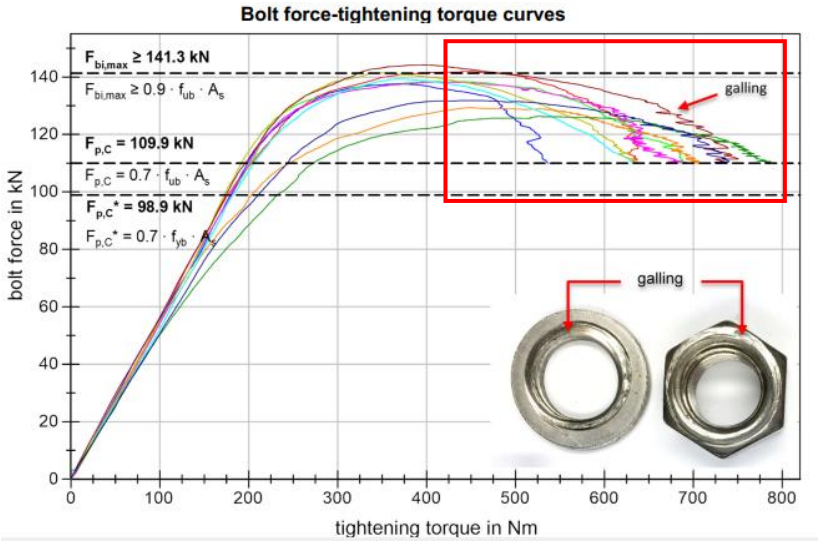

Figura 5.19 Galling di test svolti su bulloni BUMAX 10.9 M16 con lubrificante Gleitmo 1952V. Fonte: [25]

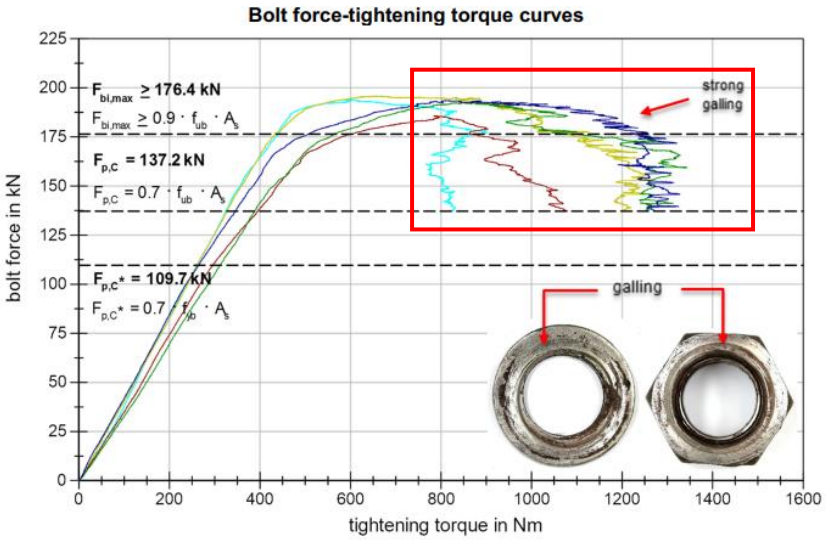

Figura 5.20 Galling di test svolti su bulloni BUMAX 8.8 M20 con lubrificanti Molykote 1000 spray. Fonte: [25]

Anche il serraggio di bulloni lubrificati con la pasta o lo spray Molykote ha visto una ricorrenza del galling quasi in tutti i provini, con delle striature ancora più pronunciate e per questo dette "strong galling". La maggior presenza di galling può essere notata anche nella **Figura 5.20**, che viene riportata a titolo di esempio dei test effettuati con i lubrificanti Molykote. Tuttavia, è importante precisare che tali striature nuovamente le si hanno solo nella zona discendente della curva precarico-coppia, dopo aver già raggiunto il picco di precarico.

Dunque, SIROCO [29] sottolinea che il galling risulta un problema se avviene prima del raggiungimento di $F_{p,C}$ e può essere evitato con l'utilizzo di un appropriato lubrificante (non sono però stati svolti test senza lubrificante) e una procedura di serraggio che eviti il sovra serraggio, che farebbe invece incorrere nella nascita delle striature.

Capitolo 6

6. Prove di laboratorio: idoneità al precarico

In questo capitolo e nei successivi due vengono presentate le prove di laboratorio svolte su alcuni campioni di unioni bullonate in acciaio inossidabile, utili al progetto e alla realizzazione delle opere del cantiere "Sostituzione facciate ventilate in granito rosso Balmoral del fabbricato TO_CIT11, Manica d'approdo" sul cortile interno del Politecnico di Torino. La facciata ventilata è stata realizzata con rivestimento lapideo di nuova fornitura e da nuova sottostruttura in acciaio inossidabile AISI 304 a montanti e traversi come descritto in **Figura 6.1**.

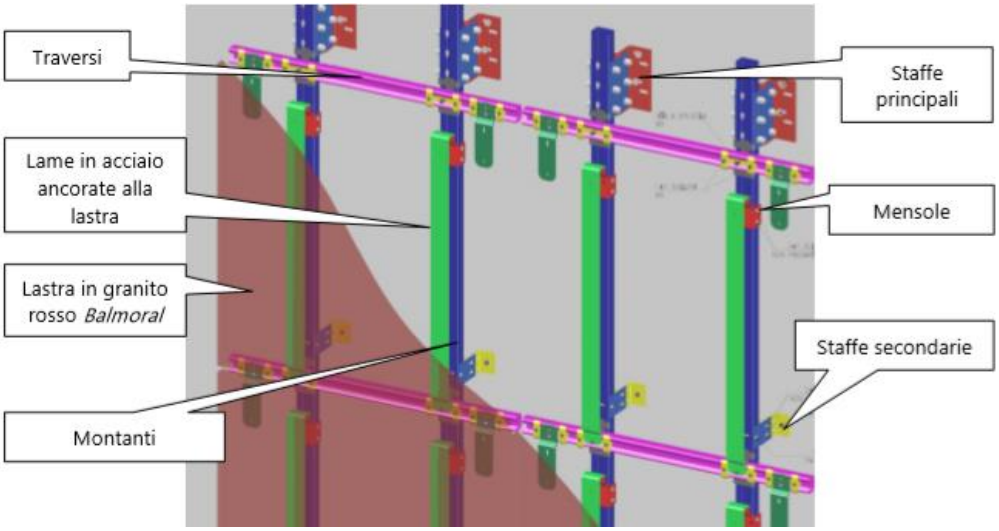

Figura 6.1 Nuova sottostruttura delle facciate ventilate del Politecnico di Torino.

Le prove di laboratorio sono risultate necessarie poiché nella sottostruttura in acciaio inossidabile sono state sfruttate le giunzioni bullonate ad attrito, sia per collegare i montanti alle staffe che per unire i traversi ai montanti. In particolare, i bulloni in acciaio inossidabile utilizzati ad attrito sono i seguenti:

- M8 utili ad unire i traversi ai montanti e per collegare le lamine delle lastre in granito ai traversi;
- M10 per collegare i montanti alle staffe secondarie;
- M12 per collegare i montanti alle staffe principali.

In questo capitolo, le prove di laboratorio a cui si fa riferimento sono quelle relative al serraggio dei bulloni, secondo le modalità di prova riportate dalla UNI EN 14399-2 [30] "Assiemi di bulloneria strutturale ad alta resistenza da precarico – Parte 2: Idoneità al precarico" ampiamente discussa nel paragrafo 5.1.3, svoltesi all'Istituto Nazionale della Saldatura a Genova IIS il 06/08/2020.

6.1. Modalità e strumenti di prova

Le prove di idoneità al precarico sono state effettuate su cinque diverse tipologie di bulloni, presentati in **Tabella 6.1** e anche raffigurati in scala nella **Figura 6.2** , per avere meglio concezione delle dimensioni e delle differenze tra essi.

Tabella 6.1 Bulloni in acciaio inossidabile utilizzati nei test di serraggio per l'idoneità al precarico.

Provino	d [mm]	Classe	A_s [mm^2]	Descrizione
M8-25-br	8	A2-70	36,6	Viti M8 con gambo da 25 mm e testa a brugola
M8-40	8	A2-70	36,6	Viti M8 con gambo da 40 mm e testa esagonale
M10-30	10	A2-70	58,0	Viti M10 con gambo da 30 mm e testa esagonale
M10-40	10	A2-70	58,0	Viti M10 con gambo da 40 mm e testa esagonale
M12-40	12	A2-80	84,3	Viti M12 con gambo da 40 mm e testa esagonale

I bulloni utilizzati sono in acciaio inossidabile austenitico e sono tutti in classe A2-70, tranne per gli M12 che sono in classe A2-80. Da sottolineare che per la prova di serraggio

i bulloni sono stati utilizzati così come consegnati dal produttore, senza applicare alcun lubrificante specifico. Dunque, a parte possibili olii di scarto di lavorazione, tali provini vengono considerati non lubrificati.

Seguendo la normativa UNI EN 14399-2 [30], per poter ottenere un valore medio affidabile del fattore k con la relativa deviazione standard, si è proceduto nel testare cinque bulloni per ogni tipologia (tranne nel caso del bullone M8-40 in cui le prove sono risultate sei per un problema tecnico ad una di esse).

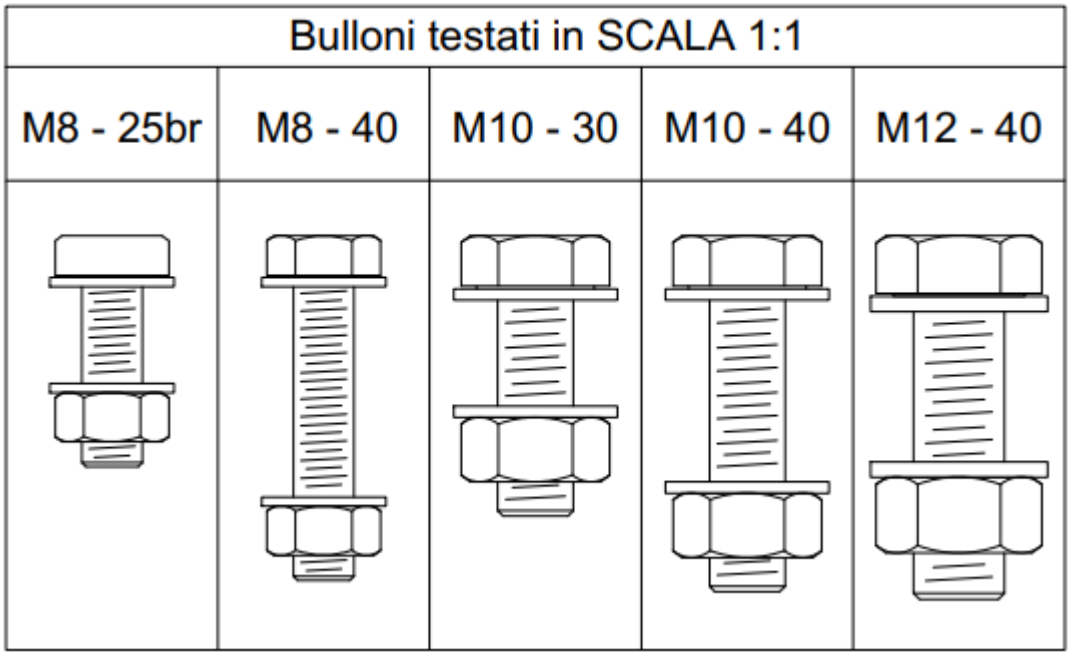

Figura 6.2 Rappresentazione in scala dei bulloni testati sull'idoneità al precarico.

La prova, come già detto, è stata svolta seguendo le direttive della UNI EN 14399-2 per l'acciaio al carbonio, che prevede la misurazione in contemporanea del precarico nel gambo della vite, la rotazione relativa tra dado e vite, la coppia fornita e l'allungamento della vite. Quest'ultimo parametro, non essendo indispensabile, è stato solo valutato tenendo conto della lunghezza della vite iniziale e di quella a fine della prova. Per ottenere questi parametri sono stati utilizzati i seguenti strumenti (la temperatura di prova è risultata essere di 23.3°C):

- Cella di carico per la rilevazione del precarico: HMB 50t;
- Rilevazione dell'angolo: Tecnogi torque-wrench 7200A1;
- Rilevazione coppia: Tecnogi torque-wrench 7200A1;
- Calibro digitale TWN Cal;

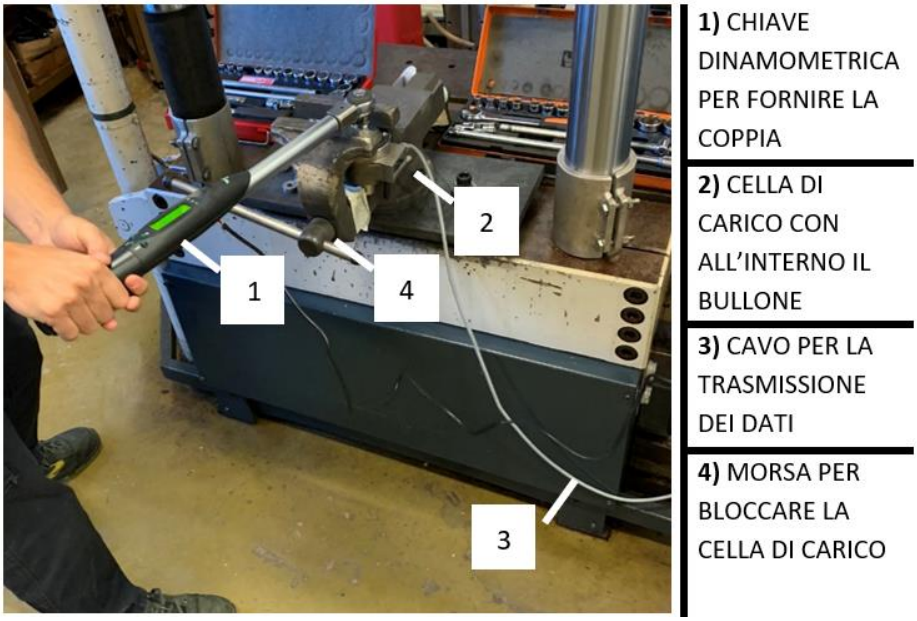

Figura 6.3 Schema di prova per misurare coppia, angolo e precarico durante il serraggio.

La prova è avvenuta con lo schema riportato nella **Figura 6.3**. In particolare, gli step per ogni bullone sono stati:

- Misurazione della lunghezza iniziale del bullone con calibro;
- Inserimento del bullone all'interno della cella di carico utilizzando spessori appositi per raggiungere clamp length tali da avere solo un paio di filetti oltre il dado;
- Serraggio del bullone nella cella di carico ponendo attenzione a non fornire un precarico;
- Fissaggio della cella di carico nella morsa e bloccaggio della rotazione della testa della vite;

- Applicazione della coppia tramite chiave dinamometrica Tecnogi fino a rottura del bullone;
- Rimozione della parte di bullone rimasta all'interno della cella di carico e misurazione della sua lunghezza accoppiando le due parti.

In **Figura 6.4** viene riportata una foto che riprende da vicino la cella di carico con il bullone inserito all'interno e nella **Figura 6.5** viene visualizzato uno spaccato di essa.

Figura 6.4 Cella di carico contenente un bullone M12-40 prima del test di precarico.

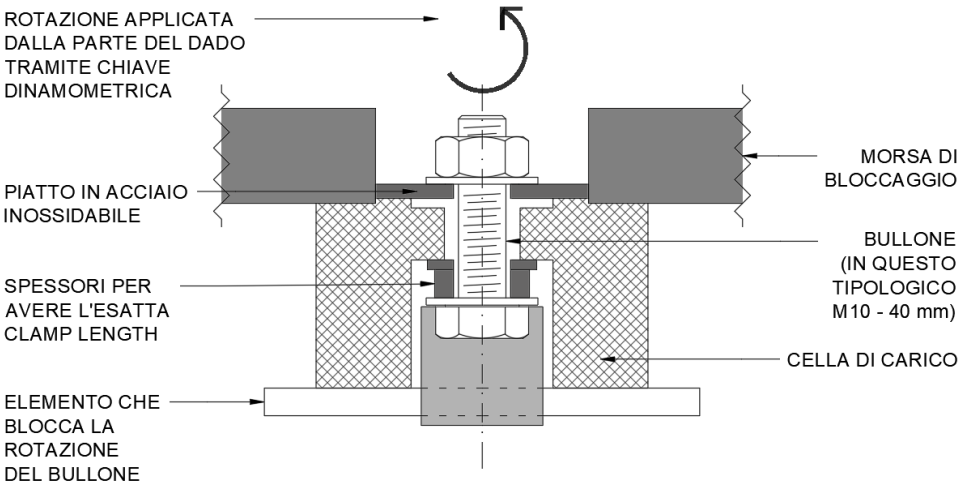

Figura 6.5 Spaccato della cella di carico e dei componenti utili allo svolgimento del test di idoneità al precarico.

6.2. Trattamento dei dati

I dati raccolti sono stati trattati secondo quanto riportato nella UNI EN 14399-2 [30], ovvero con i parametri riportati nel paragrafo 5.1.3. Tuttavia, i precarichi massimi non hanno mai raggiunto il valore $F_{p,C}$, perciò per valutare le differenze degli angoli $\Delta\theta$ e il fattore k si è tenuto conto del precarico $F_{bi,spec}$ fornito dalla coppia di progetto espressa dai produttori dei bulloni (M_{spec}), e non all' $F_{p,C}$.

Nelle seguenti pagine vengono presentati i grafici di precarico-coppia utili alla definizione del precarico $F_{bi,spec}$ a partire dalla coppia fissata e i grafici precarico-angolo utili alla definizione degli angoli $\Delta\theta$. La legenda dei termini utilizzati è la seguente:

d	diametro della vite
A_s	sezione resistente della vite (valore nominale estratto da UNI EN ISO 3506-1)
f_{ub}	carico unitario di rottura della vite associato alla classe di resistenza
$M_{B,min}$	valore di rottura a torsione atteso (estratto da UNI EN ISO 3506-1)
$F_{p,C}$	valore di precarico richiesto di 0.7 f_{ub} A_s
M_{pi}	valore della coppia alla quale il carico della vite raggiunge per la prima volta il valore $F_{p,C}$
k_i	fattore k
L_1	lunghezza della vite prima della prova
L_2	lunghezza della vite dopo la prova
A	allungamento percentuale a rottura, calcolato come 100 (L_2-L_1)/L_1
$F_{bi,max}$	valore individuale del carico massimo della vite raggiunto durante la prova
M_{spec}	valore specificato della coppia da applicare agli assiemi di bulloneria secondo progetto
$F_{bi,spec}$	valore del carico al quale la coppia raggiunge per la prima volta il valore M_{spec}
$\theta_{1i,spec}$	valore dell'angolo θ al quale la coppia raggiunge per la prima volta il valore M_{spec}
M_{max}	valore massimo registrato della coppia applicata alla vite
θ_{2i}	valore dell'angolo θ al quale la coppia applicata alla vite ha raggiunto il valore M_{max}
s_k	scarto normalizzato stimato
V_k	coefficiente di variazione

- **M8 – 25-br**

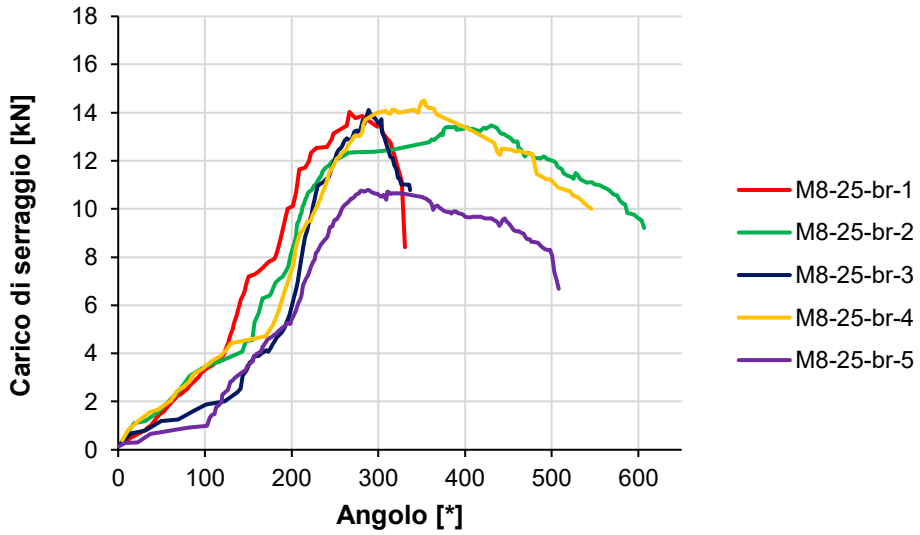

Figura 6.6 Grafico carico-angolo dei bulloni M8_25_br.

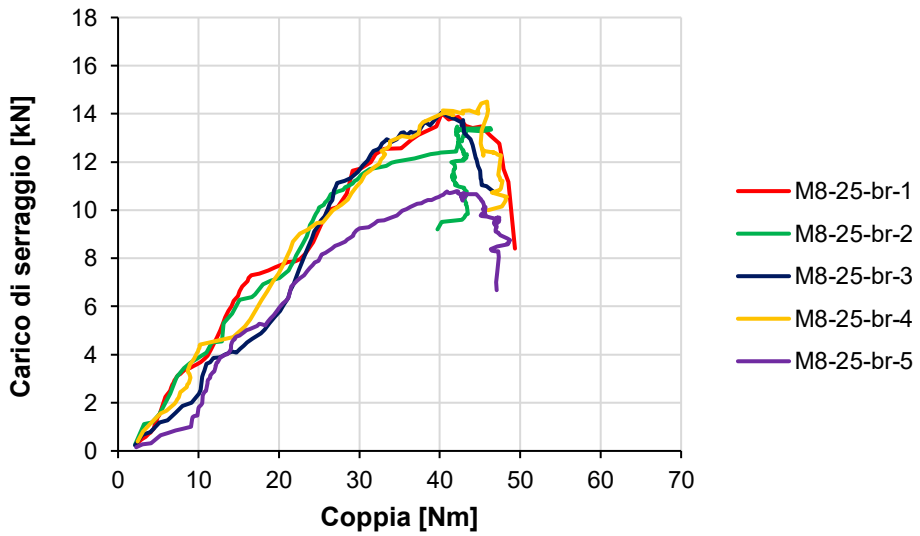

Figura 6.7 Grafico carico-coppia dei bulloni M8_25_br.

Tabella 6.2 Trattamento dei dati dei bulloni M8-25-brugola.

Provino	$M_{B,min}$ [Nm]	$F_{p,C}$ [kN]	M_{pi} [Nm]	k_i (§) -	L_1 [mm]	L_2 [mm]	A [%]	$F_{bi,max}$ [kN]	M_{spec} [Nm]	$F_{bi,spec}$ [kN]	$\theta_{1i,spec}$ [°]	M_{max} [Nm]	θ_{2i} [°]
M8-25-br-1	32	17.934	(§)	0.36	30.10	30.60	1.7	14.03	23.5	8.19	184	49.3	331
M8-25-br-2	32	17.934	(§)	0.33	30.06	30.64	1.9	13.47	23.5	8.90	206	46.4	390
M8-25-br-3	32	17.934	(§)	0.35	30.06	30.75	2.3	14.11	23.5	8.38	213	52.2	435
M8-25-br-4	32	17.934	(§)	0.32	29.91	30.95	3.5	14.51	23.5	9.17	214	48.4	527
M8-25-br-5	32	17.934	(§)	0.39	29.93	30.50	1.9	10.79	23.5	7.48	221	48.8	473

s_k	0,03
k_m	0,35
V_k	0,085

- **M8 – 40**

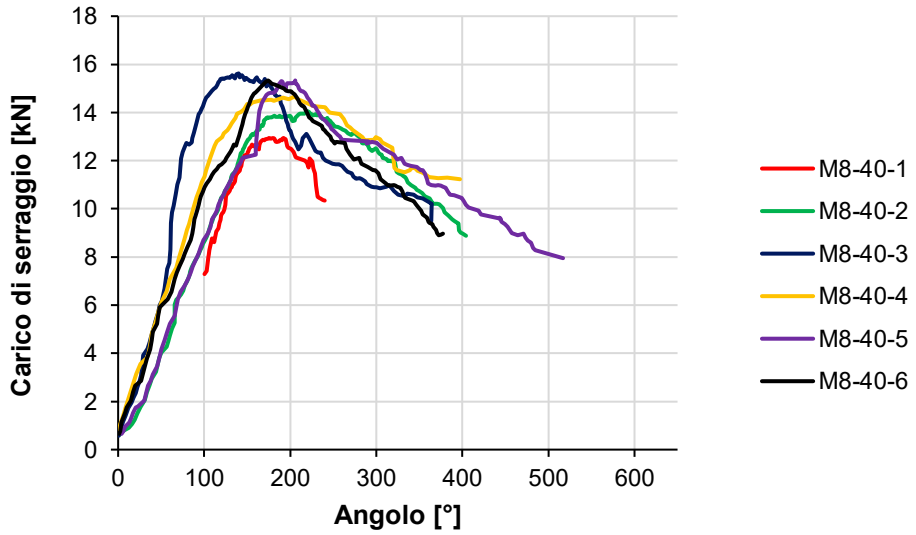

Figura 6.8 Grafico carico-angolo dei bulloni M8_40.

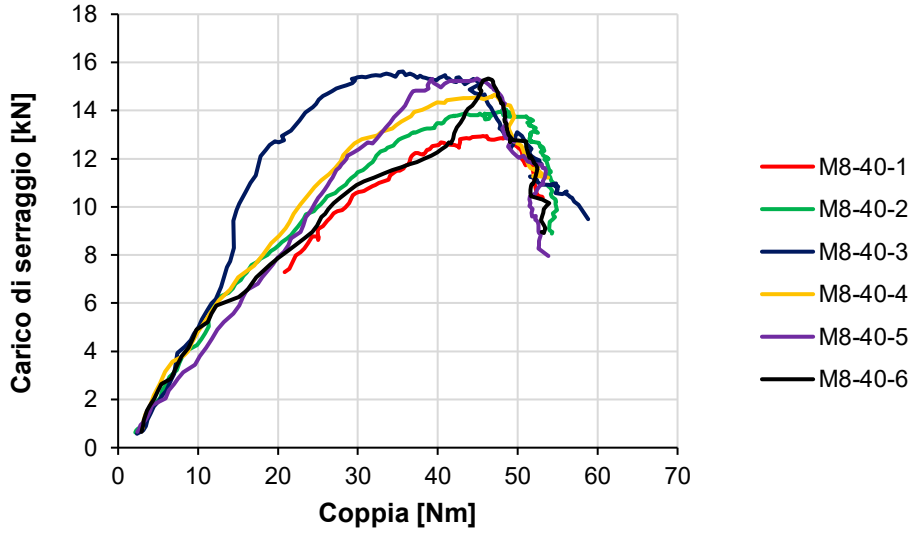

Figura 6.9 Grafico carico-coppia dei bulloni M8_40.

Tabella 6.3 Trattamento dei dati dei bulloni M8-40.

Provino	$M_{B,min}$ [Nm]	$F_{p,C}$ [kN]	M_{pi} [Nm]	k_i (§) -	L_1 [mm]	L_2 [mm]	A [%]	$F_{bi,max}$ [kN]	M_{spec} [Nm]	$F_{bi,spec}$ [kN]	$\theta_{1i,spec}$ [°]	M_{max} [Nm]	θ_{2i} [°]
M8-40-1	32	17.934	(§)	0.35	45.39	46.10	1.6	12.97	23.5	8.43	107	53.4	237
M8-40-2	32	17.934	(§)	0.30	45.54	46.10	1.2	14.06	23.5	9.73	113	55.6	416
M8-40-3	32	17.934	(§)	0.21	45.38	46.10	1.6	15.62	23.5	13.90	94	58.7	374
M8-40-4	32	17.934	(§)	0.29	45.28	46.39	2.5	14.72	23.5	10.00	91	53.9	397
M8-40-5	32	17.934	(§)	0.31	45.20	46.26	2.3	15.33	23.5	9.57	141	53.5	394
M8-40-6	32	17.934	(§)	0.34	45.34	46.21	1.9	15.22	23.5	8.54	85	53.6	349

s_k	0,05
k_m	0,30
V_k	0,164

- **M10 – 30**

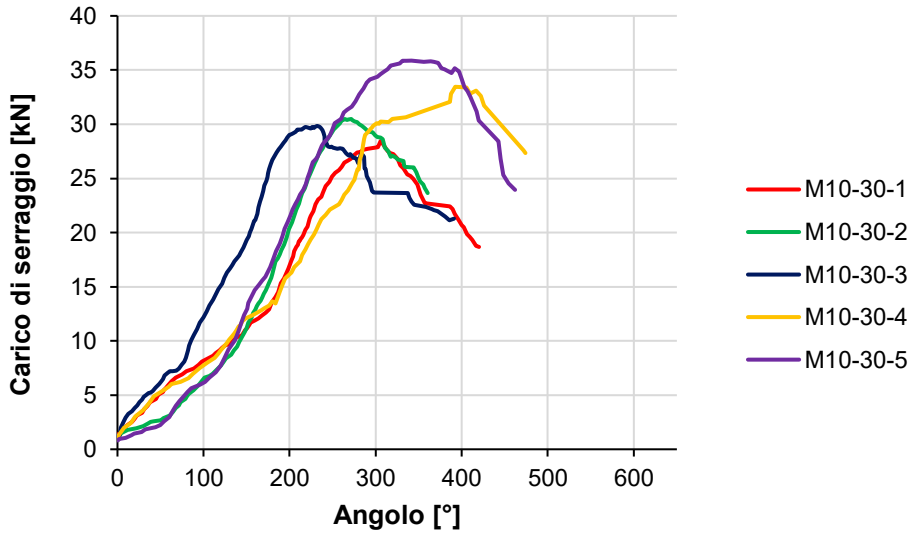

Figura 6.10 Grafico carico-angolo dei bulloni M10_30.

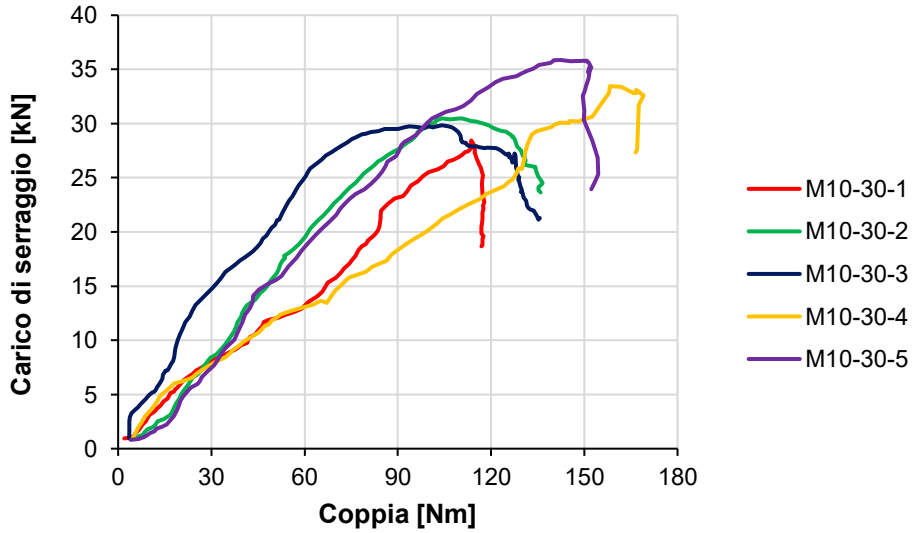

Figura 6.11 Grafico carico-coppia dei bulloni M10_30.

Tabella 6.4 Trattamento dei dati dei bulloni M10-30.

Provino	$M_{B,min}$ [Nm]	$F_{p,C}$ [kN]	M_{pi} [Nm]	k_i (§) -	L_1 [mm]	L_2 [mm]	A [%]	$F_{bi,max}$ [kN]	M_{spec} [Nm]	$F_{bi,spec}$ [kN]	$\theta_{1i,spec}$ [°]	M_{max} [Nm]	θ_{2i} [°]
M10-30-1	65	28.42	(§)	0.41	36.35	37.39	2.9	28.44	48.4	11.91	160	118.0	414
M10-30-2	65	28.42	(§)	0.32	34.44	37.40	8.6	30.54	48.4	15.20	176	136.6	418
M10-30-3	65	28.42	(§)	0.24	36.37	37.59	3.4	29.85	48.4	20.58	154	135.7	391
M10-30-4	65	28.42	(§)	0.42	36.60	37.22	1.7	33.75	48.4	11.46	143	169.1	422
M10-30-5	65	28.42	(§)	0.32	36.36	37.65	3.5	35.90	48.4	15.17	165	154.5	448

s_k	0,08
k_m	0,34
V_k	0,223

- **M10 – 40**

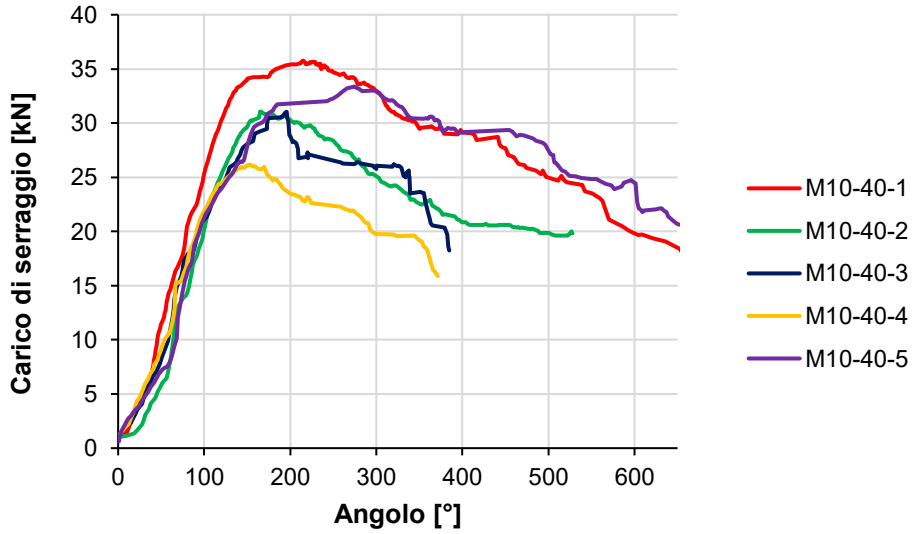

Figura 6.12 Grafico carico-angolo dei bulloni M10_40.

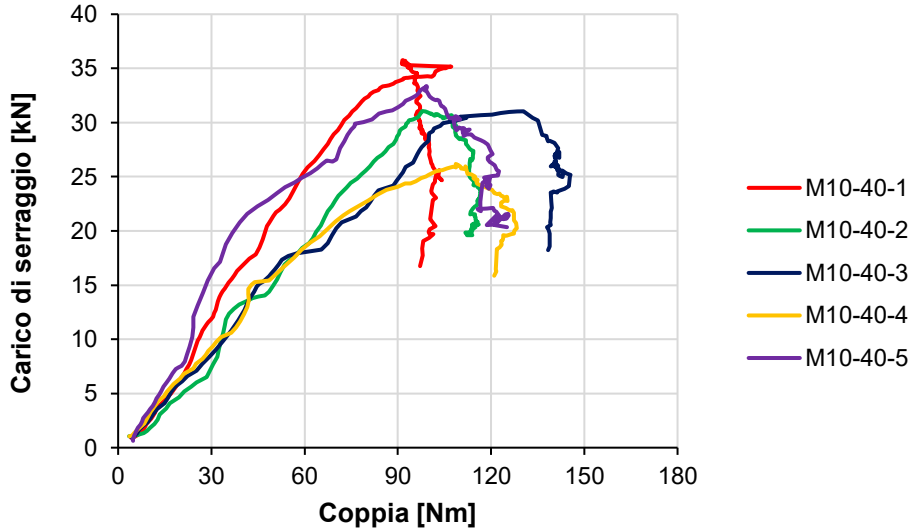

Figura 6.13 Grafico carico-coppia dei bulloni M10_40.

Tabella 6.5 Trattamento dei dati dei bulloni M10-40.

Provino	$M_{B,min}$ [Nm]	$F_{p,C}$ [kN]	M_{pi} [Nm]	k_i (§) -	L_1 [mm]	L_2 [mm]	A [%]	$F_{bi,max}$ [kN]	M_{spec} [Nm]	$F_{bi,spec}$ [kN]	$\theta_{1i,spec}$ [°]	M_{max} [Nm]	θ_{2i} [°]
M10-40-1	65	28.42	(§)	0.23	46.82	48.63	3.9	35.76	48.4	20.74	81	107.3	189
M10-40-2	65	28.42	(§)	0.34	46.54	48.11	3.4	31.07	48.4	14.40	80	116.7	340
M10-40-3	65	28.42	(§)	0.31	46.56	47.77	2.6	31.04	48.4	15.83	73	145.7	336
M10-40-4	65	28.42	(§)	0.31	46.59	47.40	1.7	26.18	48.4	15.44	73	128.3	292
M10-40-5	65	28.42	(§)	0.28	46.64	48.47	3.9	33.38	48.4	17.14	111	125.7	667

s_k	0,04
k_m	0,29
V_k	0,133

- **M12 – 40**

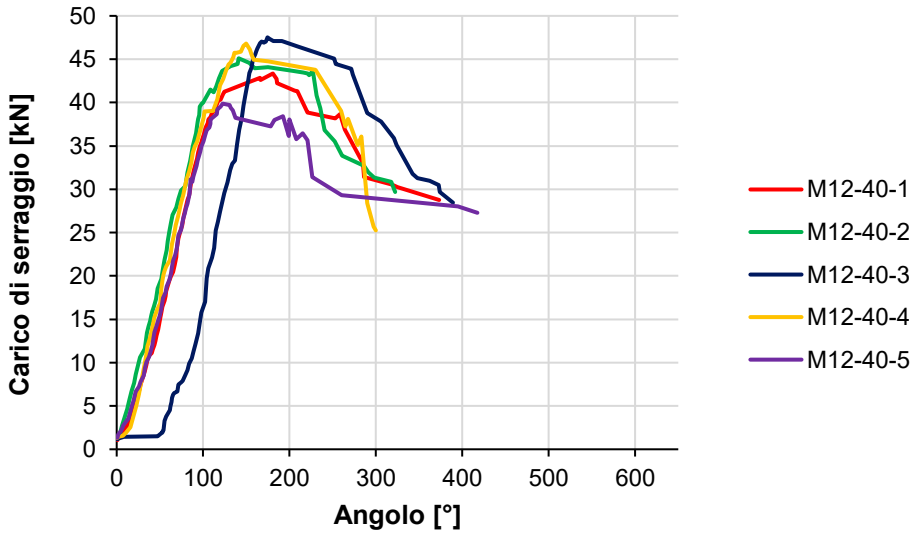

Figura 6.14 Grafico carico-angolo dei bulloni M12_40.

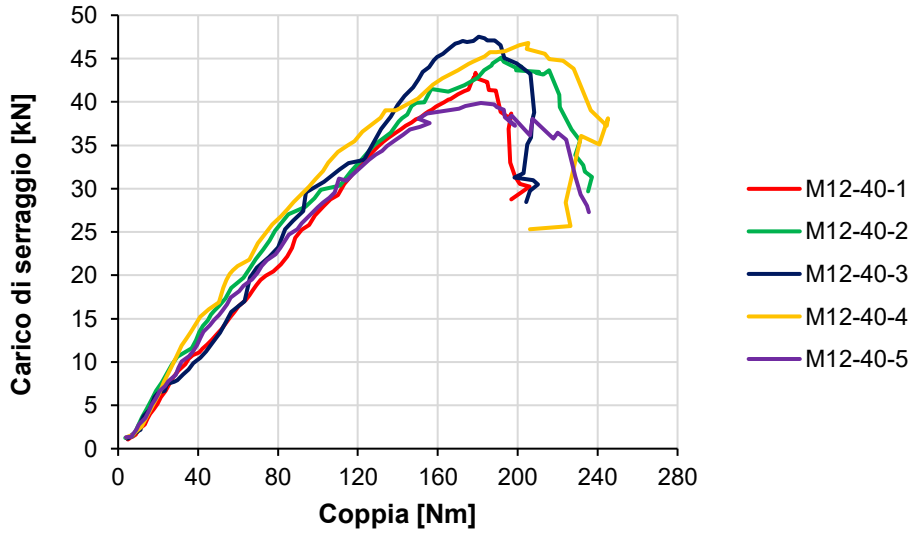

Figura 6.15 Grafico carico-coppia dei bulloni M12_40.

Tabella 6.6 Trattamento dei dati dei bulloni M12-40.

Provino	$M_{B,min}$ [Nm]	$F_{p,C}$ [kN]	M_{pi} [Nm]	k_i (§) -	L_1 [mm]	L_2 [mm]	A [%]	$F_{bi,max}$ [kN]	M_{spec} [Nm]	$F_{bi,spec}$ [kN]	$\theta_{1i,spec}$ [°]	M_{max} [Nm]	θ_{2i} [°]
M12-40-1	130	47.208	(§)	0.31	47.47	48.56	2.3	43.35	110	29.24	84	205.9	325
M12-40-2	130	47.208	(§)	0.30	47.36	48.50	2.4	45.10	110	30.35	80	237.9	303
M12-40-3	130	47.208	(§)	0.28	47.27	49.52	4.8	47.52	110	32.18	117	210.1	343
M12-40-4	130	47.208	(§)	0.27	47.36	48.23	1.8	46.80	110	34.25	88	245.5	266
M12-40-5	130	47.208	(§)	0.29	47.70	48.14	0.9	39.88	110	31.17	86	233.2	262

s_k	0,02
k_m	0,29
V_k	0,060

6.3. Commenti e confronti con studi SIROCO

Come riportato nel paragrafo 5.1.5, analoghi test sul serraggio di bulloni in acciaio inossidabile sono stati effettuati dallo studio SIROCO. Tuttavia sono da sottolineare importanti differenze sia riguardo la modalità di test che i bulloni utilizzati.

Nel caso di SIROCO, i bulloni testati sono bulloni Bumax 88 e 109 con resistenze maggiori rispetto agli A2-70 e A2-80 dei test oggetto di questo documento, anche se gli A2-80 sono piuttosto confrontabili con i Bumax 88 poiché cambia soltanto la resistenza a snervamento. Importante è poi anche la dimensione dei bulloni: nel caso SIROCO sono stati sottoposti a test i diametri M12, M16, M20, M24 mentre in questo caso diametri minori o uguali all'M12. Anche la clamp length è differente, infatti i test trattati in questo documento hanno uno rapporto tra spessore di serraggio e diametro molto vicino a 2, mentre nel caso di SIROCO sono stati utilizzati bulloni con gambo più lungo, ottenendo un rapporto sempre vicino a 6. Infine, la lubrificazione dei bulloni risulta totalmente assente in questi test, mentre SIROCO ha applicato differenti lubrificanti per cercare di migliorare il comportamento al serraggio dell'unione ad attrito.

Per quanto riguarda la modalità di prova di laboratorio è da sottolineare una differenza sul metodo di applicazione della coppia: in questo caso è stata applicata la coppia in modo manuale con una chiave dinamometrica, mentre in SIROCO è stato utilizzato un motore

elettrico in grado di mantenere costante la rotazione del bullone senza salti. Questo in realtà non dovrebbe portare a grandi differenze nei risultati e, soprattutto, è da considerare che la modalità con cui vengono serrati i bulloni in cantiere è molto più simile alla chiave dinamometrica che al motore elettrico. Inoltre, i bulloni nel caso di SIROCO quasi mai sono stati portati a rottura, cosa che invece è sempre avvenuta nel caso delle prove in oggetto.

Tabella 6.7 Risultati delle prove svolte da SIROCO sul serraggio di bulloni con lubrificante GleitmoV1952. Fonte: [29]

Tested series	n [-]	$F_{p,C}^*$	$F_{p,C}$	$F_{bi,max}$	$\Delta\Theta_{1i,min}$ ≥ 120°	$\Delta\Theta_{2i,min}$ ≥ 240°	k-values [-]	k-class K1 $0.10 \le k_i \le 0.16$	k-class K2 $0.10 \le k_m \le 0.23$	k-class K2 $V_k \le 0.06$	Fracture	Galling
M12												
Bumax 88 - M12x80	10	100%	100%	90%	70%	80%	0.11 – 0.19	80%	0.149	0.186	0%	100%
Bumax 109 - M12x80	10	100%	100%	40%	70%	60%	0.12 – 0.24	30%	0.183	0.205	0%	100%
Bumax SDX - M12x80	10	100%	100%	90%	60%	90%	0.14 – 0.21	60%	0.138	0.138	0%	100%
M16												
Bumax 88 - M16x80	10	100%	100%	100%	60%	100%	0.13 – 0.17	90%	0.136	0.075	0%	100%
Bumax 109 - M16x100	10	100%	100%	30%	40%	40%	0.11 – 0.22	60%	0.151	0.231	0%	100%
Bumax LDX - M16x100	10	100%	100%	30%	40%	80%	0.11 – 0.15	100%	0.123	0.127	0%	100%
Bumax DX - M16x100	10	100%	100%	20%	20%	30%	0.12 – 0.19	70%	0.150	0.169	0%	100%
M20												
Bumax 88 - M20x100 (2013)	5	100%	100%	0%	0%	0%	0.21 – 0.33	0%	0.239	0.217	0%	20%
Bumax 88 - M20x100 (2015)	10	100%	100%	90%	30%	90%	0.12 – 0.17	80%	0.145	0.118	0%	100%
Bumax 109 - M20x140	10	100%	40%	0%	0%	0%	0.25 – 0.26	0%	0.255	0.023	0%	100%
Bumax LDX - M20x100	10	100%	100%	0%	0%	30%	0.10 – 0.15	100%	0.120	0.148	0%	100%
Bumax DX - M20x100	10	100%	100%	0%	20%	30%	0.10 – 0.15	100%	0.121	0.158	0%	100%
M24												
Bumax 88 - M24x100	10	100%	100%	50%	10%	30%	0.10 – 0.22	60%	0.151	0.235	0%	30%

Tabella 6.8 Risultati delle prove svolte da SIROCO sul serraggio di bulloni con lubrificanti Molykote. Fonte: [29]

Tested series	n [-]	$F_{p,C}^*$	$F_{p,C}$	$F_{bi,max}$	$\Delta\Theta_{1i,min}$ ≥ 120°	$\Delta\Theta_{2i,min}$ ≥ 240°	k-values [-]	k-class K1 $0.10 \le k_i \le 0.16$	k-class K2 $0.10 \le k_m \le 0.23$	k-class K2 $V_k \le 0.06$	Fracture	Galling
M12x80												
SDX - Molykote 1000 spray	10	100%	100%	100%	100%	100%	0.12 – 0.16	100%	0.139	0.097	70%	100%
M16x100												
88 - Molykote 1000 spray	10	100%	100%	90%	90%	90%	0.10 – 0.16	100%	0.129	0.150	50%	70%
109 - Molykote 1000 spray	10	100%	100%	100%	100%	100%	0.11 – 0.14	100%	0.130	0.080	0%	100%
109 - Molykote D-321R spray	10	100%	100%	100%	100%	100%	0.10 – 0.12	100%	0.112	0.053	10%	100%
LDX - Molykote 1000 spray	10	100%	100%	90%	100%	100%	0.12 – 0.15	100%	0.133	0.075	0%	100%
DX - Molykote 1000 spray	10	100%	100%	100%	100%	100%	0.14 – 0.17	80%	0.152	0.057	0%	100%
M20x100												
109 - Molykote 1000 spray	10	100%	100%	0%	60%	70%	0.10 – 0.15	100%	0.132	0.128	0%	100%
LDX - Molykote 1000 spray	10	100%	100%	0%	40%	70%	0.10 – 0.13	100%	0.118	0.082	0%	100%
DX - Molykote 1000 spray	10	100%	100%	30%	70%	70%	0.09 – 0.15	90%	0.124	0.128	0%	100%

I risultati di SIROCO vengono presentati nelle **Tabelle 6.7, 6.8**. Nella **Tabella 6.7** vengono riportati i risultati delle prove effettuati su bulloni lubrificati con Gleitmo®1952V,

tipico lubrificante per l'acciaio inossidabile. Nella **Tabella 6.8** vengono invece presentati i risultati del serraggio di bulloni lubrificati con il materiale Molykote, tecnica che favorisce un miglior serraggio, raggiungendo più spesso i parametri imposti dalla UNI EN 14399-3.

6.3.1. Fattore k

Il fattore k ottenuto nelle prove di serraggio svolte, come visibile nella **Tabella 6.9**, risulta essere piuttosto sempre elevato, con valori che si attestano vicino a 0,30. Sono valori molto distanti da quelli ottenuti nelle prove di precarico effettuate da SIROCO, in cui il fattore k è quasi sempre minore di 0,20. La causa principale è sicuramente data dal fatto che lubrificando il bullone è più semplice ottenere un precarico elevato con una coppia più piccola, poiché una quota parte minore di coppia viene persa in attrito. Inoltre, i valori ottenuti non rientrano né nella classificazione K1, né nella classificazione K2 proposta dalla UNI EN 14399-2 [30] per le unioni in acciaio al carbonio, infatti per rientrare nel K1 tutti i valori i-esimi devono stare nell'intervallo 0,10-0,16 mentre per il K2 il valore medio deve essere compreso nell'intervallo 0,10-0,23 con anche un coefficiente di variazione minore di 0,06. Tuttavia, ciò non implica che non possano essere utilizzati e anzi, raggiungendo una buona attendibilità, si potrebbe definire un nuovo intervallo per bulloni in acciaio inossidabile ad attrito senza lubrificanti.

Tabella 6.9 Riassunto dei fattori k ottenuti dalle prove di serraggio.

	M8-25br	**M8-40**	**M10-30**	**M10-40**	**M12-40**
k_1	0,36	0,35	0,41	0,23	0,31
k_2	0,33	0,30	0,32	0,34	0,30
k_3	0,35	0,21	0,24	0,31	0,28
k_4	0,32	0,29	0,42	0,31	0,27
k_5	0,39	0,31	0,32	0,28	0,29
k_6	-	0,34	-	-	-
$\mathbf{k_m}$	0,35	0,29	0,34	0,29	0,29
$\mathbf{s_k}$	0,03	0,05	0,08	0,04	0,02
$\mathbf{V_k}$	0,09	0,16	0,22	0,13	0,06

Tuttavia, anche per quanto riguarda il coefficiente di variazione si sono ottenuti valori molto elevati, come si può vedere nella **Tabella 6.9**, quindi risulta difficile poter ipotizzare un reale intervallo che non sia troppo ampio e che possa valere sempre, poiché si rischia il sovra serraggio.

Dunque, mentre SIROCO [29] ha ottenuto valori del fattore k che spesso rientravano in una delle due classi, più in particolare nella classificazione K1 per circa il 60% dei provini testati lubrificati con Gleitmo®1952V e il 100% nel K1 e talvolta anche nella K2 per i provini lubrificati con Molykote, nel caso dei test effettuati senza lubrificante non si è mai riusciti a rientrare in una delle due classificazioni definite per l'acciaio al carbonio.

6.3.2. Precarico F_{pc}

Il precarico raggiunto nelle prove svolte raggiunge solo alcune volte i precarichi $F_{p,C}$ definiti da normativa, riassunti nella **Tabella 6.10**. Tuttavia, anche quando viene raggiunto ci si trova troppo vicino al picco del grafico carico-coppia ed è per questo che si è deciso di tenere in conto nei calcoli del valore $F_{bi,spec}$, precarico corrispondente alla coppia definita dal produttore. Ovvero si è cercato di considerare un precarico minore da poter utilizzare in progetto, in modo da essere sufficientemente lontani dal problema del sovra serraggio, ovvero di superare il picco di forza ottenibile nel bullone o la rottura del bullone. Questo argomento viene trattato in modo più approfondito nel paragrafo 9.1, ove si ricerca un valore di precarico valido in progetto per le unioni bullonate in acciaio inossidabile ad attrito senza lubrificante.

Tabella 6.10 Precarichi $F_{p,C}$ secondo normativa.

	A_s	f_{ub}	$F_{p,C}$
	[mm^2]	[MPa]	[kN]
M8 A2-70	36,6	700,0	17,9
M10 A2-70	58,0	700,0	28,4
M12 A2-80	84,3	800,0	47,2

Per quanto riguarda i risultati ottenuti invece da SIROCO, il 100% dei bulloni testati con qualsiasi tipo di lubrificante ha raggiunto il precarico $F_{p,C}$, come definito da UNI EN 14399-2 [30].

6.3.3. Precarico F_{bimax}

Il precarico $F_{bi,max}$ non viene mai raggiunto, e i valori massimi di forza sono piuttosto lontani dalla definizione data dalla UNI EN 14399-2:

$$F_{bi,max} \geq 0{,}9\, f_{ub}\, A_s \qquad \textbf{(6.1)}$$

Nel caso di SIROCO invece, il precarico $F_{bi,max}$ veniva rispettato per circa il 40% dei provini lubrificati con Gleitmo®1952V, mentre per il 70% dei provini lubrificati con Molykote.

6.3.4. Duttilità dell'unione bullonata

La duttilità della giunzione ad attrito, come già riportato nel paragrafo 5.1.3, viene definita dalle differenze di angoli $\Delta\theta_{1i}$ e $\Delta\theta_{2i}$. Nei test svolti i bulloni sono di geometria secondo la norma UNI EN 4017, molto simili agli assiemi HR in acciaio al carbonio, dunque per verificare la duttilità si è scelto di tenere conto i valori degli angoli dati dalla UNI EN 14399-3 sugli HR. Per i bulloni delle prove, che hanno un rapporto tra clamp length e diametro tra 2 e 6, si sono quindi scelti i valori minimi pari a 120° e 240°, rispettivamente per $\Delta\theta_{1i}$ e $\Delta\theta_{2i}$. I risultati vengono raccolti nelle tabelle seguenti:

Tabella 6.11 Duttilità secondo normativa UNI EN 14399-3 dei bulloni M8-25br.

Provino	$\theta_{1i,spec}$ [°]	θ_{max} [°]	θ_{2i} [°]	$\Delta\theta_{1i}$ [°]	$\Delta\theta_{2i}$ [°]	$\Delta\theta_{1i}$>120°	$\Delta\theta_{2i}$>240°
M8-25-br-1	183,9	266,9	330,8	83,0	146,8	NO	NO
M8-25-br-2	205,8	430,4	390,1	224,6	184,3	Sì	NO
M8-25-br-3	213,3	289,1	435,3	75,8	222,0	NO	NO
M8-25-br-4	213,7	352,6	526,6	138,9	312,8	Sì	Sì
M8-25-br-5	221,3	388,0	472,9	166,7	251,6	Sì	Sì

Tabella 6.12 Duttilità secondo normativa UNI EN 14399-3 dei bulloni M8-40.

Provino	$\theta_{1i,spec}$ [°]	θ_{max} [°]	θ_{2i} [°]	$\Delta\theta_{1i}$ [°]	$\Delta\theta_{2i}$ [°]	$\Delta\theta_{1i}$ >120°	$\Delta\theta_{2i}$ >240°
M8-40-1	106,6	192,1	236,5	85,5	129,9	NO	NO
M8-40-2	112,9	220,2	416,3	107,3	303,3	NO	Sì
M8-40-3	94,1	140,0	374,2	45,9	280,1	NO	Sì
M8-40-4	90,8	205,5	396,6	114,7	305,8	NO	Sì
M8-40-5	141,4	205,9	394,3	64,5	252,9	NO	Sì
M8-40-6	84,7	174,0	349,0	89,3	264,3	NO	Sì

Tabella 6.13 Duttilità secondo normativa UNI EN 14399-3 dei bulloni M10-30.

Provino	$\theta_{1i,spec}$ [°]	θ_{max} [°]	θ_{2i} [°]	$\Delta\theta_{1i}$ [°]	$\Delta\theta_{2i}$ [°]	$\Delta\theta_{1i}$ >120°	$\Delta\theta_{2i}$ >240°
M10-30-1	159,5	305,8	414,0	146,3	254,5	Sì	Sì
M10-30-2	175,9	264,2	417,6	88,3	241,7	NO	Sì
M10-30-3	154,0	232,7	391,1	78,7	237,1	NO	NO
M10-30-4	143,5	392,7	422,1	249,2	278,6	Sì	Sì
M10-30-5	165,4	341,5	448,5	176,1	283,0	Sì	Sì

Tabella 6.14 Duttilità secondo normativa UNI EN 14399-3 dei bulloni M10-40.

Provino	$\theta_{1i,spec}$ [°]	θ_{max} [°]	θ_{2i} [°]	$\Delta\theta_{1i}$ [°]	$\Delta\theta_{2i}$ [°]	$\Delta\theta_{1i}$ >120°	$\Delta\theta_{2i}$ >240°
M10-40-1	81,1	215,0	189,4	133,9	108,3	Sì	NO
M10-40-2	80,4	165,1	340,0	84,7	259,5	NO	Sì
M10-40-3	72,9	195,9	335,6	123,0	262,8	Sì	Sì
M10-40-4	73,1	152,9	292,4	79,8	219,3	NO	NO
M10-40-5	111,2	274,6	667,4	163,4	556,3	Sì	Sì

Tabella 6.15 Duttilità secondo normativa UNI EN 14399-3 dei bulloni M12-40.

Provino	$\theta_{1i,spec}$ [°]	θ_{max} [°]	θ_{2i} [°]	$\Delta\theta_{1i}$ [°]	$\Delta\theta_{2i}$ [°]	$\Delta\theta_{1i}$ >120°	$\Delta\theta_{2i}$ >240°
M12-40-1	84,1	180,6	325,1	96,5	241,0	NO	Sì
M12-40-2	79,8	141,2	302,8	61,4	223,1	NO	NO
M12-40-3	116,5	174,3	343,1	57,8	226,6	NO	NO
M12-40-4	88,3	149,6	266,4	61,3	178,1	NO	NO
M12-40-5	85,9	122,6	262,3	36,7	176,4	NO	NO

La duttilità viene raggiuta perciò solo in circa il 50% dei casi, percentuale simile ottenuta da SIROCO nel caso dei bulloni lubrificati con Gleitmo®1952V, mentre con il Molykote la duttilità dell'unione è stata ottenuta per più del 90% dei test.

Capitolo 7

7. Prove di laboratorio: galling

Le verifiche sulla possibile presenza di galling sono state effettuate sui bulloni oggetto di prova di idoneità al precarico, test effettuati a Genova e ampiamente discussi nel capitolo 6 precedente. Come già descritto nel paragrafo 5.4, è importante definire se sono presenti o meno delle striature e dunque se il bullone risulti danneggiato dal serraggio poiché in primo luogo, se questo avviene prima ancora di raggiungere il precarico voluto, produce degli scatti nel serraggio che causano una minore affidabilità nel raggiungimento del precarico ipotizzato e, in secondo luogo, se i bulloni dovessero essere poi riutilizzati in futuro, ciò non potrebbe avvenire nel caso in cui fossero danneggiati.

Generalmente, se si utilizza un adatto lubrificante come avviene nel caso dei bulloni ad alta resistenza in acciaio al carbonio adatti al precarico, il galling si manifesta solo se il serraggio viene portato a livelli elevati fino a superare il valore di precarico massimo nel bullone. Se invece non viene usato un lubrificante, come nelle prove in esame di tale documento, vi è la possibilità che il galling si presenti già prima di raggiungere il precarico di progetto, causando problemi di affidabilità e, nel caso sia previsto, il riutilizzo.

7.1. Modalità di prova

La prova effettuata sui bulloni è risultata essere un semplice test visivo sui provini testati a serraggio ed è stata svolta seguendo tali procedure:

- I bulloni sono stati portati tutti a rottura nella prova di serraggio, dunque il primo passo è stato ricomporre le parti di ogni bullone in modo che coincidessero. È

risultato però difficile capire precisamente quali fossero le rondelle proprie di ogni vite;

- Si sono visionate, procedendo a scattare anche foto di ogni provino, tutte le parti soggette ad attrito durante il test di serraggio ovvero: testa della vite, rondelle e dado.
- Per ogni parte del bullone si è osservata la presenza di danneggiamento sotto due forme: linee continue e protuberanze.

Per ogni bullone si sono ottenute sei valutazioni sulla presenza di danneggiamento. Poiché gli accoppiamenti non sono precisamente certi, si è deciso di definire la non presenza di galling nel caso in cui il danneggiamento non superi 1 caso sui 6 sopra detti, ovvero si è accettato per il 'NO' galling che una valutazione su sei non passi il test. Quindi nel caso di due 'SI'' nelle 6 valutazioni allora il galling è presente.

Figura 7.1 Esempio di galling ben visibile sulla rondella e sul dado del provino M12-40-2.

7.2. Trattamento dei dati

Le prove visive, come riportato nelle **Tabella 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5**, permettono di capire se vi è la presenza o meno di danneggiamento. Nel caso in cui la risposta sia positiva, si

possono osservare i grafici di carico di precarico-coppia per comprendere se il galling sopraggiunge prima o dopo il picco della forza massima. Secondo lo studio SIROCO, come già descritto nel paragrafo 5.4.1, il galling è riconoscibile nei grafici poiché si possono notare delle riduzioni di coppia improvvise e poi una nuova crescita. Questa riduzione è infatti causata dallo scorrimento tra le parti del bullone che porta al danneggiamento.

Nelle seguenti pagine vengono riportate, assieme alle tabelle di valutazione, anche le immagini di ogni singolo bullone, in cui si può ben notare la presenza del danneggiamento causato dalla rotazione tra le superfici a contatto, e anche i grafici di carico-coppia nelle **Figura 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6** in cui viene evidenziata la zona dove avviene il galling attraverso dei riquadri in rosso. [1]

- **M8 – 25-br**

[1] I grafici talvolta riportano una prova in meno poiché alcuni bulloni tenuti in conto in questo test sul galling sono stati utilizzati solo per provare il funzionamento della apparecchiatura da laboratorio e non sono perciò stati utilizzati per la stesura dei grafici carico-coppia.

Tabella 7.1 Test di galling sui bulloni M8-25br.

M8_25_br A2 70	Presenza di striature							
Provino	Testa della vite		Rondelle		Dado			Galling
	linee continue	Protuberanze	linee continue	Protuberanze	linee continue	Protuberanze		
M8_25_br_1	NO	NO	SI'	SI'	SI'	SI'		SI'
M8_25_br_2	NO	NO	SI'	NO	SI'	NO		SI'
M8_25_br_3	NO	NO	SI'	NO	NO	NO		NO
M8_25_br_4	NO	NO	SI'	SI'	NO	NO		SI'
M8_25_br_5	NO	NO	SI'	SI'	SI'	NO		SI'
M8_25_br_6	NO	NO	SI'	NO	SI'	NO		SI'

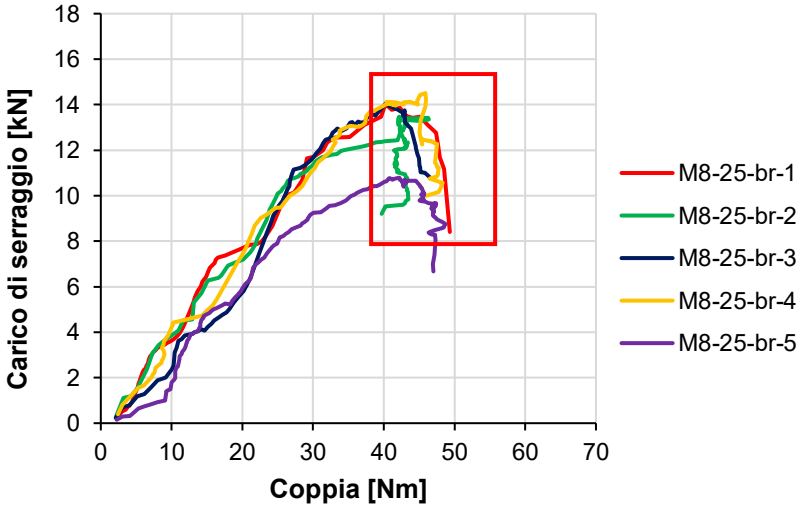

Figura 7.2 Grafico carico-coppia del bullone M8-25-br con relativa indicazione del galling.

- **M8 – 40**

Tabella 7.2 Test di galling sui bulloni M8-40.

M8_40 A2 70	Presenza di striature							
Provino	Testa della vite		Rondelle		Dado			Galling
	linee continue	Protuberanze	linee continue	Protuberanze	linee continue	Protuberanze		
M8_40_1	NO	NO	SI'	SI'	NO	SI'		SI'
M8_40_2	NO	NO	SI'	SI'	SI'	SI'		SI'
M8_40_3	NO	NO	SI'	SI'	NO	SI'		SI'
M8_40_4	NO	NO	SI'	SI'	NO	SI'		SI'
M8_40_5	NO	NO	SI'	NO	SI'	NO		SI'
M8_40_6	NO	NO	SI'	SI'	NO	SI'		SI'

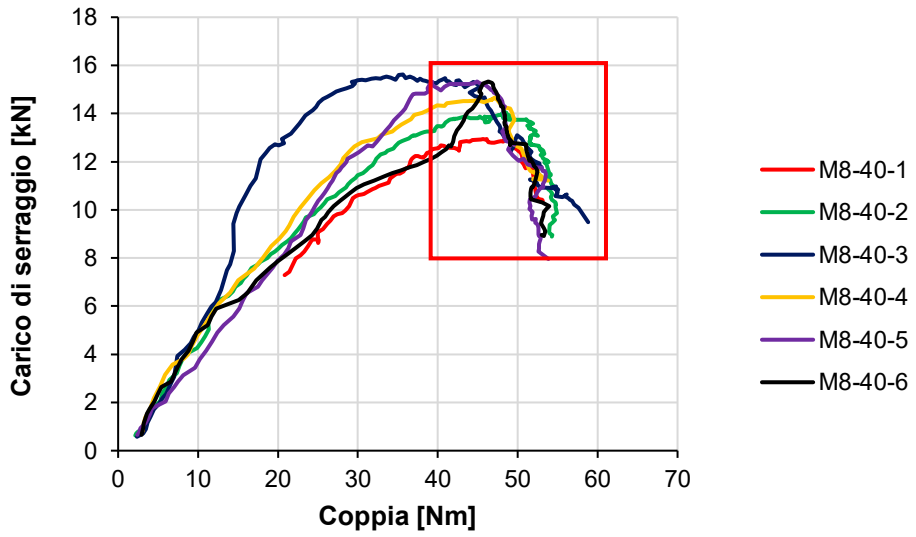

Figura 7.3 Grafico carico-coppia del bullone M8-40 con relativa indicazione del galling.

- **M10 – 30**

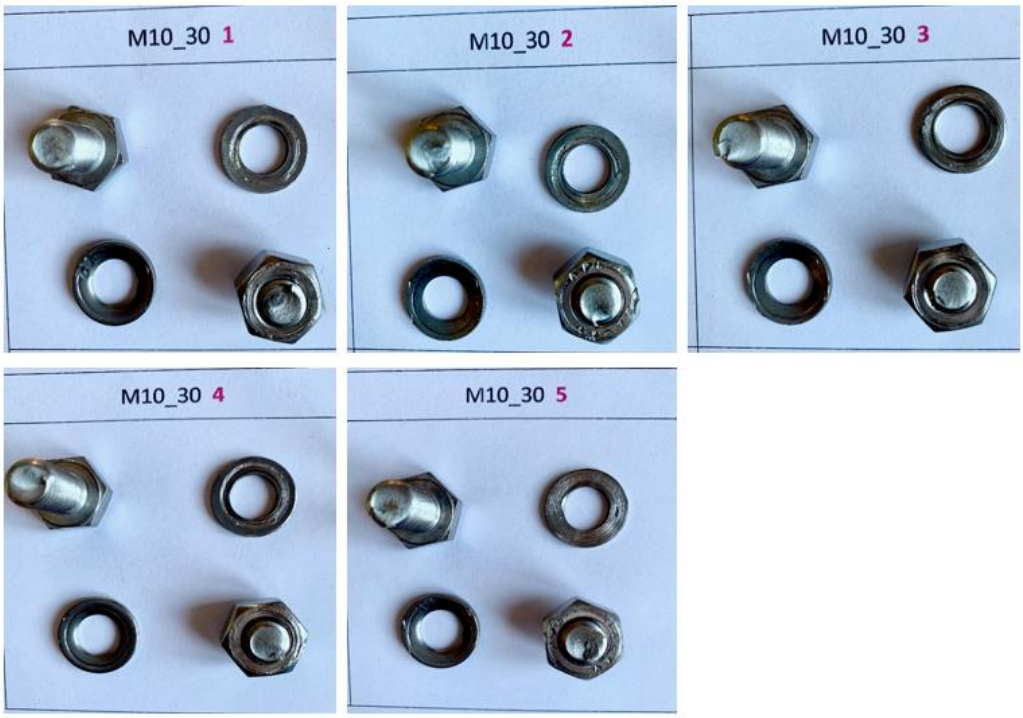

Tabella 7.3 Test di galling sui bulloni M10-30.

M10_30 A2 70	Presenza di striature							
Provino	Testa della vite		Rondelle		Dado			Galling
	linee continue	Protuberanze	linee continue	Protuberanze	linee continue	Protuberanze		
M10_30_1	NO	NO	SI'	SI'	SI'	SI'		SI'
M10_30_2	NO	NO	SI'	SI'	SI'	SI'		SI'
M10_30_3	NO	NO	SI'	NO	SI'	NO		SI'
M10_30_4	NO	NO	SI'	SI'	SI'	SI'		SI'
M10_30_5	NO	NO	SI'	SI'	SI'	NO		SI'

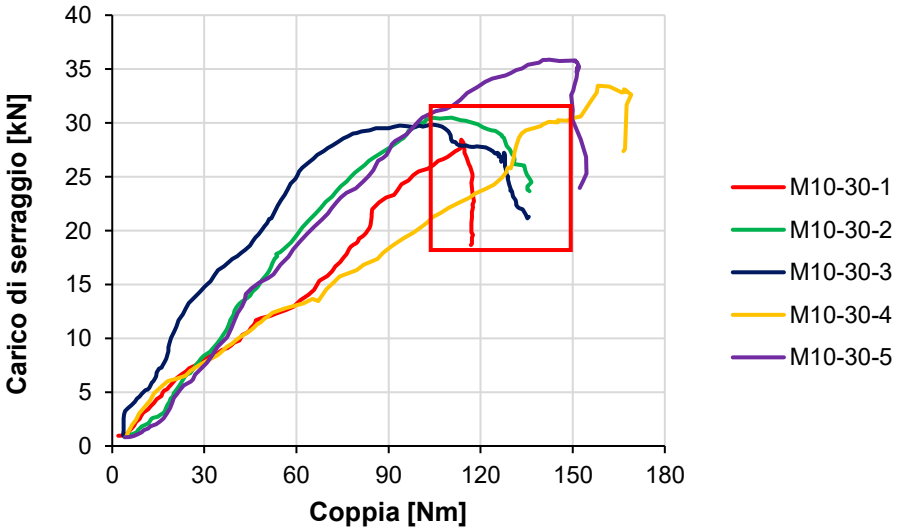

Figura 7.4 Grafico carico-coppia del bullone M10-30 con relativa indicazione del galling.

- **M10 – 40**

Tabella 7.4 Test di galling sui bulloni M10-40.

M10_40 A2 70	Presenza di striature							
Provino	Testa della vite		Rondelle		Dado			Galling
	linee continue	Protuberanze	linee continue	Protuberanze	linee continue	Protuberanze		
M10_40_1	NO	NO	SI'	NO	SI'	NO		SI'
M10_40_2	NO	NO	SI'	SI'	SI'	SI'		SI'
M10_40_3	NO	NO	SI'	NO	SI'	SI'		SI'
M10_40_4	NO	NO	SI'	NO	NO	NO		NO
M10_40_5	NO	NO	SI'	SI'	SI'	SI'		SI'

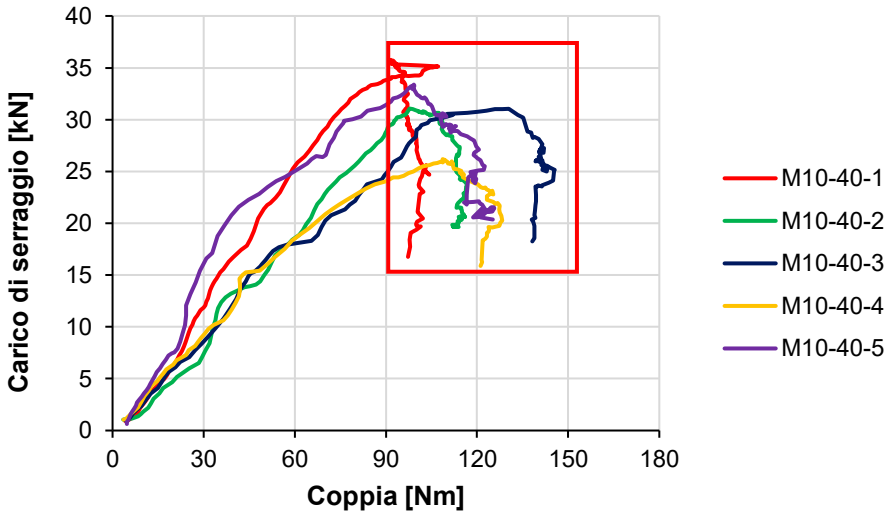

Figura 7.5 Grafico carico-coppia del bullone M10-40 con relativa indicazione del galling.

- **M12 – 40**

Tabella 7.5 Test di galling sui bulloni M12-40.

M12_40 A2 80	Presenza di striature							
Provino	Testa della vite		Rondelle		Dado			Galling
	linee continue	Protuberanze	linee continue	Protuberanze	linee continue	Protuberanze		
M12_40_1	NO	NO	SI'	NO	NO	NO		NO
M12_40_2	SI'	NO	SI'	SI'	SI'	SI'		SI'
M12_40_3	NO	NO	SI'	NO	NO	NO		NO
M12_40_4	NO	NO	SI'	SI'	NO	SI'		SI'
M12_40_5	NO	NO	SI'	SI'	NO	SI'		SI'
M12_40_6	NO	NO	NO	NO	NO	SI'		NO

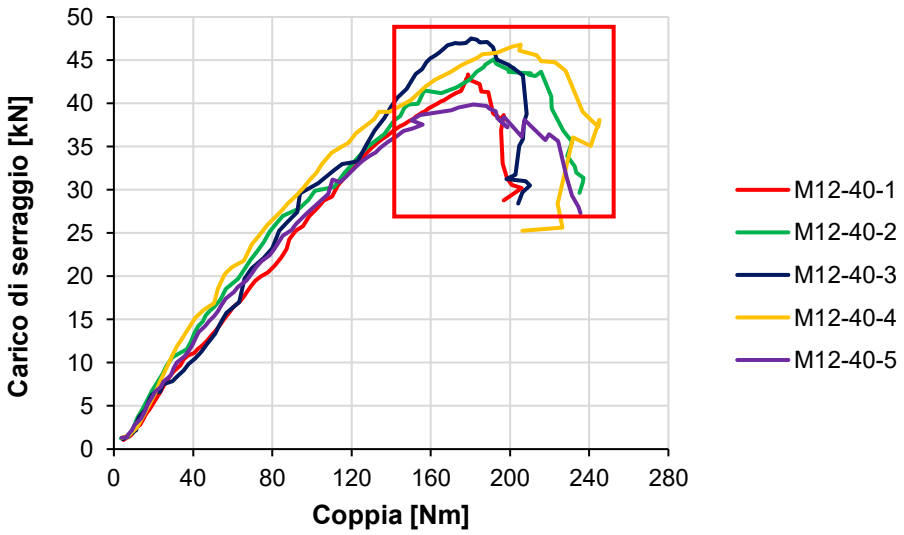

Figura 7.6 Grafico carico-coppia del bullone M12-40 con relativa indicazione del galling.

In questo caso sono presenti meno salti nei valori della coppia e questo rispecchia la presenza di meno danneggiamento, come notato nel test visivo.

7.3. Commenti e confronti con studi SIROCO

Nel test svolti da parte di SIROCO [29] il galling è presente quasi nel 100% delle prove. Tuttavia, come già descritto nel paragrafo 5.4.1, il bullone viene danneggiato dalle striature solamente quando viene serrato oltre il precarico di progetto ovvero nella zona plastica del grafico carico-coppia. Dunque, nel caso delle prove di SIROCO il galling non risulta essere un problema, poiché serrando al precarico di progetto $F_{p,C}$, il danneggiamento del bullone viene evitato.

Anche nelle prove in esame di questo documento il galling è piuttosto presente in tutti i provini, tranne nel caso dei bulloni M12-40, in cui solo il 50% risulta danneggiato. Da notare però che, come per i test di SIROCO, le striature nascono solo dopo aver raggiunto il picco massimo di forza, infatti le piccole ondulazioni nel tratto precedente possono essere dovute al metodo di misura con chiave dinamometrica manuale e non in modo elettrico come per SIROCO e a piccoli ingranamenti durante il serraggio. Dunque, questo danneggiamento non risulta essere un problema in progetto, infatti i precarichi applicati per i bulloni in acciaio inossidabile in oggetto, come riportati nel capitolo 6 e come descritti poi nel capitolo 9, rimangono abbondantemente nel tratto "lineare" del grafico.

Capitolo 8

8. Prove di laboratorio: scorrimento

In questo capitolo vengono presentate le prove di laboratorio relative alla determinazione della resistenza a scorrimento di due tipologie di struttura differenti utilizzate nel progetto "Sostituzione facciate ventilate in granito rosso Balmoral del fabbricato TO_CIT11, Manica d'approdo": il collegamento dei montanti ai traversi e il collegamento tra le staffe e i montanti. Rispettivamente, la prima tipologia di struttura viene denominata "carrello" per la sua forma, ovvero due piatti che possono muoversi lungo il montante, e la seconda "piastre" in quanto lo scorrimento può avvenire tra due superfici piatte.

8.1. Modalità e strumenti di prova

Sia per i test di scorrimento sulle piastre sia per quelli sui carrelli, per il serraggio dei bulloni sono state utilizzate le seguenti chiavi dinamometriche:

- Chiave dinamometrica 1:

Costruttore	USAG
Capacità	200 Nm
Modello	810n 200
Numero di serie	P 260610
Ente certificatore	Centro LAT n. 166 – UTENSIL LINE
Certificato di taratura	20-G0042/2020 del 17/02/2020

- Chiave dinamometrica 2:

Costruttore	USAG
Capacità	50 Nm
Modello	810n
Numero di serie	H 2100081
Ente certificatore	Centro LAT n. 166 – UTENSIL LINE
Certificato di taratura	20-G0043/2020 del 17/02/2020

Con esse si sono serrati i bulloni mediante il metodo della coppia, raggiungendo le coppie di serraggio riportate in **Tabella 8.1**.

Tabella 8.1 Coppie di serraggio utilizzate nelle prove di scorrimento.

Tipologia	Coppia di serraggio (Nm)
M8 A2-70	23,5
M10 A2-70	48,4
M12 A2-80	110,0

Prove di scorrimento delle piastre

Ogni prova sulle piastre è stata svolta utilizzando due piastre in acciaio inossidabile AISI 304 aventi foro asolato, unite tramite un bullone in acciaio inossidabile e dotate di barre per il collegamento alla pressa idraulica come visibile in **Figura 8.1**. Le prove sono state condotte con tre tipologie di bulloni, M8 classe A2-70, M10 classe A2-70 e M12 classe A2-80 che sono stati prima serrati con le coppie descritte in **Tabella 8.1** e poi posti in sala a temperatura controllata. Infatti, per ciascuna tipologia sono stati preparati sei campioni da provare a 72 ore dal momento del serraggio, e sei da provare dopo 180 giorni, potendo così controllare il rilassamento sia già a tre giorni sia dopo un tempo più lungo.

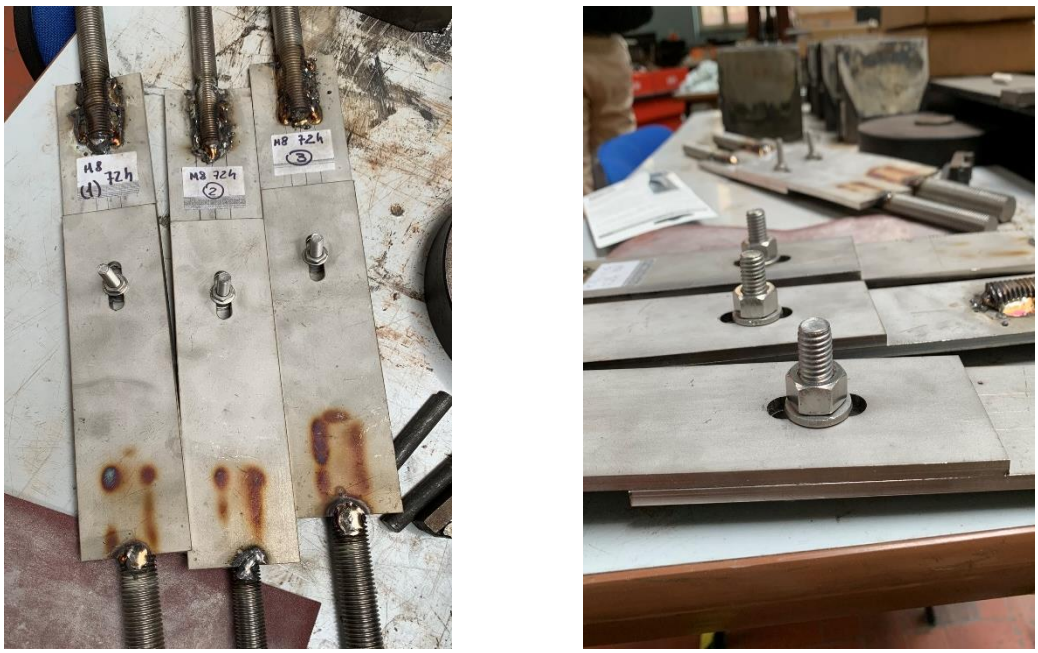

Figura 8.1 Provini testati per lo scorrimento delle piastre, bulloni M8 su foro asolato.

La prova è consistita nell'applicazione di un carico di trazione in controllo di spostamento con velocità pari a 0,5 mm/min. Durante la prova sono stati misurati in continuo la forza applicata e lo scorrimento relativo e sono stati utilizzati i seguenti strumenti, visibili anche nella **Figura 8.2**, con le rispettive caratteristiche:

- Pressa idraulica:

Costruttore	MTS Systems Corporation (U.S.A.)
Capacità	±250 kN
Modello	312.31 - Telaio 250 kN
Numero di serie	1103
Ente certificatore	Centro LAT n. 139 – Politecnico di Torino
Certificato di taratura	154/2019 del 02/09/2019
Classe	0.5 (UNI EN ISO 7500-1:2018)

- Trasduttori di spostamento:

Costruttore	HBM
Modello	WI
Spostamento massimo	2 mm

- Acquisitore:

Costruttore	HBM
Modello	Spider8
Software acquisizione	Catman Easy 3.5

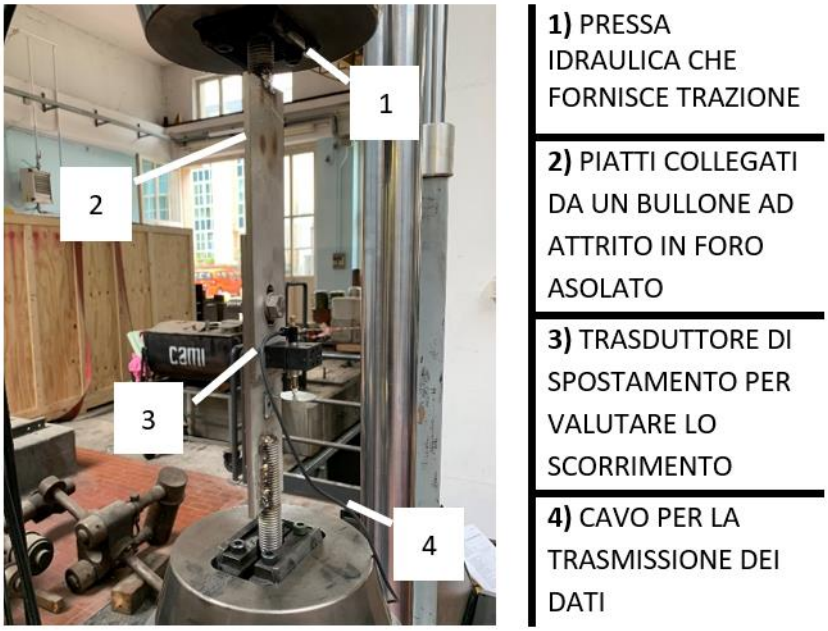

Figura 8.2 Schema di prova di scorrimento delle piastre.

Prove di scorrimento dei carrelli

Le prove di scorrimento del carrello normale e zoppo sul montante hanno per oggetto la determinazione del carico di scorrimento del carrello soggetto ad un carico verticale come mostrato in **Figura 8.3**. I provini sono stati assemblati e poi installati su un telaio di prova rigido. I bulloni M8 sono stati serrati utilizzando la coppia di serraggio riportata in **Tabella 8.1.** Per ciascuna tipologia sono stati assemblati sei campioni, tre da provarsi a 72 ore e tre dopo sei mesi. I campioni sono stati conservati in camera a temperatura e umidità controllate.

Figura 8.3 Carrello normale con due bulloni M8 sulla sinistra, carrello zoppo con un bullone M8 sulla destra.

Durante le prove sono stati misurati in continuo il carico applicato e lo spostamento verticale del carrello (direzione Y in **Figura 8.4**). Le prove sono state effettuate applicando in continuo il carico fino al sopraggiungimento dello scorrimento del carrello. Per le prove di scorrimento dei carrelli sono stati utilizzati i seguenti strumenti, visibili in **Figura 8.4,** con le rispettive caratteristiche:

- Martinetto oleodinamico con pompa idraulica:

Modello	ENERPAC RC140
Capacità	45 kN
Ente certificatore	Mastrlab – Politecnico di Torino

- Trasduttori di spostamento

Costruttore	Novotechnick
Modello	TR
Spostamento massimo	50 mm

- Acquisitore

Costruttore	HBM
Modello	Spider8
Software acquisizione	Catman Easy 3.5

- Sensore di pressione

Costruttore	HBM
Modello	P6
Pressione massima	500 bar

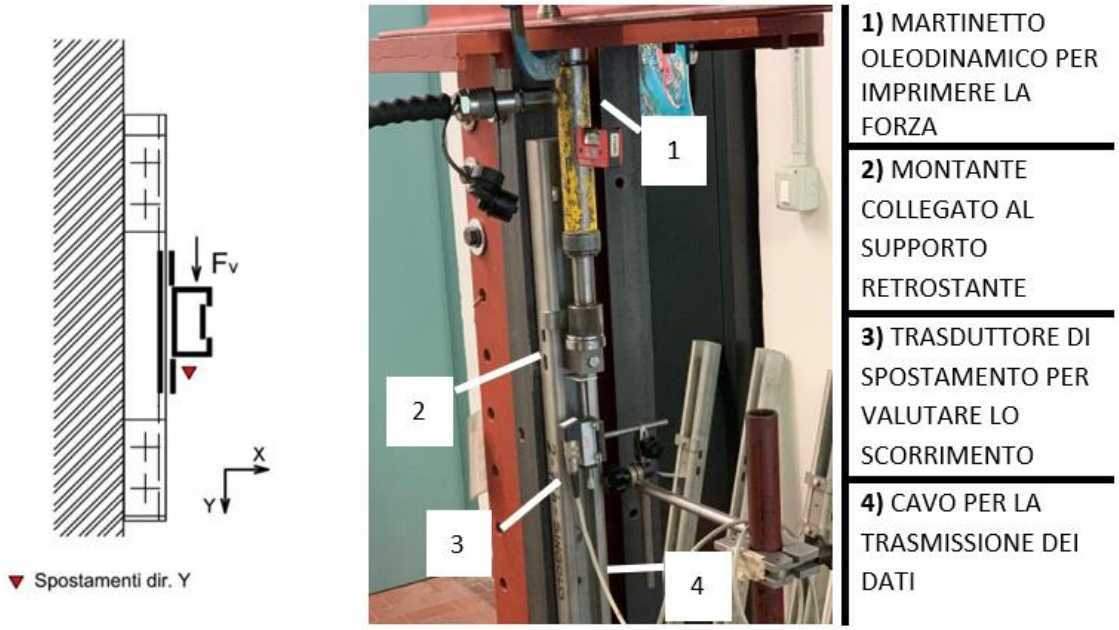

Figura 8.4 Schema di prova di scorrimento dei carrelli sui montanti.

8.2. Trattamento dei dati

In ogni prova sono stati misurati contemporaneamente forza applicata e scorrimento, perciò è possibile plottare una curva per vedere l'andamento dello spostamento dei piatti in funzione della crescita di carico. Dunque, nella trattazione dei dati, il primo step è stato ricavarsi tali grafici dalle misure acquisite e successivamente ricercare su di essi il valore di forza a scorrimento. Come riportato nel paragrafo 5.2.2, nel caso della prova di laboratorio utile a determinare il coefficiente di attrito delle superfici, l'Annex G della UNI EN 1090-2:2018 [31] prevede di considerare la forza a scorrimento a uno spostamento massimo di 0,15 mm, oppure ad uno spostamento minore se vi è un picco di forza precedente. Tuttavia, questa prova è differente da quella relativa alla determinazione dell'attrito,

anche perché si ha solo un trasduttore di spostamento e non otto posizionati in modo strategico. Per questo motivo si è scelto di considerare come valore di forza a scorrimento quello relativo al punto in cui sul grafico carico-scorrimento si nota una zona orizzontale, ovvero in cui si ha forza costante e scorrimento che incrementa, senza porre il vincolo dei 0,15 mm, come visibile nelle **Figura 8.5, 8.6, 8.7, 8.8, 8.9.**

Dopo aver ottenuto i valori della forza a scorrimento si è proceduto al calcolo del valore di progetto della resistenza a scorrimento, passando tramite il valore caratteristico. Ovvero si è calcolato il valore caratteristico e successivamente si è applicato il fattore di sicurezza previsto per le giunzioni ad attrito, in modo da ottenere un valore di resistenza ultima di progetto. Per determinare il valore caratteristico (percentile 5%) delle prove effettuate, si è svolto il calcolo secondo quanto previsto dalla UNI EN 1990:2006 – Annex D, par. "D.7.2" [48] che prevede:

- Calcolo della media dei valori m_x;
- Calcolo della varianza s_x^2 e il coefficiente di variazione V_x:

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - m_x)^2 \qquad \textbf{(8.1)}$$

In cui - n è il numero di prove effettuate;
- x_i sono i valori di resistenza a scorrimento della singola prova.

$$V_x = s_x / m_x \qquad \textbf{(8.2)}$$

- Da **Tabella 8.2** si ottiene il valore k_n che dipende dal numero di prove effettuate e dalla varianza, che può essere nota a priori o non conosciuta. In questo caso si tengono conto dei valori della varianza non conosciuta:

Tabella 8.2 Valori di k_n in funzione del numero di prove effettuate secondo UNI EN 1990. Fonte: [48]

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
V_X known	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
V_X unknown	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

- Si va ad ottenere la resistenza di progetto in cui si applica un coefficiente di sicurezza che è quello specifico che viene utilizzato anche in progetto, in questo caso γ_m = 1,25 (coefficiente di sicurezza per il calcolo della resistenza di progetto a scorrimento di un'unione bullonata):

$$X_d = \eta_d \frac{X_k}{\gamma_m} = \eta_d \frac{m_x\,(1 - k_n\,V_x)}{\gamma_m} \qquad \textbf{(8.3)}$$

In cui - X_k è il valore caratteristico delle prove;
- η_d è un fattore di conversione, in tal caso non necessario, dunque posto uguale a 1.

Nelle pagine seguenti vengono presentati i grafici forza-spostamento con i valori della forza a scorrimento scelti per i calcoli del valore di progetto riportato nelle tabelle successive. È da sottolineare che quelle presentate sono solamente le prove relative ai test effettuati dopo 72 ore dal serraggio poiché quelle a sei mesi non sono ancora state effettuate e verranno trattate in futuro. Per quanto riguarda le piastre, si è anche proceduto al calcolo della resistenza di progetto per una stessa giunzione ma serrata ad $F_{p,C}$, precarico teorico. Per tale calcolo si è considerata la **Formula (4.11)**, con valori presentati in **Tabella 8.3**, ovvero k_s per foro asolato, μ minimo da normativa per l'acciaio al carbonio e con una sezione resistente ad attrito, in quanto vi sono solo due piastre a contatto.

Tabella 8.3 Parametri per il calcolo della resistenza teorica secondo UNI EN 1993-1-8.

Parametri utilizzati per ottenere la res. teorica	
K_s (foro asolato)	0,63
n	1
μ	0,2
γ_{M3}	1,25

Prove di scorrimento delle piastre

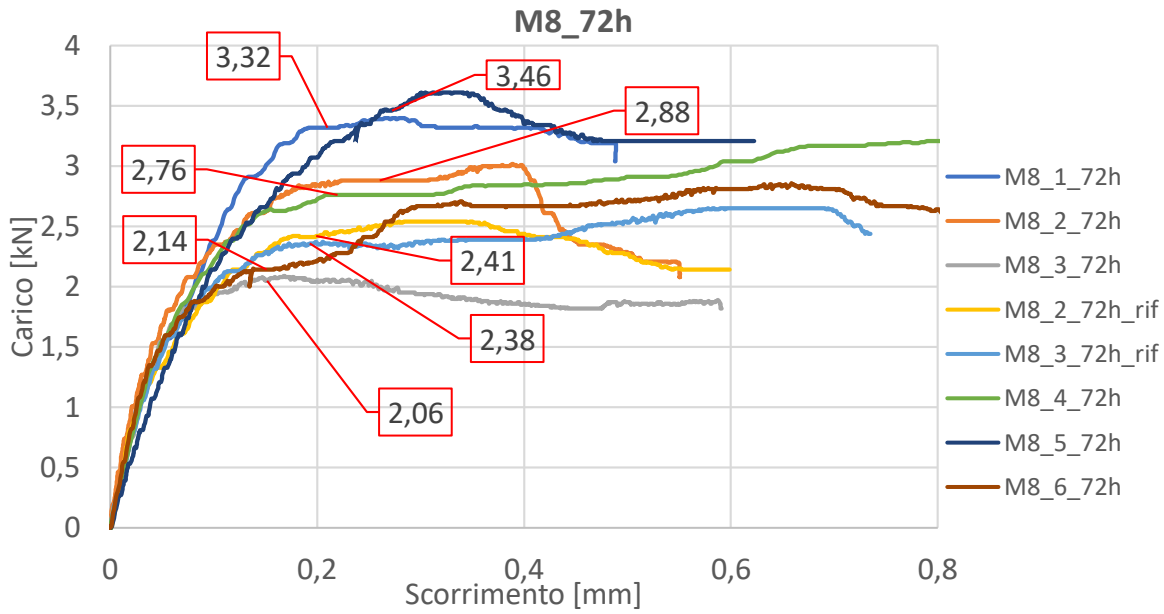

Figura 8.5 Grafico carico-scorrimento della giunzione con bullone M8.

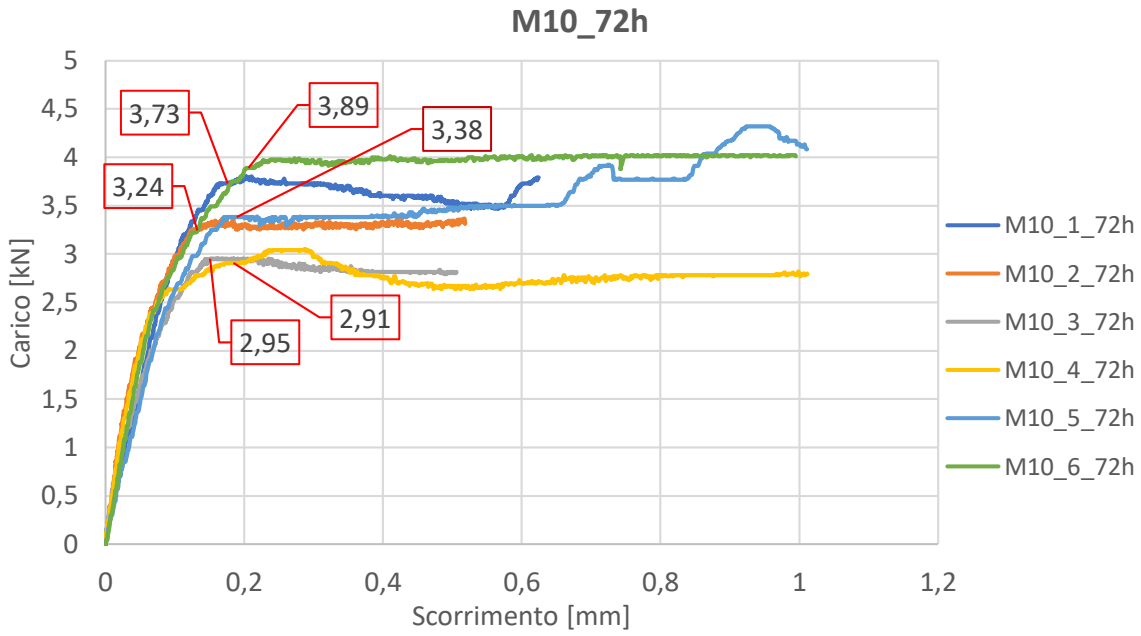

Figura 8.6 Grafico carico-scorrimento della giunzione con bullone M10.

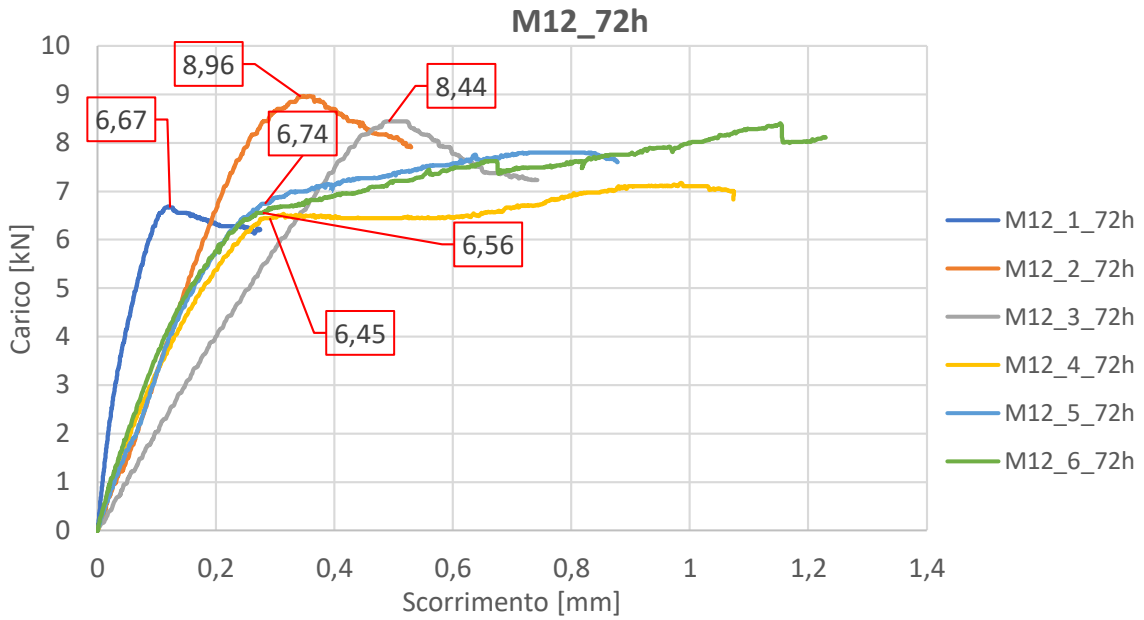

Figura 8.7 Grafico carico-scorrimento della giunzione con bullone M12.

Tabella 8.4 Calcolo della resistenza di progetto e teorica dell'unione con bullone M8.

BULLONI M8	
Prova	Carico a scorr.[kN]
M8-1	3,32
M8-2	2,88
M8-3	2,06
M8-4	2,76
M8-5	3,46
M8-6	2,14
M8-2 rif	2,41
M8-3 rif	2,38
numero prove	8
K_n (per n=8)	2,00
Resistenza di progetto da prove	
R_d [kN]	1,31
Resistenza teorica bulloni alta resistenza	
Res. Teorica [kN]	1,81

Tabella 8.5 Calcolo della resistenza di progetto e teorica dell'unione con bullone M10.

BULLONI M10	
Prova	Carico a scorr.[kN]
M10-1	3,73
M10-2	3,24
M10-3	2,95
M10-4	2,91
M10-5	3,38
M10-6	3,89
numero prove	6
K_n (per n=6)	2,18
Resistenza di progetto da prove	
R_d [kN]	1,98
Resistenza teorica bulloni alta resistenza	
Res. Teorica [kN]	2,86

Tabella 8.6 Calcolo della resistenza di progetto e teorica dell'unione con bullone M12.

BULLONI M12	
Prova	Carico a scorr.[kN]
M12-1	6,67
M12-2	8,96
M12-3	8,44
M12-4	6,45
M12-5	6,74
M12-6	6,56
numero prove	6
K_n (per n=6)	2,18
Resistenza di progetto da prove	
R_d [kN]	3,93
Resistenza teorica bulloni alta resistenza	
Res. Teorica [kN]	4,76

Prove di scorrimento dei carrelli

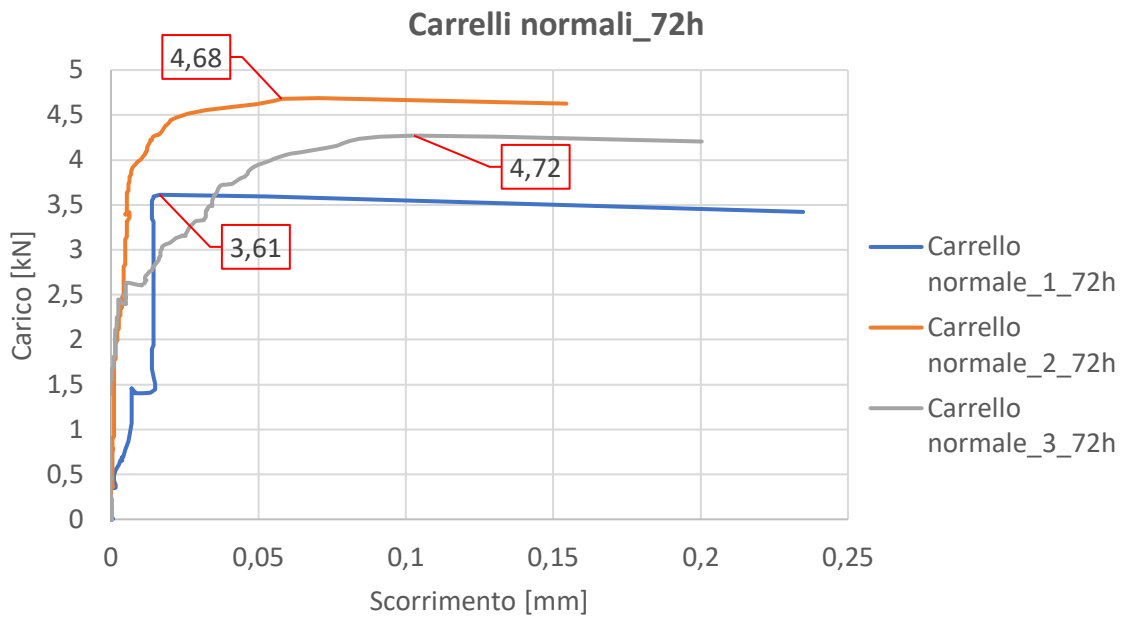

Figura 8.8 Grafico carico-scorrimento dei carrelli normali con due bulloni M8.

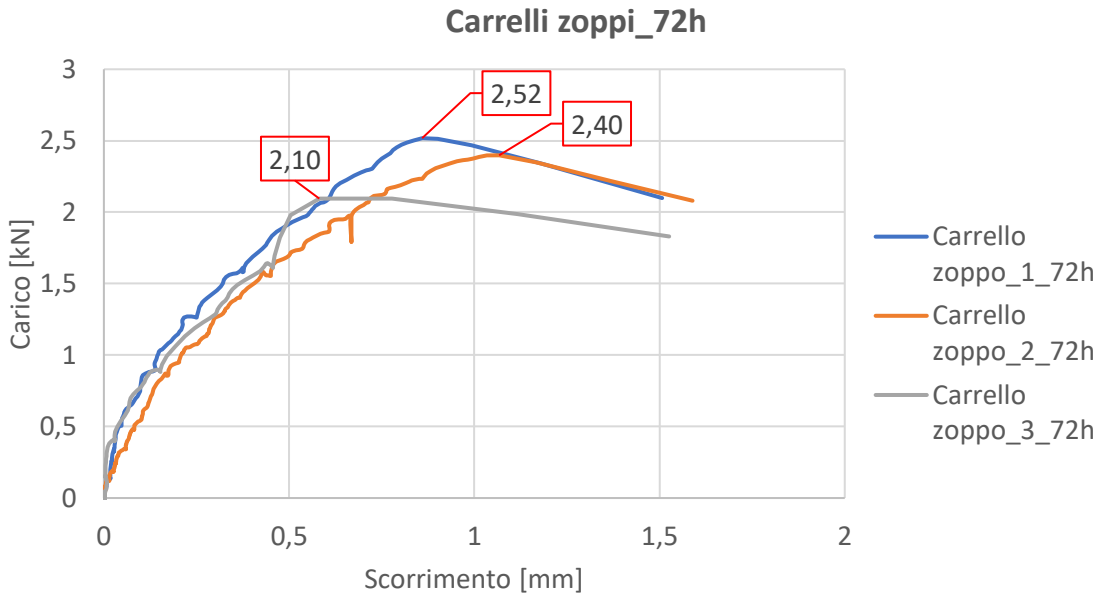

Figura 8.9 Grafico carico-scorrimento dei carrelli zoppi con un bullone M8.

Tabella 8.7 Calcolo della resistenza di progetto dei carrelli normali.

Carrelli normali	
Prova	Carico a scorr.[kN]
M8_doppio - 1	3,61
M8_doppio - 2	4,68
M8_doppio - 3	4,72
numero prove	3
K_n (per n=3)	3,37
Resistenza di progetto da prove	
R_d [kN]	1,77

Tabella 8.8 Calcolo della resistenza di progetto dei carrelli zoppi.

Carrelli zoppi	
Prova	Carico a scorr.[kN]
M8_zoppo - 1	2,52
M8_zoppo - 2	2,40
M8_zoppo - 3	2,10
numero prove	3
K_n (per n=3)	3,37
Resistenza di progetto da prove	
R_d [kN]	1,29

8.3. Confronti con valori teorici

Per quanto riguarda le piastre a scorrimento, i valori ottenuti trattando i dati con il metodo del valore caratteristico sono decisamente lontani dai valori teorici, calcolati con la $F_{p,C}$ secondo la normativa sui bulloni in acciaio al carbonio (ovvero considerando il 70% del carico massimo possibile sul bullone). Questo rispecchia i valori ottenuti nelle prove di idoneità al precarico e suggerisce che anche in questo caso con le coppie applicate si sono raggiunti precarichi minori rispetto ad $F_{p,C}$, portando poi ad avere minori resistenze a scorrimento. Le resistenze a scorrimento calcolate vengono presentate sotto forma di percentuale di quelle teoriche in **Tabella 8.9**, tuttavia è da sottolineare che sono state

effettuate ipotesi importanti sul coefficiente d'attrito delle superfici delle piastre in acciaio inossidabile, considerando il minimo da normativa degli acciai al carbonio, mentre potrebbe risultare leggermente differente. Le resistenze sono più basse rispetto ai valori teorici, anche se non in modo ampio come nel caso delle prove di serraggio in cui, come visto nel capitolo 6 e poi come si vedrà nel capitolo 9, si attestano a valori del 50% minori rispetto ai teorici. Questo è dovuto dal fatto che forse le superfici di acciaio inossidabile avevano un coefficiente di attrito leggermente superiore allo 0,2 di cui si è tenuto conto nel calcolo teorico, oppure dal fatto che il valore di k_s per i fori asolati è molto cautelativo.

Tabella 8.9 Confronti tra resistenze a scorrimento da prove di laboratorio e teoriche.

	Res. Teorica [kN]	R_d [kN]	% (R_d /$R_{teorica}$)
BULLONI M8	1,81	1,31	0,72
BULLONI M10	2,86	1,98	0,69
BULLONI M12	4,76	3,93	0,83

Per i carrelli, invece, non sono stati effettuati confronti con valori teorici, in quanto sono particolari costruttivi che si allontanano da semplici piatti a scorrimento. Infatti, il bullone va a collegare il carrello al montante con due piatti che sono distanziati e non a contatto, andando a resistere tramite l'attrito delle piastre solo a lato dei bulloni e non sotto di essi. Le sezioni resistenti da considerare sarebbero due e perciò i valori dei carrelli zoppi dovrebbero essere doppi rispetto a quelli ottenuti per il bullone M8 sulle piastre, e quattro volte maggiori nel caso dei carrelli normali, cosa che invece non avviene, anche in parte a causa del numero limitato delle prove.

8.4. Prove di rilassamento

Le prove a sei mesi su analoghi provini verranno effettuate proprio per verificare l'andamento delle resistenze a scorrimento nel tempo e vedere quanto il rilassamento dell'unione va a far diminuire il precarico nel bullone. Tuttavia, è da sottolineare che, come descritto già nel paragrafo 5.3, la componente maggiore di rilassamento avviene già dopo le prime ore dal serraggio, perciò con le prove a 72 ore effettuate questa diminuzione di carico è già stata tenuta in conto.

Capitolo 9

9. Proposte sull'utilizzo di bulloni precaricati senza lubrificante in acciaio inox

In questo capitolo vengono presentate le principali conclusioni ottenibili dalle prove di laboratorio effettuate. È assodato che il precarico raggiungibile nel caso di giunzioni bullonate ad attrito in acciaio inossidabile senza lubrificante risulti di gran lunga minore rispetto ai valori teorici dati dalla normativa sull'acciaio al carbonio. La duttilità dei provini testati non sempre rispetta i requisiti della UNI EN 14399-2, mentre in galling non sembra risultare un problema nel serraggio dei bulloni in acciaio inossidabile. Dunque, in linea di massima, risulta possibile utilizzare tali bulloni con il precarico. Nei paragrafi successivi vengono perciò presentate delle proposte sul valore di precarico di progetto da utilizzare e delle valutazioni sul fattore k per ottenere la coppia da applicare durante il serraggio.

9.1. Precarico di progetto

9.1.1. Tabelle fornite dai produttori e calcolo di μ_{tot}

Per definire un valore di precarico valido in progetto, oltre ad utilizzare i dati provenienti dai test sull'idoneità al precarico, si va a far riferimento anche a tabelle (**Tabella 9.1, Tabella 9.2**) fornite da due produttori, Fiminox e InoxTirrenica, che elencano valori di precarico e coppie di serraggio di bulloni in acciaio inossidabile serrati senza lubrificanti. Sia Fiminox che InoxTirrenica forniscono delle tabelle in cui la coppia di

serraggio e il precarico cambiano al variare del coefficiente di attrito μ_{tot}, che, come presentato nel paragrafo 5.1.2, è la combinazione dell'attrito presente tra i filetti, dado e rondelle durante il serraggio.

Il produttore InoxTirrenica fornisce i seguenti valori di precarico e coppia di serraggio:

Tabella 9.1 Valori di precarico e coppia di serraggio forniti dal produttore InoxTirrenica.

FILETTATURA	COEFF. ATTRITO μ	PRECARICO FM (KN) CLASSE DI RESISTENZA			COPPIA DI SERRAGGIO MA (Nm) CLASSE DI RESISTENZA		
		50	70	80	50	70	80
M 4	0,1	1,5	3,2	4,2	0,86	1,85	2,4
	0,2	1,3	2,76	3,6	1,35	2,9	3,8
	0,3	1,1	2,35	3,1	1,66	3,6	4,7
M 5	0,1	2,4	5,2	69,9	1,6	3,6	4,8
	0,2	2,1	4,51	6	2,6	5,7	7,6
	0,3	1,8	3,85	5,1	3,3	7	9,4
M 6	0,1	3,4	7,3	9,7	2,9	6,3	8,4
	0,2	3	6,4	8,4	4,6	10	13,2
	0,3	2,5	5,5	7,2	5,7	12,2	16,3
M 8	0,1	6,2	13,4	17,9	7,1	15,2	20,3
	0,2	5,4	11,6	15,5	11,2	24,1	32,1
	0,3	4,6	9,9	13,3	13,9	30	40
M 10	0,1	9,9	21,3	28,4	14	30	39
	0,2	8,6	18,5	27,7	22,2	47,7	63
	0,3	7,4	15,8	21,1	27,6	59,3	79
M 12	0,1	14,4	31	41,4	24	51	68
	0,2	12,6	27	36	38	82	109
	0,3	10,7	23	30,8	47	102	136
M 14	0,1	19,8	42,6	56,8	38	82	109
	0,2	17,3	37	49,5	61	131	175
	0,3	14,8	31,7	42,3	76	163	217
M 16	0,1	27,2	58	77,7	58	126	168
	0,2	23,7	51	67,9	95	204	272
		20,3	43,5	58,2	119	255	340
M 18	0,1	33,2	71	94	82	176	235
	0,2	28,9	62	82	131	282	376
	0,3	24,7	53	70	164	352	469
M 20	0,1	42,5	91	121	115	247	330
	0,2	37,1	79,6	106	187	401	534
	0,3	31,8	68	90	234	501	669
M 22	0,1	52,9	113	151	157	337	450
	0,2	46,3	99,3	132	257	551	735
	0,3	39,7	85,2	114	323	692	923

Il produttore Fiminox fornisce invece tali valori di precarico e coppia di serraggio:

Tabella 9.2 Valori di precarico e coppia di serraggio forniti dal produttore Fiminox.

Coefficiente di attrito μ_{tot} 0,10	Forze di precarico $F_{vmax.}$ [kN]			Coppia di serraggio M_A [Nm]		
	50	70	80	50	70	80
M 3	0,9	1	1,2	0,85	1	1,3
M 4	1,08	2,97	3,96	0,8	1,7	2,3
M 5	2,26	4,85	6,47	1,6	3,4	4,6
M 6	3,2	6,85	9,13	2,8	5,9	8
M 8	5,86	12,6	16,7	6,8	14,5	19,3
M 10	9,32	20	26,6	13,7	30	39,4
M 12	13,6	29,1	38,8	23,6	50	67
M 14	18,7	40	53,3	37,1	79	106
M 16	25,7	55	73,3	56	121	161
M 18	32,2	69	92	81	174	232
M 20	41,3	88,6	118,1	114	224	325
M 22	50	107	143	148	318	424
M 24	58	142	165	187	400	534

Coefficiente di attrito μ_{tot} 0,20	Forze di precarico $F_{vmax.}$ [kN]			Coppia di serraggio M_A [Nm]		
	50	70	80	50	70	80
M 3	0,6	0,65	0,95	1	1,1	1,6
M 4	1,12	2,4	3,2	1,3	2,6	3,5
M 5	1,83	3,93	5,24	2,4	5,1	6,9
M 6	2,59	5,54	7,39	4,1	8,8	11,8
M 8	4,75	10,2	13,6	10,1	21,4	28,7
M 10	7,58	16,2	21,7	20,3	44	58
M 12	11,1	23,7	31,6	34,8	74	100
M 14	15,2	32,6	43,4	56	119	159
M 16	20,9	44,9	59,8	86	183	245
M 18	26,2	56,2	74,9	122	260	346
M 20	33,8	72,4	96,5	173	370	494
M 22	41	88	118	227	488	650
M 24	47	101	135	284	608	810

Coefficiente di attrito μ_{tot} 0,30	Forze di precarico $F_{vmax.}$ [kN]			Coppia di serraggio M_A [Nm]		
	50	70	80	50	70	80
M 3	0,4	0,45	0,7	1,25	1,35	1,85
M 4	0,9	1,94	2,59	1,5	3	4,1
M 5	1,49	3,19	4,25	2,8	6,1	8
M 6	2,09	4,49	5,98	4,8	10,4	13,9
M 8	3,85	8,85	11	11,9	25,5	33,9
M 10	6,14	13,1	17,5	24	51	69
M 12	9	19,2	25,6	41	88	117
M 14	12,3	26,4	35,2	66	141	188
M 16	17	36,4	48,6	102	218	291
M 18	21,1	45,5	60,7	144	308	411
M 20	27,4	58,7	78,3	205	439	586
M 22	34	72	96	272	582	776
M 24	39	83	110	338	724	966

Coefficiente di attrito μ_{tot} 0,40	Forze di precarico $F_{vmax.}$ [kN]			Coppia di serraggio M_A [Nm]		
	50	70	80	50	70	80
M 4	0,74	1,60	2,13	1,6	3,3	4,4
M 5	1,22	2,62	3,5	3,2	6,6	8,8
M 6	1,73	3,7	4,93	5,3	11,3	15,0
M 8	3,17	6,80	9,10	12,9	27,6	36,8
M 10	5,05	10,80	14,40	26,2	56,0	75,0
M 12	7,38	15,8	21,10	44,6	96,0	128,0
M 14	10,1	21,70	26,0	71,0	152,0	204,0
M 16	20,9	44,90	59,80	110	237	316
M 18	17,5	37,50	50,10	156	334	447
M 20	22,6	48,4	64,6	223	479	639

Per confrontare i risultati ricavati dalle prove effettuate con i valori dati dai produttori, è utile dunque calcolare il coefficiente di attrito totale μ_{tot} come riportato nelle **Tabella 9.3, 9.4, 9.5**. Il calcolo di questo parametro per le prove di laboratorio effettuate avviene basandosi, come per il k, sul valore di coppia utilizzato in progetto (M_{spec} delle tabelle nel paragrafo 6.2) e il corrispondente valore di precarico dai grafici carico-coppia. I parametri geometrici dei bulloni da utilizzare nella formulazione del μ_{tot} sono invece ricavabili da normativa. In particolare, il passo P della filettatura e il diametro d_w della testa della vite della zona a contatto con la rondella sono forniti, essendo che i provini presentano filettatura sull'intero gambo, dalla norma UNI EN ISO 4017 [24]. Per quanto riguarda il d_2 è utile la norma UNI EN 724 [49] sulla filettatura dei bulloni, in cui vengono descritti e forniti i parametri geometrici per produrre i filetti. Infine, il d_h è reperibile sulla norma che tratta le dimensioni delle rondelle, ovvero la UNI EN ISO 7089 [50].

Tabella 9.3 Calcolo del coefficiente di attrito delle prove di laboratorio sul serraggio dei bulloni M8.

P	d_2	d_w	d_h	D_b
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1,25	7,188	11,63	8,40	10,015

Provino	d	Classe	M_{spec}	$F_{bi,spec}$		$\mu_{tot,i}$	k_i
	[mm]		[Nm]	[kN]		-	-
M8-25-br-1	8	A2-70	23,5	8,19		0,292	0,36
M8-25-br-2	8	A2-70	23,5	8,90		0,267	0,33
M8-25-br-3	8	A2-70	23,5	8,38		0,285	0,35

M8-25-br-4	8	A2-70	23,5	9,17		0,258	0,32
M8-25-br-5	8	A2-70	23,5	7,48		0,322	0,39
$\mu_{tot,m}$ e k_m	-	-	-	-		0,285	0,351
s_k	-	-	-	-		0,025	0,028

Provino	d	Classe	M_{spec}	$F_{bi,spec}$		$\mu_{tot,i}$	k_i
	[mm]		[Nm]	[kN]		-	-
M8-40-1	8	A2-70	23,5	8,43		0,283	0,35
M8-40-2	8	A2-70	23,5	9,73		0,242	0,30
M8-40-3	8	A2-70	23,5	13,90		0,163	0,21
M8-40-4	8	A2-70	23,5	10,00		0,235	0,29
M8-40-5	8	A2-70	23,5	9,57		0,247	0,31
M8-40-6	8	A2-70	23,5	8,54		0,279	0,34
$\mu_{tot,m}$ e k_m	-	-	-	-		0,234	0,293
s_k	-	-	-	-		0,044	0,050

Tabella 9.4 Calcolo del coefficiente di attrito delle prove di laboratorio sul serraggio dei bulloni M10.

P	d_2	d_w	d_h	D_b
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1,50	9,026	14,63	10,50	12,565

Provino	d	Classe	M_{spec}	$F_{bi,spec}$		$\mu_{tot,i}$	k_i
	[mm]		[Nm]	[kN]		-	-
M10-30-1	10	A2-70	48,4	11,91		0,333	0,41
M10-30-2	10	A2-70	48,4	15,20		0,256	0,32
M10-30-3	10	A2-70	48,4	20,58		0,184	0,24
M10-30-4	10	A2-70	48,4	11,46		0,347	0,42
M10-30-5	10	A2-70	48,4	15,17		0,257	0,32
$\mu_{tot,m}$ e k_m	-	-	-	-		0,275	0,340
s_k	-	-	-	-		0,066	0,076

Provino	d	Classe	M_{spec}	$F_{bi,spec}$		$\mu_{tot,i}$	k_i
	[mm]		[Nm]	[kN]		-	-
M10-40-1	10	A2-70	48,4	20,74		0,182	0,23
M10-40-2	10	A2-70	48,4	14,40		0,271	0,34
M10-40-3	10	A2-70	48,4	15,83		0,245	0,31
M10-40-4	10	A2-70	48,4	15,44		0,252	0,31
M10-40-5	10	A2-70	48,4	17,14		0,225	0,28
$\mu_{tot,m}$ e k_m	-	-	-	-		0,235	0,294
s_k	-	-	-	-		0,034	0,039

Tabella 9.5 Calcolo del coefficiente di attrito delle prove di laboratorio sul serraggio dei bulloni M12.

P	d_2	d_w	d_h	D_b
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1,75	10,863	16,63	13,00	14,815

Provino	d	Classe	M_{spec}	$F_{bi,spec}$		$\mu_{tot,i}$	k_i
	[mm]		[Nm]	[kN]		-	-
M12-40-1	12	A2-80	110	29,24		0,255	0,31
M12-40-2	12	A2-80	110	30,35		0,244	0,30
M12-40-3	12	A2-80	110	32,18		0,229	0,28
M12-40-4	12	A2-80	110	34,25		0,214	0,27
M12-40-5	12	A2-80	110	31,17		0,237	0,29
$\mu_{tot,m}$ e k_m	-	-	-	-		0,236	0,292
s_k	-	-	-	-		0,015	0,017

9.1.2. Ricerca del precarico caratteristico delle prove di laboratorio

In questo paragrafo, a partire dalle prove di laboratorio sull'idoneità al precarico presentate nel capitolo 6, si ricerca un valore caratteristico di precarico, in modo tale da poter ottenere una formulazione che sia valida per la progettazione di unioni bullonate con precarico in acciaio inossidabile senza utilizzo di lubrificanti durante il serraggio. Il procedimento consiste in alcuni passaggi, a partire dalla determinazione della coppia

caratteristica corrispondente al picco del precarico, per concludere con la determinazione del precarico caratteristico utile in progetto. Gli step sono i seguenti:

1) **Determinazione della coppia caratteristica corrispondente al picco del precarico**: per ogni provino testato, utilizzando il grafico carico-coppia, si ottiene la coppia corrispondente al raggiungimento del carico massimo. Questi valori vengono poi trattati secondo quanto previsto dalla UNI EN 1990:2006 – Annex D, par. "D.7.2" [48], in cui viene determinato il valore caratteristico, come descritto nel paragrafo 8.2 (senza considerare in questo caso il coefficiente di sicurezza). La ricerca di tale valore caratteristico ha lo scopo di evitare di serrare troppo il bullone, ovvero superare il picco della forza e ricadere nel ramo discendente del grafico carico-coppia. Se ciò succedesse infatti, il bullone tenderebbe a non più lavorare al massimo delle sue capacità, perciò è sempre da evitare.
2) **Ricerca dei precarichi corrispondenti alla coppia caratteristica**: per ogni prova si ricerca il precarico che corrisponde alla coppia caratteristica appena calcolata al passo precedente.
3) **Calcolo del precarico caratteristico**: i precarichi ottenuti al passo precedente vengono trattati nuovamente secondo quanto previsto dalla UNI EN 1990:2006 – Annex D, par. "D.7.2". In questo modo si ottiene un valore di precarico che viene raggiunto o superato il 95% delle volte.
4) **Confronti con valori teorici e valori forniti dal produttore**.

Nelle **Tabella 9.6, 9.7, 9.8, 9.9 e 9.10** vengono presentati i passaggi dall'1 al 3 per ogni tipologia di bullone testata, mentre nella **Tabella 9.11** viene effettuato un confronto sia sui precarichi di serraggio che sulle coppie di serraggio tra i valori ottenuti da laboratorio, valori teorici e valori forniti dal produttore. In particolare, per i valori forniti dal produttore, si è calcolato il precarico e la coppia andando a fissare il μ_{tot} calcolato al paragrafo 9.1.1 per ogni tipo di bullone. Ovvero, prendendo i valori dai produttori corrispondenti a μ_{tot}= 0,2 e 0,3, si è andati ad interpolare linearmente per determinare la coppia e il precarico.

Tabella 9.6 Calcolo del precarico caratteristico per i bulloni M8_25_br.

BULLONI M8_25_br		
Prova	Coppia $_{carico\ max}$ [Nm]	Carico max [kN]
M8_25_br-1	40,22	14,03
M8_25_br-2	42,16	13,47
M8_25_br-3	40,63	14,11
M8_25_br-4	45,90	14,51
M8_25_br-5	42,13	10,79
numero prove	5	
K_n (per n=5)	2,33	
Valore caratt. coppia per precarico massimo		
M_k [Nm]	36,99	

BULLONI M8_25_br	
Prova	Precarico corrisp. [kN]
M8_25_br-1	13,00
M8_25_br-2	12,15
M8_25_br-3	13,22
M8_25_br-4	13,10
M8_25_br-5	10,20
numero prove	5
K_n (per n=5)	2,33
Valore caratt. precarico per il serraggio	
R_k [kN]	9,39

Tabella 9.7 Calcolo del precarico caratteristico per i bulloni M8_40.

BULLONI M8_40		
Prova	Coppia $_{carico\ max}$ [Nm]	Carico max [kN]
M8_40-1	48,49	12,94
M8_40-2	48,38	14,06
M8_40-3	35,66	15,62
M8_40-4	47,14	14,67
M8_40-5	44,89	15,33
M8_40-6	46,30	15,33
numero prove	6	
K_n (per n=6)	2,18	
Valore caratt. coppia per precarico massimo		
M_k [Nm]	34,60	

BULLONI M8_40	
Prova	Precarico corrisp. [kN]
M8_40-1	11,43
M8_40-2	12,60
M8_40-3	15,41
M8_40-4	13,35
M8_40-5	13,71
M8_40-6	11,55
numero prove	6
K_n (per n=6)	2,18
Valore caratt. precarico per il serraggio	
R_k [kN]	9,75

Tabella 9.8 Calcolo del precarico caratteristico per i bulloni M10_30.

BULLONI M10_30		
Prova	Coppia $_{carico\ max}$ [Nm]	Carico max [kN]
M10_30-1	113,70	28,44
M10_30-2	104,13	30,48
M10_30-3	104,10	29,85
M10_30-4**	128,80	25,84
M10_30-5	142,42	35,87
numero prove	5	
K_n (per n=5)	2,33	
Valore caratt. coppia per precarico massimo		
M_k [Nm]	79,73	

** escludendo gli ultimi due picchi del grafico carico-coppia

BULLONI M10-30	
Prova	Precarico corrisp. [kN]
M10_30-1	18,86
M10_30-2	25,50
M10_30-3	29,08
M10_30-4	16,75
M10_30-5	24,00
numero prove	5
K_n (per n=5)	2,33
Valore caratt. precarico per il serraggio	
R_k [kN]	11,17

Tabella 9.9 Calcolo del precarico caratteristico per i bulloni M10_40.

BULLONI M10_40		
Prova	Coppia $_{carico\ max}$ [Nm]	Carico max [kN]
M10_40-1	91,69	35,76
M10_40-2	97,78	31,07
M10_40-3	130,42	31,04
M10_40-4	108,72	26,18
M10_40-5	99,22	33,38
numero prove	5	
K_n (per n=5)	2,33	
Valore caratt. coppia per precarico massimo		
M_k [Nm]	70,21	

BULLONI M10-40	
Prova	Precarico corrisp. [kN]
M10_40-1	29,20
M10_40-2	22,90
M10_40-3	20,30
M10_40-4	20,88
M10_40-5	26,61
numero prove	5
K_n (per n=5)	2,33
Valore caratt. precarico per il serraggio	
R_k [kN]	15,07

Tabella 9.10 Calcolo del precarico caratteristico per i bulloni M12_40.

BULLONI M12_40		
Prova	Coppia $_{carico\ max}$ [Nm]	Carico max [kN]
M12_40-1	178,94	43,35
M12_40-2	191,75	45,10
M12_40-3	180,51	47,52
M12_40-4	205,44	46,80
M12_40-5	181,59	39,88
numero prove	5	
K_n (per n=5)	2,33	
Valore caratt. coppia per precarico massimo		
M_k [Nm]	161,68	

BULLONI M12_40	
Prova	Precarico corrisp. [kN]
M12_40-1	39,75
M12_40-2	41,30
M12_40-3	45,50
M12_40-4	42,60
M12_40-5	38,90
numero prove	5
K_n (per n=5)	2,33
Valore caratt. precarico per il serraggio	
R_k [kN]	35,56

Tabella 9.11 Confronti su precarico e coppia tra valori da prove, teorici e dei produttori.

Bullone			M8-25br	M8-40	M10-30	M10-40	M12-40
Attrito da prove		$\mu_{tot,m}$	0,285	0,234	0,275	0,235	0,236
Fattore k da prove		k_m	0,35	0,29	0,34	0,29	0,29
Precarico	Da prove laboratorio	$F_{p,caratt}$	9,39	9,75	11,17	15,07	35,56
	Teorico ($0,7*f_{ub}*A_{res}$)	$F_{p,C\ teorico}$	17,93	17,93	28,42	28,42	47,12
	Da prod. Fiminox	$F_{p,Fiminox}$	9,05	9,74	13,88	15,12	29,44
	Da Prod. Inox Tirrenica	$F_{p,InoxTirr}$	10,16	11,02	16,48	17,56	34,13
Coppia	Da prove ($k_m*d*F_{p,caratt}$)	M_{caratt}	26,37	22,85	38,01	44,34	124,78
	Da prod. Fiminox	$M_{Fiminox}$	24,89	22,79	49,25	46,45	106,12
	Da Prod. Inox Tirrenica	$M_{InoxTirr}$	29,12	26,11	56,40	51,76	118,72

Come visibile in **Tabella 9.11**, i precarichi caratteristici ottenuti sono lontani dal valore teorico con cui si progettano le unioni bullonate ad attrito in acciaio al carbonio. Tuttavia, possono considerarsi in linea con i valori forniti dai produttori, come anche la coppia da applicare, tranne il caso del bullone M10_30 che presenta valori un po' minori, causato soprattutto dalla dispersione che si è avuta nelle cinque prove effettuate per l'idoneità al precarico. Vista comunque la grande differenza rispetto al valore teorico $F_{p,C}$, risulta necessario definire una differente formulazione per avere il precarico da considerare nella definizione della resistenza a scorrimento della giunzione bullonata.

9.1.3. Formula per il precarico di progetto

Per quanto riguarda il precarico, la norma sull'acciaio al carbonio UNI EN 1993-1-8 [19] riporta che i bulloni che possono essere utilizzati ad attrito sono quelli ad alta resistenza con sistema HR o HV. Tuttavia, si possono utilizzare anche classi minori di bulloni con il precarico a patto che siano utilizzati per un miglioramento della funzionalità del collegamento e non per verifiche agli stati limite, anche con un precarico minore. In generale, si possono presentare due distinti livelli di carico nelle unioni bullonate ad attrito per l'acciaio al carbonio:

- **Livello target I**
  Garanzia di sicurezza strutturale: connessioni ad attrito in categoria B e C nonché collegamenti a trazione precaricati nella categoria E che vengono spesso utilizzati in applicazioni sotto carico di fatica. In questi casi, il precarico deve essere garantito in modo sufficiente e sicuro per l'intera vita utile e sono necessarie ispezioni periodiche.
  Precarico specificato in normativa: $F_{pC} = 0{,}7\ f_{ub}\ A_{res}$
- **Livello target II**
  Miglioramento della funzionalità: connessioni non precaricate a taglio in categoria A, così come connessioni a trazione non precaricate nella categoria D, possono essere eseguite come unioni precaricate per migliorare la funzionalità (per esempio minimizzazione dello slittamento, aumento della rigidità, riduzione al minimo di deformazioni).
  Possibile precarico: $F_{pC}* < F_{pC} \rightarrow \quad F_{pC}* = 0{,}7\ f_{yb}\ A_{res}$

Per quanto riguarda i bulloni in acciaio inossidabile è presente un vuoto normativo, poiché non vengono specificate particolari classi per l'utilizzo nel precarico. Inoltre, non sono presenti geometrie apposite dei bulloni come succede per l'acciaio al carbonio. Questo fa sì che i bulloni prodotti seguendo le normative sulla geometria UNI EN ISO 4014 e 4017 possano essere utilizzati per connessioni verificate agli stati limite ultimo o di servizio, verificando i precarichi che possono essere raggiunti.

Come ampiamente dimostrato dai risultati al paragrafo precedente i valori teorici non vengono mai raggiunti e il precarico che si riesce ad ottenere nel bullone in acciaio inossidabile è di gran lunga inferiore. Con tali risultati e con i valori forniti dai produttori si

ricerca una formulazione di progetto che sostituisca quella presentata in normativa e sia valida per i bulloni in acciaio inossidabile con geometria secondo UNI EN ISO 4014 e 4017 senza lubrificanti.

A tale scopo, si calcolano quali sono le percentuali di $f_{ub}\,A_{res}$ e $f_{yb}\,A_{res}$ che riescono ad essere raggiunte con i precarichi forniti dalle prove di laboratorio e dai produttori. Nella **Tabella 9.12** vengono riportate le percentuali ottenute dai valori dei test, mentre nelle **Tabella 9.13 e 9.14** vengono presentati quelli dei produttori. In particolare, si sono considerate solo le tabelle con coefficienti μ_{tot} pari a 0,2 e 0,3, poiché le prove di laboratorio svolte hanno riscontrato valori di attrito compresi in tale intervallo.

Tabella 9.12 Percentuali di precarico massimo ottenute dai valori caratteristici dei test di laboratorio.

	A2 70			A2 80		
	Carico F_{vmax}	% di $f_{yb}*A_{res}$	% di $f_{ub}*A_{res}$	Carico F_{vmax}	% di $f_{yb}*A_{res}$	% di $f_{ub}*A_{res}$
Provino	[kN]	[kN]	-	[kN]	[kN]	-
M8_25_br	9,40	0,57	0,37			
M8_40	9,80	0,60	0,38			
M10_30	11,20	0,43	0,28			
M10_40	15,10	0,58	0,37			
M12_40				35,60	0,70	0,53

*Tabella 9.13 Percentuali di F_{pc} e F_{pc} * dei precarichi forniti dal produttore Fiminox.*

			A2 70			A2 80		
μ_{tot}	diametro	A_{res}	Carico F_{vmax}	% di $f_{yb}*A_{res}$	% di $f_{ub}*A_{res}$	Carico F_{vmax}	% di $f_{yb}*A_{res}$	% di $f_{ub}*A_{res}$
coef attrito	[mm]	[mm²]	[kN]	-	-	[kN]	-	-
0,2	6	20,1	5,50	0,61	0,39	7,40	0,61	0,46
	8	36,6	10,20	0,62	0,40	13,60	0,62	0,46
	10	58	16,20	0,62	0,40	21,70	0,62	0,47
	12	84,3	23,70	0,62	0,40	31,60	0,62	0,47
	14	115	32,60	0,63	0,40	43,40	0,63	0,47
	16	157	44,90	0,64	0,41	59,80	0,63	0,48
	18	192	56,20	0,65	0,42	74,90	0,65	0,49
	20	245	72,40	0,66	0,42	96,50	0,66	0,49
	22	303	88,00	0,65	0,41	118,00	0,65	0,49
	24	353	101,00	0,64	0,41	135,00	0,64	0,48

			A2 70			A2 80		
μ_{tot}	diametro	A_{res}	Carico F_{vmax}	% di $f_{yb}*A_{res}$	% di $f_{ub}*A_{res}$	Carico F_{vmax}	% di $f_{yb}*A_{res}$	% di $f_{ub}*A_{res}$
coef attrito	[mm]	[mm²]	[kN]	-	-	[kN]	-	-
0,3	6	20,1	4,50	0,50	0,32	6,00	0,50	0,37
	8	36,6	8,90	0,54	0,35	11,00	0,50	0,38
	10	58	13,10	0,50	0,32	17,50	0,50	0,38
	12	84,3	19,20	0,51	0,33	25,60	0,51	0,38
	14	115	26,40	0,51	0,33	35,20	0,51	0,38
	16	157	36,40	0,52	0,33	48,60	0,52	0,39
	18	192	45,50	0,53	0,34	60,70	0,53	0,40
	20	245	58,70	0,53	0,34	78,30	0,53	0,40
	22	303	72,00	0,53	0,34	96,00	0,53	0,40
	24	353	83,00	0,52	0,34	110,00	0,52	0,39

*Tabella 9.14 Percentuali di F_{pc} e F_{pc} * dei precarichi forniti dal produttore InoxTirrenica.*

			A2 70			A2 80		
μ_{tot}	diametro	A_{res}	Carico F_{vmax}	% di $f_{yb}*A_{res}$	% di $f_{ub}*A_{res}$	Carico F_{vmax}	% di $f_{yb}*A_{res}$	% di $f_{ub}*A_{res}$
coef attrito	[mm]	[mm²]	[kN]	-	-	[kN]	-	-
0,2	6	20,1	6,4	0,71	0,45	8,4	0,70	0,52
	8	36,6	11,6	0,70	0,45	15,5	0,71	0,53
	10	58	18,5	0,71	0,46	27,7	0,80	0,60
	12	84,3	27	0,71	0,46	36	0,71	0,53
	14	115	37	0,71	0,46	49,5	0,72	0,54
	16	157	51	0,72	0,46	67,9	0,72	0,54
	18	192	62	0,72	0,46	82	0,71	0,53
	20	245	79,6	0,72	0,46	106	0,72	0,54
	22	303	99,3	0,73	0,47	132	0,73	0,54

			A2 70			A2 80		
μ_{tot}	diametro	A_{res}	Carico F_{vmax}	% di $f_{yb}*A_{res}$	% di $f_{ub}*A_{res}$	Carico F_{vmax}	% di $f_{yb}*A_{res}$	% di $f_{ub}*A_{res}$
coef attrito	[mm]	[mm²]	[kN]	-	-	[kN]	-	-
0,3	6	20,1	5,5	0,61	0,39	7,2	0,60	0,45
	8	36,6	9,9	0,60	0,39	13,3	0,61	0,45
	10	58	15,8	0,61	0,39	21,1	0,61	0,45
	12	84,3	23	0,61	0,39	30,8	0,61	0,46
	14	115	31,7	0,61	0,39	42,3	0,61	0,46
	16	157	43,5	0,62	0,40	58,2	0,62	0,46
	18	192	53	0,61	0,39	70	0,61	0,46
	20	245	68	0,62	0,40	90	0,61	0,46
	22	303	85,2	0,62	0,40	114	0,63	0,47

Da queste tabelle si vede come il valore di $F_{p,C}$ non viene mai raggiunto. Il fatto che i coefficienti di attrito ottenuti dalle prove siano molto elevati è sicuramente attribuibile all'assenza di lubrificante sul gambo della vite e sulle superfici di contatto tra testa, dado e rondelle.

Poiché si ricerca un precarico da utilizzare nel livello target I, si tengono in considerazione le percentuali del precarico $f_{ub}\ A_{res}$ per definire una nuova formulazione. Tranne i dati sui provini M10_30, che hanno una percentuale del 28%, causata, come già detto da una grande dispersione dei dati, tutte le altre percentuali si attestano a valori vicini o superiori allo 0,35 $f_{ub}\ A_{res}$,

Utilizzando le percentuali ottenute viene perciò proposta la seguente formulazione per il precarico di progetto per bulloni in acciaio inossidabile non lubrificati:

$$\boldsymbol{F_{p,C,inox} = 0,35\ f_{ub}\ A_{res}} \qquad \textbf{(9.1)}$$

In cui - f_{ub} resistenza ultima dell'acciaio inossidabile che costituisce il bullone;
- A_s area resistente del gambo della vite.

Tale precarico risulta essere la metà del valore proposto dalla normativa per bulloni in acciaio al carbonio ad alta resistenza, 0,7 $f_{ub}\ A_{res}$.69

9.2. Fattore k

Dalle prove svolte è possibile anche ricavare importanti considerazioni sul fattore k, utile a determinare la coppia di serraggio a partire dal precarico o viceversa. Come visibile nella **Tabella 9.15** riassuntiva delle prove di laboratorio, il fattore k di unioni bullonate con precarico in acciaio inossidabile senza l'utilizzo di lubrificante presenta un valore decisamente più elevato rispetto a quelli proposti secondo UNI EN 1993-1-8, ove gli intervalli sono 0,10 - 0,16 per il K1 e 0,10 - 0,23 per il K2.

Tabella 9.15 Fattori k ottenuti dalle prove di laboratorio svolte.

Dimensione	Classe	k
M8	A2 70	0,351
		0,293
M10	A2 70	0,340
		0,294
M12	A2 80	0,292

Dai valori della **Tabella 9.15,** si può ipotizzare che il fattore k di unioni bullonate precaricate in acciaio inossidabile non lubrificate rientri in un intervallo pari a:

$$\mathbf{0,25 \leq k \leq 0,40} \tag{9.2}$$

Tuttavia, questo intervallo è molto ampio e la scelta di tenere conto di un valore vicino a 0,40 o vicino a 0,25 può portare rispettivamente ad un sovra serraggio nel caso in cui il k reale sia minore o viceversa ad un precarico troppo basso se il k reale risulti maggiore. Per questo, l'intervallo proposto deve essere considerato solo per rimarcare la differenza presente rispetto alle giunzioni in acciaio al carbonio. Si sottolinea quindi che per il fattore k è necessario sempre svolgere dei test, per ottenere la coppia da applicare a partire dal precarico proposto al paragrafo 9.1.3.

Capitolo 10

10. Conclusioni

Le giunzioni bullonate ad attrito in acciaio inossidabile sono ancora poco utilizzate, soprattutto a causa di una normativa piuttosto assente, che non ne vieta l'utilizzo, ma impone di effettuare dei test di laboratorio ogni qual volta vengano impiegate. Questo porta a costi maggiori e non fornisce una base semplice al progettista per la definizione delle resistenze. Tuttavia, i vantaggi dell'uso dell'acciaio inossidabile sono molti, a partire dalla resistenza a corrosione, che in alcune strutture risulta essere fondamentale. Altri vantaggi sono una maggiore resistenza al fuoco, una maggiore duttilità e una migliore estetica. I costi sono superiori, ma se considerati sull'intera vita della struttura, diventano paragonabili a quelli dell'acciaio al carbonio, poiché la manutenzione è di gran lunga inferiore.

L'acciaio inossidabile che viene utilizzato per i bulloni è l'austenitico o il duplex, due materiali su cui si è sempre supposto che l'utilizzo nelle giunzioni ad attrito potesse portare a elevati rilassamenti, a causa della loro differente curva sforzo-deformazione rispetto all'acciaio al carbonio. Tuttavia, prove di laboratorio effettuate da SIROCO [29] hanno dimostrato che il rilassamento di un'unione ad attrito in acciaio inossidabile è simile a quello del comune acciaio, concludendo che i bulloni in acciaio inossidabile possono essere usati, ponendo però attenzione ai metodi di serraggio e ai lubrificanti da applicare.

Nelle prove di laboratorio trattate in questo documento si è invece deciso di testare bulloni precaricati non lubrificati, ovvero come forniti dal produttore. Questo è dato dal fatto che applicare un lubrificante in cantiere risulta essere un passaggio molto delicato, poiché si ha il problema del controllo sul lavoro effettuato e la difficoltà dello stoccaggio.

Le prove di laboratorio svolte sono state: test di scorrimento su simulacri al vero della nuova facciata ventilata del Politecnico di Torino, prove di scorrimento di piastre in acciaio inossidabile e prove di idoneità al precarico dei bulloni. Quest'ultima prova è stata quella di maggior interesse per la definizione di parametri sulle giunzioni ad attrito in acciaio inossidabile senza lubrificante, mentre le altre sono state sfruttate soprattutto per confermare i risultati ottenuti da essa. Si è infatti riscontrato che i precarichi raggiungibili nel caso di queste giunzioni ad attrito in acciaio inossidabile sono inferiori rispetto a quelli definiti da normativa per l'acciaio al carbonio. Si è perciò proposto di considerare un precarico di progetto pari a 0,35 $f_{ub}\ A_{res}$, che risulta essere il 50% di quello impiegato per le connessioni ad attrito in acciaio comune. Per quanto riguarda il fattore k, la conclusione più importante è che i valori da utilizzare per i bulloni non lubrificati in acciaio inossidabile appartengono ad un intervallo tra 0,25 - 0,40, valori piuttosto superiori rispetto a quelli dei bulloni 8.8 e 10.9 in acciaio al carbonio. Non risultano invece esserci problemi riguardo al danneggiamento "galling" del bullone durante il serraggio, poiché i precarichi proposti rimangono ampiamente sul ramo lineare del grafico carico-coppia, mentre le striature nascono solo nella zona plastica di tale diagramma.

Dunque, per rendere più accessibile l'utilizzo delle unioni bullonate ad attrito in acciaio inossidabile, gli enti normatori possono optare su due differenti possibilità. La prima è prendere le mosse dalla normativa sull'acciaio al carbonio, proponendo gli stessi valori di precarico, di fattore k e geometrie, portando i fornitori a produrre bulloni certificati e che rispettino tali parametri. La seconda è, invece, considerare di utilizzare i bulloni in acciaio inossidabile ora presenti sul mercato, con precarichi di progetto pari al 50% rispetto a quelli dell'acciaio al carbonio, come proposto nel paragrafo 9.1.3, e definire un intervallo più ristretto del fattore k con un quantitativo maggiore di prove, poiché i valori 0,25 - 0,40, riportati al paragrafo 9.2, risultano troppo ampi e obbligherebbero ad effettuare sempre delle prove di laboratorio per definire tale parametro, poiché si rischierebbe un sovra serraggio o viceversa, un precarico troppo basso del bullone.

Bibliografia

[1] SCI, "Manuale di progettazione per strutture in acciaio inossidabile quarta edizione", Silwood Park, Ascot, Berks, SL5 7QN, UK: SCI, 2017.

[2] «www.utensileriaonline.it/acciai-inossidabili-ezp-10.php,» [Online]. [Consultato il giorno 03 Dicembre 2020].

[3] «www.metalrecuperi.it/lacciaio-inox/,» [Online]. [Consultato il giorno 04 Dicembre 2020].

[4] SCI, "Manuale di progettazione per strutture in acciaio inossidabile terza edizione", Euro Inox e The Steel Construction Institute, 2006.

[5] «www.collegiotecniciacciaio.it/2017/12/11/lacciaio-inossidabile-quale-materiale-strutturale-,» [Online]. [Consultato il giorno 04 Dicembre 2020].

[6] L. Gardner, «The use of stainless steel in structure,» *Prog. Struct. Eng. Mater. 7,* pp. 45-55, 2005.

[7] Y. Sakumoto, T. Nakazato e A. Matsuzaki, «High-temperature properties of stainless steel for building structures,» pp. 399-406, 1996.

[8] L. Di Sarno, «Seismic performance assessment of stainless steel frames,» *Journal of Constructional Steel Research 59,* pp. 1289-1319, 2003.

[9] J. Johnson e al, «“The energy benefit of stainless steel recycling”,» *Energy Policy,* pp. 181-192, 2008.

[10] N. Baddoo, «Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities,» *Elsevier BV Journal of constructional steel research,* vol. 64 (11), pp. 1199-1206, 2008-11.

[11] A. Burkert, «Technical and economical stainless steel alternatives for civil engineering applications,» *Materials and Corrosion,* 2014.

[12] GrahamGedge, «Structural uses of stainless steel — buildings and civil engineering,» *Journal of Constructional Steel Research,* p. 1194–1198, 2008.

[13] M. Cavallo, «L'altalena dei prezzi dell'acciaio inox,» *Exportplanning.com,* 2017.

[14] Gardner e Leroy, «Stability and design of stainless steel structures – Review and outlook,» *Elsevier BV Thin-walled structures,* vol. 141, pp. 208-216, 2019-08.

[15] Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-4: "General rules - Supplementary rules for stainless steels", 2006+A1-2015.

[16] N. Baddoo, «Reprint of “Foreword: Recent research into structural stainless steel”,» *Journal of constructional steel research,* vol. 152, pp. 1-1, 2019-01.

[17] NTC-2018 - dm 17 gennaio 2018 “Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni”.

[18] F. Tondolo, Materiale didattico del corso di “Teoria e progetto delle strutture in acciaio e composite”, A.A. 2019/2020.

[19] Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-8: “Design of joints”, 2005.

[20] UNI EN ISO 3506-1 “Fasteners - Mechanical properties of corrosion resistant stainless steel fasteners. Part 1: Bolts, screws and studs with specified grades and property classes", 2020.

[21] UNI EN ISO 3506-2 “Fasteners - Mechanical properties of corrosion resistant stainless steel fasteners. Part 2: Nuts with specified grades and property classes", 2020.

[22] UNI ISO 3506-6 “Fasteners - Mechanical properties of corrosion resistant stainless steel fasteners. Part 6: General rules for the selection of stainless steels and nickel alloys for fasteners ", 2020.

[23] UNI EN ISO 4014 "Hexagon head bolts — Product grades A and B", 2011.

[24] UNI EN ISO 4017 "Hexagon head screws — Product grades A and B", 2014.

[25] N. Stranghöner, C. Abraham, N. Afzali e D. Jungbluth, "Preloading behaviour and preloading levels for stainless steel bolt assemblies including relaxation with detailed specifications for recommended preloading levels", Institute for Metal and Lightweight Structures, 2018.

[26] EN 14399-1 "High-strength structural bolting assemblies for preloading. Part 1: General requirements", 2015.

[27] N. Stranghöner, D. Jungbluth, C. Abraham e A. Söderman, «Tightening behaviour of preloaded stainless steel bolting assemblies,» *Steel construction : design and research,* vol. 10 (4), pp. 319-332, 2017-11.

[28] A. Bouchaïr, J. Averseng e A. Abidelah, «Analysis of the behaviour of stainless steel bolted connections,» *Journal of Constructional Steel Research,* p. 1264–1274, 2008.

[29] SIROCO, Execution and reliability of slip resistant connections for steel structures using CS and SS - Final report, Publications Office of the European Union, 2019.

[30] EN 14399-2 "High-strength structural bolting assemblies for preloading. Part 2: Suitability for preloading", 2015.

[31] UNI EN 1090-2 'Execution of steel structures and aluminium structures. Part 2: Technical requirements for steel structures", 2018.

[32] I. A. Perenthaler, Le tipologie dei nuovi prodotti unificati, i materiali, la produzione, i trattamenti, le criticità, 05/2011.

[33] UNI EN ISO 16047 "Fasteners - Torque/clamp force testing", 2005+A1:2012.

[34] EN 14399-3 "High-strength structural bolting assemblies for preloading. Part 3: System HR - Hexagon bolt and nut assemblies", 2015.

[35] G. De Matteis, Bulloneria Strutturale Quadro Normativo Fabbricazione – Controlli E Prove Certificazioni s, Promozione Acciaio, 09-2015.

[36] N. Stranghöner, N. Afzali e P. d. Vries, "Slip factors for typical stainless steel surface finishes and new types of coatings for stainless steel", Institute for Metal and Lightweight Structures, 2018.

[37] F. Liljedahl e E. Schedin, "Topography between contact surfaces in slip resistant bolted joint", Outokumpu Avesta Research Centre, Technical report, 2015.

[38] Z. Chen, Y. Peng, W. Su, F. Qian e J. Dong, «Experimental investigation for anti-slipping performance of stainless steel slip-resistant connections with particles embedded in connected plates,» *Construction & building materials,* vol. 152, n. 1059-1067, 2017-10-15.

[39] N. Stranghöner, N. Afzali, P. de Vries, E. Schedin, J. Pilhagen e S. Cardwell, «Slip-resistant bolted connections of stainless steel,» *Berlin: Wiley, Steel construction : design and research,* vol. 10 (4), pp. 333-343, 2017-11.

[40] H. Ahrman e E. Schedin, "Surface characterization of faying surfaces in slip factor tests for slip resistant bolted joints", Outokumpu Avesta Research Centre, 2017.

[41] N. Stranghöner, N. Afzali, P. de Vries, E. Schedin e J. Pilhagen, «Slip factors for slip-resistant connections made of stainless steel,» *Elsevier BV, Journal of constructional steel research,* vol. 152, pp. 235-245, 2019-01.

[42] SCI, "Model calibration and parametric study", 2018.

[43] SCI, "Design specifications for preloaded bolted connections; Design recommendations and design examples; Guidelines for design and execution", 2018.

[44] N. Afzali, N. Stranghöner, J. Pilhagen, T. Manninen e E. Schedin, «Viscoplastic deformation behaviour of preloaded stainless steel connections,» *Elsevier BV Journal of constructional steel research,* vol. 152, pp. 225-234, 2019-01.

[45] A. Ebert, R. Glienke e M. Dörre, «Ultra-long-term slip-resistance and comments to the test procedure determining the slip factor,» *Elsevier BV, Journal of constructional steel research,* vol. 161, pp. 171-186, 2019-10.

[46] T. Manninen e J. Pilhagen, "Creep and stress relaxation behavior of stainless steel plates at room temperature", Outokumpu Avesta and Tornio R&D, Technical report, 2018.

[47] J. Pilhagen, "Mechanical properties and stress relaxation of stainless bolts", Outokumpu Avesta and Tornio R&D, Technical report, 2017.

[48] Eurocode 0 - "Basis of structural design", 2002+A1:2005.

[49] "UNI EN ISO 724 General-purpose metric screw threads -- Basic dimensions", 1993.

[50] UNI EN ISO 7089 "Plain washers - Normal series - Product grade A", 2000.