

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

**INTERVENTI ALLE BOCHE LAGUNARI PER LA REGOLAZIONE DEI FLUSSI DI MAREA
BOCCE DI TREPORTI – MALAMOCCO – CHIOGGIA – SAN NICOLO’**

GRUPPI DI AGGANCO E TENSIONAMENTO

RELAZIONE

**SULL’ADEGUATEZZA STRUTTURALE, SULLA DURABILITA’ E SULLE
OPERAZIONI DI MANUTENZIONE ATTUALI E FUTURE**

Rev.0 23.05.2017

PROF. ING. CARLO BRUTTI

PROF. ING. DONATELLA MASCIA

Sommario

1.	Introduzione	4
2.	Caratteristiche generali, funzione strutturale e processo costruttivo	5
3.	Progetto strutturale.....	9
4.	Protezione contro la corrosione	10
5.	Condizione dei gruppi di aggancio alla data attuale.....	11
5.1.	Generalità	11
5.2.	Bocca di Treporti.....	11
5.3.	Bocca di Malamocco.....	14
5.4.	Bocca di Chioggia.....	14
5.5.	Bocca di S. Nicolò.....	15
6.	Revisione del progetto strutturale per tenere conto dello stato attuale dei tensionatori	17
6.1.	Considerazioni generali	17
6.2.	Risultati ottenuti con l'approccio Fail Safe	17
6.3.	Risultati ottenuti con l'approccio Damage Tolerant	19
6.4.	Considerazioni conclusive sulla revisione del progetto strutturale	22
7.	Mezzi e attività per il miglioramento della protezione contro la corrosione.....	24
7.1.	Generalità	24
7.2.	Risultati degli studi eseguiti.....	24
7.3.	Procedura di protezione	26
8.	Conclusioni generali	28
	ALLEGATO 1: Velocità di corrosione	31
	Oggetto	31
	Analisi dei dati disponibili in letteratura per acciai in atmosfera marina	32
	Analisi dei dati di velocità di corrosione per acciai con deposito di Nichel.....	36
	Misura della velocità di corrosione	36
	Conclusioni	38
	Bibliografia Allegato 1.....	39
	ALLEGATO 2: Progressione della cricca per fatica e corrosione.....	41
	Generalità	41
	Equazione di Paris.....	42
	Valori di soglia	42
	Forma della Cricca	43
	Valori al collasso	45
	Procedura di calcolo	48
	Definizione della successione di cicli più gravoso	48

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

Calcoli della durata nella Bocca di Treporti	52
Calcoli della durata per le Bocche di Malamocco, Chioggia e San Nicolò.	56
Bibliografia.....	60
ALLEGATO 3: Verifica a fatica dei tensionatori con approccio Fail safe.	61
Generalità	61
Risultati per la Bocca di Treporti	63
Risultati per le altre bocche.....	65
Conclusioni del calcolo Fail safe dei tensionatori.....	68

1. Introduzione

Il presente documento riguarda l'esame del comportamento strutturale dei gruppi di aggancio del sistema di dighe mobili per la protezione della Laguna di Venezia ai fini della valutazione della loro durata, alla luce di quanto rilevato sperimentalmente, dopo la loro installazione a partire dal Febbraio 2015. I gruppi analizzati sono quelli definiti dal progetto a suo tempo approvato e realizzato; pertanto le conclusioni riguardano solo steli costituiti in 39NiCrMo3 e nichelati; gli analoghi steli attualmente in fase di studio e sperimentazione da realizzare in SAF Superduplex non sono pertanto oggetto della presente valutazione.

Nel Febbraio 2015 un evento meteorologico di eccezionale intensità provocò l'allagamento della galleria sottomarina della Bocca di Malamocco a causa della quantità di acqua penetrata dalle aperture di accesso, non ancora protette dagli edifici in corso di realizzazione sopra i cassoni di spalla. In conseguenza di tutto questo, i tensionatori rimasero immersi nell'acqua di mare e fu organizzata e sviluppata un'attività di verifica, controllo e pulizia per riportare i tensionatori nelle condizioni iniziali di fornitura e montaggio. Poiché dopo la pulizia furono rilevati alcuni segni di corrosione si stabilì di eseguire controlli analoghi nelle altre bocche per verificare lo stato di conservazione dei gruppi. Particolare attenzione è stata dedicata ai gruppi di aggancio della Bocca di Treporti che, come previsto dalla procedura di installazione delle paratoie, erano già venuti a contatto con l'acqua di mare ed erano stati puliti al termine delle operazioni di montaggio, secondo le prescrizioni contenute nei manuali di manutenzione. Sui tensionatori di Treporti sono stati evidenziati rilevanti segni di corrosione insieme con la presenza di sabbia, depositi marini e organici all'interno dei carter. Come meglio verrà riferito nel seguito, i segni di corrosione erano prevalentemente presenti nella parte dello stelo contenuta nel carter, nella sezione di posizionamento della guarnizione che separa il carter dall'ambiente della galleria, nella sezione di transizione conica tra il diametro 190 e 181.7 mm e nella zona di attacco della filettatura. Se i segni di corrosione all'interno del carter potevano essere riferiti ad un'errata e inefficace azione di pulizia dopo il montaggio, gli altri ponevano in dubbio se la protezione costituita dallo strato superficiale di nichelatura fosse effettivamente efficace per proteggere l'acciaio debolmente legato che costituisce i tensionatori.

I sottoscritti collaudatori statici, prof. C. Brutti e prof.ssa D. Mascia, a suo tempo designati dal Consorzio Venezia Nuova quali collaudatori statici della fornitura dei gruppi di aggancio delle Bocche di Treporti, San Nicolò, Malamocco e Chioggia¹, sono stati successivamente incaricati dal Consorzio Venezia Nuova dapprima di partecipare all'accertamento delle cause dei deterioramenti nonché alla verifica delle operazioni di manutenzione sui tensionatori di Malamocco (indicazione incarico) e successivamente di riaprire il collaudo dei gruppi di aggancio di Treporti, già concluso.

Il presente documento riguarda sia l'esito dei controlli e degli accertamenti fatti in collaborazione con i progettisti, la direzione lavori e le imprese coinvolte nonché le elaborazioni autonomamente eseguite per valutare il comportamento strutturale dei tensionatori per tutta la durata della vita prevista a Capitolato.

¹ L'avanzamento di tali collaudi è: Treporti concluso, S.Nicolò concluso, Malamocco e Chioggia sospesi in attesa della definizione delle attività di protezione e ripristino.

2. Caratteristiche generali, funzione strutturale e processo costruttivo

Il sistema di dighe mobili per la protezione della laguna di Venezia è costituito, in ciascuna delle quattro bocche di comunicazione con il mare aperto, da paratoie mobili vincolate alle strutture di fondazione in c.a. mediante una serie di connettori metallici (Figura 1).

Il sistema di ancoraggio delle paratoie alle fondazioni è costituito da due corpi distinti:

- Il primo elemento posto superiormente e detto "**maschio**", è in grado di raccogliere i carichi trasmessi dalla paratoia attraverso il relativo perno della cerniera e trasmetterli alla parte inferiore solidarizzata alla soletta di fondazione in c.a. Esso è composto da 2 lamiere verticali, adeguatamente sagomate per alloggiare il perno della cerniera, da un disco superiore, da uno inferiore di minor diametro e da 4 costole trasversali di irrigidimento.
- Il secondo elemento, posto inferiormente e detto "**femmina**", è costituito da una struttura scatolare che nella parte centrale presenta una sede troncoconica nella quale è alloggiato il maschio, e alla quale il maschio trasmette le azioni provenienti dal perno mediante i due dischi. L'elemento "femmina" costituisce l'interfaccia tra connettore e fondazioni in c.a., facenti parte integrante del cassone di alloggiamento delle paratoie.

I due elementi ora descritti sono mantenuti a contatto sulla superficie troncoconica dal cosiddetto **Gruppo di aggancio**. Esso è formato da un elemento cilindrico filettato nella parte inferiore e dotato di una testa a martello in quella superiore. Quest'ultima, mediante un apposito meccanismo di rotazione, si impegna nella corrispondente sede del maschio, applicando, grazie al suo pretensionamento, una forza in grado di chiudere stabilmente la connessione Femmina-Maschio. Il tensionatore contrasta su una flangia bullonata alla parte inferiore della femmina ed è realizzato in 39NiCrMo3, forgiato, successivamente lavorato di macchina e nichelato. La connessione tra l'elemento femmina e il cassone è costituita dalle **barre di inghisaggio**, ancorate superiormente mediante un accoppiamento vite-dado alla femmina, inferiormente mediante un ulteriore accoppiamento vite-dado al cielo del cassone. L'intercapedine tra barre e femmina è riempita totalmente con grasso, per impedire il contatto con l'aria. Le barre sono realizzate in 39NiCrMo3 lavorate di macchina e nichelate.

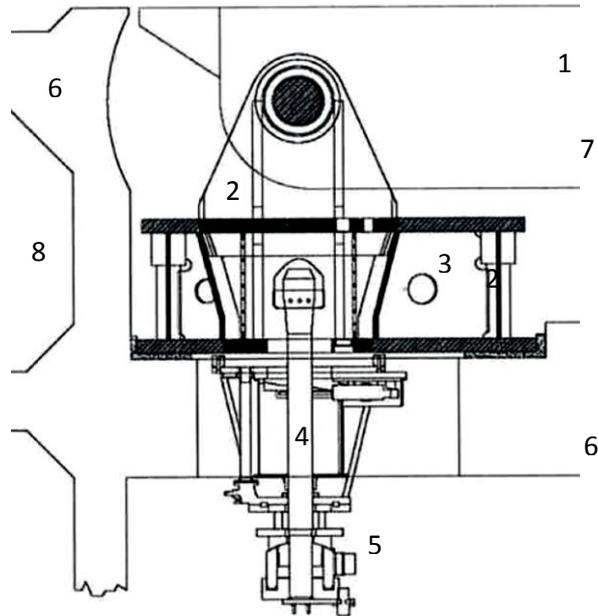
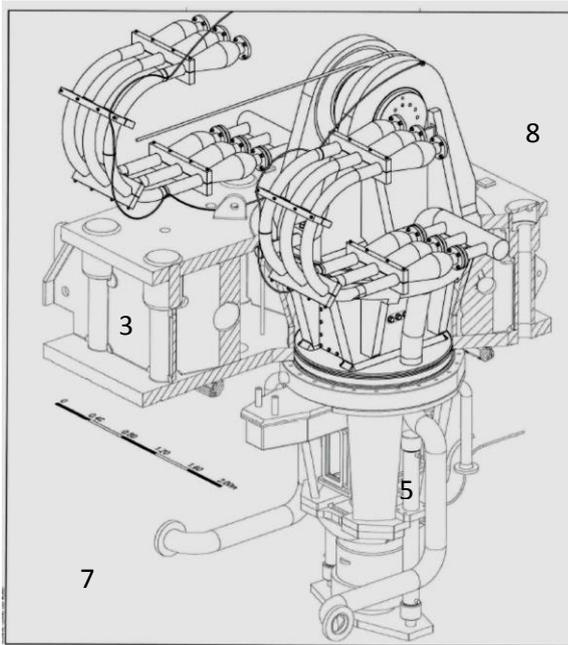
L'ancoraggio della femmina alle fondazioni è concepito in modo da consentirne l'eventuale sostituzione ove in casi eccezionali se ne ravvisasse la necessità. E' evidente, tuttavia, che tale eventualità comporta lavori di notevole impegno e complessità dovendo essi essere eseguiti sott'acqua ed è quindi da considerarsi un'operazione eccezionale. Per tale motivo la femmina, il maschio e la paratoia sono protetti rispetto al rischio di corrosione mediante protezione catodica la cui efficacia è verificata dal sistema di monitoraggio; inoltre la femmina è stata dimensionata con un adeguato spessore di corrosione.

Tra i requisiti previsti per l'opera, uno dei più importanti è la vita utile, fissata dai capitolati in 100 anni, con l'esclusione dell'elemento maschio per il quale è prevista una vita utile di 50 anni.

Considerando le caratteristiche peculiari dell'opera, l'ambiente marino in cui è installata e che non esistono opere analoghe da cui trarre utili informazioni sui problemi legati al danneggiamento e all'invecchiamento, è evidente che il rispetto del requisito sulla durata dell'opera è legato, oltre che alle scelte progettuali e costruttive, anche e soprattutto alle operazioni di controllo e manutenzione in corso di utilizzazione e alla disponibilità di adeguate procedure di riparazione. A tale scopo è stato richiesto al progettista e al costruttore di predisporre il piano di manutenzione definitivo, contenente indicazioni sulla natura e sulla cadenza temporale dei controlli e delle verifiche nonché le procedure di intervento in caso di esito negativo dei controlli e delle misure.

Il tensionatore (Figura 2) è realizzato in acciaio debolmente legato 39 NiCrMo3, le cui caratteristiche meccaniche sono riassunte nell'Allegato 2. Per migliorare le caratteristiche di resistenza ad attacchi corrosivi sul manufatto è stato depositato uno spessore di 70 μm di Nichel (Trattamento di Nichelatura). Il tensionatore dopo la nichelatura viene sottoposto ad una lavorazione di lucidatura che porta la rugosità $R_a = 1.2 \mu\text{m}$ in tutte le zone meno che nel mantello cilindrico su cui scorre, durante le operazioni di montaggio, la guarnizione di tenuta, dove la rugosità $R_a = 0.6 \mu\text{m}$. Per migliorare la resistenza alla corrosione la parte filettata è ricoperta da uno strato di grasso ramato che, oltre a minimizzare il coefficiente d'attrito durante le operazioni di movimentazione, isola la superficie dei filetti dal contatto con l'aria.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.



- | | | | |
|----------------------|-----------|---------------|----------------------|
| 1 Paratoia | 2 Maschio | 3 Femmina | 4 Stelo Tensionatore |
| 5 Gruppo di aggancio | 6 Cassone | 7 Lato Laguna | 8 Lato Mare |

Figura 1 Schema del sistema di ancoraggio delle paratoie

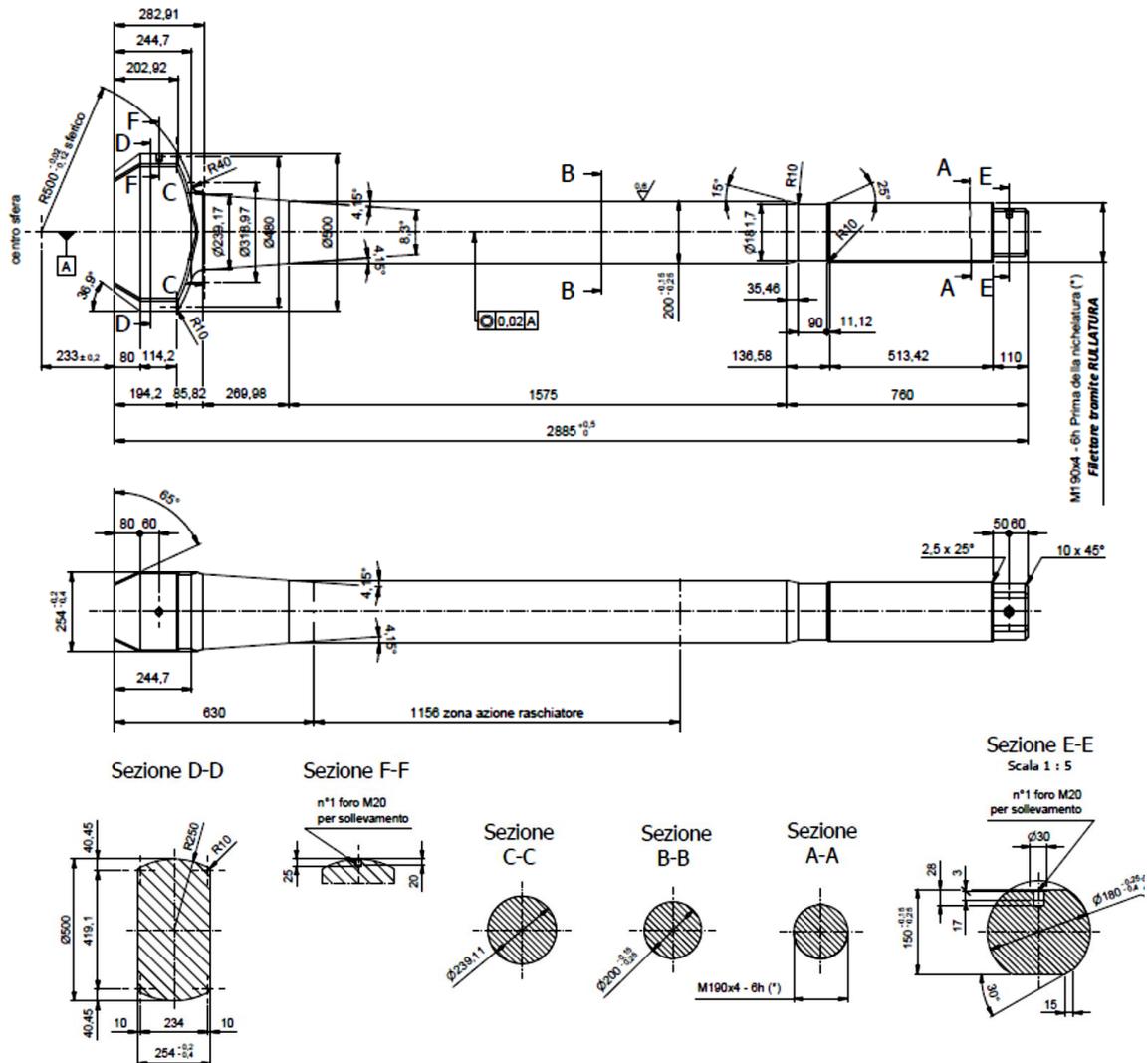


Figura 2 Tensionatore: forma e dimensioni

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

La funzione del tensionatore, come già accennato, è quella di mettere in contatto sicuro la sede della femmina con le corrispondenti superfici coniche di tenuta sul maschio. In Figura 3 è illustrato il sistema di aggancio, la struttura di contrasto e il gruppo oleodinamico che applica il precarico.

Il gruppo oleodinamico è rappresentato in Figura 4. La procedura di tensionamento è formata dai seguenti passi:

1. Il tensionatore viene ruotato e impegnato mediante la testa a martello nella sede del maschio in cui sono ricavate due selle di forma adeguata ad assicurare il perfetto contatto con la testa.
2. Viene azionato mediante apposita centralina mobile, il cilindro oleodinamico di cui alla Figura 4, che obbliga il pistone a sollevarsi finché l'anello di ripartizione va a battuta con la struttura di contrasto; in tale manovra la pressione del circuito oleodinamico è solo quella necessaria alla generazione della forza (peso proprio + attriti) necessaria alla movimentazione del cilindro e degli elementi connessi.
3. Da questo momento ogni aumento della pressione mette in trazione il tensionatore e in compressione il maschio con la femmina.
4. Una volta raggiunto il valore di forza stabilito, viene messo in rotazione mediante un motore orbitale ed una ruota dentata folle il dado meccanico, filettato internamente (Figura 5). In tal modo l'applicazione della forza non è più affidata al cilindro oleodinamico ma ad un sistema di battuta meccanica.

Le caratteristiche del sistema di tensionamento sono le seguenti

- Pressione massima di lavoro nel circuito 250 bar.
- Corsa 40 mm
- Forza di trazione nominale 3300 kN
- Forza di trazione massima 3620 kN
- Forza di trazione minima 3000 kN

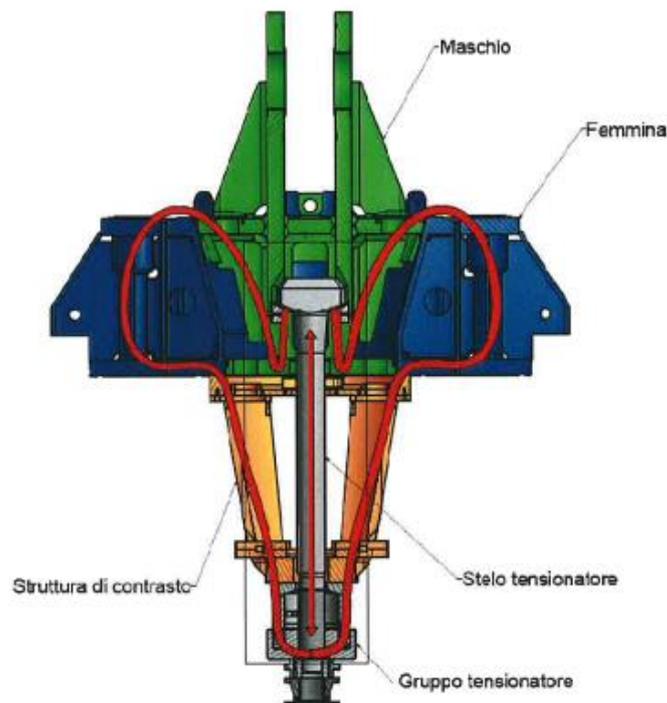


Figura 3 Schema di applicazione del precarico.

La forza di trazione viene controllata periodicamente per assicurarsi che, a causa degli assestamenti del sistema di tensionamento sotto carico, la forza stessa non scenda sotto il valore minimo. Il controllo viene eseguito:

- Misurando la lunghezza dello stelo che verrà posta in trazione, quando è senza carico.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

- Misurando l'allungamento sotto il carico di posa.
- Misurando l'allungamento dopo tempi prestabiliti nel manuale di manutenzione.

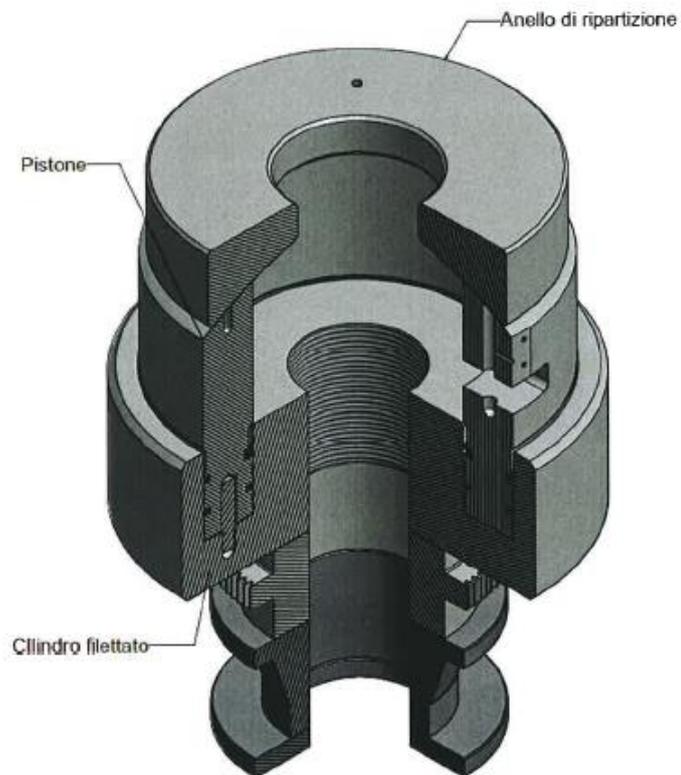


Figura 4 Sistema oleodinamico di tensionamento.

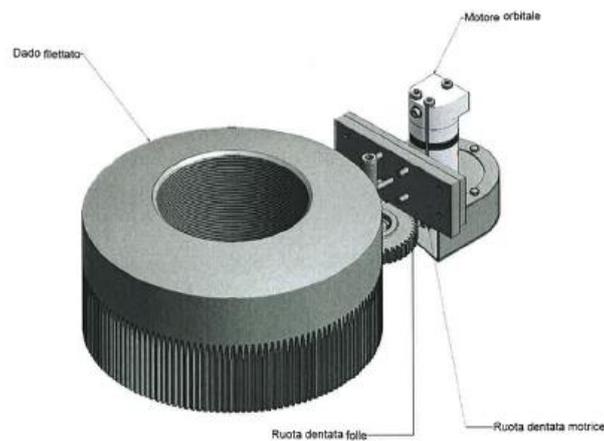


Fig. 6.26 – DISPOSITIVO DI BLOCCO MECCANICO

Figura 5 Dado filettato internamente e sistema di rotazione.

3. Progetto strutturale

Il progetto strutturale del gruppo di aggancio è stato eseguito dal progettista Technital ed è esposto nelle Relazioni di Calcolo Meccanico competenti per ciascuna delle 4 Bocche². Esso è stato sviluppato in diverse fasi:

- La prima prevedeva la rappresentazione, mediante un modello FEM, dell'elemento femmina, dell'elemento maschio e in forma semplificata del tensionatore. Tale modello, caricato con le forze trasmesse dalla paratoia, ha consentito di valutare gli sforzi nella femmina, nel maschio e i carichi assorbiti dal tensionatore.
- Successivamente, mediante un modello FEM di dettaglio, è stato studiato il comportamento del tensionatore eseguendo le verifiche agli stati limite e le verifiche a fatica di quest'ultimo.

In particolare le verifiche a fatica sono state eseguite in accordo alla normativa DNV RP-C203 "Fatigue strength of offshore steel structure" e, su richiesta dei sottoscritti collaudatori statici, anche in accordo alla norma UNI 7670-1988 "Meccanismi per apparecchi di sollevamento. Istruzioni per il calcolo". Tutte le verifiche di resistenza sono superate rispetto ai valori di confronto ammissibili per il materiale impiegato.

E' da notare inoltre che, in fase preliminare antecedentemente alla produzione, è stato realizzato un sistema completo, denominato Preserie, comprendente un elemento femmina, un elemento maschio e un gruppo di aggancio. Su tale prototipo sono stati effettuati accertamenti, controlli e prove, i cui risultati, con esito positivo hanno consentito l'emissione del certificato di collaudo finale³. In particolare è stata condotta una prova a fatica che si è protratta per 3.800.000 di cicli con un opportuno spettro di carico. Nel documento MV078C-PE-MMR-1325 C0 Allegato C il progettista ha dimostrato l'equivalenza, dal punto di vista del danneggiamento a fatica, dello spettro applicato durante le prove a quello di 6.000.000 di cicli, considerato valido per simulare la vita del tensionatore durante 100 anni. Dopo l'esecuzione delle prove a fatica è stata condotta la verifica con liquidi penetranti. Non sono state evidenziati difetti e quindi la prova è stata considerata superata con esito positivo.

Congruentemente con il complesso di tali risultati il progettista ha considerato nei calcoli di progetto, per effetto della nichelatura, il materiale isolato rispetto all'ambiente esterno, potenzialmente corrosivo, e quindi non ha utilizzato nessun coefficiente riduttivo delle prestazioni del materiale per effetto della corrosione.

² Bocca di Treporti: Relazione di calcolo – Parte meccanica MV089P-PE-TMR-3203 C0

Bocca di Malamocco: Relazione di calcolo – Parte meccanica MV080P-PE-MMR-3203 C1

Bocca di Chioggia: Relazione di calcolo – Parte meccanica MV078P-PE-CMR-3203 C1

Bocca di S.Nicolò: Relazione di calcolo – Parte meccanica MV082P-PE-NMR-3203 C1

³ Certificato di collaudo finale del "Completamento della sperimentazione sul gruppo cerniera-connettore delle paratoie e costruzione della preserie – 2° Fase (Studio B.7.03/II) redatto dall'ing. Flavio Zanchettin.

4. Protezione contro la corrosione

Il progetto del gruppo di aggancio prevede che la protezione rispetto alla corrosione sia ottenuta mediante un trattamento di nichelatura in grado di assicurare uno spessore di 70 μm . In sede di collaudo statico dei gruppi di aggancio della Bocca di Treporti i sottoscritti hanno richiesto la ripetizione dei controlli con liquidi penetranti da parte dell'I.I.S sulle superfici trattate. I risultati sono contenuti nella Relazione SER 0539 L ed evidenziano la presenza di una difettosità, seppur contenuta, sul rivestimento della nichelatura che ha reso necessari ulteriori approfondimenti. E' da sottolineare che lo stelo su cui sono stati eseguiti i controlli era lo stesso su cui erano già state fatte tutte le prove, comprese quelle di fatica, durante la sperimentazione prototipale. Si è quindi proceduto ad effettuare una prova non distruttiva sul gruppo tensionatore, che è stato sottoposto a ulteriori 260 cicli di tensionamento e detensionamento a 3400 kN⁴. I risultati sono raccolti nel report di prova Vp 86-11 rev1. I controlli delle superfici mediante liquidi fluorescenti sono stati eseguiti sia prima che dopo avere sottoposto il gruppo a carichi statici ed a cicli di sollecitazione: si è così accertata l'assenza di variazioni dello stato, a seguito dei cicli di carico; inoltre il controllo con liquidi penetranti sulle filettature dello stelo ha evidenziato che non si sono verificati peggioramenti a seguito dell'applicazione dei cicli di carico. Limitate zone di usura hanno interessato le superfici di contatto del filetto con l'ingranaggio di azionamento. Per valutare come proteggere le zone che presentavano difetti sullo strato nichelato sono state eseguite successivamente prove di corrosione accelerata in nebbia salina per 1000 ore su n. 3 spezzoni di barre filettate e nichelate: una senza altri accorgimenti, una protetta dal grasso ramato e una protetta con pasta anticorrosiva Viscopaste HT- TDS. La prova condotta presso il laboratorio di MATED s.r.l. è descritta con i risultati ottenuti nel Rapporto 2012-062 Rev.0. L'esame dei campioni ha consentito di rilevare che:

- Sul campione senza protezione a parte la nichelatura sono presenti segni di corrosione sul tratto filettato con scolature di ossido anche sulla superficie cilindrica liscia che non appare però ossidata.
- Sul campione protetto dal grasso ramato non si rilevano segni di corrosione
- Sul campione protetto con Viscopaste HT-TDS non si rilevano segni di corrosione.

Pertanto la Direzione Lavori sentito anche il costruttore ha stabilito di far eseguire i montaggi immergendo completamente la parte filettata nel grasso ramato in modo da proteggere le zone critiche e da minimizzare l'attrito. E' da notare che tale misura, su richiesta dei collaudatori statici, è stata estesa anche per la protezione delle parti a vista delle barre di inghisaggio, presenti negli stessi locali connettori.

Inoltre su richiesta della Direzione Lavori, il costruttore di concerto con l'esecutore del trattamento di nichelatura, ha svolto una attività sperimentale volta ad ottimizzare il processo di nichelatura in modo da migliorare la regolarità del trattamento e l'assenza di difetti. Per tale attività è stata coinvolta l'Università di Trento nella persona della prof.ssa C. Zanella. Sulla base di tale attività sperimentale è stata emessa la procedura MATED "PROCEDURA DI NICHELATURA AUTOCATALITICA" Rev.7 del 2.8.2013 che definisce un processo ottimizzato rispetto all'originale. In base a tale processo sono stati trattati i tensionatori di Malamocco, San Nicolò e Chioggia.

⁴ La scelta di questo tipo di sollecitazione deriva dal fatto che durante il ciclo di tensionamento e detensionamento il tensionatore è sottoposto a rotazione e traslazione. In tale operazione dunque le superfici degli elementi a contatto vengono sollecitate presumibilmente ad usura e pertanto la prova è significativa per valutare l'adeguatezza del rivestimento nichelato rispetto al rischio che eventuali usure interrompano la continuità dello strato protettivo e offrano materiale base all'attacco corrosivo. Considerando che ogni paratoia subisce uno smontaggio ogni 5 anni, corrispondenti a 20 smontaggi durante i 100 anni di vita dell'impianto, e che a tale smontaggio corrisponde un'operazione di detensionamento-tensionamento, 260 cicli sono stati considerati adeguati a simulare questo tipo di operazione per l'intera vita del gruppo di aggancio, con un notevole margine di sicurezza anche considerando manovre aggiuntive di ritensionamento per compensare eventuale cadute di tiro derivanti dal rilassamento degli elementi strutturali sollecitati.

5. Condizione dei gruppi di aggancio alla data attuale

5.1. Generalità

Nel presente capitolo vengono riportati i risultati delle ispezioni compiute sui tensionatori delle bocche di Treporti, Malamocco, Chioggia e S. Nicolò per verificare lo stato di conservazione.

5.2. Bocca di Treporti

Dopo l'allagamento della galleria di Malamocco, anche su richiesta dei sottoscritti collaudatori statici, sono stati sottoposti a controlli i gruppi di aggancio installati nella Bocca di Treporti. Questi gruppi di aggancio sono stati costruiti e installati all'interno dei cassoni nel 2011; i cassoni sono stati varati nella bocca nel 2012; le paratoie sono state poste in opera tra il 2012 e il 2013 con il conseguente tensionamento. Pertanto si può dire che, al momento delle ispezioni avvenute in aprile del 2016, erano 5 anni dalla costruzione/montaggio, 4 anni dall'inizio del contatto con l'atmosfera marina e 3÷4 anni dal tensionamento e quindi dal contatto con l'acqua di mare durante le operazioni di montaggio e dalla successiva pulizia.

In estrema sintesi, all'atto delle ispezioni, sono stati trovati rilevanti segni di danneggiamento da corrosione distribuiti in maniera non uniforme sui diversi gruppi della bocca e in maniera non uniforme nelle varie zone dello stelo. In particolare è stata fatta una ricognizione puntuale e completa dei tensionatori. I risultati di tale ispezione sono contenuti nel documento emesso da MATED s.r.l. 20160414 Rev.0 "Verifica dello stato di consistenza dei gruppi di aggancio con riferimento agli steli tensionatori". Nel documento sono descritti i metodi di indagine utilizzati, i risultati ottenuti e una documentazione fotografica che riporta le principali zone affette da corrosione. Oltre ai segni di corrosione è stata evidenziata la presenza di rilevanti residui provenienti dalla laguna (sabbia, conchiglie, limo, ecc.) entrati durante le operazioni di montaggio e non rimossi durante la pulizia. Da un punto di vista qualitativo i risultati sono sintetizzati nella tabella riportata a pagina seguente dove sono stati utilizzati tre colori:

- Arancione chiaro: danneggiamenti assenti
- Arancione più scuro: presenza di danneggiamenti moderati
- Rosso: danneggiamento rilevante.

Dall'esame dei risultati si nota:

- Nessuno stelo è esente da danneggiamenti.
- Su 42 steli complessivamente 25 hanno almeno un danneggiamento rilevante e 17 danneggiamenti moderati (nn.1-14-16-18-20-25-26-27-33-35-36-37-38-39-40-41-42)
- Dall'elenco di cui al punto precedente che gli steli in migliore stato di conservazione si addensano preferibilmente tra quelli installati nelle cerniere delle paratoie da 18 a 21.
- Su 462 operazioni di controllo eseguite (11 operazioni per ciascuno dei 42 steli) il 13% ha evidenziato danneggiamenti rilevanti, 38% danneggiamenti moderati e 49% assenza di danneggiamenti).
- Nella quasi totalità dei carter si riscontra la presenza di umidità e/o sabbia e microorganismi.
- I danneggiamenti possono essere classificati in
 - o Ossidazione.
 - o Blistering o rigonfiamenti e distacco scaglie dalla superficie nichelata.
 - o Pitting.
 - o Crevice.

Soprattutto emerge in modo chiaro che la zona più critica è quella in prossimità della guarnizione di tenuta del carter dove i danneggiamenti si addensano sia nella zona sopra, contenuta entro il carter, sia nella zona immediatamente inferiore in tutti gli steli.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

Cassone	Paratoia	Connettore	Gruppo tensionatore	Posa della paratoia	Data di ispezione	ZONA CARTER				ZONA CENTRALE							
						Presenza materiale (ossidi, sabbia, organismi, ...)	Ossidazione superficie Stelo	Ossidazione superficie Carter	Umidità / Acqua	Presenza materiale (ossidi, sabbia, organismi, ...)	Ossidazione filetti stelo	Blistering superficie stelo	Ferroxyl su superficie stelo	Pitting superficie stelo	Crevice area guarnizione	Crevice superiore alla guarnizione	
TBA01	1	1	1	22/08/2014	21/03/2016												
		2	2	22/08/2014	21/03/2016												
	2	1	3	01/08/2014	21/03/2016												
		2	4	01/08/2014	10/03/2016												
	3	1	5	29/07/2014	21/03/2016												
		2	6	29/07/2014	21/03/2016												
TBA02	4	1	7	14/06/2013	21/03/2016												
		2	8	14/06/2013	22/03/2016												
	5	1	9	26/06/2013	10/03/2016												
		2	10	26/06/2013	22/03/2016												
	6	1	11	01/07/2013	22/03/2016												
		2	12	01/07/2013	22/03/2016												
TBA03	7	1	13	04/07/2013	22/03/2016												
		2	14	04/07/2013	22/03/2016												
	8	1	15	27/01/2014	22/03/2016												
		2	16	27/01/2014	08/04/2016												
	9	1	17	05/02/2014	08/04/2016												
		2	18	05/02/2014	08/04/2016												
TBA04	10	1	19	07/02/2014	08/04/2016												
		2	20	07/02/2014	22/03/2016												
	11	1	21	30/06/2014	22/03/2016												
		2	22	30/06/2014	22/03/2016												
	12	1	23	03/07/2014	22/03/2016												
		2	24	03/07/2014	23/03/2016												
TBA05	13	1	25	05/07/2014	23/03/2016												
		2	26	05/07/2014	23/03/2016												
	14	1	27	08/07/2014	23/03/2016												
		2	28	08/07/2014	23/03/2016												
	15	1	29	10/07/2014	23/03/2016												
		2	30	10/07/2014	23/03/2016												
TBA06	16	1	31	12/07/2014	23/03/2016												
		2	32	12/07/2014	23/03/2016												
	17	1	33	15/07/2014	23/03/2016												
		2	34	15/07/2014	23/03/2016												
	18	1	35	17/07/2014	08/04/2016												
		2	36	17/07/2014	08/04/2016												
TBA07	19	1	37	19/07/2014	24/03/2016												
		2	38	19/07/2014	24/03/2016												
	20	1	39	24/07/2014	24/03/2016												
		2	40	24/07/2014	24/03/2016												
	21	1	41	27/08/2014	24/03/2016												
		2	42	27/08/2014	24/03/2016												

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

Contemporaneamente alla ricognizione sistematica dei danneggiamenti la consulente della FIP per i problemi di corrosione, Prof.ssa C. Zanella, ha predisposto un documento dal titolo "Relazione Tecnica. Indagine sull'ossidazione presente sui gruppi di aggancio, identificazione di meccanismi, cause, azioni correttive e preventive. 6.4.2016".

In tale relazione, successivamente condivisa nei suoi contenuti e conclusioni dal Gruppo di lavoro di cui alla nota 7, si evidenzia come l'attacco corrosivo è avvenuto essenzialmente nelle seguenti zone, a partire dal basso verso l'alto:

- Zona in prossimità della filettatura: i prodotti di corrosione riscontrati rivelano che tale zona è venuta a contatto con l'acqua di mare e sabbia in conseguenza delle operazioni di svuotamento del carter dopo il montaggio.
- Parte dello stelo in corrispondenza della piastra di contrasto: i segni di corrosione sono tipo pitting per porosità dello strato protettivo.
- Zona in corrispondenza della guarnizione di tenuta del carter affetta dal fenomeno di crevice dovuto alla presenza di due zone, superiore ed inferiore rispetto alla guarnizione, in cui vi è aerazione differenziale.
- Zona di ristagno sopra la guarnizione ed entro il carter; il ristagno è dovuto alla differenza di quota tra foro di uscita dell'acqua per lo svuotamento (posto più in alto) e filo superiore della guarnizione (posto più in basso): in tale zona si è verificato un contatto prolungato con acqua di mare e quindi una corrosione pronunciata.
- Zona di accumulo di sabbia e sporizia sul fondo del carter per una pulizia insufficiente che crea una condizione di aerazione differenziale in ambiente ricco di cloruri: la corrosione è forte e profonda qualche millimetro (circa 3 mm).
- Zona sovrastante fino alla testa: zona molto sporca in cui si notano segni di pitting e rigonfiamenti della nichelatura.

Le cause del danneggiamento possono essere identificate in sintesi come segue:

- La pulizia non adeguata che ha provocato sia l'accumulo di sporizia nel carter sia il dilavamento dell'acqua di mare lungo lo stelo con ristagno nella zona dei filetti.
- L'effetto geometrico sfavorevole in corrispondenza della guarnizione del carter con il ristagno di acqua di mare tra il foro di uscita dell'acqua e la guarnizione stessa.
- Le condizioni ambientali senza ricambio d'aria.
- La minor resistenza a corrosione rispetto alle attese del nichel chimico dopo il trattamento termico.

Quest' ultima causa deriva dal fatto che dopo la nichelatura, come prescritto dal capitolato, si è eseguito su questi steli un trattamento termico per ottenere la durezza di 900 HV. In conseguenza di tale trattamento, una volta superata la temperatura di 280 °C, il nichel da amorfo si trasforma in una struttura cristallina più soggetta a microcricature e porosità. A tale aspetto è stata data una soluzione, in sede di ottimizzazione del processo di nichelatura, modificando i parametri del trattamento come si deduce dalla procedura MATED "PROCEDURA DI NICHELATURA AUTOCATALITICA" Rev.7 del 2.8.2013.

Successivamente per verificare l'avanzamento dei processi corrosivi è stata eseguita dai collaudatori statici un'altra ispezione presso la Bocca di Treporti in data 21.2.2017 (Verbale n.40). Dal rapporto redatto in tale occasione si rileva:

- Considerato che i tensionatori sono attualmente sotto tensione e quindi impegnati nelle rispettive sedi all'interno degli elementi "maschio", l'ispezione è stata condotta esaminando la porzione visibile attraverso la finestratura del carter.
- In molti tensionatori si è riscontrata la presenza di goccioline di condensa sui vetri e di melma arancione nella parte bassa, in prossimità della sede della guarnizione.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

- Sono presenti residui di sabbia e conchiglie che mostrano che non sono state eseguite operazioni di bonifica e pulizia come peraltro indicato nella citata relazione della prof.ssa Zanella e sollecitato anche dai collaudatori statici.
- In numerosi tensionatori la guarnizione di tenuta installata nella parte bassa del carter, teoricamente a contatto con lo stelo, è risultata estrusa. Tale effetto è dovuto, probabilmente alla movimentazione dei tensionatori, per le ispezioni a suo tempo eseguite, con superfici non completamente lisce a causa della presenza di prodotti di corrosione.
- In generale sulla superficie degli steli sono presenti segni di corrosione del tutto congruenti con quanto rilevato a suo tempo nell'ispezione eseguita da MATED.

5.3. Bocca di Malamocco

Per verificare l'avanzamento dei processi corrosivi, dopo l'allagamento e le conseguenti operazioni di pulizia, è stata eseguita dai collaudatori statici una ispezione, prima dell'inizio delle operazioni di montaggio delle paratoie ai gruppi di aggancio della Bocca di Malamocco, in data 10.1.2017 (Verbale n.37). Dal rapporto redatto in tale occasione si rileva:

- L'ispezione puntuale compiuta su tutti i tensionatori installati nella galleria sottomarina di Malamocco ha evidenziato che su tutti i tensionatori sono state eseguite le riparazioni nei punti che presentavano segni di corrosione ed è stata applicato sul mantello il prodotto protettivo Sol/Gel. I tensionatori si presentano pertanto in buono stato.
- E' stata applicata la pasta anticorrosiva sulla sezione di transizione.
- Sono tuttora presenti alcuni segni di corrosione sulle piastre di contrasto, sotto il foglio di gomma nera di protezione, che andrebbero riparati secondo la solita procedura emessa da FIP e a suo tempo approvata. E' da notare che insieme ai segni di corrosione sono presenti anche macchie di grasso secco che in parte si confondono con i segni effettivi di corrosione e che andrebbero puliti per visualizzare la situazione effettiva.
- I dadi di fissaggio degli steli dei cilindri laterali di accostamento, posti inferiormente alla piastra, presentano, a seguito dell'allagamento del Febbraio 2015, segni di corrosione. E' indispensabile la sostituzione di quelli attualmente presenti con altri di dimensioni uguali ma di materiale adeguato a resistere agli attacchi corrosivi. La sostituzione è stata richiesta dai sottoscritti collaudatori statici.

Successivamente per verificare lo stato dei gruppi di aggancio durante le operazioni di montaggio delle paratoie, i collaudatori statici hanno compiuto un'ispezione in data 2.3.2017 (Verbale n.43). Dal rapporto redatto in tale occasione si rileva:

- La visita ha riguardato il controllo dei gruppi di aggancio durante la fase di installazione delle paratoie e le operazioni di lavaggio dei carter dopo lo svuotamento dell'acqua di mare che entra a seguito delle operazioni di montaggio delle paratoie.
- In particolare erano in corso le attività per la pulizia degli steli e dei recessi interni, secondo la procedura operativa predisposta da CVN. Tale procedura si articola in 19 punti illustrati nel documento dal titolo "INTERVENTI MIGLIORATIVI SUGLI STELI DEI TENSIONATORI – Procedura post-installazione paratoie" consegnato ai collaudatori dall'Ing. Strano prima della visita.
- A tale proposito si è evidenziata la difficoltà di esecuzione del lavaggio del carter a causa delle ridotte dimensioni del foro di svuotamento. Tanto che per un'efficace pulizia risulta più agevole smontare completamente il carter
- La Direzione Lavori di concerto con CVN ha proposto una modifica al carter consistente nell'allargamento del foro e nell'inserimento di una piastrina con guarnizione di tenuta, che è stata condivisa dai sottoscritti ed è al vaglio del progettista.

5.4. Bocca di Chioggia

In data 25.10.2016, in occasione della visita di collaudo degli edifici tecnici della bocca di Chioggia è stato eseguito, dai sottoscritti collaudatori statici, anche un sopralluogo ai tensionatori e alle barre di inghisaggio.

- Sono state eseguite tutte le riparazioni dei piccoli punti di corrosione rilevati, applicando la procedura emessa da FIP e a suo tempo approvata.
- E' stata applicata la pasta anticorrosiva sulla sezione di transizione.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

- Manca l'applicazione del SOLGEL che verrà eseguita in occasione del montaggio delle paratoie, previsto per l'estate 2017.
- In generale i tensionatori sono in buono stato di conservazione, anche se sono privi della protezione con telo di plastica e sali igroscopici.
- La condizione diversa da tutte le altre bocche è che i segni di umidità e condensa sono molto minori e i carter superiori sono in generale asciutti. Successivamente si è constatata la presenza di ventilatori da cantiere installati alle uscite della galleria che movimentando l'aria migliorano le condizioni dell'aria. Tale soluzione potrebbe esser estesa anche alle altre bocche per migliorare le condizioni termo-igrometriche ambientali.

5.5. Bocca di S. Nicolò

Una prima ispezione era stata eseguita nel marzo 2016 su un gruppo di aggancio anche con la presenza della prof.ssa C. Zanella, riscontrando un buono stato di conservazione e l'assenza di segni di corrosione. Successivamente, in data 26.1.2017 (Verbale n.39) è stata compiuta una ricognizione puntuale e completa di tutti i tensionatori da parte dei collaudatori statici e della D.L. I risultati sono i seguenti:

- Sono stati esaminati tutti i 40 gruppi di aggancio. Su 39 gruppi si è potuto constatare uno stato di conservazione buono senza particolari segni di danneggiamento. Sulla superficie di alcuni steli sono presenti depositi di grasso che possono essere rimossi agevolmente senza uso di solventi e sotto i quali si evidenzia un buono stato della superficie nichelata.
- In corrispondenza al cambio di sezione (transizione dal diametro 181.7 a 200 mm) è stata applicata la pasta anticorrosiva che è presente su tutti i tensionatori. In alcuni casi la pasta risulta graffiata fino a mostrare la superficie sottostante. In tutti i casi in cui questa situazione è stata rilevata si è provveduto immediatamente a ristabilire la continuità dello strato redistribuendo la pasta dalle zone confinanti.
- In alcuni casi le superfici sono imbrattate in varia misura con grasso ramato che, una volta rimosso, mostra superfici senza danni. In alcuni punti i depositi sulla superficie non sono asportabili senza solvente e quindi si è richiesto un esame mediante Ferroxyll, dopo pulitura con solvente, per evidenziare l'eventuale necessità di riparazioni dello strato nichelato secondo la procedura emessa da FIP e già approvata.
- Sono stati esaminati anche i carter superiori attraverso gli oblò in vetro. Pur rilevando qualche debole segno di scolatura, i carter sono sostanzialmente asciutti.
- Diversa è la condizione del tensionatore n.34. Infatti sulla sommità dello stelo, poco sotto la piastra di riscontro superiore, vi è una vasta zona con una macchia di prodotto estremamente aderente che sembra essere una zona di estesa corrosione superficiale. Dato che le paratoie nella bocca di San Nicolò non sono state montate, le uniche ragioni plausibili del danneggiamento possono essere: un'errata esecuzione delle operazioni di lucidatura finale, durante la fabbricazione, o un danneggiamento accidentale per urto dello strato di nichelatura, durante il montaggio in sede.
- Anche il carter sovrastante il tensionatore n.34 si presenta, almeno ad un esame esterno, in cattive condizioni. Sulla cornice del carter, infatti, sono presenti segni che ad un esame visivo sembrano prodotti dalla corrosione e il vetro degli oblò è imbrattato di una sostanza arancione. Ciò indicherebbe un attacco particolarmente aggressivo in quanto il carter è realizzato con acciaio inossidabile. Per il timore di trafile e non disponendo di mezzi adeguati, non è stato possibile aprire immediatamente il carter
- E' stata richiesta pertanto con urgenza:
 - o Apertura del carter, verifica dello stato di conservazione e della presenza di corrosione nonché verifica della tenuta della valvola superiore e dello stato di conservazione delle guarnizioni di tenuta.
 - o Pulizia dei prodotti depositati sugli oblò e all'interno della camera e raccolta del prodotto rimosso con esecuzione dell'analisi chimica.
 - o Smontaggio del tensionatore e verifica della parte inferiore filettata e della parte superiore della testa a martello

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

- Pulizia della zona corrosa sul mantello e raccolta del prodotto rimosso con esecuzione dell'analisi chimica.
 - Misura dello spessore della nichelatura in corrispondenza alla lesione e nelle zone circostanti.
 - Esame dell'estensione della zona effettivamente corrosa per giudicare se il tensionatore è riparabile o va sostituito.
 - Preparazione di un rapporto dettagliato riportante le operazioni eseguite e i risultati ottenuti.
 - L'analisi chimica dei prodotti depositati sulle superfici del carter e del tensionatore e la riparazione o sostituzione del tensionatore stesso.
- Tali attività sono in corso e si è in attesa di un report definitivo prima di procedere ad una nuova ispezione finale dopo le necessarie operazioni di ricondizionamento e prima della chiusura del collaudo.

6. Revisione del progetto strutturale per tenere conto dello stato attuale dei tensionatori

6.1. Considerazioni generali

Alla luce dello stato attuale dei tensionatori si rileva che:

- Per i tensionatori di Treporti è necessario valutare la loro attitudine a resistere ai carichi di esercizio considerando le condizioni in cui si trovano attualmente nonché le attività di controllo, verifica e manutenzione prevedibili per assicurare la durata prevista.
- Per i tensionatori delle altre bocche è necessario valutare la loro attitudine a resistere ai carichi di esercizio considerando le condizioni in cui si trovano attualmente nonché le attività di controllo, verifica e manutenzione prevedibili per assicurare la durata prevista.

Le attività di Treporti e delle altre bocche sono state considerate separatamente in quanto diverso è lo spettro di sollecitazioni agenti (minore per Treporti) e diverso è lo stato di conservazione attuale (peggiore per Treporti).

Preliminarmente quindi è necessario scegliere la metodologia da impiegare per valutare la durata dei tensionatori. In generale il calcolo della durata di una parte meccanica può essere fatto secondo due approcci diversi:

- Fail Safe
- Damage tolerant

Il primo sistema di calcolo è quello seguito dal progettista nei documenti di progetto meccanico, già citati (vd. Nota 1) e presuppone l'assenza di difetti; esso consente di calcolare il valore dei cicli a rottura con adeguato coefficiente di sicurezza e di affidabilità statistica. La normativa utilizzata dal progettista è la DNV RP-C203 [A2.5]. Il progettista ha anche sviluppato un analogo calcolo, su richiesta dei collaudatori statici, in accordo alla norma UNI 7670 [A2.6] ottenendo risultati analoghi anche se un po' più gravosi, comunque entro i margini di sicurezza prescritti.

L'approccio **fail safe**, comunemente utilizzato nella progettazione, è adeguato quando si tratta di valutare la resistenza a fatica, espressa in termini di cicli a rottura, di un elemento a partire dalla sua messa in servizio in perfetto stato e senza difetti. E' invece incapace di prevedere la durata di un pezzo che presenti un difetto come una cricca da corrosione.

Purtroppo l'indagine svolta sui tensionatori, i cui risultati sono riportati nel paragrafo 5, ha riscontrato la presenza di un attacco corrosivo in alcuni steli molto esteso e in altri più contenuto, in entrambi i casi con presenza di cricche che oltrepassavano abbondantemente lo strato di Nichelatura.

In questo caso è necessario ricorrere all'approccio **Damage Tolerant** che, facendo uso della meccanica della frattura, è in grado di valutare i cicli di propagazione di un difetto a partire dalla condizione iniziale fino alla condizione di collasso della struttura.

Poiché la situazione dei tensionatori propone la presenza sia di elementi con difetti sia di elementi senza difetti, nei paragrafi seguenti vengono esposti i risultati ottenuti con entrambi gli approcci. L'applicazione dell'approccio Fail Safe, inoltre, consente di valutare, in condizioni più vicine alla realtà sperimentata in questi anni, l'adeguatezza strutturale dei tensionatori così come definiti dai documenti di capitolato delle corrispondenti forniture.

6.2. Risultati ottenuti con l'approccio Fail Safe

Come già accennato il progettista nei calcoli di progetto ha supposto che il materiale base costituente gli steli dei tensionatori (39NiCrMo3) sia protetto in modo completo rispetto all'attacco corrosivo dal

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

trattamento di nichelatura. In realtà tale ipotesi non si è rivelata verificata sia per insufficiente pulizia dopo il montaggio delle paratoie (Treporti) sia per l'allagamento della galleria di Malamocco, sia per errori e danneggiamenti casualmente avvenuti durante il montaggio (Chioggia e S. Nicolò).

Pertanto si è ripetuto il calcolo eseguito dal progettista supponendo che sia presente un attacco corrosivo dovuto ad acqua di mare. Per l'esecuzione del calcolo sono state assunte le seguenti modalità operative:

- Si è utilizzata la normativa UNI 7670-1988 [A2.6] che, sebbene ritirata costituisce un riferimento completo per la verifica a fatica di elementi meccanici e, inoltre, all'esame comparativo eseguito dal progettista in occasione delle operazioni di collaudo statico dei gruppi di aggancio di Treporti, si è rivelata più stringente della DNV RP-C203 [A2.5].
- Si sono considerati validi i risultati ottenuti dal progettista nell'analisi con modelli ad elementi finiti per la definizione dei carichi agenti durante la vita del tensionatore.
- Sono stati pertanto utilizzati due spettri di sforzi agenti (uno per la zona sottotesta e uno per il primo filetto in presa) per la bocca di Treporti selezionando i più gravosi tra quelli effettivamente forniti dal progettista che distinguevano la direzione delle forze "verso mare" e "verso laguna".
- Sono stati utilizzati poi per le altre bocche altri due spettri agenti (uno per la zona sottotesta e uno per il primo filetto in presa) definiti dal progettista come validi, per inviluppo, in tutte le altre bocche (Malamocco, Chioggia e S. Nicolò).
- Inoltre sia per Treporti sia per le altre bocche, i controlli hanno evidenziato una criticità per quanto riguarda l'attacco corrosivo in corrispondenza alla transizione conica tra il diametro 190 mm e il diametro 181.7mm. Dato però che in corrispondenza a tale sezione il coefficiente di concentrazione delle tensioni è prossimo all'unità, i risultati sono sempre meno gravosi di quelli ottenuti in corrispondenza al primo filetto in presa e pertanto la loro esposizione, per brevità, è stata omessa⁵.
- Per valutare la riduzione di resistenza derivante dal fatto che è presente un attacco corrosivo si è utilizzato un coefficiente riduttivo della resistenza pari a 3.6, adeguato rispetto al carico di rottura del materiale.
- La sovrapposizione degli effetti di danneggiamento conseguenti all'applicazione degli spettri di carico è stata eseguita come è usuale secondo la regola di Miner, che è stata adottata dal progettista. La condizione limite di collasso è stata assunta, in accordo al progettista, quando la somma dei danneggiamenti raggiunge il valore 0.5. In realtà le evidenze sperimentali di cui è traccia in bibliografia mostrano che si potrebbe probabilmente giungere anche al valore 0.6. Si è scelto il valore minore per ragioni di sicurezza.
- Inoltre nel calcolo si è assunto un coefficiente riduttivo per le dimensioni anche se le caratteristiche del materiale usate sono quelle per la dimensione competente del semilavorato.

Tab. 1 Riepilogo dei risultati ottenuti con l'approccio Fail Safe corretto con la corrosione

Bocca	Zona di verifica	Danno Totale	Danno totale ammissibile
Treporti	Sottotesta	0.092	0.500
Treporti	Primo filetto in presa	0.463	0.500
Altre Bocche	Sottotesta	0.276	0.500
Altre Bocche	Primo filetto in presa	0.334	0.500

Nell'allegato 3 sono contenuti i risultati ottenuti applicando il calcolo ora esposto che sono riassunti anche nella Tab. 1.

⁵ Infatti il rapporto tra le aree è $\left(\frac{190}{181.7}\right)^2 = 1.093$ mentre il coefficiente di concentrazione effettivo per la fatica è, nella sezione del primo filetto in presa, pari a 4.81 e quindi risulta chiaro il motivo per il quale quest'ultima sezione è più gravosa.

In base ai risultati ivi esposti è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- Tutte le verifiche sono soddisfatte rispetto al valore limite del danno totale pari a 0.5.
- Per la Bocca di Treporti, la verifica più critica è per la zona sottotesta dove il danno totale è pari a 0.463 rispetto ad un valore limite di 0.5. In realtà esiste un margine di sicurezza ulteriore. Infatti sono stati assunti come dati caratteristici del materiale quelli minimi di riferimento imposti dalla normativa. Se invece si fa uso dei minimi effettivamente riscontrati nelle prove di caratterizzazione dei materiali (Tab. 6) il carico di rottura è pari a 798 MPa al quale corrisponde un limite di fatica per il ciclo alterno simmetrico di 399 MPa, di conseguenza il danno totale diventa 0.379 con un margine di sicurezza pari a 31.9 %.
- Per le altre bocche, la verifica più critica è per la zona del primo filetto in presa, dove il danno totale è pari a 0.334 rispetto ad un valore limite di 0.5. In realtà esiste un margine di sicurezza ulteriore. Infatti sono stati assunti come dati caratteristici del materiale quelli di riferimento imposti dalla normativa. Se invece si fa uso di minimi effettivamente riscontrati nelle prove di caratterizzazione dei materiali (Tab. 6) il carico di rottura è pari a 763 MPa al quale corrisponde un limite di fatica per il ciclo alterno simmetrico di 381 MPa, di conseguenza il danno totale diventa 0.305 con un margine di sicurezza pari a 63.9 %.
- Il fatto che il risultato ottenuto per la Bocca di Treporti sia più gravoso di quello delle altre bocche nonostante le paratoie di Treporti abbiano dimensioni inferiori, è probabilmente giustificato dal fatto che lo spettro applicato nelle altre bocche è più articolato e quindi più preciso mentre quello di Treporti essendo semplificato risulta, come involuppo, di fatto più gravoso.

La verifica eseguita consente quindi di affermare che il progetto strutturale è corretto anche considerando l'effetto della corrosione e quindi le nuove condizioni di resistenza del materiale più gravose, rispetto a quelle assunte dal progettista.

6.3. Risultati ottenuti con l'approccio Damage Tolerant

Come riportato nella premessa del presente capitolo, la presenza di un danneggiamento da corrosione costituisce per i tensionatori un inizio di cricca che può propagarsi sia per effetto della corrosione sia per quello derivante dalla sollecitazione di fatica. Ciò rende necessario, per la valutazione della durata del tensionatore stesso, l'uso dell'approccio Damage Tolerant.

La sovrapposizione del danneggiamento derivante da corrosione e fatica è un problema ben noto e ampiamente trattato sia nella letteratura scientifica [A2.2] sia nelle normative internazionali applicabili [A2.1]. Nell'Allegato 1 è stata svolta ed esposta dai sottoscritti collaudatori statici un'analisi dei riferimenti disponibili per definire, nelle condizioni in cui si trovano i tensionatori, una velocità di corrosione attendibile espressa in mm/anno (o mm/y) di perdita di materiale per effetto del processo di deterioramento. Sulla base di tale analisi si può evidenziare che:

1. Come per i problemi di meccanica della frattura, è possibile distinguere nella vita di un componente soggetto a fenomeni corrosivi e sollecitato meccanicamente, tre fasi: incubazione, propagazione e collasso. La fase di incubazione, di più difficile valutazione quantitativa, è stata assunta, nelle valutazioni del presente documento, di estensione temporale nulla. Cioè si assume che il processo corrosivo inizi dall'istante dell'installazione del gruppo di aggancio. Inoltre è lecito considerare la velocità di corrosione costante e indipendente dalla sollecitazione applicata e dalla dimensione della cricca (cioè dal fattore K_I di intensità degli sforzi), per tutta la fase di propagazione, fino all'incipiente collasso.
2. Per quanto riguarda la velocità di propagazione il riferimento più pertinente per le parti esposte all'aria è quello desumibile da "UNI ENV 1993-5, Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture di acciaio - Parte 5: Pali e palancole" [A-1.14] che prescrive 0.02 mm/anno per atmosfera in prossimità del mare. Per il caso delle parti di tensionatore all'interno del carter che quindi sono a contatto con

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

acqua di mare o con residui sabbiosi, i valori di riferimento possono essere assunti pari a quelli della splash zone, cioè pari a 0.300 mm/anno, secondo la norma DNV-RP.0416 [A-1.11].

3. E' evidente quindi che i valori delle velocità di corrosione sono affetti, in generale, anche riferendosi alle sole normative, da una dispersione non trascurabile spaziando da valori dello spessore corroso dopo 100 anni che possono corrispondere a 2 mm ($V_c = 0.020$ mm/y) o a 30 mm ($V_c = 0.300$ mm/y).
4. Per tale motivo le elaborazioni numeriche riguardanti la valutazione della durata dei tensionatori mediante la meccanica della frattura, stante l'incertezza sul valore della velocità di corrosione sono state eseguite in modo parametrico assumendo velocità di corrosione variabili da 0.05 mm/anno fino a 1 mm/anno. L'estremo inferiore del campo di variazione è quello corrispondente ad una velocità di corrosione modesta ma superiore a quella consigliata dalle norme per esposizione ad atmosfere marine mentre il limite superiore di 1 mm/anno è un valore sicuramente approssimato per eccesso.

In realtà l'impiego degli steli tensionatori, come già accennato nell'Allegato 1 e successivamente analizzato nell' Allegato 2, è particolare per un altro aspetto. Infatti i cicli di sollecitazione sono applicati, a parte qualche ciclo minore, quando la paratoia viene dispiegata in condizioni di galleggiamento per contrastare il fenomeno dell'acqua alta. Tra un dispiegamento e l'altro vi sono lunghi periodi in cui non è attivo il danneggiamento meccanico da fatica ma è attivo quello di sola corrosione sotto l'effetto statico del carico di pretensionamento. Pertanto si è ipotizzato, in accordo alla bibliografia sull'argomento [A2.9] e [A2.8], che per rappresentare correttamente il complesso di questi fenomeni si deve considerare la sovrapposizione di due contributi diversi per la valutazione della progressione della cricca secondo l'equazione:

$$\frac{da}{dt} = V_c + \frac{dN}{dt} \left(\frac{da}{dN} \right)_{Fat}$$

Il primo derivante dal fenomeno di corrosione sotto sforzo statico e il secondo derivante da fatica in presenza di un ambiente aggressivo (Ambiente Marino). Inoltre, ai fini dell'esecuzione dei calcoli, essendo il processo di accrescimento non lineare non è possibile semplicemente sommare i due effetti. Pertanto la lunghezza della cricca iniziale di ciascun gruppo di cicli di fatica deve essere aggiornata in base agli effetti della corrosione precedentemente subita.

In base a tale algoritmo è stato messo a punto un foglio di calcolo (vd. Allegato 2) per simulare la progressione del danneggiamento totale giungendo a determinare da un lato il valore limite della cricca che provoca il collasso e dall'altro l'entità della cricca stessa dopo 100 anni di crescita per diversi valori della velocità di corrosione. I calcoli sono stati eseguiti per tre zone dello stelo: quella sottotesta in prossimità del raccordo, al primo filetto in presa e in corrispondenza della zona di transizione da 190 mm a 181.7 mm. Il valore della cricca finale è stato calcolato sia per una cricca iniziale di 1 mm che rappresenta il tensionatore praticamente privo di danni e con una cricca iniziale di 5 mm che corrisponde ad un danno superiore a quello riscontrato sugli steli di Treporti (circa 3 mm). I risultati, per una velocità di corrosione pari a 0.300⁶ mm/y, sono riepilogati per la bocca di Treporti in Tab. 2 e in Tab. 3. Per le altre bocche i risultati analoghi sono riassunti nelle Tab. 4 e in Tab. 5. Nelle stesse tabelle sono mostrati anche i coefficienti di sicurezza espressi come rapporto tra la cricca che provoca il collasso e la cricca dopo 100 anni di progressione. Dai risultati si rileva che per velocità di corrosione ≤ 0.300 mm/y la durata è sempre superiore a 100 anni con margini di sicurezza ampi per una profondità iniziale di 1 mm e più ristretti, ma comunque rassicuranti, per una profondità iniziale di 5 mm. E' da notare inoltre che la velocità di corrosione di 0.300 mm/anno,

⁶ In realtà nell'allegato 2 è mostrato come, per la bocca di Treporti, anche per una velocità di 0.500 mm/y, la durata di 100 è assicurata. Tuttavia per uniformità di presentazione sono riportati i dati relativi alla velocità di corrosione di 0.300 mm/y che rappresenta il valore limite per tutte le altre bocche per avere una durata di 100 anni.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

secondo DNV-RP.0416 [A-1.11], corrisponde ad una superficie metallica non protetta nella cosiddetta "splash zone" cioè nella zona alternativamente asciutta-bagnata. Quest'ultima condizione è sicuramente più gravosa di quella conseguibile nelle camere dei tensionatori, purché le superfici siano pulite, asciutte e ben areate. Infine considerando che le zone di transizione sono protette dalla pasta Viscopaste HT- TDS e i filetti in presa sono protetti dal grasso ramato, i dati più attendibili sono quelli della zona sottotesta.

Tab. 2 Bocca di Treporti. Valori della cricca in mm dopo 100 anni per una velocità di corrosione $V_c = 0.3$ mm/y ed una profondità iniziale di 1mm

Zona Tensionatore	Cricca triangolare			Cricca semicircolare		
	Limite	Dopo 100 anni	Coeff.sic.	Limite	Dopo 100 anni	Coeff.sic.
Sottotesta	84,8	37.5	2.26	88,9	38.9	2.29
Primo filetto	65,7	31.6	2.08	72,5	32.1	2.26
Transizione	60,6	31.8	1.91	66,5	32.3	2.06

Tab. 3 Bocca di Treporti. Valori della cricca in mm dopo 100 anni per una velocità di corrosione $V_c = 0.3$ mm/y ed una profondità iniziale di 5mm

Zona Tensionatore	Cricca triangolare			Cricca semicircolare		
	Limite	Dopo 100 anni	Coeff.sic.	Limite	Dopo 100 anni	Coeff.sic.
Sottotesta	84,8	43.4	1.95	88,9	44.3	2.01
Primo filetto	65,7	35.8	1.84	72,5	36.2	2.00
Transizione	60,6	36.2	1.67	66,5	36.6	1.82

Tab. 4 Bocche di Malamocco, Chioggia e S.Nicolò. Valori finali delle cricche in mm dopo 100 anni per una $V_c = 0.300$ mm/y ed una profondità iniziale di 1mm

Zona Tensionatore	Cricca triangolare			Cricca semicircolare		
	Limite	Dopo 100 anni	Coeff.sic.	Limite	Dopo 100 anni	Coeff.sic.
Sottotesta	74,9	49,1	1,53	75,9	54,5	1,39
Primo filetto	58,6	32,60	1,80	66,8	33,2	2,01
Transizione	52,3	33,10	1,58	56,6	33,9	1,67

Tab. 5 Bocche di Malamocco, Chioggia e S.Nicolò. Valori finali delle cricche in mm dopo 100 anni per una $V_c = 0.300$ mm/y ed una profondità iniziale di 5 mm

Zona Tensionatore	Cricca triangolare			Cricca semicircolare		
	Limite	Dopo 100 anni	Coeff.sic.	Limite	Dopo 100 anni	Coeff.sic.
Sottotesta	74,9	54.5	1.37	75,9	60.9	1.25
Primo filetto	58,6	37.1	1.58	66,8	38.2	1.75
Transizione	52,3	37.9	1.38	56,6	39.4	1.44

Le conclusioni ora espone sono valide per le due forme di cricca (triangolare e semicircolare) assunte come applicabili. Altre forme di cricca sono teoricamente possibili tra le quali è possibile avere casi più pericolosi di quelle studiate estensivamente. Per esempio, come è riportato nell'allegato 2, una cricca circonferenziale cioè estesa su tutto il perimetro, ha una propagazione più veloce di quelle triangolari o semicircolari. La durata attesa, per i tensionatori di Treporti, infatti con $V_c = 0.300$ mm/y ed una cricca iniziale di 1 mm è ancora superiore a 100 anni ma già per un cricca iniziale di 3 mm la durata scende, seppur di poco, sotto i 100 anni. Con una profondità iniziale di 5 mm e $V_c = 0.300$ mm/y la durata attesa è invece di 90 anni. Con

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

una profondità iniziale invece di 5 mm e una velocità di corrosione di 1.000 mm/y la durata scende drasticamente a 36 anni. Questo risultato da un lato definisce la necessità di eseguire un'analisi più estesa per quanto riguarda le forme delle cricche applicabili e dall'altro può servire da guida preliminare per discernere quali siano i tensionatori potenzialmente pericolosi.

6.4. Considerazioni conclusive sulla revisione del progetto strutturale

I sottoscritti collaudatori statici, nel quadro dell'incarico ricevuto per far fronte agli effetti dell'allagamento di Malamocco e dell'incarico ricevuto per valutare i miglioramenti da implementare sui tensionatori di Treporti hanno analizzato la resistenza degli steli tensionatori dei gruppi di aggancio applicando ai tensionatori di Treporti e ai tensionatori delle altre bocche sia l'approccio "Fail safe" sia quello "Damage tolerant".

I risultati ottenuti con l'approccio "Fail safe" evidenziano che i tensionatori stessi sono strutturalmente adeguati alla funzione di progetto.

I risultati ottenuti con l'approccio Damage Tolerant mettono in luce che se la velocità di corrosione derivante dall'ambiente è contenuta entro valori inferiori a 0.300 mm/y i tensionatori possono assicurare la durata richiesta di 100 anni, purché la forma delle cricche sia tra quelle effettivamente qui indagate (triangolare e semicircolare). Il contenimento della velocità di corrosione deve essere affidato a provvedimenti che riguardano sia il trattamento superficiale dei tensionatori con opportuni prodotti protettivi, sia le operazioni di pulizia, lavaggio e asciugatura sia la sorveglianza e il condizionamento dell'aria nei locali.

Pertanto si ritiene indispensabile proporre l'esecuzione di una sperimentazione sul campo inserendo negli ambienti in cui sono posizionati i tensionatori, appositi provini in 39NiCrMo3 con trattamento di nichelatura, soggetti a un livello di carico analogo a quello presente nello stelo e scelti con forma e caratteristiche in accordo alla norma EN ISO 7539 [A-1.15] in modo da riprodurre il tipo di sollecitazione agente (vd. allegato 1). I provini dovrebbero essere esposti liberamente all'atmosfera degli ambienti del locale tensionatori. La verifica e la misura della velocità di corrosione effettiva risulterebbe in tale maniera precisa ed agevole consentendo interventi tempestivi di pulizia e protezione sugli steli stessi.

A proposito dei risultati fin qui sintetizzati si deve sottolineare quanto segue:

- Le attività, i risultati delle quali sono qui di seguito riportati, esulano dai compiti previsti nell'incarico di collaudo statico della fornitura affidato ai sottoscritti a suo tempo; tuttavia trattandosi di un problema assai rilevante per la durabilità di un componente essenziale del sistema, si è ritenuto utile eseguire, in base ai dati disponibili, valutazioni quantitative riguardanti la resistenza e la durata prevedibile dei tensionatori.
- E' però doveroso richiamare l'attenzione sul fatto che il ruolo del collaudatore statico è quello di ultimo controllore della resistenza strutturale e quindi le elaborazioni qui riportate non sono e non possono essere utilizzate come una revisione degli elaborati progettuali ma solo come un contributo per richiamare l'attenzione sia sulle metodologie da utilizzare sia sui risultati con essi ottenibili.
- In particolare è necessario evidenziare che i risultati sono stati ottenuti considerando come valore del Fattore di intensità degli sforzi critico (K_{Ic}) quello derivato dalle prove di resilienza attraverso la formula stabilita dalla Norma BS 7910. Sarebbe auspicabile eseguire delle prove di propagazione della cricca su provini di 39NiCrMo3 soggetti agli stessi trattamenti eseguiti sui tensionatori per avere dati di riferimento più attendibili.
- Quelli qui esposti sono comunque risultati preliminari che devono essere discussi e confrontati con i risultati ottenuti da calcoli eseguiti in modo indipendente da altri, per esempio il progettista o un ente terzo qualificato.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

- Qualsiasi sia l'origine delle eventuali elaborazioni condivise riguardanti la resistenza e la durata prevedibile dei tensionatori, esse devono comunque essere sottoposte all'attenzione del progettista perché esprima un parere sulla loro attendibilità e applicabilità.

7. Mezzi e attività per il miglioramento della protezione contro la corrosione

7.1. Generalità

Nell'allegato 1 riguardante specificamente il fenomeno della corrosione, è posto in evidenza che gli elementi principali responsabili di un fenomeno di sforzo-corrosione sono tre:

- La presenza di un materiale che può essere soggetto a corrosione.
- Un ambiente con caratteristiche aggressive per quel materiale.
- Uno stato di sforzo meccanico superiore ad un valore di soglia.

Poiché gli ultimi due elementi non sono modificabili perché provengono dalla localizzazione del gruppo di aggancio e dalla stessa funzione strutturale dello stesso, il modo per superare le difficoltà è quello di modificare il primo elemento cioè la reattività del materiale costituente il gruppo di aggancio. Ciò si può ottenere in diverse maniere⁷:

1. Realizzando il gruppo di aggancio in un materiale resistente all'attacco corrosivo come per esempio un acciaio inox superduplex; visti i livelli di sollecitazione agenti è indispensabile ricorrere al più performante dei materiali oggi disponibili a livello industriale cioè un acciaio austeno-ferritico classificato come ASTM A 182 F55 – UNS S32760F55 – EN 10250-4/1.4501 – X2CrNiMoCuWN25.7.4⁸.
2. Proteggendo il materiale attualmente impiegato con un opportuno strato isolante. Questa operazione si può eseguire in diverse maniere:
 - Rivestendo il tensionatore realizzato in 39NiCrMo3 con uno strato in INCONEL 625 o equivalente (parte cilindrica) e con un doppio rivestimento costituito da lega INCONEL 625 e lega UNS R31233 o equivalente (testa a martello). Il deposito del rivestimento avviene mediante tecnologia laser⁹.
 - Rivestendo il tensionatore realizzato in 39NiCrMo3 e nichelato con opportuni prodotti in modo da isolare il materiale dal contatto con l'ambiente corrosivo, proteggendo le zone critiche eventualmente presenti sia per porosità microscopiche eventuali del trattamento di nichelatura sia per danneggiamenti generati durante le operazioni di movimentazione e montaggio.

Poiché il presente documento si riferisce alle forniture di gruppi di aggancio già eseguite e delle quali i sottoscritti sono collaudatori statici, nel prosieguo del presente capitolo ci si riferisce solo a quest'ultima tipologia di protezione.

7.2. Risultati degli studi eseguiti

Durante l'attività del gruppo di lavoro di cui alla nota 7, è stato svolto un intenso lavoro sperimentale teso a determinare i prodotti migliori per conseguire la completa protezione del tensionatore nichelato. Sono stati sottoposti ad esame comparativo i seguenti prodotti:

⁷ Ci si limita qui ad elencare le metodologie che sono state discusse nel Gruppo di Lavoro organizzato e coordinato dal Consorzio Venezia Nuova da Gennaio a Settembre 2016 al quale hanno partecipato in varia misura e secondo le rispettive competenze ed incarichi: il progettista (TECHNITAL) con i suoi responsabili e con i consulenti (prof. Ormellese e prof. Mapelli), il progettista e costruttore (FIP) con i suoi consulenti (prof.ssa Zanella e MATED s.r.l.), la Direzione Lavori (Lotti-Thetis) con il suo consulente (prof. Gusmano), i collaudatori statici (Proff. Brutti e Mascia), i consulenti del Provveditore (ex Magistrato alle Acque) prof. Paolucci e ing. Ramundo.

⁸ Per le caratteristiche fisico-chimiche e per quelle meccaniche si veda la procedura emessa da IIS Progress s.r.l. PRO/STF/001S.17 Rev.1.

⁹ Vd. Documento redatto dal prof. Gusmano "Ripristino dei tensionatori di Lido Treporti mediante rivestimento degli steli esistenti con laser cladding – Disciplinary tecnico." -Rev.1 – 5.10.2016

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

- SwissNanoSystems SNS1-F, trattamento applicabile a spruzzo, spessore circa 0.2 μm e vetrificazione tramite mantenimento, dopo l'applicazione, per 2 ore alla temperatura di 150 °C.
- Nanocoating Master Pro Shield, trattamento SOL-GEL applicabile a temperatura ambiente, che crea uno strato ceramico isolante di spessore pari a circa 1 μm . Si tratta di un prodotto che viene applicato sulla superficie da proteggere, dopo pulizia e asciugatura, a temperatura ambiente con un panno; l'essiccazione avviene entro 2 ore ed entro 7 giorni avviene la vetrificazione dello strato.
- Polyguard RT-2400 LT, pasta inibitrice reattiva che crea uno strato protettivo coprente, a base di ossidi stabili, e in tal modo isola il materiale sottostante dal contatto con l'ambiente esterno creando quindi un effetto barriera simile alla pasta anticorrosiva applicata sulle barre di inghisaggio.

Tali prodotti sono stati sottoposti ad una campagna di prove di corrosione in diverse condizioni e in diversi ambienti. I campioni provati, in forma lamina di dimensioni 3cmx10cmx3mm dello stesso materiale base dello stelo e Nichelatura ottimizzata, sono stati provati secondo le seguenti combinazioni:

- a) Lamina nichelata tal quale
 - b) Lamina nichelata trattata con SNS1-F
 - c) Lamina nichelata trattata con SNS1-F idrofobico
 - d) Lamina nichelata trattata con Master Pro Shield (Sol-Gel)
 - e) Lamina nichelata ricoperta con RT-2400 LT
 - f) Lamina nichelata trattata con SNS1-F e ricoperta con RT-2400 LT
 - g) Lamina nichelata trattata con SNS1-F idrofobico e ricoperta con RT-2400 LT
 - h) Lamina nichelata trattata con Master Pro Shield (Sol-Gel) e ricoperta con RT-2400 LT
- Risultati sono riassunti nei seguenti documenti emessi da MATED s.r.l.

Proposta test di validazione per rivestimenti per Nichel REV05082016

Rapporto2016-345 Curve potenziodinamiche

Rapporto2016-346 Pitting in FeCl₃

Rapporto2016-347 Crevice in FeCl₃

Rapporto2016-348 Immersione in Seawater

Rapporto2016-349 Immersione in sol Aggressiva

Rapporto2016-350 Crevice in Seawater

Rapporto2016-361 Re-passivation

L'esito delle prove elencate può essere sintetizzato nei seguenti punti:

- Sia il rivestimento in Master Proshield (Sol-Gel) sia quello con SNS1-F idrofobico pigmentato accoppiati con l'applicazione della pasta RT-2400 LT (campioni g e h) riducono in maniera sostanziale gli effetti di tutti i vari attacchi corrosivi.
- Le prove SNS1-F non pigmentato, nella maggior parte dei casi forniscono risultati peggiori rispetto all'applicazione degli altri prodotti.
- Nella prova di determinazione delle curve potenziometriche, i risultati dei due prodotti, Master Proshield (Sol-Gel) e SNS1-F idrofobico pigmentato accoppiati con l'applicazione della pasta RT-2400 LT, sono molto prossimi.
- Nella prova di crevice in seawater e per l'immersione in soluzione aggressiva (sia con crevice former sia senza) il Master Proshield (Sol-Gel) accoppiato con pasta RT-2400 LT (campione h) fornisce prestazioni migliori.
- Nella prova di Pitting in Cloruro Ferrico e in quella in seawater con crevice former entrambi i prodotti, Master Proshield (Sol-Gel) e SNS1-F idrofobico pigmentato accoppiati con l'applicazione della pasta RT-2400 LT (campioni g e h) riducono l'effetto corrosivo a pochi punti percentuali

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

rispetto al provino Nichelato, con una prestazione leggermente superiore per il prodotto SNS1-F idrofobico pigmentato.

- Nelle altre prove, cioè crevice in cloruro ferrico e repassivation in NaCl, il prodotto SNS1-F idrofobico pigmentato accoppiato con pasta RT-2400 LT (campione g) esibisce prestazioni migliori.

Pertanto viste le buone prestazioni di entrambe le alternative, Master Proshield (Sol-Gel) e SNS1-F idrofobico pigmentato accoppiati con l'applicazione della pasta RT-2400 LT (campioni g e h), e considerato che con i tensionatori posti in opera l'applicazione del prodotto SNS1-F idrofobico pigmentato a spruzzo con successivo mantenimento per 2 ore a 150 °C, è praticamente impossibile si è scelto di proteggere gli steli tensionatori già installati con l'applicazione di Master Proshield (Sol-Gel) accoppiato con pasta RT-2400 LT.

7.3. Procedura di protezione

In definitiva sulla base delle attività di studio e sperimentazione è stata messa a punto ed utilizzata già sui tensionatori di Malamocco dopo l'installazione delle paratoie la procedura di seguito descritta.

1. Il tensionatore viene pulito e asciugato
2. Si applica il Master Proshield (Sol-Gel) dalla rastrematura (zona 2 di Fig. 11) fino all'altezza della guarnizione di tenuta del carter.
3. Viene montata la paratoia.
4. Dopo che la paratoia è stata montata, nell'arco di un breve tempo, non oltre una settimana dalla posa, il gruppo di aggancio viene detensionato.
5. Si smonta il carter.
6. Viene eseguito il lavaggio accurato della camera interna del carter (intercapedine), dello stelo e della camera inferiore mediante acqua tiepida in pressione.
7. Si asciuga il carter, lo stelo e la camera inferiore con l'ausilio di aria compressa essiccata.
8. Si applica il Master Proshield (Sol-Gel) sulla parte alta dello stelo dal livello della guarnizione fino alla testa a martello compresa.
9. Si applica la pasta RT 2400 al di sotto della guarnizione del carter per una larghezza complessiva di 15 cm.
10. Viene rimontato il carter.
11. Viene eseguito il tensionamento del gruppo
12. Si apre l'oblò del carter
13. Si applica la pasta Viscotak¹⁰ nello spazio tra guarnizione del carter e lo stelo fino a rifiuto (zona a imbuto tra il livello della guarnizione e il livello del foro di svuotamento, dove a Treporti si è sempre riscontrato accumulo di umidità e detriti).
14. All'interno del carter viene inserito un supporto tessile contenente il prodotto VCI (inibitore di corrosione) in quantità sufficiente a ricoprire, per evaporazione, tutte le superfici metalliche.
15. Si esegue la chiusura dell'oblò e di tutte le valvole afferenti alla zona inferiore.
16. Dopo almeno 2 giorni, tempo necessario perché il prodotto VCI vaporizzi e si depositi sulle superfici, si apre l'oblò e si rimuove il supporto tessile del VCI oramai esaurito.
17. Si inseriscono i sacchetti di essicante (tipo Silicagel) in quantità sufficiente a proteggere la camera e in posizione visibile dall'oblò.
18. Si provvede alla chiusura dell'oblò con sostituzione delle guarnizioni, ove necessario.
19. Si esegue la prova di tenuta del carter con aria compressa essiccata.
20. Si applica la pasta protettiva nella zona della rastrematura

¹⁰ Si tratta di una pasta anticorrosiva che si utilizza per proteggere manufatti metallici a contatto con l'acqua (p.es tubazioni interrate) analoga al Molycote impiegato per proteggere le barre di inghisaggio.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

21. Si verifica che tutta la camera contenente la parte filettata sia riempita di grasso ramato nello spazio tra stelo filettato e dado di chiusura stelo a rifiuto e si applica, se assente, lo stesso grasso ramato dalla porzione filettata fino alla zona rastremata.

In tal modo tutte le porzioni di superficie nichelata del tensionatore sono protette dal contatto diretto con l'ambiente potenzialmente aggressivo da appositi prodotti applicati in superficie.

Le attività descritte nel presente paragrafo devono essere ripetute ogni volta che si smonta lo stelo e/o lo si movimentata.

La descrizione puntuale di queste attività e delle responsabilità esecutive e di quelle di verifica e controllo, già descritte nel documento "BOCCHIE DI PORTO DI LIDO, MALAMOCCO E CHIOGGIA INTERVENTI INTEGRATIVI GRUPPI CERNIERA-CONNETTORE - RELAZIONE TECNICA. 01 C1 15.5.2017" devono essere inserite nei manuali di manutenzione.

Negli stessi manuali di manutenzione dovranno essere inserite le prescrizioni necessarie al controllo della velocità di corrosione di cui al para. "Misura della velocità di corrosione" dell'Allegato 1.

8. Conclusioni generali

A causa dell'allagamento della Bocca di Malamocco è stata predisposta dal Consorzio Venezia Nuova un'attività di valutazione dei danneggiamenti sui gruppi di aggancio di tale Bocca e dello stato degli analoghi gruppi delle altre bocche. Tale attività ha portato da un lato allo studio di adeguate procedure di conservazione e dall'altro allo studio dell'applicazione di materiali più resistenti all'attacco corrosivo per la realizzazione degli steli.

Il primo passo del lavoro svolto è stata la ricognizione puntuale sulle quattro bocche dello stato di conservazione/danneggiamento degli steli (vd. Para 5) nonché l'identificazione delle cause del processo corrosivo. Riguardo a questo argomento è necessario distinguere due casi: Treporti e le altre bocche. Per Treporti il rilevante danneggiamento riscontrato deriva, in base alle constatazioni ed analisi fatte:

- Dalla pulizia non adeguata che ha provocato sia l'accumulo di sporcizia nel carter sia il dilavamento dell'acqua di mare lungo lo stelo con ristagno nella zona dei filetti.
- Dall'effetto geometrico sfavorevole in corrispondenza della guarnizione del carter con il ristagno di acqua di mare tra il foro di uscita dell'acqua e la guarnizione stessa.
- Dalle condizioni ambientali senza ricambio d'aria.
- Dalla minor resistenza a corrosione del nichel chimico dopo il trattamento termico rispetto a quanto ipotizzato in sede di progetto e di capitolato.
- Dalla porosità casuale del rivestimento nichelato.

Per le altre bocche invece, dove non era stato, all'epoca delle ispezioni, eseguito il montaggio delle paratoie i danneggiamenti, diffusi in modo casuale e non sistematici come a Treporti, sono derivati:

- Dal contatto con l'acqua di mare e successiva pulizia senza la rimozione completa dei residui di salsedine (solo per la Bocca di Malamocco dove è avvenuto l'allagamento nel Febbraio 2015)
- Dalle condizioni ambientali senza ricambio d'aria.
- Dalla porosità casuale del rivestimento nichelato.
- Da danneggiamenti casuali presumibilmente derivanti da urti o errate manipolazioni durante le operazioni di montaggio.

Contemporaneamente, visti i risultati rilevati in campo durante le ispezioni, i sottoscritti collaudatori statici hanno sviluppato autonomamente una revisione del progetto strutturale elaborato dal Progettista Technital e approvato dal Comitato Tecnico del Magistrato alle Acque di Venezia. Tale progetto è stato eseguito a suo tempo, con esito positivo in tutte le verifiche, applicando la normativa di riferimento. In particolare per la fatica è stato applicato l'approccio "Fail safe" senza utilizzare coefficienti riduttivi della resistenza a seguito di attacchi corrosivi, in quanto il progettista ha supposto che lo strato di nichelatura proteggesse il materiale base in modo integrale. Pertanto, utilizzando lo stesso stato di sforzo definito dal progettista, sono state rieseguite dai sottoscritti collaudatori statici le verifiche di resistenza a fatica considerando però un attacco corrosivo in presenza di acqua di mare. Tutte le verifiche nelle zone potenzialmente critiche degli steli delle 4 Bocche hanno dato esito positivo rispetto ai valori limite di confronto per una durata di 100 anni. Considerando poi i valori di resistenza effettivi, cioè riscontrati nel corso delle numerose prove di caratterizzazione predisposte dalla D.L., vi sono, anche rispetto ai valori ammissibili di confronto, ulteriori buoni margini di sicurezza.

Dato che sui tensionatori sono stati rilevati segni di danneggiamento sono stati applicati i metodi della Meccanica della Frattura per valutare la durata degli steli danneggiati. In particolare è stata modificata la legge di accrescimento per fatica della cricca per tenere conto dell'ambiente marino, in accordo a quanto prescritto nella norma BS 7910, e, a tale contributo, è stato aggiunto, in modo parametrico, l'effetto dell'accrescimento da corrosione sotto sforzo per velocità di corrosione crescenti. I risultati ottenuti con l'approccio Damage Tolerant mettono in luce che solo se la velocità di corrosione derivante dall'ambiente è

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

contenuta entro valori inferiori a 0.300 mm/y e la forma delle cricche è tra quelle effettivamente indagate, i tensionatori possono assicurare la durata richiesta di 100 anni. Il contenimento della velocità di corrosione deve essere affidato pertanto a provvedimenti adeguati che riguardano sia i tensionatori, sia le operazioni di pulizia, lavaggio e asciugatura sia la sorveglianza e il condizionamento dell'aria nei locali.

Dato però che il dato relativo alla velocità di corrosione è quello più variabile per cause non completamente controllabili a priori, si suggerisce l'esecuzione di un monitoraggio sperimentale sul campo inserendo negli ambienti in cui sono posizionati i tensionatori, appositi provini in 39NiCrMo3 con trattamento di nichelatura, soggetti a un livello di carico analogo a quello presente nello stelo e scelti con forma e caratteristiche in accordo alla norma EN ISO 7539 [A-1.15] in modo da riprodurre il tipo di sollecitazione agente (vd. Allegato 1). In base a tali provini si potrebbe infatti misurare agevolmente la velocità di corrosione effettiva consentendo interventi tempestivi di pulizia e protezione sugli steli stessi.

A proposito dei risultati fin qui sintetizzati si deve sottolineare quanto segue:

- Le attività svolte per conseguire tali risultati, esulano dai compiti previsti nell'incarico di collaudo statico della fornitura affidato ai sottoscritti a suo tempo; tuttavia trattandosi di un problema assai rilevante per la durabilità di un componente essenziale del sistema, si è ritenuto utile e doveroso eseguire, in base ai dati disponibili, valutazioni quantitative riguardanti la resistenza e la durata prevedibile dei tensionatori in modo da poter suggerire provvedimenti adeguati atti a risolvere le problematiche riscontrate.
- E' però altrettanto doveroso richiamare l'attenzione sul fatto che il ruolo del collaudatore statico di una fornitura è quello di ultimo controllore, con riferimento alla resistenza strutturale, della rispondenza della fornitura al progetto approvato e validato, al capitolato e agli eventuali ordini di servizio. Pertanto quanto qui riportato non può essere utilizzato come revisione degli elaborati progettuali ma solo come un contributo per richiamare l'attenzione sia sulle metodologie da impiegare sia sui risultati con essi ottenibili.
- In particolare è necessario evidenziare che i risultati sono stati ottenuti considerando come valore del Fattore di intensità degli sforzi critico (K_{IC}) quello derivato dalle prove di resilienza eseguite dalla D.L. attraverso la formula stabilita dalla Norma BS 7910, solitamente approssimata per difetto. Sarebbe auspicabile eseguire delle prove di propagazione della cricca su provini di 39NiCrMo3 soggetti agli stessi trattamenti eseguiti sui tensionatori per avere dati di riferimento più precisi.
- Quelli qui esposti sono comunque risultati preliminari che devono essere discussi e confrontati con i risultati ottenuti da calcoli eseguiti in modo indipendente da altri, per esempio il progettista o un ente terzo qualificato.
- Nell'esecuzione dei calcoli sono state assunte due forme di cricche (presumibilmente le più probabili), sarebbe utile che nelle verifiche indipendenti venissero indagate anche altre forme di cricche, che, seppur meno probabili o comunque evitabili con adeguate operazioni di riparazione, potrebbero portare a risultati diversi. Infatti si è riscontrato che una cricca con estensione su tutta la circonferenza (cricca circonferenziale) può portare a durate più basse rispetto alle altre forme di cricca e pertanto andrebbe, una volta che se ne individuasse la presenza o l'incipiente formazione riparata con urgenza.
- Qualsiasi sia l'origine delle eventuali elaborazioni riguardanti la resistenza e la durata prevedibile dei tensionatori, esse devono comunque essere sottoposte all'attenzione del progettista perché esprima un parere sulla loro attendibilità e applicabilità.

Nel paragrafo 7 della presente relazione sono riportati i risultati della sperimentazione comparativa su prodotti da utilizzare per proteggere adeguatamente dall'attacco corrosivo nelle reali condizioni che si verificano nelle gallerie delle quattro bocche, la superficie nichelata. Al termine di tale sperimentazione è stata messa a punto una procedura di pulizia e trattamento delle superfici che, allo stato delle conoscenze basate sulle sperimentazioni effettivamente compiute, ha i requisiti necessari per la protezione degli steli.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

Essa è attualmente applicata ai gruppi di aggancio della bocca di Malamocco dove sono in corso di ultimazione le operazioni di montaggio delle paratoie.

Tale procedura, insieme con i suggerimenti forniti dai sottoscritti nella presente relazione circa le sperimentazioni e i monitoraggi da compiere ora e durante la fase di esercizio, richiedono come urgente e non procrastinabile la revisione dei manuali di manutenzione fino alla messa in marcia dell'impianto e per la successiva fase di esercizio anche in accordo a quanto contenuto nel documento elaborato dal progettista Technital "BOCCHHE DI PORTO DI LIDO, MALAMOCCO E CHIOGGIA INTERVENTI INTEGRATIVI GRUPPI CERNIERA-CONNETTORE - RELAZIONE TECNICA. 01 C1 15.5.2017". A tale proposito i sottoscritti collaudatori statici ribadiscono quanto già segnalato nella stesura del documento "Bocca di Malamocco. Relazione di sintesi delle attività condotte per il collaudo statico. Parere di nulla osta per l'installazione delle paratoie. 3.2.2017":

- Nella revisione dei manuali di manutenzione dei gruppi di aggancio dovranno essere inserite tutte le attività fin qui descritte.
- In assenza di questi interventi ne risulterebbe diminuita la durabilità rispetto alla vita richiesta con esiti, in assenza di un adeguato monitoraggio, potenzialmente incontrollabili sull'integrità dei gruppi di aggancio.
- Pertanto la durabilità richiesta in sede di stesura dei requisiti fondamentali del sistema (cioè 100 anni) può essere conseguita solo a prezzo di maggiori oneri di manutenzione rispetto a quanto previsto in sede di progetto.

Si richiama quindi l'attenzione delle commissioni di collaudo tecnico- amministrativo competenti sulla necessità di valutare se tutto questo costituisca una diminuzione del valore del gruppo di aggancio a causa dei costi futuri da sostenere.

Infine si sottolinea l'estrema urgenza di procedere alla bonifica dei tensionatori di Treporti sui quali i danni da corrosione sono i più rilevanti. La bonifica deve prevedere anche la distinzione tra quelli che possono essere riparati e quelli che devono essere sostituiti avviando quindi le necessarie procedure di sostituzione. Tra questi ultimi, in base a quanto detto in precedenza, ci sono senza dubbio quelli che dovessero presentare cricche con estensione su tutta la circonferenza con profondità rilevante, in quanto su per essi la speranza di vita è bassa rispetto alla durata richiesta.

Non è compito dei sottoscritti stabilire se tali sostituzioni devono essere fatte con tensionatori in 39NiCrMo3 nichelati secondo il processo ottimizzato e protetti secondo le procedure esposte al para.7 o con le soluzioni ipotizzate dal gruppo di lavoro di cui alla nota 7 della presente relazione e attualmente in fase di studio prototipale. In qualsiasi caso i gruppi di aggancio devono essere restituiti alla loro piena efficienza prima di poter utilizzare il sistema per il suo impiego progettuale.

In assenza di una sollecita esecuzione di queste attività nella Bocca di Treporti, considerato che la velocità di corrosione attuale non è nota, non è possibile garantire la durata dei gruppi di aggancio.

22-05-2017

I collaudatori Statici

Prof. Ing. Carlo Brutti

Prof. Ing. Donatella Mascia

ALLEGATO 1: Velocità di corrosione

Oggetto

La generazione di cricche causate dalla sovrapposizione di sforzi meccanici e aggressione corrosive (o Stress Corrosion Cracking SCC) è un fenomeno dovuto alla sovrapposizione di tre fattori concomitanti:

- La presenza di un materiale che può essere soggetto a corrosione.
- Un ambiente con caratteristiche aggressive per quel materiale.
- Uno stato di sforzo meccanico superiore ad un valore di soglia.

Se uno di questi elementi manca il fenomeno non avviene o si presenta con velocità lentissime e quindi praticamente non percettibili. D'altra parte il caso dei tensionatori del sistema di dighe mobili della Laguna di Venezia presenta alcune caratteristiche specifiche che possono essere così riassunte:

- Essi sono installati al coperto in una galleria in cui l'atmosfera ha caratteristiche di tipo marino.
- Lo stelo è sollecitato da cicli di fatica provenienti dal moto ondoso sia di lungo sia di breve periodo, quando le paratoie vengono dispiegate. Il periodo di utilizzo è stimato in 8-10 dispiegamenti l'anno per una durata di circa 8-12 ore. Supponendo i valori massimi si ha quindi un numero di ore all'anno pari a circa 1.4% del totale.
- Nel resto dell'anno il tensionatore è soggetto ad uno sforzo costante derivante dal carico di pretensionamento.

Per poter valutare il rischio di eventuali cedimenti e la durata del tensionatore in presenza di difetti non è possibile quindi riferirsi solo alla classica progressione di una cricca valutata mediante la legge di Paris della Meccanica della frattura in ambiente progressivo ma si deve anche risolvere il problema di valutare la velocità di progressione di una cricca nel periodo in cui lo sforzo agente è costante e quindi il fenomeno è statico.

In questo allegato vengono discussi i riferimenti reperibili in letteratura per quanto riguarda la velocità di corrosione di acciai al carbonio o debolmente legati in presenza di atmosfera marina. La velocità di corrosione è definita come

$$V_c = \frac{da}{dt} = CK^m$$

Dove V_c è la velocità di corrosione espressa in mm/anno, a è lo spessore dello strato corrosivo in mm, K è il fattore di intensità degli sforzi della meccanica della frattura in MPa $\cdot\sqrt{m}$ e C ed m sono costanti dipendenti dal materiale e dal tipo di ambiente. E' un dato consolidato (vedi ad es. [A-1.1] e [A-1.2]) che l'andamento della velocità di approfondimento della cricca è quello riportato in Fig. 1.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

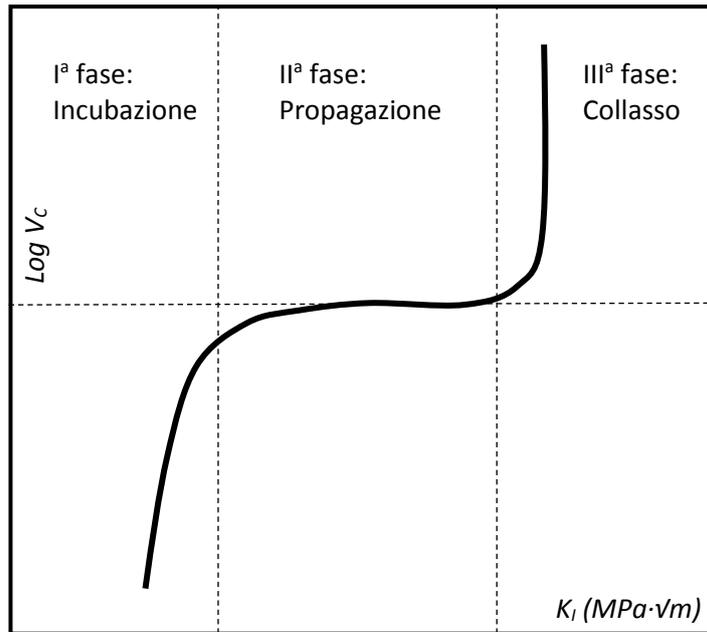


Fig. 1 Andamento qualitativo della velocità di corrosione

Esiste quindi una fase del fenomeno, che è solitamente la più lunga, nella quale si ha una velocità costante di approfondimento della cricca da corrosione. Al fine quindi di prevedere, almeno in via del tutto preliminare la progressione della cricca da corrosione, è stata quindi svolta una approfondita ricerca bibliografica per definire un valore di riferimento in condizioni prossime a quelle che si verificano effettivamente nelle sale connettori delle Bocche del sistema MOSE.

Analisi dei dati disponibili in letteratura per acciai in atmosfera marina

In [A-1.1] e in [A-1.4] vengono riportati tre diagrammi relativi a prove di corrosione eseguite in soluzione 4N nitrato di ammonio a 98 °C su tre diversi acciai basso tenore di carbonio, con diversi trattamenti di normalizzazione e tempera dai quali si desume che:

- Per valori del fattore di intensità degli sforzi K_I superiori a $25 \div 32 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ la velocità di corrosione è costante fino all'inizio del collasso mentre al di sotto essa è molto bassa.
- Il fenomeno viene spiegato perché sulla superficie della cricca, per basse sollecitazioni agenti, i prodotti di corrosione sono aderenti e isolano il materiale vergine dall'ambiente aggressivo.
- La velocità di approfondimento della cricca è molto elevata al massimo pari a $4 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$.

I valori riportati nell'articolo sono riassunti nella tabella seguente, desunta dal testo originale e sono sicuramente superiori a quelli in atmosfera marina in ambienti chiusi.

TABLE 2 – Yield Point and SCC Properties

Condition	Lower Yield Point MPa	SCC Threshold K_{ISCC} MPa $\sqrt{\text{m}}$	Plateau Velocity V_p m/s
Normalized, untempered	321	23.5	4×10^{-8}
Normalized, tempered at 600 C	303	26.5	3×10^{-8}
Normalized, tempered at 680 C	294	32.0	2.2×10^{-8}

In [A-1.5] oltre a valori specifici registrati sui pali installati in porti della Svezia, viene riportato un interessante paragone tra i valori di velocità di corrosione prescritti nella normativa americana, australiana, svedese ed europea. Dai dati riportati si evince che:

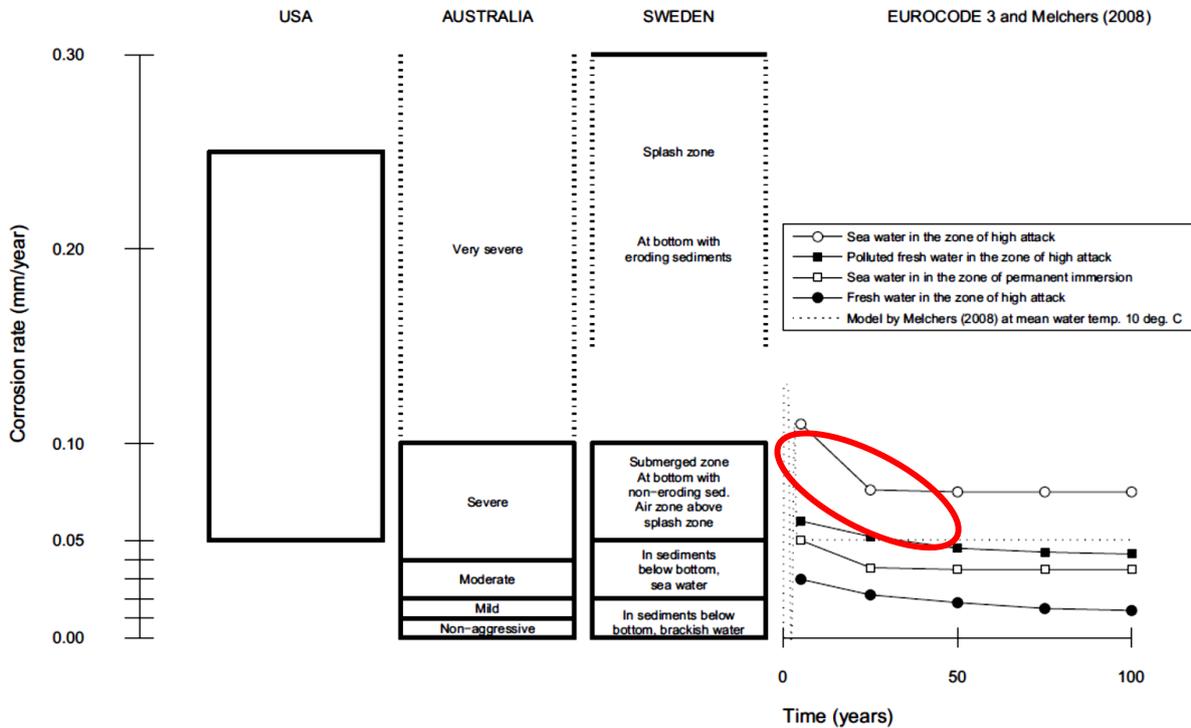


Fig. 5. Recommended design corrosion rates for steel in marine environments in different parts of the world [2,7,8,10,11]

Fig. 2 Paragone tra i valori delle velocità di corrosioni suggeriti dalle norme in diversi paesi

- La zona di massimo attacco è quella della cosiddetta “splash zone” dove la superficie viene continuamente bagnata e asciugata.
- I valori di velocità di corrosione sono molto inferiori a quelli registrati nelle prove riportate in [A-1.1] e [A-1.4], come del resto atteso considerando la diversa aggressività dell’atmosfera nei due casi.
- Il valore massimo per le norme europee è pari a 0.10 mm/anno, nella fase iniziale della vita dell’elemento (primi 25 anni) per poi stabilizzarsi intorno a 0.075 mm/anno.
- La fonte del dato relativo alle norme europee è l’EUROCODE [A-1.6]
- I valori effettivamente misurati nel porto svedese sono inferiori a quelli riportati dalle norme europee non superando 0.05 mm/anno. L’autore nota che la concentrazione salina nei porti svedesi è superiore a quella assunta a riferimento nelle normative.

La citata sezione dell’EUROCODE [A-1.6] riporta inoltre nell’appendice F che la velocità di corrosione in atmosfera normale è di 0.01 mm/anno e di 0.02 mm/anno per atmosfera in prossimità del mare. Per elementi direttamente a contatto con il mare la norma suggerisce una tabella con i valori che sono stati convertiti nelle curve riportate in Fig. 1.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

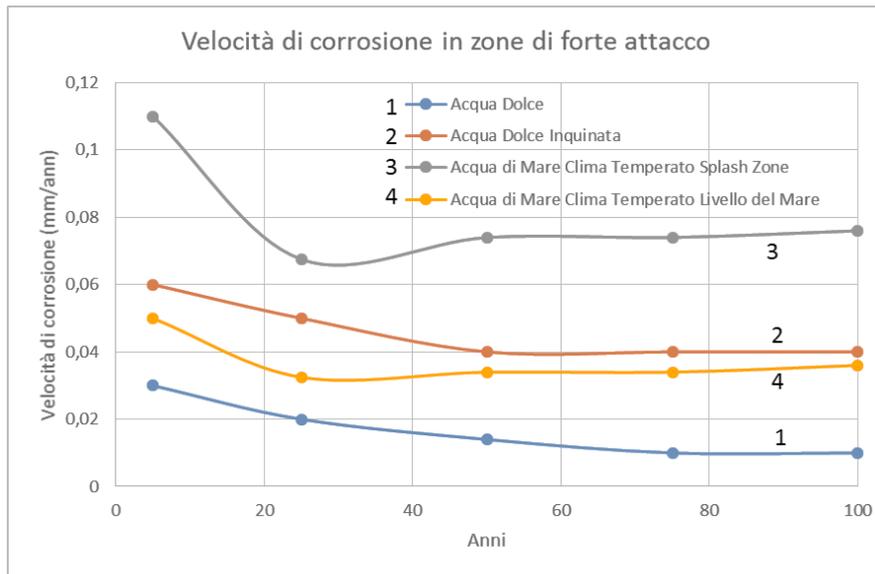


Fig. 3 Andamento di V_c secondo UNI ENV 1993-5 fino a 100 anni per elementi immersi

Nel riferimento [A-1.7] vengono riportati i valori della velocità di corrosione misurata in 74 elementi di acciaio al carbonio esposti per tre anni all'atmosfera presente nelle sette principali isole dell'arcipelago delle Canarie in luoghi classificati, in accordo a ISO 9223 nelle categorie C2, C3, C4, C5. I risultati ottenuti per tutte le installazioni, forniscono la distribuzione evidenziata in Fig. 4.

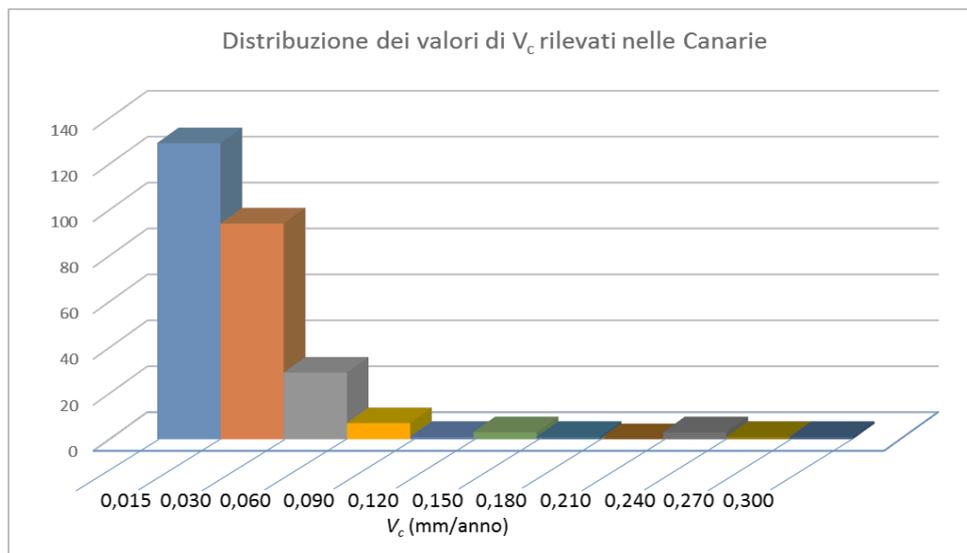


Fig. 4 Risultati delle prove di corrosione riportate in[A-1.7]

Il campo delle velocità rilevate è compreso tra 0 e 0.3 mm/anno, ma risulta evidente che la maggior parte dei valori si addensa per le velocità basse; infatti il 94% dei valori è inferiore a 0.06 mm/anno. Questi valori sono congruenti con quanto suggerito da EUROCODE per l'atmosfera in prossimità del mare, tenendo conto del fatto che le isole, essendo isolate nel mare, hanno venti e salinità superiore rispetto alle condizioni delle coste e che il clima delle Canarie è da considerare di tipo tropicale.

Proprio all'influenza della temperatura media annuale sono dedicati i dati riportati in [A-1.9] che, per l'acciaio sono riassunti nella Fig. 5; le misure qui sintetizzate sono state eseguite nel quadro del programma ISO CORRAG. Si rileva, dalla distribuzione dei dati in Fig. 5, che per temperature medie comprese tra 14 e 24 °C si hanno valori inferiori a 0.1 mm/anno. Le misure sono state eseguite all'aperto.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

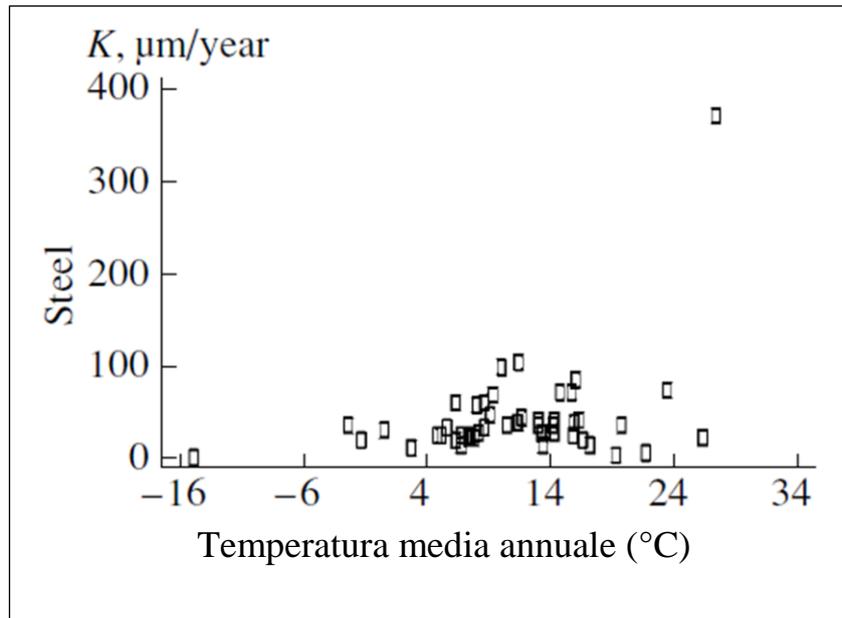


Fig. 5 Sintesi delle prove eseguite durante il progetto ISO CORRAG

Infine, sempre per installazioni esterne, in base alla norma ISO 9223 [A-1.10], si ottengono i seguenti risultati che ancora una volta possono essere considerati approssimati per eccesso rispetto a quelli presumibili nelle sale tensionatori, a causa del fatto che l'installazione dei tensionatori avviene all'interno.

ISO 9223		Typical environment	Corrosion rate for the first year of exposure ($\mu\text{m}/\text{y}$)	
Category	Description		Mild steel	Zinc
C1	Very low	Dry indoors	≤ 1.3	≤ 0.1
C2	Low	Arid/Urban inland	> 1.3 to ≤ 25	> 0.1 to ≤ 0.7
C3	Medium	Coastal or industrial	> 25 to ≤ 50	> 0.7 to ≤ 2.1
C4	High	Calm sea-shore	> 50 to ≤ 80	> 2.1 to ≤ 4.2
C5	Very High	Surf sea-shore	> 80 to ≤ 200	> 4.2 to ≤ 8.4
CX	Extreme	Ocean/Off-shore	> 200 to ≤ 700	> 8.4 to ≤ 25

Dai dati riportati si rileva che la velocità di corrosione è compresa tra 0.025 e 0.050 mm/anno (Casella cerchiata).

Un altro riferimento importante e pertinente è quello fornito dalle norme DNV. Nella norma DNV-RP.0416 [A-1.11] sono riportati i valori della velocità di corrosione su superfici in acciaio nella "splash zone".

Table 4-1 Minimum values for design corrosion rate (V_{corr}) on primary structural parts in splash zone

Region	V_{corr} External Surface	V_{corr} Internal Surface
Temperate climate (annual mean surface temperature of seawater $\leq 12^\circ\text{C}$)	0.30 mm/yr	0.10 mm/yr
Subtropical and tropical climate	0.40 mm/yr	0.20 mm/yr

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

Inoltre nella norma DNV-CG-0172 [A-1.12], relativamente ai serbatoi su unità mobili, riporta le seguenti velocità di corrosione.

Table 5-1 Typical minimum corrosion rate (mm/year) for FSO/FPSO's, t_{k-inc}

Structure element	Within 1.5 m below weather deck tank or hold top		Elsewhere	
	Cargo tank	Ballast tank	Cargo tanks	Ballast tanks
Transverse structural elements				
<i>Transverse web frames and BHD's</i>				
Plating	0.05	0.075	0.025	0.05
Horizontal girder/stiffener	0.05	0.075	0.025	0.05
Vertical girder/stiffener	0.025	0.05	0.0125	0.025
Brackets	0.025	0.05	0.0125	0.025
Longitudinal structural elements				
<i>Deck structure</i>				
Deck plating (one side of element)	0.1	0.15	-	-
Deck Girders/Longitudinals (Web)	0.05	0.075	-	-
Deck Girders/Longitudinals (Flange)	0.05	0.075	-	-
Brackets	0.05	0.075	-	-
<i>Bottom structure</i>				
Bottom plating (one side of element)	-	-	0.05	0.05
Bottom Girders/Longitudinals (Web)	-	-	0.025	0.025
Bottom Girders/Longitudinals (Flange)	-	-	0.025	0.025
Brackets	-	-	0.025	0.025
<i>Inner bottom</i>				
Inner Bottom plating	-	-	0.025	0.0375
Bottom Girders/Longitudinals (Web)	-	-	0.025	0.0375
Bottom Girders/Longitudinals (Flange)	-	-	0.025	0.0375
Brackets	-	-	0.025	0.0375
<i>Side shell</i>				
Side shell plating (one side of element)	0.1	0.1	0.025	0.05
Side shell Longitudinals (Web)	0.05	0.075	0.025	0.05
Side shell Longitudinals (Flange)	0.05	0.075	0.025	0.05
Brackets	0.05	0.075	0.025	0.05
<i>Long BHD</i>				
Long BHD plating	0.05	0.075	0.025	0.05
Long BHD Longitudinals (Web)	0.05	0.075	0.025	0.05
Long BHD Longitudinals (Flange)	0.05	0.075	0.025	0.05
Brackets	0.05	0.075	0.025	0.05
<i>Horizontal stringers</i>				
Horizontal Stringer plating	-	-	0.025	0.05
Horizontal Longitudinals (Web)	-	-	0.025	0.05
Horizontal Longitudinals (Flange)	-	-	0.025	0.05
Brackets	-	-	0.025	0.05

Questi ultimi dati, desunti dalle norme DNV, insieme a quelli evidenziati dall'EUROCODE, possono essere considerati di riferimento per superfici bagnate da acqua di mare, caso questo che si verifica se la pulizia del carter superiore, dopo il montaggio del sistema maschi+paratoia non è completa.

Analisi dei dati di velocità di corrosione per acciai con deposito di Nichel

Gli analoghi dati di velocità di corrosione di acciai protetti con depositi di nichelatura sono molto meno diffusi. Per esempio in [A-1.13] la velocità di corrosione del rivestimento di Nichel in atmosfera con PH 7 (0.5 M Na₂SO₄ 1 0.5 M H₃BO₃) è stata misurata in circa 0.022 mm/anno.

Misura della velocità di corrosione

Per quanto i riferimenti bibliografici, compresi quelli normative, siano numerosi è inevitabile notare come la velocità di corrosione sia influenzata da un numero notevole di fattori che individuano il singolo caso da esaminare e determinano il fatto che i valori generici suggeriti dalle normative, per quanto sicuramente approssimati con larghi margini di sicurezza, devono essere assunti solo come valori di primo

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

dimensionamento. Una valutazione più precisa può essere fatta solo attraverso una valutazione sul campo mediante appositi provini che rispettino i tre elementi fondamentali del processo fisico:

- Il tipo di materiale.
- Il livello di sforzo.
- Le caratteristiche dell'ambiente.

Questo tipo di prove sono disciplinate dalle normative EN ISO 7539 [A-1.15]. Considerando che lo stato di sollecitazione, in assenza dei cicli di fatica, è di trazione in corrispondenza dello stelo e di flessione-trazione in corrispondenza alla zona sottotesta, i provini da considerare per l'uso proposto devono essere scelti tra quelli riportati in EN ISO 7539 [A-1.15], tra i quali alcuni sono rappresentati, a titolo di esempio nella Fig. 6, Fig. 7 e Fig. 8 .

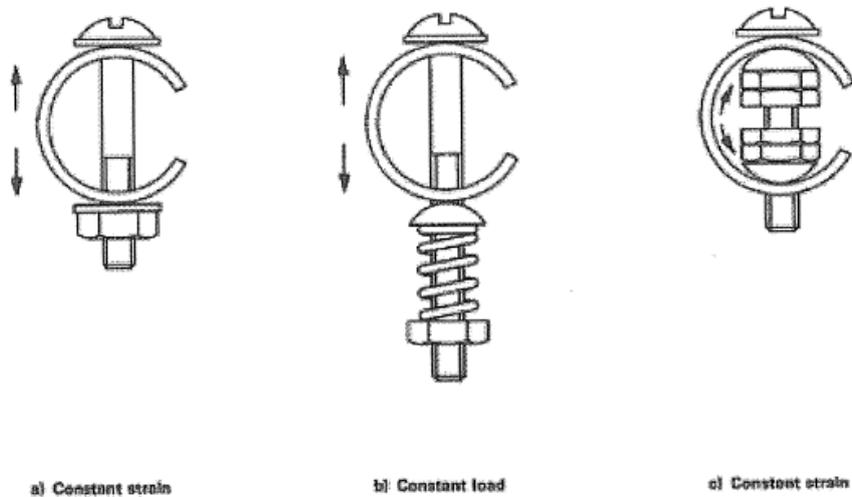


Fig. 6 Provino ad anello per prove di velocità di corrosione

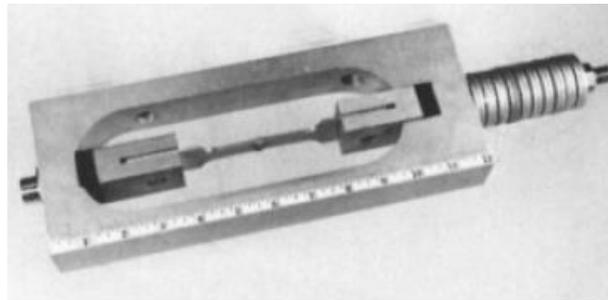


Fig. 7 Provino di trazione per prove di velocità di corrosione

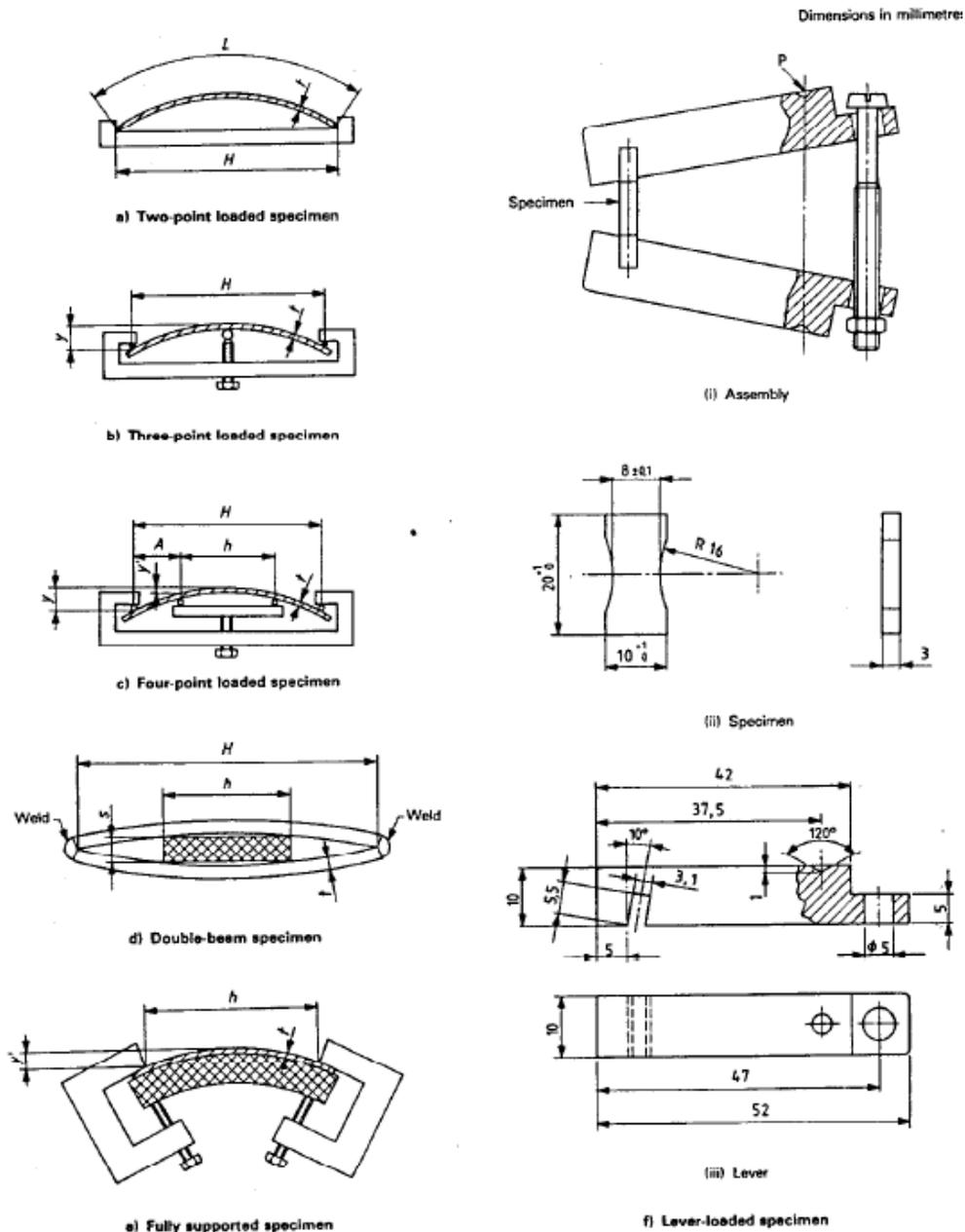


Fig. 8 Provini di flessione per prove di velocità di corrosione

I provini scelti, costituiti dello stesso materiale del tensionatore con il trattamento di nichelatura presente e appositamente dimensionati in modo da rispettare il livello di sforzo effettivamente presente, devono essere installati in prossimità dei gruppi da aggancio in modo da poter valutare direttamente e agevolmente la velocità di corrosione. Particolare cura deve essere dedicata a studiare lo spessore dei provini in modo da avere condizioni analoghe a quelle dello stelo. La periodicità dovrà essere stabilita in base ai dati rilevati effettivamente sul campo nel primo periodo. Sarebbe utile inoltre, condurre delle prove accelerate di laboratorio per valutare in via preliminare i valori della velocità di corrosione attesa.

Conclusioni

Sulla base dei dati raccolti nella letteratura internazionale sull'argomento e riportati nel presente documento è possibile trarre alcune considerazioni conclusive:

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

1. Come per i problemi di meccanica della frattura, è possibile distinguere nella vita di un componente soggetto a fenomeni corrosivi, tre fasi: incubazione, propagazione e collasso.
2. La fase di incubazione è di più difficile valutazione ma ai fini delle considerazioni contenute nel presente documento e in favore di sicurezza, può essere assunta di estensione temporale nulla. Ciò si assume che il processo corrosivo inizi dall'istante dell'installazione del gruppo di aggancio.
3. E' lecito considerare la velocità di corrosione costante e indipendente dalla sollecitazione applicata e dalla dimensione della cricca (cioè dal fattore K_I di intensità degli sforzi), per tutta la fase di propagazione, fino all'incipiente collasso.
4. Per quanto riguarda la velocità di propagazione il riferimento più pertinente è quello desumibile da "UNI ENV 1993-5, Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture di acciaio - Parte 5: Pali e palancole" [A-1.14] che prescrive 0.02 mm/anno per atmosfera in prossimità del mare. Tutti gli altri valori, che differiscono per il tipo di clima o perché relativi ad elementi bagnati o, peggio, in condizioni di bagnatura e asciugatura continua, sono quantitativamente congruenti con tale assunzione.
5. Per il caso delle parti di tensionatore all'interno del carter che quindi sono a contatto con acqua di mare o con residui sabbiosi, i valori di riferimento possono essere assunti pari a quelli della splash zone, cioè pari a 0.300 mm/anno, secondo la norma DNV-RP.0416 [A-1.11].
6. E' comunque evidente che i valori delle velocità di corrosione sono affetti, in generale, anche riferendosi alle sole normative, da una dispersione non trascurabile spaziando da valori che dopo 100 anni corrispondono a 2 mm fino a 30 mm.
7. Pertanto dopo le valutazioni del presente documento si ritiene indispensabile proporre l'esecuzione di una sperimentazione sul campo inserendo negli ambienti in cui sono posizionati i tensionatori, appositi provini in 39NiCrMo3 con trattamento di nichelatura, soggetti a un livello di carico analogo a quello presente nello stelo e scelti con forma e caratteristiche in modo da riprodurre il tipo di sollecitazione agente. I provini dovrebbero essere esposti liberamente all'atmosfera degli ambienti del locale tensionatori. La verifica e la misura della velocità di corrosione effettiva risulterebbe in tale maniera precisa ed agevole consentendo interventi tempestivi di pulizia e protezione sugli steli stessi.
8. Comunque nel prosieguo del presente documento, stante l'incertezza sul valore della velocità di corrosione, le considerazioni sulla resistenza e sulla durata dei tensionatori vengono eseguite in modo parametrico assumendo velocità di corrosione variabili da 0.05 mm/anno fino a 1 mm/anno. L'estremo inferiore del campo di variazione è quello corrispondente ad una velocità di corrosione modesta ma pertinente ad atmosfere marine non particolarmente aggressive mentre il limite superiore di 1 mm/anno è un valore sicuramente approssimato per eccesso.

Bibliografia Allegato 1

- [A-1.1]. R.H. Jones, *Stress corrosion cracking*, ASM International, Ohio, USA, 1992.
- [A-1.2]. S.D. Cramer, B.S. Covino, Jr., *Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*, ASM Handbook, Vol. 13, ASM International, Ohio, USA, 2003.
- [A-1.3]. P.C. Conor, *Crack closure and stress corrosion fracture thresholds in mild steel*, *Corrosion*, 43 (10), October 1987, p.614-621.
- [A-1.4]. A.J. McEvily, Jr., *Atlas of stress-corrosion and corrosion fatigue curves*, ASM International, Ohio, USA, 1990.
- [A-1.5]. H. Wall, L. Wadsö, *Corrosion rate measurements in steel sheet pile walls in a marine environment*, *Marine Structures* 33 (2013), p. 21–32.
- [A-1.6]. UNI ENV 1993-5, Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture di acciaio - Parte 5: Pali e palancole.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

- [A-1.7]. H.C. Vasconcelos, B.M. Fernández-Pérez, J. Morales, R.M. Souto, S. González, V. Cano, J.J. Santana, *Development of Mathematical Models to predict the Atmospheric Corrosion Rate of Carbon Steel in F ragmented Subtropical Environments*, Int. J. Electrochem. Sci., 9 (2014) 6514 – 6528.
- [A-1.8]. A. A. Mikhailov, J. Tidblad, and V. Kucera, *The Classification System of ISO 9223 Standard and the Dose–Response Functions Assessing the Corrosivity of Outdoor Atmospheres*, Protection of Metals, Vol. 40, No. 6, 2004, pp. 541–550. Translated from Zashchita Metallov, Vol. 40, No. 6, 2004, pp. 601–610.
- [A-1.9]. ISO 9223 – Corrosion of Metals and Alloys – Corrosivity of Atmospheres – Classification.
- [A-1.10]. DNVGL-RP-0416. Corrosion protection for wind turbines. 2016.
- [A-1.11]. DNV-CG-0172. Thickness diminution for mobile offshore units. 2015.
- [A-1.12]. A. Durairajan, B.S. Haran, R.E. White, B. Popov, *Development of a New Electrodeposition Process for Plating of Zn-Ni-X (X = Cd, P) Alloys: I. Corrosion Characteristics of Zn-Ni-Cd Ternary Alloys*, Journal of the Electrochemical Society, Volume 147, Issue 5, 2000, pages 1781-1786.
- [A-1.13]. UNI ENV 1993-5, Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture di acciaio - Parte 5: Pali e palancole
- [A-1.14]. EN ISO 7539 Corrosion of Metals and Alloys. Stress Corrosion testing.
- a. Part 1: General guidance on testing procedures.
 - b. Part 2: Preparation and use of bent-beam specimens
 - c. Part 3: Preparation and use of U-bend specimens
 - d. Part 4: Preparation and use of uniaxially loaded tension specimens
 - e. Part 5: Preparation and use of C-ring specimens
 - f. Part 6: Preparation and use of pre-cracked specimens for tests under constant load or constant displacement

ALLEGATO 2: Progressione della cricca per fatica e corrosione.

Generalità

Senza entrare in ulteriori dettagli e classificazioni si può dire che quella che viene chiamata “corrosione fatica” può essere trattata con la stessa metodologia utilizzata nel caso della fatica e descritta mediante la legge di Paris ben nota. Rispetto al caso della fatica si osservano però le seguenti differenze:

- Riduzione del ΔK_{th} al di sotto del quale non si verifica propagazione di un difetto preesistente;
- Aumento della velocità di propagazione del difetto. Tale velocità è sempre descritta dalla legge di Paris che, risultando generalmente diverse le costanti in essa contenute, può essere riscritta nella forma

$$\frac{da}{dN} = A' \cdot \Delta K^{m'}$$

nella quale A' e m' differiscono dalle costanti A e m valide in assenza di ambiente corrosivo e dipendono dall'ambiente e dalla frequenza di applicazione del carico.

Per quanto riguarda la costante m' , anche se il suo valore dipende dall'ambiente, in molti casi si può assumere uguale a m quindi, in prima approssimazione, se ne può tralasciare l'effetto.

La costante A' invece dipende sia dalla frequenza che dalla legge di applicazione dello sforzo.

La frequenza agisce nel senso che, al suo diminuire, aumenta il valore di A' , rispetto a quello in assenza di corrosione, con conseguente aumento della velocità di avanzamento del difetto. Quanto più invece aumenta la frequenza tanto più il valore di A' diminuisce e approssima quello di A e pertanto si riduce la sua influenza. Per frequenze pari a 10Hz o più i due valori risultano sostanzialmente uguali. Dato che le frequenze di applicazione del carico nel caso degli steli di aggancio sono molto più basse di 10 Hz¹¹ il valore di A' è da assumere pari al valore asintotico suggerito dalle norme basate sui dati sperimentali.

Per quanto invece riguarda la legge di applicazione dello sforzo essa influisce nel senso che risultano più pericolose quelle condizioni caratterizzate da una lenta applicazione del carico, mentre nei casi nei quali si ha un suo incremento molto rapido la componente corrosione si può del tutto trascurare e tornare quindi ad una situazione simile a quella della sola fatica. Quanto sopra si spiega con il fatto che l'ambiente esplica la sua azione negativa essenzialmente nella fase di plasticizzazione dell'apice del difetto. Considerando quanto riportato prima rispetto alle frequenze effettive si conferma la necessità di utilizzare valori specifici del caso di sovrapposizione di fatica e corrosione.

In realtà l'impiego degli steli tensionatori, come già accennato nell'Allegato 1, è particolare per un altro aspetto. Infatti i cicli di sollecitazione sono applicati, a parte qualche ciclo minore, quando la paratoia viene dispiegata in condizioni di galleggiamento per contrastare il fenomeno dell'acqua alta. Tra un dispiegamento e l'altro vi sono lunghi periodi in cui non è attivo il danneggiamento meccanico ma è attivo quello di sola corrosione sotto l'effetto statico del carico di pretensionamento. Pertanto si può ipotizzare che per rappresentare correttamente il complesso di questi fenomeni si deve considerare la sovrapposizione di due contributi diversi per la valutazione della progressione della cricca secondo l'equazione:

$$\frac{da}{dt} = V_c + \frac{dN}{dt} \left(\frac{da}{dN} \right)_{Fat}$$

¹¹ Le oscillazioni provengono dal moto ondoso che, in base ai dati sperimentali disponibili per il Mare Adriatico, sono nel caso più elevato caratterizzate da un periodo non inferiore a 5 s e quindi corrispondono ad una frequenza non superiore a 0.2 Hz.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

Questo approccio è ben noto in letteratura [A2.9] ed è stato proposto, tra gli altri in [A2.8].

Nella relazione scritta V_c è la velocità di corrosione espressa in mm/y desunta dai dati riportati nella presente relazione nell' ALLEGATO 1 e che, in base alla letteratura scientifica di riferimento, dopo un breve periodo iniziale, è costante ed è indipendente dall'intensità della condizione di sforzo e dalla ampiezza della

cricca. Se ci riferiamo, per comodità alla velocità per anno, il valore di $\frac{da}{dN}$ risulta essere pari ai cicli di fatica che si hanno in un anno e che, per semplicità di valutazione, si assumono essere costanti per tutta la vita utile del tensionatore. In altri termini se N_{100} è il numero totale di cicli di una certa ampiezza di sollecitazione il numero di cicli per anno sarà $N_{100}/100$. Inoltre, ai fini dell'esecuzione dei calcoli, essendo il processo di accrescimento non lineare, la lunghezza della cricca iniziale di ciascun gruppo di cicli di fatica deve essere aggiornata in base agli effetti della corrosione precedentemente subita.

Equazione di Paris

I tensionatori sono realizzati in acciaio debolmente legato 39 NiCrMo3, le cui caratteristiche meccaniche, in accordo alla norma EN 10088-3 sono riportate in Fig. 9.

L'equazione di Paris consente quindi di calcolare la velocità di crescita di una cricca utilizzando la seguente equazione generale [A2.1], [A2.4]:

$$\frac{da}{dN} = A' \cdot \Delta K^{m'}$$

Per acciai (esclusi gli acciai inossidabili) che operano in ambiente marino fino a 20°C, la BS 7910 [A2.1] suggerisce la seguente equazione semplificata:

$$\frac{da}{dN} = 2.3 \cdot 10^{-12} \Delta K^3$$

per da/dN espressa in mm/ciclo e ΔK in $N/mm^{3/2}$.¹²

Valori di soglia

La dimensione del difetto di soglia si valuta solitamente con la relazione:

$$a_{th} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{th,SCC}}{Y \Delta \sigma} \right)^2 \quad (MPa\sqrt{m})$$

Con il seguente significato dei simboli:

a_{th} dimensione del difetto che inizia la propagazione

$\Delta K_{th,SCC}$ variazione del fattore di intensità degli sforzi che provoca l'inizio della propagazione in condizioni di stress-corrosion

$\Delta \sigma$ Variazione dello sforzo agente ($\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$), nel caso di $R = 0$ si ha $\Delta \sigma = \sigma_{max}$

Y fattore che dipende dalla forma della cricca.

¹² Il valore suggerito da BS 7910 per le condizioni di corrosione in ambiente marino è maggiore di quello in atmosfera normale che è invece pari a $5.21 \cdot 10^{-13}$ con un incremento di circa il 341%. Se si considera che la zona della filettatura è protetta dal grasso e che quella di transizione è protetta dalla pasta anticorrosiva, sarebbe più corretto per queste zone utilizzare l'equazione: $\frac{da}{dN} = 5.21 \cdot 10^{-12} \Delta K^3$. In favore di sicurezza comunque si è utilizzata l'equazione relativa agli elementi non protetti anche per le zone della filettatura e della transizione.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

Il valore di $\Delta K_{th,SCC}$ è una caratteristica del materiale e dipende dalle condizioni ambientali in cui si trova a lavorare il materiale.

La BS7910 suggerisce i seguenti valori

Acciaio in aria con un ambiente non aggressivo $\Delta K_{th} = 2 \text{ MPa}\sqrt{m}$

Acciaio in ambiente marino senza protezione $\Delta K_{th} = 0 \text{ MPa}\sqrt{m}$

Table 8 — Mechanical properties^a at room temperature in the quenched and tempered condition (+QT)

Steel designation	Name	Number	Mechanical properties for the ruling section (see EN 10083-1:2006, Annex A) with a diameter (d) or for flat products thickness (t) of																													
			d ≤ 16 mm t ≤ 8 mm						16 mm < d ≤ 40 mm 8 mm < t ≤ 20 mm						40 mm < d ≤ 100 mm 20 mm < t ≤ 60 mm						100 mm < d ≤ 160 mm 60 mm < t ≤ 100 mm						160 mm < d ≤ 250 mm 100 mm < t ≤ 160 mm					
			R _e min.	R _m	A min.	Z min.	KV ^b min.	R _e min.	R _m	A min.	Z min.	KV ^b min.	R _e min.	R _m	A min.	Z min.	KV ^b min.	R _e min.	R _m	A min.	Z min.	KV ^b min.	R _e min.	R _m	A min.	Z min.	KV ^b min.					
36Cr2	1.7003	550	800 to 950	14	35	-	450	700 to 850	15	40	35	350	600 to 750	17	45	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
46Cr2	1.7006	650	900 to 1100	12	35	-	550	800 to 950	14	40	35	400	650 to 800	15	45	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
34Cr4	1.7033	700	900 to 1100	12	35	-	590	800 to 950	14	40	40	460	700 to 850	15	45	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
34CrS4	1.7037	700	900 to 1100	12	35	-	590	800 to 950	14	40	40	460	700 to 850	15	45	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
37Cr4	1.7034	750	950 to 1150	11	35	-	630	850 to 1000	13	40	35	510	750 to 900	14	40	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
37CrS4	1.7038	750	950 to 1150	11	35	-	630	850 to 1000	13	40	35	510	750 to 900	14	40	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
41Cr4	1.7035	800	1000 to 1200	11	30	-	660	900 to 1100	12	35	35	560	800 to 950	14	40	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
41CrS4	1.7039	800	1000 to 1200	11	30	-	660	900 to 1100	12	35	35	560	800 to 950	14	40	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
25CrMo4	1.7218	700	900 to 1100	12	50	-	600	800 to 950	14	55	50	450	700 to 850	15	60	50	400	650 to 800	16	60	45	-	-	-	-							
25CrMoS4	1.7213	700	900 to 1100	12	50	-	600	800 to 950	14	55	50	450	700 to 850	15	60	50	400	650 to 800	16	60	45	-	-	-	-							
34CrMo4	1.7220	800	1000 to 1200	11	45	-	650	900 to 1100	12	50	40	550	800 to 950	14	55	45	500	750 to 900	15	55	45	450	700 to 850	15	60	45						
34CrMoS4	1.7226	800	1000 to 1200	11	45	-	650	900 to 1100	12	50	40	550	800 to 950	14	55	45	500	750 to 900	15	55	45	450	700 to 850	15	60	45						
42CrMo4	1.7225	900	1100 to 1300	10	40	-	750	1000 to 1200	11	45	35	650	900 to 1100	12	50	35	550	800 to 950	13	50	35	500	750 to 900	14	55	35						
42CrMoS4	1.7227	900	1100 to 1300	10	40	-	750	1000 to 1200	11	45	35	650	900 to 1100	12	50	35	550	800 to 950	13	50	35	500	750 to 900	14	55	35						
50CrMo4	1.7228	900	1100 to 1300	9	40	-	780	1000 to 1200	10	45	30	700	900 to 1100	12	50	30	650	850 to 1000	13	50	30	550	800 to 950	13	50	30						
34CrNiMo6	1.6582	1000	1200 to 1400	9	40	-	900	1100 to 1300	10	45	45	800	1000 to 1200	11	50	45	700	900 to 1100	12	55	45	600	800 to 950	13	55	45						
30CrNiMo8	1.6580	1050	1250 to 1450	9	40	-	1050	1250 to 1450	9	40	30	900	1000 to 1200	10	45	35	800	1000 to 1200	11	50	45	700	900 to 1100	12	50	45						
35NiCr6	1.5815	740	880 to 1080	12	40	-	740	880 to 1080	14	40	35	640	780 to 980	15	40	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
36NiCrMo16	1.6773	1050	1250 to 1450	9	40	-	1050	1250 to 1450	9	40	30	900	1100 to 1300	10	45	35	800	1000 to 1200	11	50	45	800	1000 to 1200	11	50	45						
39NiCrMo3	1.6510	785	980 to 1180	11	40	-	735	930 to 1130	11	40	35	685	880 to 1080	12	45	40	635	830 to 1030	12	50	40	540	740 to 940	13	50	40						
30NiCrMo16-6	1.6747	880	1080 to 1280	10	45	-	880	1080 to 1280	10	45	35	880	1080 to 1280	10	45	35	790	900 to 1050	11	50	35	880	900 to 1050	11	50	35						
51CrV4	1.8159	900	1100 to 1300	9	40	-	800	1000 to 1200	10	45	30	700	900 to 1100	12	50	30	650	850 to 1000	13	50	30	600	800 to 950	13	50	30						
20MnB5	1.5530	700	900 to 1050	14	55	-	600	750 to 900	15	55	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
30MnB5	1.5531	800	950 to 1150	13	50	-	650	800 to 950	13	50	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-							

Fig. 9 Caratteristiche meccaniche 39NiCrMo3

Forma della Cricca

Sono state utilizzate per l'analisi due forme di cricca (Fig. 10):

- Cricca triangolare con il vertice rivolto verso l'interno
- Cricca semicircolare

La cricca triangolare simula un attacco concentrato del tipo di quello che deriva da un originario pitting da corrosione mentre la cricca semicircolare simula un danno più esteso derivante da un iniziale distacco dello strato di nichelatura e successiva progressione del danneggiamento.

Per il primo caso (Cricca Triangolare) il valore del fattore di intensità degli sforzi si calcola con la relazione desunta da [A2.3]

$$K_I = Y\sigma_{Max} \sqrt{\pi \cdot \sqrt{Area}} = Y\sigma_{Max} \sqrt{\pi \cdot \frac{ca}{2}} \text{ per la condizione di collasso}$$

$$\Delta K_I = Y\Delta\sigma \sqrt{\pi \cdot \sqrt{Area}} = Y\Delta\sigma \sqrt{\pi \cdot \frac{ca}{2}} \text{ per la condizione di propagazione}$$

Dove Area indica l'area occupata dalla cricca e Y è un fattore correttivo pari, secondo Murakami [A2.3] a 0.659. Nell'analisi si è assunto che la cricca cresca uniformemente su tutto il perimetro, mantenendo cioè il rapporto h= base/profondità = a/c costante. In [A2.3] è riportato, in realtà, che i vertici alla base crescono

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

con velocità inferiore e quindi il rapporto $h = a/c$ tenderebbe a diminuire. Dato però che, esprimendo tutto in funzione di c , si ottiene:

$$K_I = Y\sigma_{Max} \sqrt{\pi \cdot \sqrt{Area}} = Y\sigma_{Max} \sqrt{\pi \cdot \sqrt{\frac{c^2 h}{2}}}$$

Si evidenzia che al diminuire di h il valore del fattore di intensità degli sforzi K_I diminuisce e quindi la cricca diventa meno pericolosa. Pertanto assumere h costante durante la propagazione è in favore di sicurezza rispetto alla valutazione sia del carico di collasso sia della velocità di propagazione. D'altra parte per valori elevati di h , la cricca triangolare è simile a quella semicircolare, si è assunto base/altezza = 2. In definitiva quindi il valore del fattore di intensità degli sforzi si calcola con la relazione

$$K_I = Y\sigma_{Max} \sqrt{\pi \cdot \sqrt{Area}} = Y\sigma_{Max} \sqrt{\pi \cdot c}$$

Mentre la velocità di propagazione si calcola con la relazione:

$$\Delta K_I = Y\Delta\sigma \sqrt{\pi \cdot \sqrt{Area}} = Y\Delta\sigma \sqrt{\pi \cdot c}$$

Per la cricca semicircolare BS 7910 [A2.1] suggerisce la seguente espressione:

$$\Delta K_I = Y\Delta\sigma \sqrt{\pi a}$$

$$Y = M_m$$

Avendo assunto che tutto lo sforzo presente è di tipo membranale¹³. Nella formula scritta si ha:

$$M_m = g \left\{ 0.752 + 2.020 \left(\frac{a}{2r} \right) + 0.37 \left[1 - \text{sen} \left(\frac{\pi a}{4r} \right) \right]^3 \right\}$$

$$g = \frac{1.84}{\pi} \cdot \frac{\left[\frac{\tan \left(\frac{\pi a}{4r} \right)}{\left(\frac{\pi a}{4r} \right)} \right]^{0.5}}{\cos \left(\frac{\pi a}{4r} \right)}$$

Considerando poi che lo stato tensionale è diverso nelle diverse zone del tensionatore a causa della forma di questo sono state considerate potenzialmente critiche tre zone:

- Raccordo sotto testa (1 in Fig. 11).
- Primo filetto in presa (2 in Fig. 11).
- Zona di transizione in corrispondenza a $D = 180$ mm (3 in Fig. 11).

¹³ In realtà nello stato di sforzo dello stelo è presente una piccola componente flessionale che però nei dati forniti dal progettista non è separata e pertanto, prudenzialmente, viene trascurata la sua presenza considerando tutto lo sforzo costante sulla sezione. Questo tipo di assunzione è conservativo considerando che la cricca si propaga in un campo privo di gradiente mentre nella realtà c'è un piccolo gradiente, derivante proprio dalla componente flessionale, che rallenta la velocità di progressione della cricca.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

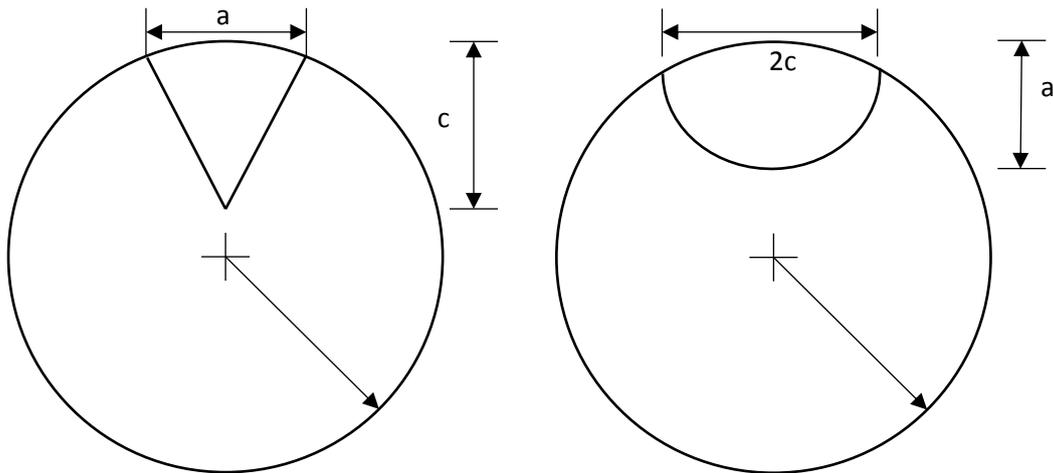


Fig. 10 Forma delle cricche esaminate

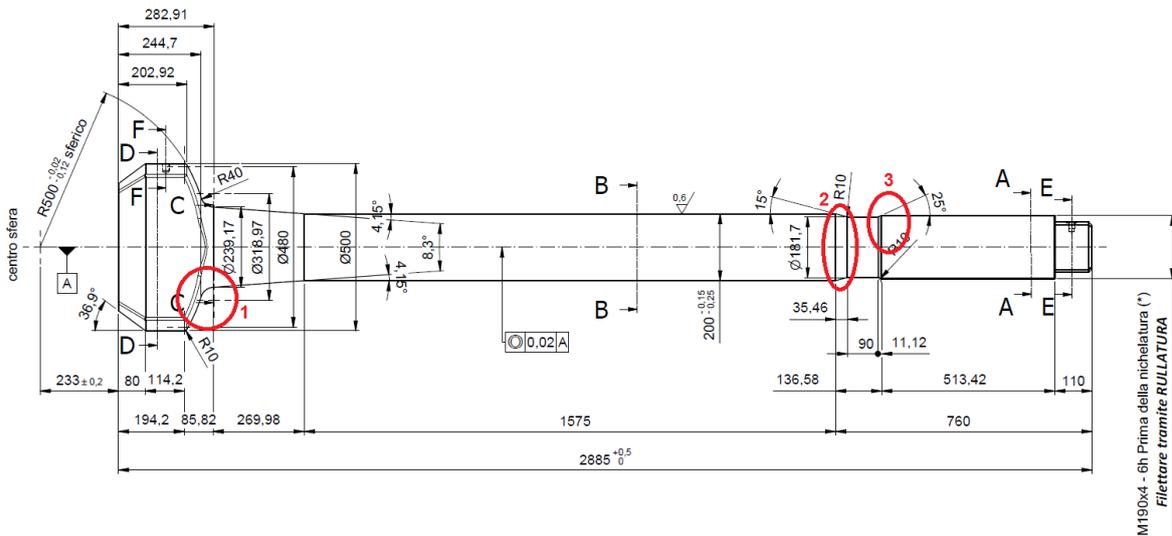


Fig. 11 Zone critiche di localizzazione delle cricche

Valori al collasso

Il valore del fattore di intensità degli sforzi critico (K_{IC}), si calcola, in assenza di una determinazione specifica, in accordo alla BS 7910 in base ai valori della resilienza secondo la relazione

$$K_{IC} = \left[\left(12\sqrt{KV} - 20 \right) \left(\frac{25}{B} \right)^{0.25} + 20 \right] \cdot \sqrt{1000} \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (\text{A2.1})$$

La (A2.1) corrisponde ad una valutazione conservativa, cioè approssimata per difetto; allo scopo comunque di evitare qualsiasi sopravvalutazione la norma stessa suggerisce di verifica che il valore calcolato con la (A2.1) sia sempre inferiore a

$$K_{IC, Lim} = 0.54KV + 55 \quad (\text{A2.2})$$

Il valore della resilienza minimo stabilito dalle norme è pari a 40 J anche nel caso di spessore fino a 250 mm ma le prove di caratterizzazione dei fucinati da cui sono stati ricavati gli steli hanno fornito valori molto superiori come riportato in Tab. 6. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

Tab. 6 Valori di resistenza accertati nelle prove predisposte dalla Direzione Lavori¹⁴

Bocca	N°RPR	R(MPa)	S(MPa)	A%	KV ₁ (J)	KV ₂ (J)	KV ₃ (J)	KV _m (J)
NORMA	EN 10083-3	740-880	540	13	40			40
Treporti	41192	848	614	18	126	120	121	122
Treporti	41191	835	593	13.6	112	110	129	117
Treporti	41191	823	578	18.8	114	110	117	114
Treporti	41191	818	578	17.8	82	90	125	99
Treporti	41191	798	578	19.0	91	93	82	89
Malamocco	130159	803	615	18.0	106	124	90	107
Malamocco	130161	826	643	18.0	146	149	120	138
Malamocco	130162	797	587	18.0	112	100	104	105
Chioggia	131062	844	681	18.0	130	93	132	118
Chioggia	131062	873	699	19.0	134	122	155	137
Chioggia	131062	854	670	20.0	149	152	139	147
Chioggia	131041	865	711	18.0	143	157	148	149
S.Nicolò	45083	763	554	20.0	70	107	132	103

Applicando la formula (A2.1) si ottengono per i valori dei K_{IC} i valori riportati nella Tab. 7. Dato che il valore di K_{IC} dipendono dal diametro della zona considerata i calcoli sono stati eseguiti per la zona sottotesta (D=239.4 mm) per il primo filetto in presa (D=190 mm) e per la zona di transizione (D=181.7 mm). Nella stessa tabella è riportato, nell'ultima colonna e per ciascun caso il valore limite calcolato secondo la (A2.2) dimostrando così che esso non viene mai superato, così come impone la norma.

Tab. 7 Valori di K_{IC} per gli steli delle 4 bocche

Bocca	KV _m (J)	K_{IC} (MPa√mm)		
		D=231.7 mm	D=190 mm	D=181.7 mm
Treporti	122	2655,60	2775,94	2800,01
Treporti	117	2606,27	2723,67	2747,15
Treporti	114	2576,16	2691,77	2714,89
Treporti	99	2419,29	2525,57	2546,83
Treporti	89	2308,00	2407,66	2427,60
Malamocco	107	2504,32	2615,66	2637,93
Malamocco	138	2807,03	2936,38	2962,25
Malamocco	105	2483,37	2593,46	2615,49
Chioggia	118	2616,22	2734,21	2757,81
Chioggia	137	2797,83	2926,63	2952,39
Chioggia	147	2888,36	3022,54	3049,38
Chioggia	149	2906,09	3041,33	3068,38
S.Nicolò	103	2462,22	2571,05	2592,82

La norma BS 7910 stabilisce regole per l'analisi statistica dei valori di K_{IC} e suggerisce di valutare il valore medio e la deviazione standard della distribuzione ed utilizzare per le verifiche come valore limite:

$$K_{Mat} = K_{IC}(\text{Medio}) - K_{IC}(\text{Dev.standard})$$

Tale relazione è stata applicata per gruppi omogenei rispetto alle sollecitazioni agenti cioè, visto che esistono due tipologie di sollecitazioni agenti sotto forma di spettri di carichi a fatica, una per Treporti e una per le altre bocche. In questo modo sono stati ricavati i valori di K_{mat} per tali gruppi e per ciascuna delle dimensioni di riferimento delle zone del tensionatore indagate (Fig. 11).

¹⁴ Il numero di RPR indica l'identificativo del certificato dei materiali corrispondente a ciascuna prova.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

Da tali valori limite è stata successivamente calcolata, per ciascuna forma di cricca, il valore limite dell'ampiezza a che porta al collasso il tensionatore. Il valore del limite di collasso è stato valutato mediante l'approccio suggerito da BS 7910 Level 2. Per esso non è necessario adottare nessun coefficiente di sicurezza su K_{IC} , σ , a purché ci si riferisca la più sfavorevole dei casi possibili. Dato che vengono valutate le caratteristiche del materiale, gli sforzi agenti e la dimensione della cricca nel modo più sfavorevole nessun coefficiente di sicurezza è stato applicato nella valutazione del carico di collasso. Successivamente invece, nel definire le condizioni di manutenzione e i valori per i quali intervenire con riparazioni o sostituzioni, sono stati proposti valori cautelativi del coefficiente di sicurezza.

Nel calcolo dei valori limite, dato che essi sono di entità rilevante paragonati al raggio e quindi corrispondono a riduzioni non trascurabili dell'area resistente si è assunto, in accordo a quanto suggerito da BS 7910 per aree della cricca superiori al 10% di quella totale, un fattore riduttivo pari a:

$$f_w = \left[\sec \left(\frac{\pi A_{Tot}}{2 A_{Cricca}} \right) \right]^{0.5}$$

In nessun caso lo sforzo medio P_m agente sulla sezione ridotta, ha raggiunto il limite di snervamento del materiale. La condizione di collasso è stata determinata in accordo a "Level 2 BS 7910". In particolare il collasso non avviene finché

$$L_R = \frac{\sigma_{Rif}}{\sigma_y} \leq L_{R,Max} = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2\sigma_y}$$

Dove si è indicato con

$$\sigma_{Rif} = \frac{\pi \cdot P_m}{\frac{\pi}{2} + \beta + 0.5 \sin 2\beta}; \quad \beta = \frac{r-a}{r}$$

Per $L_R \leq L_{R,Max}$ il valore limite del fattore di intensità degli sforzi è

$$K_{I,Lim} = K_{IC} \left(1 - 0.14 L_R^2 \right) \left(0.3 + 0.7 \cdot e^{0.65 L_R^6} \right)$$

Le condizioni di collasso assunte nei calcoli, calcolate in base al metodo ora esposto, sono riepilogate nella Tab. 8 e Tab. 9 e sono da intendersi come dimensione limite della cricca il cui avanzamento è dovuto alla somma degli effetti della propagazione da corrosione e da fatica.

Tab. 8 Valori limite delle cricche per la Bocca di Treporti

Zona di valutazione	K_{IC} (MPa \sqrt{mm})	Pm (MPa)	K_t	Profondità della cricca (mm)	
				Triangolare	Semicircolare
Raccordo sottotesta	2368.3	121.5	3.16	84.8	88.9
Primo filetto in presa	2471.5	136.1	5.89	65.7	72.5
Zona di transizione ¹⁵	2492.2	148.8	1.00	60.6	66.5

Tab. 9 Valori limite delle cricche per le Bocche di Malamocco, Chioggia, San Nicolò

Zona di valutazione	K_{IC} (MPa \sqrt{mm})	Pm (MPa)	K_t	Profondità della cricca (mm)	
				Triangolare	Semicircolare
Raccordo sottotesta	2495.9	156.4	3.16	74.9	75.9
Primo filetto in presa	2606.7	171.3	5.89	58.6	66.8
Zona di transizione ¹⁶	2628.9	190.8	1.00	52.3	56.6

¹⁵ Valore stimato sulla base del rapporto (190/180)² tra la sezione del primo filetto e quella minima di transizione.

¹⁶ Valore stimato sulla base del rapporto (190/180)² tra la sezione del primo filetto e quella minima di transizione.

Procedura di calcolo

Definizione della successione di cicli più gravoso

Il processo di accrescimento di una cricca per fatica è di tipo non lineare in quanto la velocità di propagazione, cioè l'aumento della dimensione della cricca in funzione dei cicli, dipende dalla dimensione della cricca. Pertanto, dovendo applicare una successione di cicli di sollecitazione, definiti dal progettista nelle relazioni di calcolo meccanico del tensionatore, diversi per intensità e durata non si conosce a priori quale sia la configurazione più gravosa. In accordo a quanto suggerito da BS 7910, sono state studiate diverse configurazioni possibili per il caso della zona sottotesta del tensionatore di Treporti ottenendo i risultati esposti nella seguente tabella. In essa sono riportati il valore della cricca iniziale, assunto convenzionalmente pari a 1 mm, il valore della cricca finale nonché il valore del fattore di concentrazione delle tensioni che è pari sottotesta a 3.160 per $a=0$ e si suppone completamente estinto, cioè pari a 1, se la profondità della cricca è pari a 60 mm, che è la dimensione del raggio di raccordo moltiplicata, prudenzialmente per 1.5¹⁷. Lo studio della successione è stato limitato prima al caso della sola fatica e successivamente valutando la sovrapposizione degli effetti della velocità di corrosione e della fatica.

Tab. 10 Effetto della diversa successione dei cicli
(Caso sotto testa – Bocca di Treporti- N = Numero di cicli; $\Delta\sigma$ = Ampiezza del ciclo in MPa)

Successione	$a_{Iniziale}$ (mm)	$K_{t,Iniziale}$	$K_{t,Finale}$	a_{Finale} (mm)
SENZA CORROSIONE				
$N_{max} \rightarrow N_{min}$	1	3.16	3.095	1.220
$N_{min} \rightarrow N_{max}$	1	3.16	3.094	1.220
$\Delta\sigma_{max} \rightarrow \Delta\sigma_{min}$	1	3.16	3.094	1.220
$\Delta\sigma_{min} \rightarrow \Delta\sigma_{max}$	1	3.16	3.098	1.220
CON CORROSIONE				
$N_{max} \rightarrow N_{min}$	1	3.16	3.050	8.763
$N_{min} \rightarrow N_{max}$	1	3.16	2.529	11.791
$\Delta\sigma_{max} \rightarrow \Delta\sigma_{min}$	1	3.16	2.693	8.760
$\Delta\sigma_{min} \rightarrow \Delta\sigma_{max}$	1	3.16	2.584	11.794

Dai valori calcolati si determina che il caso più gravoso è quello che ordina i cicli da $\Delta\sigma_{min} \rightarrow \Delta\sigma_{max}$ e pertanto esso sarà utilizzato per i calcoli definitivi.

Il metodo di calcolo utilizzato consiste di 100 passi consecutivi che simulano ciascuno l'effetto di un anno di servizio (pari a $N_1=60006$ cicli di fatica) e che, nel loro complesso, forniscono gli effetti dell'avanzamento della cricca dovuto a $N_{tot}=6000600$ cicli di fatica e a 100 anni di corrosione alla velocità V_c . Per ciascun passo, detti n_i il numero di cicli competente a ciascuna delle K condizioni di carico, sono stati compiuti i seguenti calcoli:

1. Si assume un valore della cricca iniziale a_0 .
2. Si calcola la velocità di propagazione per la prima condizione di carico $(da/dN)_1$.
3. Si calcola l'avanzamento della cricca dovuto alla condizione di carico ¹⁸ $\Delta a_{1F} = n_1 \cdot (da/dN)_1$.

¹⁷ La lunghezza di estinzione di una concentrazione è un problema ben trattato in bibliografia. Per esempio Milella [A2.2] mostra che per diversi valori del fattore di concentrazione e della geometria del caso analizzato, la perturbazione dello stato di sforzo è sicuramente estinta entro una distanza pari a $1.5 \cdot R$. L'andamento del gradiente è più rapido di quello lineare, ottenuto unendo il punto di massimo sforzo con il punto di estinzione della concentrazione di tensione a distanza $1.5 \cdot R$. Pertanto nei calcoli si è assunto un gradiente lineare della concentrazione tra il punto di massimo, posto sulla superficie dello stelo, e il punto di estinzione posto a 1.5 volte il raggio di raccordo. In tal modo gli sforzi agenti sono sempre stati sovrastimati rispetto a quelli della reale distribuzione.

¹⁸ L'ordine di applicazione delle condizioni di carico è stato stabilito in base all'indagine evidenziata in Tab. 10 e corrispondente $\Delta\sigma_{min} \rightarrow \Delta\sigma_{max}$.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

4. Si calcola l'avanzamento della cricca dovuto alla velocità di corrosione V_c per il periodo di tempo corrispondente all'applicazione della prima condizione di carico 1 $\Delta a_{1c} = n_1 \cdot V_c / N_1$ (dove $N_1 = 60006$).
5. Si calcola la dimensione della cricca $a_1 = a_0 + \Delta a_{1f} + \Delta a_{1c}$ che viene assunta come cricca iniziale per la successiva condizione di carico.
6. Si ripetono, per le (K-1) condizioni di carico rimanenti, i passi 2-3-4-5. Alla fine si ottiene la dimensione della cricca totale dopo un anno di servizio.
7. Il sistema di calcolo viene replicato per i 100 anni.

Per la bocche del sistema MOSE le condizioni di carico sono riepilogate nelle Tab. 11 e Tab. 12 redatte in base ai dati forniti dal progettista. Come si vede, in generale, vengono distinti due spettri carico: uno per la Bocca di Treporti e uno per la Bocca di Malamocco, ritenuto valido per tutte le altre bocche (Chioggia e S.Nicolò).

Gli spettri di calcolo, inoltre, sono stati distinti dal progettista in base alla zona critica del tensionatore individuandone due: al raccordo sotto la testa a martello, in corrispondenza del primo filetto in presa. Essi oltre a essere caratterizzati da valori degli sforzi diversi hanno anche coefficienti di concentrazione diversi (3.16 la zona sottotesta e 5.89 la zona del primo filetto in presa). Per migliorare l'accuratezza del calcolo è stata introdotta una terza zona corrispondente alla transizione tra il diametro 180 mm (circa) e 200 mm. I valori degli sforzi sono stati ottenuti da quelli del primo filetto in presa scalandoli in funzione della diversa sezione resistente (da 190 a 181.7). Per quest'ultima zona, considerando la gradualità della transizione si è assunto un valore del coefficiente di concentrazione delle tensioni pari a 1. I valori degli sforzi, riportati nelle tabelle, sono quelli nominali, senza cioè l'effetto della concentrazione di tensione, visto l'estensione assiale della variazione e il raggio di raccordo.

Il progettista fornisce due tipi di spettro con le forze orientate verso il mare aperto e verso laguna. Poiché quest'ultimo caso è più gravoso si è utilizzato solo tale spettro. Nell'ultima riga della tabella sono riepilogati, inoltre, i valori massimi. Il ciclo di tensionamento-detensionamento dello stelo corrisponde al caso con $\sigma_{MIN} = 0$ ed è quello che corrisponde al valore massimo di $\Delta\sigma$. Il progettista ha assunto, prudenzialmente un numero di 6 cicli di tensionamento-detensionamento all'anno.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

Tab. 11 Spettri di carico per la Bocca di Treporti

Condi- zione di carico	Cicli	Sotto testa ($K_t = 3.16$)			Primo filetto ($K_t = 5.89$)			Transizione 181.7-200 mm ($K_t = 1.00$)		
		σ_{MIN} (MPa)	σ_{MAX} (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	σ_{MIN} (MPa)	σ_{MAX} (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	σ_{MIN} (MPa)	σ_{MAX} (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)
1	76	63,0	118,6	55,6	75,7	133,1	57,4	82,8	145,5	62,8
2	119	58,2	121,5	63,3	70,7	136,1	65,4	77,3	148,8	71,5
3	227	79,6	104,7	25,1	93,6	119,5	25,9	102,3	130,7	28,3
4	534	75,8	108,7	32,9	89,6	123,7	34,1	98,0	135,3	37,3
5	600	0,0	92,3	92,3	0	107,3	107,3	0,0	117,3	117,3
6	811	69,4	117,0	47,7	82,5	131,5	49	90,2	143,8	53,6
7	3301	75,4	113,2	37,8	88,9	127,7	38,8	97,2	139,6	42,4
8	3706	83,6	100,6	17,1	97,8	115,3	17,5	106,9	126,1	19,1
9	7391	80,3	109,3	29,0	94	123,8	29,8	102,8	135,4	32,6
10	9438	82,1	107,6	25,6	95,9	122,2	26,3	104,9	133,6	28,8
11	15888	85,7	99,1	13,3	100,1	113,7	13,6	109,5	124,3	14,9
12	18899	85,7	102,5	16,8	99,6	116,9	17,3	108,9	127,8	18,9
13	27501	86,3	99,0	12,7	100,1	113,1	13	109,5	123,7	14,2
14	54123	86,9	96,1	9,2	100,6	110,1	9,5	110,0	120,4	10,4
15	74591	87,8	97,7	10,0	102,3	112,5	10,2	111,9	123,0	11,2
16	88585	89,3	92,4	3,1	103,1	106,2	3,1	112,7	116,1	3,4
17	89756	87,9	94,1	6,2	101,7	108	6,3	111,2	118,1	6,9
18	262718	89,8	96,2	6,5	104,3	111	6,7	114,0	121,4	7,3
19	5342336	91,4	94,6	3,2	106	109,3	3,3	115,9	119,5	3,6
N_{tot}	6000600	MAX	121,5	92,3	MAX	136,1	107,3	MAX	148,8	117,3

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

Tab. 12 Spettri di carico per le Bocche di Malamocco – Chioggia – San Nicolò

Condi- zione di carico	Cicli	Sotto testa ($K_t = 3.16$)			Primo filetto ($K_t = 5.89$)			Transizione 181.7-200 mm ($K_t = 1.00$)		
		σ_{MIN} (MPa)	σ_{MAX} (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	σ_{MIN} (MPa)	σ_{MAX} (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	σ_{MIN} (MPa)	σ_{MAX} (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)
1	4557356	93,8	96,9	3,1	108,55	111,75	3,2	120,9	124,5	3,6
2	652941	92,6	98,5	5,9	107,2	113,39	6,2	119,4	126,3	6,9
3	302588	91,3	100,2	8,9	105,84	115,19	9,4	117,9	128,3	10,4
4	120238	89,9	102,2	12,3	104,34	117,26	12,9	116,3	130,7	14,4
5	41094	88,4	104,6	16,2	102,7	119,7	17,0	114,4	133,4	18,9
6	13495	86,6	106,0	19,4	100,76	121,1	20,3	112,3	134,9	22,7
7	9846	81,7	108,7	27,1	95,52	123,83	28,3	106,4	138,0	31,5
8	1395	75,7	111,0	35,4	89,08	126,04	37,0	99,3	140,4	41,2
9	698	65,4	113,3	47,9	78,11	128,24	50,1	87,0	142,9	55,9
10	349	62,9	117,7	54,8	75,87	132,79	56,9	84,5	148,0	63,4
11	12822	87,0	89,9	2,9	100,37	103,43	3,1	111,8	115,2	3,4
12	69470	85,7	91,6	5,8	99,02	105,15	6,1	110,3	117,2	6,8
13	68070	85,6	94,4	8,8	98,94	108,14	9,2	110,2	120,5	10,3
14	49526	86,4	98,6	12,3	99,81	112,7	12,9	111,2	125,6	14,4
15	42684	86,3	101,3	15,0	99,81	115,54	15,7	111,2	128,7	17,5
16	18886	85,7	103,1	17,5	99,16	117,41	18,3	110,5	130,8	20,3
17	18659	82,9	106,9	24,0	96,31	121,32	25,0	107,3	135,2	27,9
18	7599	80,3	110,9	30,5	93,66	125,35	31,7	104,4	139,7	35,3
19	6078	77,3	115,1	37,8	90,52	129,67	39,2	100,9	144,5	43,6
20	2128	72,2	119,5	47,2	85,1	134,04	48,9	94,8	149,3	54,5
21	1725	61,3	124,7	63,4	73,7	139,29	65,6	82,1	155,2	73,1
22	1505	58,9	132,2	73,3	71,49	147,07	75,6	79,7	163,9	84,2
23	462	56,4	138,4	82,0	69,05	153,23	84,2	76,9	170,7	93,8
24	231	53,9	144,3	90,4	66,47	159,12	92,7	74,1	177,3	103,2
25	112	51,4	150,1	98,7	63,95	164,94	101,0	71,3	183,8	112,5
26	43	48,9	156,4	107,5	61,47	171,26	109,8	68,5	190,8	122,3
27	600	0,0	93,5	93,5	0	108,63	108,6	0,0	121,0	121,0
N_{tot}	6000600	MAX	156.4	107.5	MAX	171.26	109.8	MAX	190.8	120.0

Calcoli della durata nella Bocca di Treporti

Sulla base del metodo esposto nei paragrafi precedenti è stata calcolata la progressione di due tipi di cricca in presenza di fatica e corrosione per lo spettro applicabile nella bocca di Treporti. L'analisi è stata eseguita facendo variare la velocità di corrosione da 0.050 mm/anno fino a 1 mm/anno. Il valore della cricca iniziale per l'innesco del fenomeno è stata assunto pari a 1 mm.

I risultati per una cricca di forma triangolare sono riportati nelle figure seguenti.

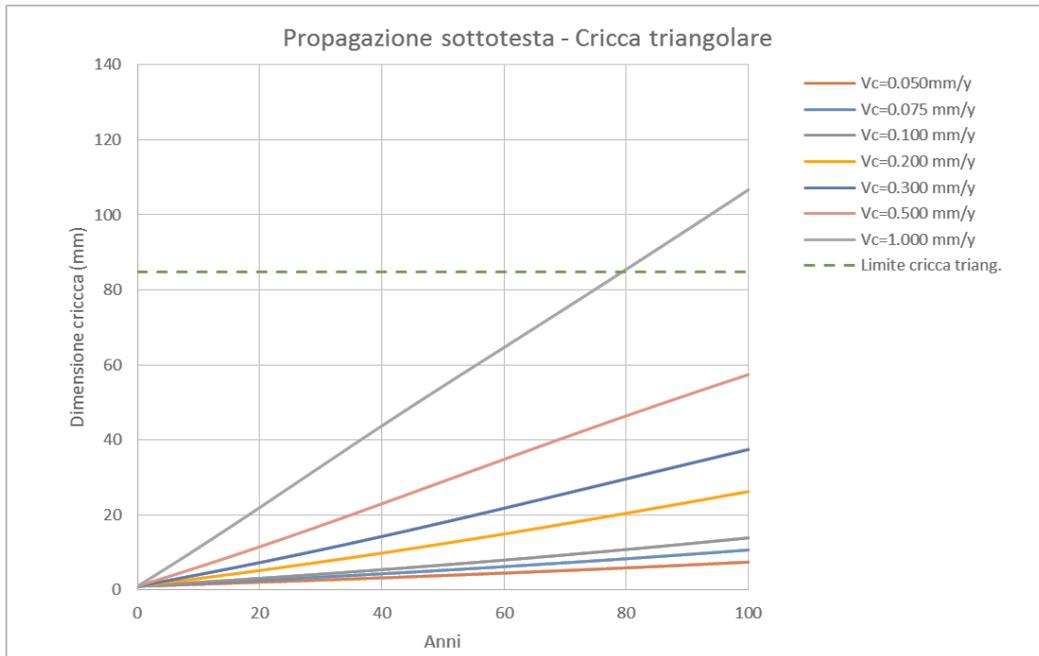


Fig. 12 Bocca di Treporti - Propagazione di una cricca triangolare nella zona sottotesta.

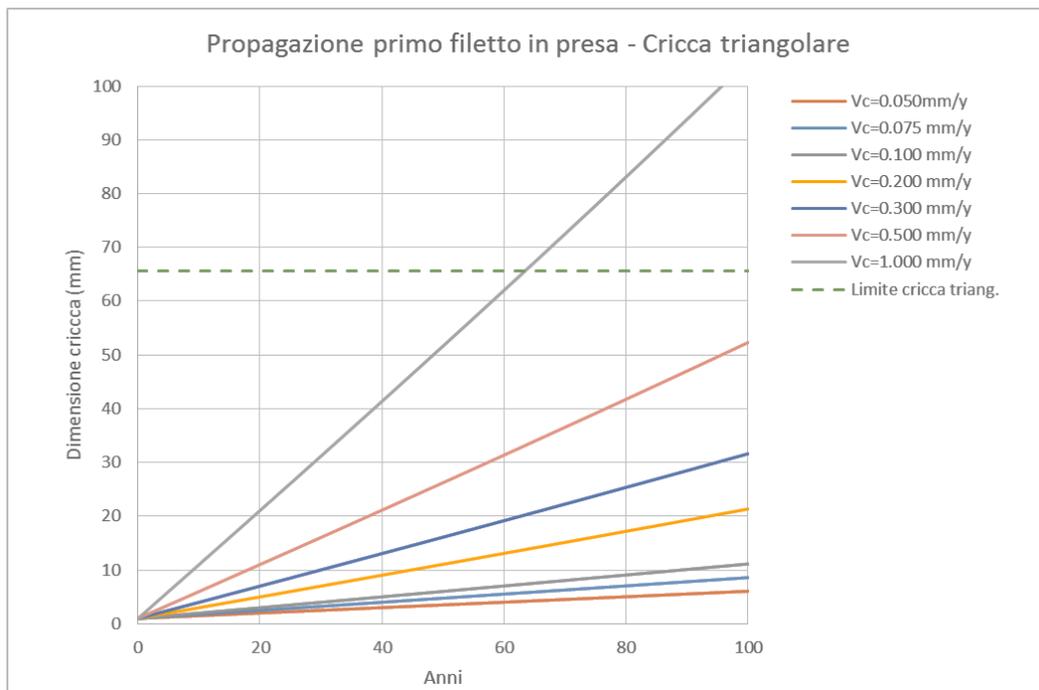


Fig. 13 Bocca di Treporti - Propagazione di una cricca triangolare nella zona del primo filetto.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

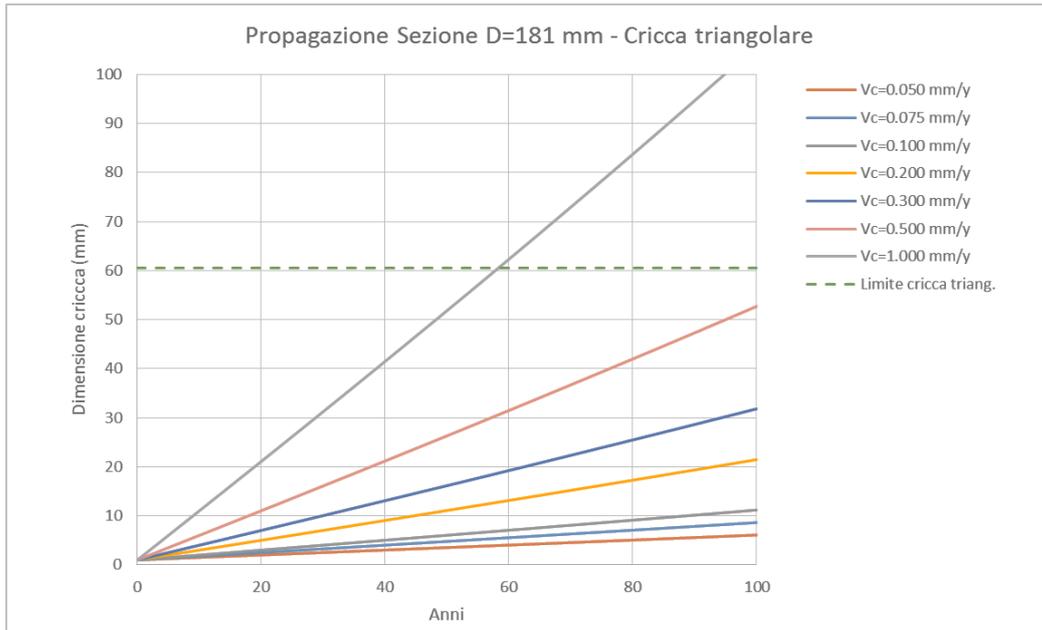


Fig. 14 Bocca di Treporti - Propagazione di una cricca triangolare nella zona di transizione da 190mm a 181.7 mm.

I risultati per la cricca semicircolare sono riportati nelle figure seguenti.

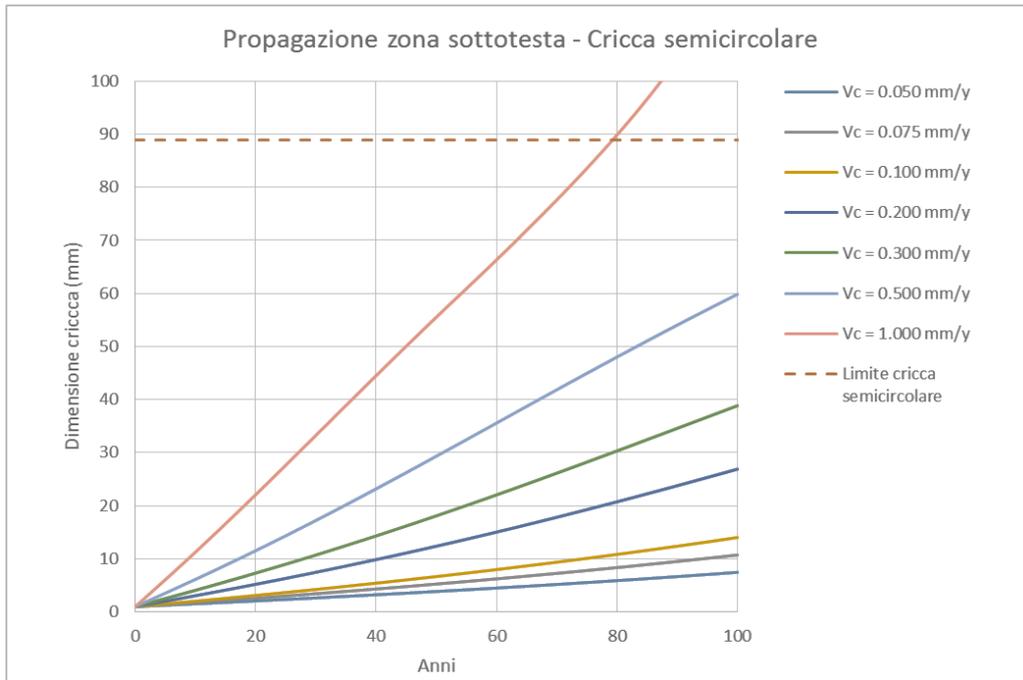


Fig. 15 Bocca di Treporti - Propagazione di una cricca semicircolare nella zona sottotesta.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

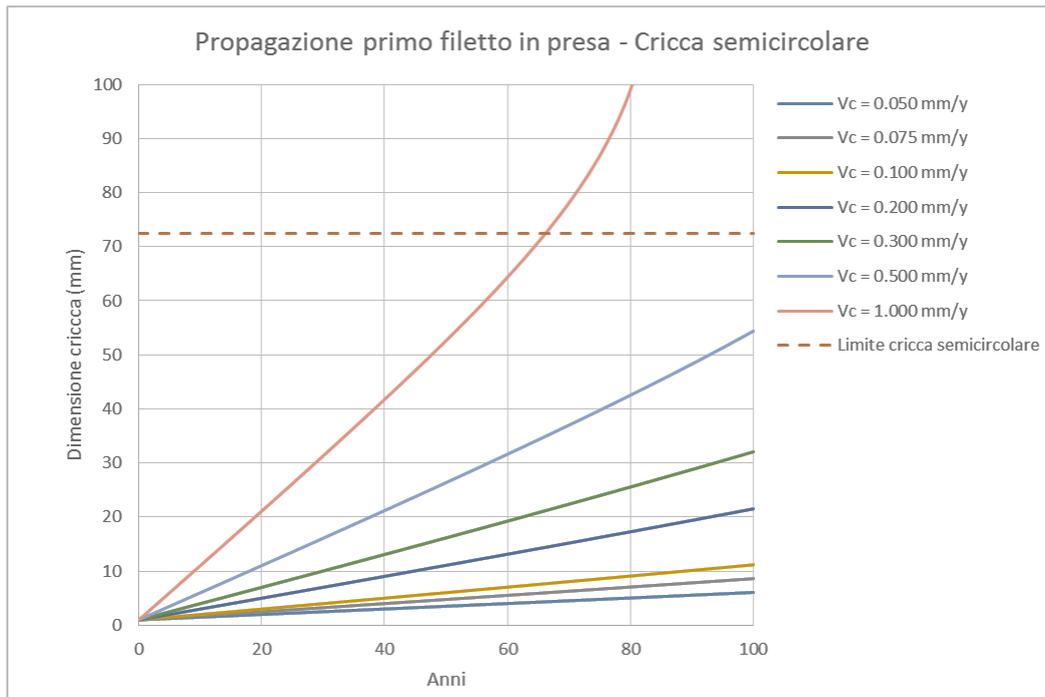


Fig. 16 Bocca di Treporti - Propagazione di una cricca semicircolare nella zona del primo filetto in presa.

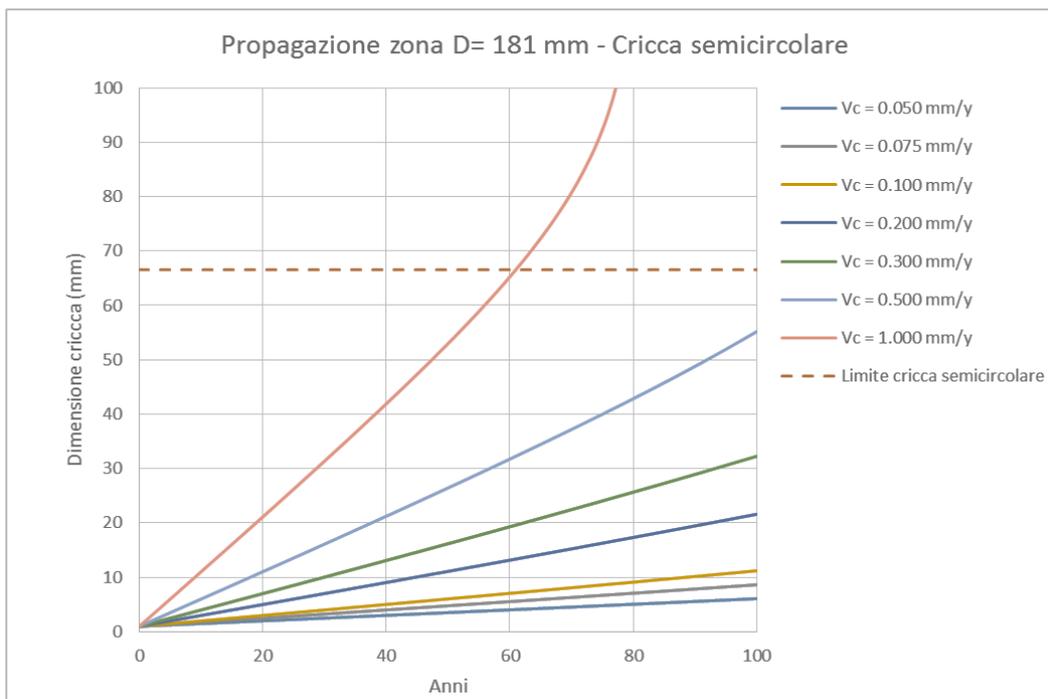


Fig. 17 Bocca di Treporti - Propagazione di una cricca semiellittica nella zona di transizione 190 - 181.7 mm.

Sulla base dei dati riportati nelle figure da Fig. 12 a Fig. 17 è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- Tutti casi con velocità di corrosione uguale o minore di 0.500 mm/anno rispettano la durata di 100 anni.
- Tutti casi con velocità di corrosione pari a 1.000 mm/anno non rispettano la durata di 100 anni.
- Il caso più gravoso è quello con la velocità di corrosione di 1.000 mm/anno per la cricca triangolare nella zona di transizione da 190 mm a 181.7 mm per il quale il collasso avviene in corrispondenza di una durata di circa 58 anni.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

- I casi più significativi per la durata sono comunque quelli sottotesta in quanto negli altri si può ipotizzare che l'effetto della pasta anticorrosiva, nella zona di transizione, e del grasso nella zona filettata, arrestino o rendano lentissimo il processo corrosivo.
- In tutti i casi riducendo la velocità di corrosione a valori uguali o inferiori a 0.500 mm/anno è possibile conseguire la durata richiesta di 100 anni. In particolare nella Tab. sono riportati i valori limite, i valori della cricca a 100 anni e il coefficiente di sicurezza calcolato come rapporto tra tali valori. Il coefficiente di sicurezza minore è pari a 1.15 e potrebbe consentire:
 - o Una diminuzione del valore limite di K_{IC} di circa il 30%.
 - o Un aumento generalizzato dei valori degli sforzi agenti del 65%.
 - o Un aumento della durata di circa fino a 115 anni.

Tab. 13 Valori della cricca dopo 100 anni per una velocità di corrosione $V_c = 0.5 \text{ mm/y}$ e relativi coefficienti di sicurezza

Zona Tensionatore	Cricca triangolare			Cricca semicircolare		
	Limite	Dopo 100 anni	Coeff.Sic.	Limite	Dopo 100 anni	Coeff.Sic.
Sottotesta	84,8	57,4	1,48	88,9	59,9	1,48
Primo filetto	65,7	52,30	1,26	72,5	54,9	1,32
Transizione	60,6	52,80	1,15	66,5	56,3	1,18

- E' da notare a tale proposito che la velocità di corrosione di 0.300 mm/anno, secondo DNV-RP.0416 [A-1.11], corrisponde ad una superficie metallica non protetta nella cosiddetta "splash zone" cioè nella zona alternativamente asciutta-bagnata. Quest'ultima condizione è sicuramente più gravosa di quella conseguibile nelle camere dei tensionatori, purché le superfici siano pulite, asciutte e ben areate.
- Le durate ora esposte e riportate nelle figure precedenti sono quelle che corrispondono ad una cricca iniziale di profondità par a 1 mm. Per verificare comunque la robustezza delle conclusioni esposte si è esaminata, per il caso di $V_c = 0.500 \text{ mm/y}$, l'effetto di una cricca iniziale di 5 mm ottenendo i risultati esposti nella Tab. 14. Si rileva come anche con una cricca iniziale profonda 5 mm si ha ancora una durata esuberante rispetto al requisito di 100 anni.

Tab. 14 Valori finali delle cricche dopo 100 anni partendo da una profondità iniziale di 5 mm

Zona	Cricca triangolare		Cricca semicircolare	
	Limite (mm)	Dopo 100 anni	Limite (mm)	Dopo 100 anni
Sottotesta	88.4	61.6	88.9	64.4
Primo filetto in presa	66.7	56.6	72.5	60.0
Transizione	60.6	57.2	66.5	62.4

Le conclusioni ora esposte sono valide per le due forme di cricca (triangolare e semicircolare) assunte come applicabili. Altre forme di cricca sono teoricamente possibili come per. es quella rettangolare con il lato lungo rivolto verso l'interno dello stelo o quella circonferenziale cioè estesa su tutto il perimetro. Mentre la prima però presenta un comportamento analogo a quello della cricca triangolare, la seconda ha un comportamento più pericoloso.

Per quest'ultima sono stati eseguiti dei calcoli preliminari della durata attesa, applicando la procedura già descritta e per il fattore di intensità degli sforzi (K_I) quanto prescritto nella norma BS7910 (sect. M). I calcoli sono stati sviluppati per la zona in corrispondenza del posizionamento della guarnizione di tenuta del carter dove, in base ai rilievi dei danneggiamenti effettivamente riscontrati a Treporti, più probabile è il suo verificarsi. Si è ottenuto per una $V_c = 0.300 \text{ mm/y}$ ed una cricca iniziale di 1 mm una durata ancora superiore a 100 anni ma già per un cricca iniziale di 3 mm la durata scende, seppur di poco, sotto i 100 anni.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

Con una profondità iniziale di 5 mm e $V_c = 0.300$ mm/y la durata attesa è invece di 90 anni. Con una profondità iniziale invece di 5 mm e una velocità di corrosione di 1.000 mm/y la durata scende drasticamente a 36 anni.

Questo risultato da un lato definisce la necessità di eseguire un'analisi più estesa per quanto riguarda le forme delle cricche applicabili e dall'altro può servire da guida preliminare per discernere quali siano i tensionatori potenzialmente pericolosi.

Calcoli della durata per le Bocche di Malamocco, Chioggia e San Nicolò.

Utilizzando gli spettri competenti forniti dal progettista, riportati nella Tab. 12, e il metodo già impiegato per l'analisi dei tensionatori della Bocca di Treporti è stata calcolata con la solita analisi parametrica la durata per le Bocche di Malamocco, Chioggia e San Nicolò i cui risultati sono riportati nelle figure seguenti, cominciando da quelli per la cricca di forma triangolare.

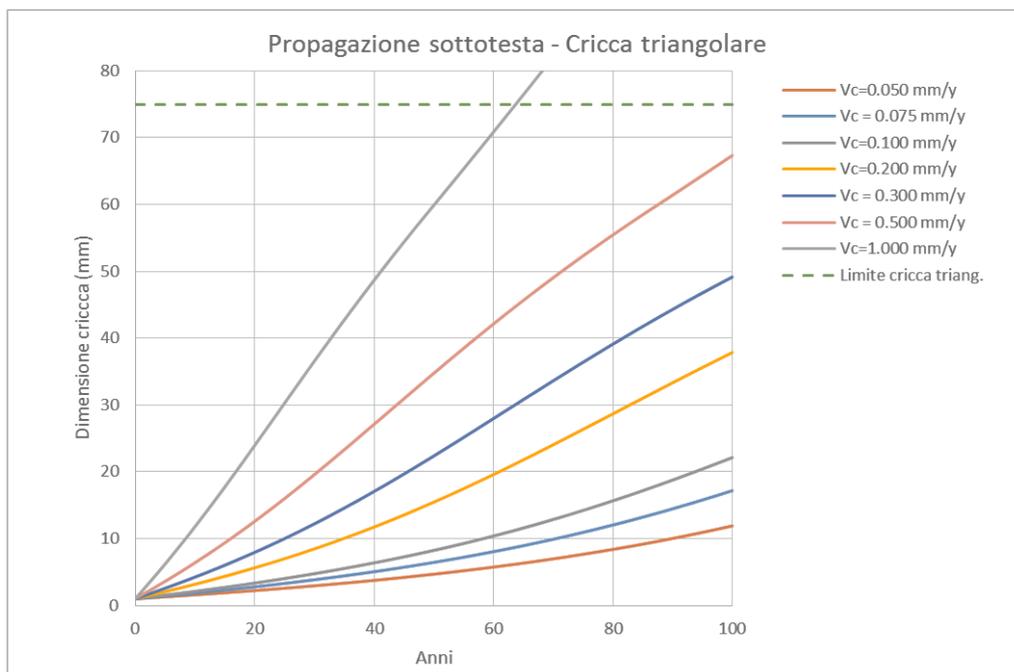


Fig. 18 Bocca di Malamocco, Chioggia, San Nicolò - Propagazione di una cricca triangolare nella zona sottotesta.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

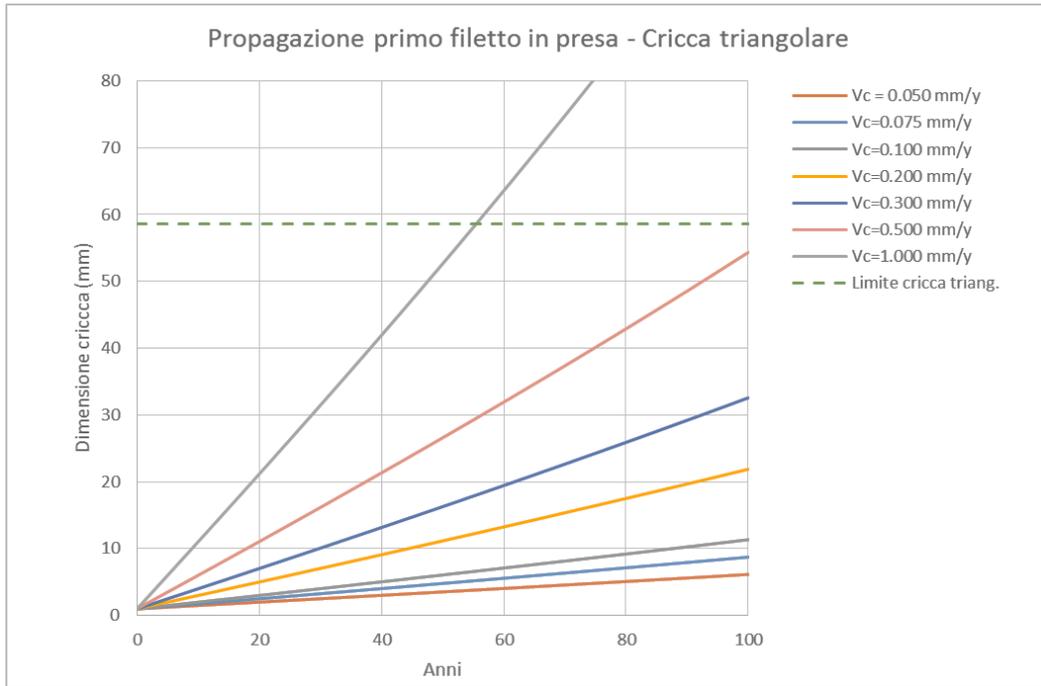


Fig. 19 Bocca di Malamocco, Chioggia, San Nicolò - Propagazione di una cricca triangolare nella zona del primo filetto in presa.

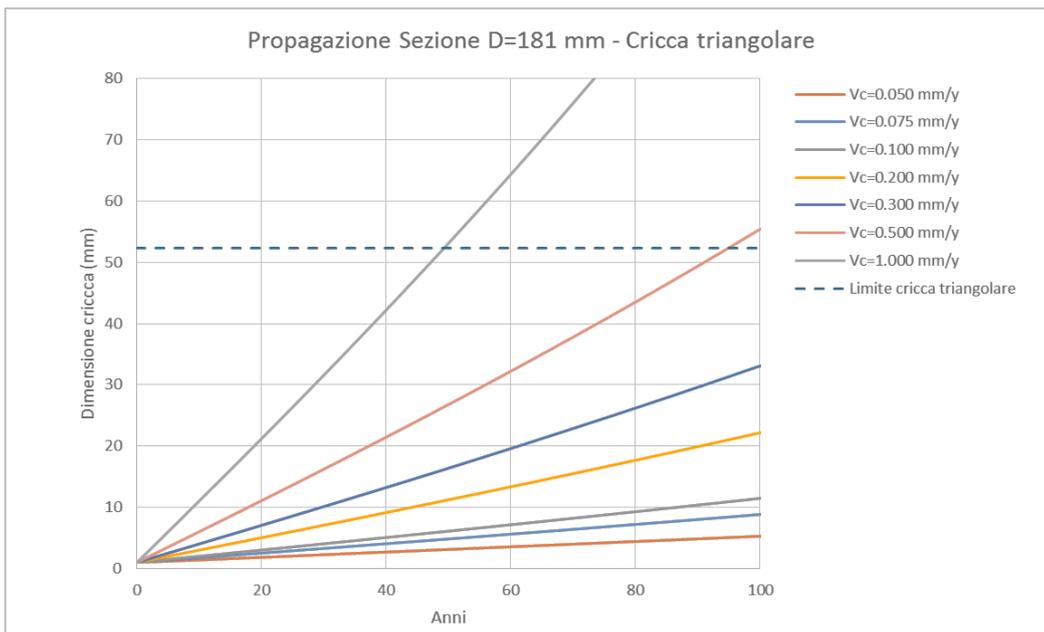


Fig. 20 Bocca di Malamocco, Chioggia, San Nicolò - Propagazione di una cricca triangolare nella zona di transizione da 190 a 181.7 mm.

I risultati per la cricca semicircolare sono riportati nelle figure seguenti.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

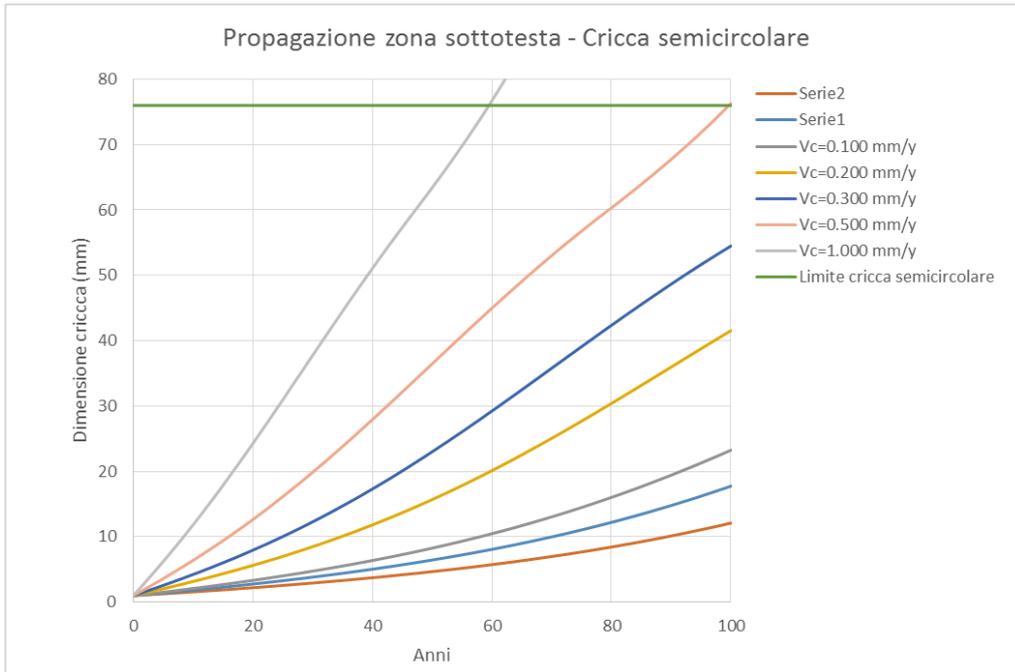


Fig. 21 Bocca di Malamocco, Chioggia, San Nicolò - Propagazione di una cricca semicircolare nella zona sottotesta.

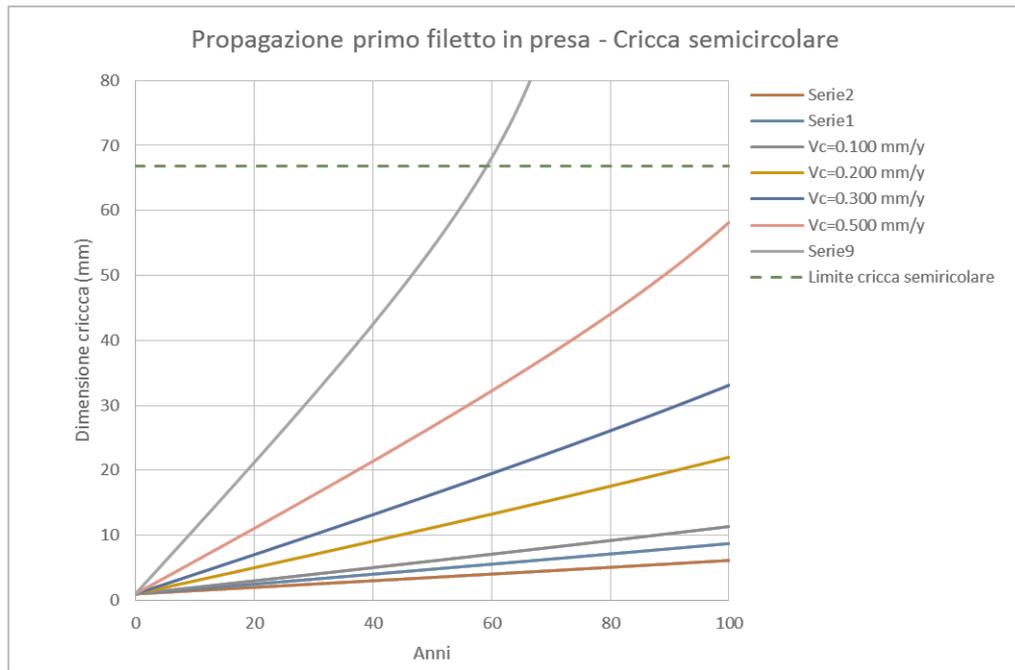


Fig. 22 Bocca di Malamocco, Chioggia, San Nicolò - Propagazione di una cricca semicircolare nella zona del primo filetto in presa.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

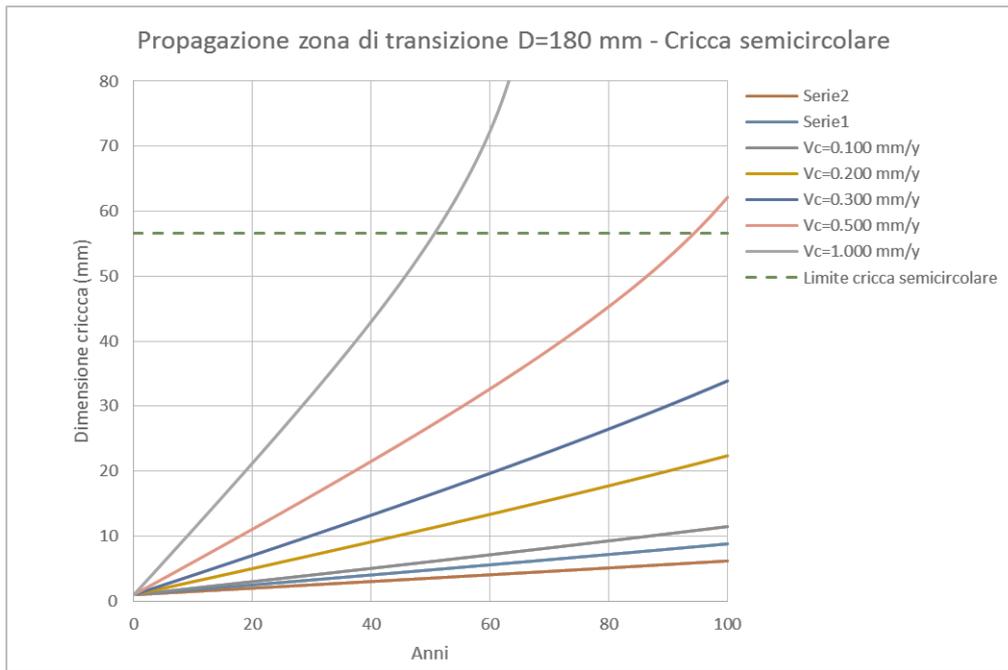


Fig. 23 Bocca di Malamocco, Chioggia, San Nicolò - Propagazione di una cricca semicircolare nella zona di transizione da 190 a 181.7 mm.

Sulla base dei dati riportati nelle figure da Fig. 18 a Fig. 23 è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- Tutti i casi con velocità di corrosione uguale o minore di 0.300 mm/anno rispettano la durata di 100 anni.
- Tutti i casi con velocità di corrosione pari a 1.000 mm/anno non rispettano la durata di 100 anni.
- Il caso più gravoso è quello con la velocità di corrosione di 1.000 mm/anno per la cricca semicircolare nella zona di transizione da 190 mm a 181.7 mm per il quale il collasso avviene in corrispondenza di una durata di circa 50 anni.
- La metà dei casi esaminati non rispetta la durata di 100 anni per una velocità di corrosione pari a $V_c=0.500$ mm/y.
- I casi più significativi per la durata sono comunque quelli sottotesta in quanto negli altri si può ipotizzare che l'effetto della pasta anticorrosiva, nella zona di transizione, e del grasso nella zona filettata, arrestino o rendano lentissimo il processo corrosivo.
- In tutti i casi riducendo la velocità di corrosione a valori uguali o inferiori a 0.300 mm/anno è possibile conseguire la durata richiesta di 100 anni. In particolare nella Tab. 15 sono riportati i valori limite, i valori della cricca a 100 anni e il coefficiente di sicurezza calcolato come rapporto tra tali valori. Il coefficiente di sicurezza minore è pari a 1.53 e potrebbe consentire:
 - o Una diminuzione del valore limite di K_{IC} di circa il 36%
 - o Un aumento generalizzato dei valori degli sforzi agenti del 45%
 - o Un aumento della durata di circa fino a 162 anni

Tab. 15 Valori finali delle cricche dopo 100 anni per una $V_c = 0.300$ mm/y e relativi coefficienti di sicurezza

Zona Tensionatore	Cricca triangolare			Cricca semicircolare		
	Limite	Dopo 100 anni	Coeff.sic.	Limite	Dopo 100 anni	Coeff.sic.
Sottotesta	74,9	49,1	1,53	75,9	54,5	1,39
Primo filetto	58,6	32,60	1,80	66,8	33,2	2,01
Transizione	52,3	33,10	1,58	56,6	33,9	1,67

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

- Si noti che la velocità di corrosione di 0.300 mm/anno, secondo DNV-RP.0416 [A-1.11], corrisponde ad una superficie metallica non protetta nella cosiddetta "splash zone" cioè nella zona alternativamente asciutta-bagnata. Quest'ultima condizione è sicuramente più gravosa di quella conseguibile nelle camere dei tensionatori, purché le superfici siano pulite, asciutte e ben areate.
- Le durate ora esposte e riportate nelle figure precedenti sono quelle che corrispondono ad una cricca iniziale di profondità par a 1 mm. Per verificare comunque la robustezza delle conclusioni esposte si è esaminata, per il caso di $V_c = 0.300 \text{ mm/y}$, l'effetto di una cricca iniziale di 5 mm ottenendo i risultati esposti nella Tab. 16. Si rileva come anche con una cricca iniziale profonda 5 mm si ha ancora una durata esuberante rispetto al requisito di 100 anni.

Tab. 16 Valori finali delle cricche dopo 100 anni partendo da una profondità iniziale di 5 mm

Zona	Cricca triangolare		Cricca semicircolare	
	Limite (mm)	Dopo 100 anni	Limite (mm)	Dopo 100 anni
Sottotesta	74.9	54.5	75.9	60.9
Primo filetto in presa	58.6	37.1	66.8	38.2
Transizione	52.3	37.9	56.6	39.4

Bibliografia

- [A2.1]. BS 7910 Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures.
- [A2.2]. P.P. Milella, Fatigue and corrosion in metals, Springer, Milano, 2013.
- [A2.3]. Y. Murakami, Stress Intensity Factors Handbook, Pergamon Press, 1987.
- [A2.4]. T.L. Anderson, Fracture Mechanics, CRC Press, Boca Raton USA, 1994.
- [A2.5]. DNV RP-C203 – Fatigue strength of offshore steel structure.
- [A2.6]. UNI 7670 – Meccanismi per apparecchi di sollevamento. Istruzioni per il calcolo.
- [A2.7]. W. Pilkey, D. Pilkey, Peterson's Stress Concentration Factors, J.Wiley, 2008.
- [A2.8]. Dill, H. D. ; Saff, C. R., Environment - Load Interaction Effects on Crack Growth, MCDONNELL AIRCRAFT CO ST LOUIS MO, Final rept. Jul 1976-Aug 1978, PDF Url : ADA071660, Approved for public release.
- [A2.9]. Handbook for Damage Tolerant Design, Section 5.1.5. "Stress-Corrosion Cracking and Stress Intensity" reperibile in rete: <http://www.afgrow.net/applications/DTDHandbook/>

ALLEGATO 3: Verifica a fatica dei tensionatori con approccio Fail safe.

Generalità

L'approccio fail safe, comunemente utilizzato nella progettazione, è adeguato quando si tratta di valutare la resistenza a fatica, espressa in termini di cicli a rottura, di un elemento a partire dalla sua messa in servizio in perfetto stato e senza difetti. E' invece incapace di prevedere la durata di un pezzo che presenti un difetto come una cricca da corrosione.

Il progettista ha utilizzato tale approccio per le verifiche di resistenza a fatica dei tensionatori impiegando come normativa di riferimento sia la DNV-RP-C203 "Fatigue Design of offshore steel structures" sia la UNI 7670 - 88 "Meccanismi per apparecchi di sollevamento". Quest'ultima normativa, per quanto ritirata, nell'attesa dell'emissione di una norma armonizzata completa sulla resistenza a fatica, rimane ancora l'unico riferimento completo sul problema della valutazione della vita a fatica di elementi meccanici. Infatti i criteri contenuti nell'EUROCODE a proposito del calcolo a fatica sono criteri generali più orientati alla verifica di elementi di carpenteria che a pezzi forgiati, lavorati di macchina e trattati superficialmente con nichelatura. Inoltre nel procedimento di calcolo in essa indicato è assai agevole inserire gli effetti di un eventuale attacco corrosivo.

Il progettista nei suoi calcoli, sia per la Bocca di Treporti sia per le altre bocche (Malamocco, Chioggia e San Nicolò) ha supposto che l'attacco corrosivo fosse assente in quanto si è assunto che lo strato di nichelatura fosse integro e pertanto in grado di isolare il materiale del tensionatore dall'atmosfera.

Nel presente allegato i calcoli di resistenza a fatica vengono eseguiti considerando che il materiale sia sottoposto ad attacco corrosivo e quindi inserendo l'appropriata riduzione della resistenza.

Le caratteristiche principali del calcolo del quale sono qui esposti i risultati, sono le seguenti:

- Il calcolo riguarda due zone diverse: la zona sottotesta e quella del primo filetto in presa. Rispetto alla valutazione della durata mediante la Meccanica della Frattura, in questo caso la zona di transizione essendo associata ad un coefficiente di concentrazione molto prossimo all'unità non risulta essere critica.
- Il calcolo è stato eseguito utilizzando i dati impiegati dal progettista nel documento citato in nota¹⁹ di verifica a fatica con la modifica di utilizzare il coefficiente riduttivo della resistenza K_c , previsto dalla norma, per il materiale 39NiCrMo3 in presenza di corrosione in acqua marina cioè $K_c=3.6$; inoltre anche se le caratteristiche del materiale, impiegate nel calcolo, sono quelle per il gruppo dimensionale 160-250 mm, è stato utilizzato il coefficiente riduttivo per l'effetto scala pari a 1.45 come assunto dal progettista.
- Per la sovrapposizione del danno è stato calcolato il danno conseguente all'applicazione di ciascun gruppo di carichi dello spettro definito dal progettista e che simula l'effetto di 100 anni di uso. Il criterio di sovrapposizione è quello dell'accumulazione lineare detto di Miner. Pertanto, vista la linearità della sovrapposizione l'ordine di applicazione di ciascun carico è ininfluente ai fini del risultato.

Le caratteristiche utilizzate per il calcolo sono le seguenti, adeguate per parti con dimensioni da 160 a 250 mm

$R = 740 \text{ MPa}$; $S = 540 \text{ MPa}$; $\sigma_{D-1} = 370 \text{ MPa}$ (Sforzo limite per $2 \cdot 10^6$ cicli con ciclo
alternativo simmetrico $k=-1$)

$$\sigma_f = \frac{\sigma_{D-1}}{K_f K_d K_I K_C} \quad k = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$$

Dove i simboli utilizzati hanno il significato definito di seguito.

¹⁹ Bocca di Lido Treporti – Gruppo di aggancio e tensionamento – Relazione di calcolo – Parte meccanica MV089P-PE-TMR-3203-C0 e inoltre Technital - STELO TENSIONATORE - Verifica a fatica integrativa per la filettatura. Rev. C0 - 9/02/12

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

K_f è il fattore di forma a fatica che si può calcolare come $K_f = (K_t - 1)q + 1$ dove K_t è il coefficiente di concentrazione delle tensioni e q è il fattore di sensibilità all'intaglio pari, a suo volta a $q = \frac{1}{1 + a/r}$ essendo R

il raggio di raccordo in prossimità della concentrazione di tensione e a (mm) un parametro che dipende dal carico di rottura del materiale: nel caso del 39NiCrMo3 $a=0.163$ mm. In definitiva si hanno i seguenti valori:

- Zona del primo filetto in presa $K_t=5.89$; $r = 0.577$ mm e quindi $q = 0.780$ e, in definitiva, $K_f=4.81$
- Zona del primo filetto in presa $K_t=3.16$; $r = 40$ mm e quindi $q = 0.995$ e, in definitiva $K_f=3.15$

Il coefficiente K_i tiene conto della finitura superficiale ed è funzione del carico di rottura del materiale; il tensionatore è rettificato ed ha una rugosità generale di $1.2 \mu\text{m}$, salvo la parte cilindrica dove scorre la guarnizione dove la rugosità è pari a $0.8 \mu\text{m}$. Considerando che il carico di rottura che ha un valore minimo consentito di 740 MPa è stato assunto $K_i=1.1$.

Il coefficiente tiene invece conto delle dimensioni; il valore del coefficiente riduttivo impiegato nei calcoli è quello massimo previsto dalla norma pari a 1.45 . $K_d=1.00$ ²⁰.

Successivamente è possibile calcolare l'esponente della curva di fatica c pertinente al caso in esame mediante i seguenti elementi:

$$\sigma_d = \sigma_f K_k \quad \text{per } -1 \leq k \leq 0 \quad K_k = \frac{5}{3-2k} \quad \text{per } 0 < k \leq 1 \quad K_k = \frac{5/3}{1 - \left(1 - \frac{5/3}{R}\right) \cdot k}$$

$$c = \frac{\log 2 \cdot 10^6 - \log 8 \cdot 10^3}{\log R - \log \sigma_d} \quad \text{per } n \leq 2 \cdot 10^6 \text{ cicli} \quad c' = c + \sqrt{c^2 + 1} \quad \text{per } n > 2 \cdot 10^6 \text{ cicli}$$

Il valore dello sforzo ammissibile di fatica si calcola dunque con la relazione:

$$\sigma_{Lim} = \frac{\sigma_d}{3.2^{1/c}} K_T^{21}$$

Dove K_T è il fattore di adeguamento delle tensioni che per la trazione vale 0.8 ²². Infine il valore dei cicli che portano al collasso per ciascun livello di sforzo i -esimo si calcola con la relazione:

$$N = 2 \cdot 10^6 \left(\frac{\sigma_{Lim}}{\sigma_i} \right)^c \quad \text{per } N \leq 2000000 \text{ cicli}; \quad N = 2 \cdot 10^6 \left(\frac{\sigma_{Lim}}{\sigma_i} \right)^{c'} \quad \text{per } N > 2000000 \text{ cicli}$$

Infine il danno conseguente all'applicazione del ciclo i -esimo è pari, secondo l'ipotesi Miner:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i}$$

Il danno totale conseguente all'applicazione di H livelli di sforzo è:

$$D_{Tot} = \sum_1^H \frac{n_i}{N_i}$$

Teoricamente la resistenza è assicurata se il danno totale è <1 ma, per tenere conto dell'inevitabile dispersione dei dati sperimentali di riferimento, si assume che la condizione di resistenza sia soddisfatta quando $D_{tot} < 0.5$. In realtà esaminando i dati disponibili in bibliografia si trovano i seguenti risultati²³.

²⁰ In realtà, considerando che le caratteristiche del materiale utilizzate per la verifica sono quelle competenti alla classe dimensionale del forgiato impiegato, si potrebbe assumere $K_d=1.00$. Il progettista, viceversa, ha assunto il valore 1.45 e per maggior sicurezza anche in questi calcoli si è effettuata la stessa assunzione.

²¹ Nella relazione se $N > 2000000$ cicli si utilizza c' invece di c .

²² In realtà in entrambi i casi è presente una componente di flessione, alla quale corrisponderebbe un fattore K_T pari a 1 cioè meno gravoso; in favore di sicurezza tale effetto viene trascurato e si utilizza $K_T = 0.8$ in tutti i casi.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

Tab. 17 Valori del danno cumulativo al collasso disponibili in bibliografia

Origine	Valore medio	Origine	Valore medio
Miner (1945)	0,95	Shin, Lukens (1983) prove random	0,90
SAE Fatigue Comm. (1977)	1,09	Gurney (1983) giunti saldati	0,85
Schutz (1979) crack Initiation	1,05	Wirsching, Chen (1988) giunti saldati	1,0
Schutz (1979) crack Initiation	0,60		

Dall'esame dei valori esposti e che riferiscono a numerose campagne sperimentali indipendenti, si deduce che si potrebbe arrivare anche ad un valore del danno cumulativo pari a 0.6 e forse oltre visto che tale valore corrisponde all'inizio della progressione di una cricca di fatica, ma, per ragioni di sicurezza, si è scelto il valore più basso pari a 0.5 che, del resto, è consigliato dalle norme DNV.

Risultati per la Bocca di Treporti

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti con lo spettro di Treporti per la zona di sottotesta (Tab. 18), per la zona del primo filetto in presa con le forze dirette verso mare (Tab. 19) e verso laguna (Tab. 20).

Il danno cumulativo è inferiore a 0.5 e pertanto la verifica è quindi superata con esito positivo.

Tab. 18 Verifica della zona sottotesta.

Cicli	Rh&Rv	σ_{min}	σ_{max}	$\Delta\sigma$	k	σ_f	K_k	σ_d	c	c'	γ_k	σ_{Lim}	N_{Lim}	D
	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]		(MPa)		(MPa)				(MPa)		
76	1625	63,04	118,60	55,56	0,53	20,45	3,38	69,14	2,33	4,86	1,65	33,57	1,057E+05	7,188E-04
119	1750	58,21	121,50	63,28	0,48	20,45	3,07	62,77	2,24	4,69	1,68	29,86	8,652E+04	1,375E-03
227	812,5	79,61	104,67	25,06	0,76	20,45	6,07	124,19	3,09	6,34	1,46	68,22	5,319E+05	4,268E-04
534	987,5	75,76	108,68	32,92	0,70	20,45	4,97	101,72	2,78	5,74	1,52	53,58	2,795E+05	1,911E-03
600	3620	0,00	92,26	92,26	0,00	20,45	1,67	34,08	1,79	3,85	1,91	14,26	7,017E+04	8,551E-03
811	1500	69,35	117,01	47,66	0,59	20,45	3,83	78,42	2,46	5,12	1,60	39,10	1,349E+05	6,013E-03
3301	1250	75,40	113,16	37,76	0,67	20,45	4,57	93,53	2,67	5,52	1,55	48,40	2,072E+05	1,593E-02
3706	625	83,57	100,63	17,06	0,83	20,45	8,02	164,03	3,66	7,46	1,37	95,54	1,654E+06	2,241E-03
7391	1000	80,27	109,26	28,99	0,73	20,45	5,57	113,92	2,95	6,07	1,48	61,45	3,660E+05	2,020E-02
9438	875	82,05	107,62	25,56	0,76	20,45	6,11	124,99	3,10	6,37	1,45	68,75	4,975E+05	1,897E-02
15888	500	85,74	99,05	13,31	0,87	20,45	9,57	195,63	4,15	8,42	1,32	118,25	8,888E+06	1,787E-03
18899	625	85,70	102,52	16,82	0,84	20,45	8,23	168,27	3,73	7,59	1,37	98,54	1,725E+06	1,095E-02
27501	500	86,30	99,01	12,71	0,87	20,45	9,89	202,26	4,26	8,63	1,31	123,12	1,312E+07	2,097E-03
54123	375	86,86	96,11	9,24	0,90	20,45	12,09	247,29	5,04	10,17	1,26	157,04	2,954E+08	1,832E-04
74591	375	87,76	97,74	9,98	0,90	20,45	11,62	237,61	4,86	9,82	1,27	149,63	1,311E+08	5,690E-04
88585	125	89,28	92,37	3,09	0,97	20,45	21,38	437,14	10,49	21,03	1,12	313,00	2,789E+17	3,177E-13
89756	250	87,92	94,08	6,16	0,93	20,45	15,36	314,05	6,44	12,96	1,20	209,74	6,516E+10	1,378E-06
262718	250	89,75	96,24	6,48	0,93	20,45	15,11	308,92	6,32	12,72	1,20	205,59	3,121E+10	8,419E-06
5342336	125	91,38	94,58	3,20	0,97	20,45	21,26	434,83	10,38	20,82	1,06	328,96	3,714E+17	1,439E-11

Danno tot 0,091939

²³ Tab.10.4 presente in P.H.Wirsching, T.L.Paez, K.Ortiz, Random vibration. Theory and practice. J.Wiley&Sons, New York, 1995 dove è stato eliminato il risultato ottenuto con cicli che provocano deformazioni plastiche.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

Tab. 19 Verifica della zona del primo filetto in presa. Forze in direzione mare

Cicli	Rh&Rv	σ_{min}	σ_{max}	$\Delta\sigma$	k	σ_f	K_k	σ_d	c	c'	γ_k	σ_{Lim}	N_{Lim}	D
	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]		(MPa)		(MPa)				(MPa)		
76,00	1625,00	82,77	145,54	62,76	0,57	13,39	3,72	49,76	2,05	4,32	1,77	22,54	4,409E+04	1,724E-03
119,00	1750,00	77,31	148,82	71,51	0,52	13,39	3,36	44,97	1,97	4,18	1,80	19,94	3,804E+04	3,129E-03
227,00	812,50	102,35	130,67	28,32	0,78	13,39	6,93	92,84	2,66	5,50	1,55	47,96	1,391E+05	1,632E-03
534,00	987,50	97,97	135,26	37,29	0,72	13,39	5,60	75,00	2,41	5,02	1,62	37,05	8,799E+04	6,069E-03
600,00	precarico	0,00	117,33	117,33	0,00	13,39	1,67	22,31	1,58	3,44	2,09	8,54	3,209E+04	1,870E-02
811,00	1500,00	90,21	143,79	53,58	0,63	13,39	4,26	56,99	2,15	4,53	1,72	26,57	5,267E+04	1,540E-02
3301,00	1250,00	97,21	139,63	42,43	0,70	13,39	5,13	68,70	2,32	4,85	1,65	33,31	7,164E+04	4,608E-02
3706,00	625,00	106,94	126,07	19,14	0,85	13,39	9,40	125,82	3,12	6,39	1,45	69,30	3,098E+05	1,196E-02
7391,00	1000,00	102,78	135,37	32,58	0,76	13,39	6,32	84,65	2,55	5,28	1,58	42,89	1,071E+05	6,900E-02
9438,00	875,00	104,86	133,62	28,76	0,78	13,39	6,98	93,41	2,67	5,52	1,55	48,32	1,326E+05	7,117E-02
15888,00	500,00	109,45	124,32	14,87	0,88	13,39	11,40	152,67	3,50	7,14	1,39	87,59	5,873E+05	2,705E-02
18899,00	625,00	108,91	127,82	18,92	0,85	13,39	9,60	128,48	3,15	6,46	1,45	71,08	3,142E+05	6,014E-02
27501,00	500,00	109,45	123,67	14,21	0,89	13,39	11,77	157,55	3,57	7,28	1,39	90,99	6,689E+05	4,112E-02
54123,00	375,00	110,00	120,39	10,39	0,91	13,39	14,64	196,02	4,16	8,43	1,32	118,54	1,875E+06	2,886E-02
74591,00	375,00	111,86	123,01	11,15	0,91	13,39	14,11	188,96	4,04	8,21	1,33	113,39	1,439E+06	5,185E-02
88585,00	125,00	112,73	116,12	3,39	0,97	13,39	28,51	381,67	8,34	16,74	1,15	265,59	2,065E+12	4,289E-08
89756,00	250,00	111,20	118,09	6,89	0,94	13,39	19,22	257,29	5,23	10,55	1,25	164,76	6,708E+07	1,338E-03
262718,00	250,00	114,05	121,37	7,33	0,94	13,39	18,79	251,59	5,12	10,33	1,26	160,35	3,554E+07	7,392E-03
5342336,00	125,00	115,91	119,51	3,61	0,97	13,39	28,04	375,43	8,14	16,34	1,07	279,70	2,154E+12	2,480E-06

Danno tot 0,4626

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

Tab. 20 Verifica della zona del primo filetto in presa. Forze in direzione laguna

Cicli	Rh&Rv	σ_{min}	σ_{max}	$\Delta\sigma$	k	σ_f	K_k	σ_d	c	c'	γ_k	σ_{Lim}	N_{Lim}	D
	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]		(MPa)		(MPa)				(MPa)		
76	1625	75,7	133,1	57,4	0,57	13,39	3,72	49,76	2,05	4,32	1,77	22,54	5,293E+04	1,436E-03
119	1750	70,7	136,1	65,4	0,52	13,39	3,36	44,97	1,97	4,18	1,80	19,94	4,536E+04	2,623E-03
227	812,5	93,6	119,5	25,9	0,78	13,39	6,93	92,84	2,66	5,50	1,55	47,96	1,764E+05	1,287E-03
534	987,5	89,6	123,7	34,1	0,72	13,39	5,60	75,00	2,41	5,02	1,62	37,05	1,091E+05	4,892E-03
600	precarico	0	107,3	107,3	0,00	13,39	1,67	22,31	1,58	3,44	2,09	8,54	3,695E+04	1,624E-02
811	1500	82,5	131,5	49	0,63	13,39	4,26	56,99	2,15	4,53	1,72	26,57	6,385E+04	1,270E-02
3301	1250	88,9	127,7	38,8	0,70	13,39	5,13	68,70	2,32	4,85	1,65	33,31	8,816E+04	3,744E-02
3706	625	97,8	115,3	17,5	0,85	13,39	9,40	125,82	3,12	6,39	1,45	69,30	4,093E+05	9,055E-03
7391	1000	94	123,8	29,8	0,76	13,39	6,32	84,65	2,55	5,28	1,58	42,89	1,345E+05	5,496E-02
9438	875	95,9	122,2	26,3	0,78	13,39	6,98	93,41	2,67	5,52	1,55	48,32	1,683E+05	5,608E-02
15888	500	100,1	113,7	13,6	0,88	13,39	11,40	152,67	3,50	7,14	1,39	87,59	8,028E+05	1,979E-02
18899	625	99,6	116,9	17,3	0,85	13,39	9,60	128,48	3,15	6,46	1,45	71,08	4,165E+05	4,538E-02
27501	500	100,1	113,1	13	0,89	13,39	11,77	157,55	3,57	7,28	1,39	90,99	9,201E+05	2,989E-02
54123	375	100,6	110,1	9,5	0,91	13,39	14,64	196,02	4,16	8,43	1,32	118,54	3,727E+06	1,452E-02
74591	375	102,3	112,5	10,2	0,91	13,39	14,11	188,96	4,04	8,21	1,33	113,39	2,134E+06	3,496E-02
88585	125	103,1	106,2	3,1	0,97	13,39	28,51	381,67	8,34	16,74	1,15	265,59	9,213E+12	9,615E-09
89756	250	101,7	108	6,3	0,94	13,39	19,22	257,29	5,23	10,55	1,25	164,76	1,721E+08	5,215E-04
262718	250	104,3	111	6,7	0,94	13,39	18,79	251,59	5,12	10,33	1,26	160,35	8,946E+07	2,937E-03
5342336	125	106	109,3	3,3	0,97	13,39	28,04	375,43	8,14	16,34	1,07	279,70	9,268E+12	5,764E-07

Danno tot 0,3447

Risultati per le altre bocche

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti con lo spettro di Malamocco, applicabile secondo i calcoli del progettista anche alle Bocche di Chioggia e San Nicolò, per la zona di sottotesta (Tab. 21) e per la zona del primo filetto in presa (Tab. 22).

Per l'ipotesi di Miner la condizione di collasso si verifica quando il danno è pari a 1.00. Tutti casi esaminati danno un risultato inferiore all'unità, cioè lontano dalla condizione di collasso. Essi inoltre sono inferiori al valore 0.5 che alcune norme indicano come valore limite per tenere conto delle inevitabili imperfezioni del calcolo. La verifica è quindi superata con esito positivo.

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

Tab. 21 Bocche di Malamocco, Chioggia e San Nicolò. Verifica della zona sottotesta.

Cicli	Rh&Rv	σ_{min}	σ_{max}	$\Delta\sigma$	k	σ_f	K_k	σ_d	c	c'	γ_k	σ_{Lim}	N_{Lim}	D
	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]		(MPa)		(MPa)				(MPa)		
4557356	93,8	93,8	96,9	3,10	0,97	20,45	21,77	445,07	10,86	21,77	1,11	319,89	3,898E+17	1,169E-11
652941	92,6	92,6	98,5	5,90	0,94	20,45	16,15	330,26	6,84	13,76	1,19	222,91	1,519E+11	4,297E-06
302588	91,3	91,3	100,2	8,90	0,91	20,45	12,74	260,58	5,29	10,67	1,25	167,32	4,763E+08	6,353E-04
120238	89,9	89,9	102,2	12,30	0,88	20,45	10,36	211,86	4,41	8,94	1,30	130,23	1,746E+07	6,885E-03
41094	88,4	88,4	104,6	16,20	0,85	20,45	8,60	175,86	3,84	7,81	1,35	103,94	1,952E+06	2,105E-02
13495	86,6	86,6	106,0	19,40	0,82	20,45	7,55	154,46	3,52	7,19	1,39	88,83	1,073E+06	1,258E-02
9846	81,7	81,7	108,7	27,00	0,75	20,45	5,89	120,42	3,04	6,24	1,47	65,72	4,330E+05	2,274E-02
1395	75,7	75,7	111,0	35,30	0,68	20,45	4,77	97,53	2,72	5,63	1,53	50,91	2,392E+05	5,832E-03
698	65,4	65,4	113,3	47,90	0,58	20,45	3,71	75,84	2,42	5,05	1,62	37,55	1,376E+05	5,074E-03
349	62,9	62,9	117,7	54,80	0,53	20,45	3,40	69,52	2,33	4,87	1,65	33,79	1,086E+05	3,214E-03
12822	87,0	87,0	89,9	2,90	0,97	20,45	21,69	443,60	10,79	21,63	1,11	318,61	1,530E+18	8,382E-15
69470	85,7	85,7	91,6	5,90	0,94	20,45	15,50	317,03	6,51	13,10	1,20	212,15	1,204E+11	5,769E-07
68070	85,6	85,6	94,4	8,80	0,91	20,45	12,35	252,48	5,13	10,37	1,25	161,04	5,077E+08	1,341E-04
49526	86,4	86,4	98,6	12,20	0,88	20,45	10,16	207,70	4,35	8,80	1,31	127,14	1,875E+07	2,641E-03
42684	86,3	86,3	101,3	15,00	0,85	20,45	8,90	181,95	3,94	8,00	1,34	108,31	3,416E+06	1,250E-02
18886	85,7	85,7	103,1	17,40	0,83	20,45	8,05	164,60	3,67	7,48	1,37	95,94	1,535E+06	1,230E-02
18659	82,9	82,9	106,9	24,00	0,78	20,45	6,40	130,97	3,19	6,53	1,44	72,75	5,862E+05	3,183E-02
7599	80,3	80,3	110,9	30,60	0,72	20,45	5,39	110,20	2,90	5,97	1,49	59,02	3,213E+05	2,365E-02
6078	77,3	77,3	115,1	37,80	0,67	20,45	4,64	94,84	2,69	5,56	1,54	49,22	2,039E+05	2,981E-02
2128	72,2	72,2	119,5	47,30	0,60	20,45	3,93	80,45	2,49	5,17	1,60	40,33	1,340E+05	1,588E-02
1725	61,3	61,3	124,7	63,40	0,49	20,45	3,14	64,17	2,26	4,73	1,67	30,67	8,424E+04	2,048E-02
1505	58,9	58,9	132,2	73,30	0,45	20,45	2,90	59,27	2,19	4,59	1,70	27,86	6,637E+04	2,268E-02
462	56,4	56,4	138,4	82,00	0,41	20,45	2,73	55,76	2,14	4,49	1,72	25,87	5,569E+04	8,296E-03
231	53,9	53,9	144,3	90,40	0,37	20,45	2,59	52,95	2,09	4,41	1,74	24,30	4,802E+04	4,811E-03
112	51,4	51,4	150,1	98,70	0,34	20,45	2,48	50,61	2,06	4,35	1,76	23,01	4,213E+04	2,658E-03
43	48,9	48,9	156,4	107,50	0,31	20,45	2,38	48,57	2,03	4,29	1,77	21,89	3,714E+04	1,158E-03
600	0,0	0,0	93,5	93,50	0,00	20,45	1,67	34,08	1,79	3,85	1,91	14,26	6,851E+04	8,758E-03

Danno tot 0,2755

Gruppi di aggancio e tensionamento - Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.

Tab. 22 Bocche di Malamocco, Chioggia e San Nicolò. Verifica della zona del primo filetto in presa.

Cicli	Rh&Rv	σ_{min}	σ_{max}	$\Delta\sigma$	k	σ_f	K_k	σ_d	c	c'	γ_k	σ_{Lim}	N_{Lim}	D
	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]		(MPa)		(MPa)				(MPa)		
4557356	93,8	108,55	111,75	3,20	0,97	20,45	22,72	464,49	11,86	23,75	1,10	336,87	4,837E+17	9,421E-12
652941	92,6	107,2	113,39	6,19	0,95	20,45	16,98	347,30	7,30	14,67	1,17	236,91	9,870E+10	6,616E-06
302588	91,3	105,84	115,19	9,35	0,92	20,45	13,50	275,99	5,60	11,28	1,23	179,37	2,961E+08	1,022E-03
120238	89,9	104,34	117,26	12,92	0,89	20,45	11,03	225,46	4,65	9,40	1,28	140,42	1,088E+07	1,105E-02
41094	88,4	102,7	119,7	17,00	0,86	20,45	9,18	187,73	4,03	8,17	1,34	112,50	1,558E+06	2,638E-02
13495	86,6	100,76	121,1	20,34	0,83	20,45	8,08	165,22	3,68	7,50	1,37	96,37	8,626E+05	1,564E-02
9846	81,7	95,52	123,83	28,31	0,77	20,45	6,31	129,02	3,16	6,48	1,44	71,44	3,515E+05	2,801E-02
1395	75,7	89,08	126,04	36,96	0,71	20,45	5,12	104,61	2,82	5,82	1,51	55,42	1,968E+05	7,090E-03
698	65,4	78,11	128,24	50,13	0,61	20,45	3,98	81,35	2,50	5,19	1,59	40,87	1,146E+05	6,091E-03
349	62,9	75,87	132,79	56,92	0,57	20,45	3,66	74,91	2,41	5,02	1,62	36,99	9,181E+04	3,801E-03
12822	87,0	100,37	103,43	3,06	0,97	20,45	22,44	458,83	11,55	23,15	1,11	331,90	1,051E+18	1,220E-14
69470	85,7	99,02	105,15	6,13	0,94	20,45	16,39	335,22	6,97	14,02	1,18	226,97	9,656E+10	7,195E-07
68070	85,6	98,94	108,14	9,20	0,91	20,45	13,10	267,90	5,43	10,96	1,24	173,03	3,454E+08	1,971E-04
49526	86,4	99,81	112,7	12,89	0,89	20,45	10,74	219,65	4,55	9,20	1,29	136,05	1,130E+07	4,381E-03
42684	86,3	99,81	115,54	15,73	0,86	20,45	9,47	193,72	4,12	8,36	1,33	116,85	2,198E+06	1,942E-02
18886	85,7	99,16	117,41	18,25	0,84	20,45	8,58	175,37	3,84	7,80	1,35	103,59	1,237E+06	1,526E-02
18659	82,9	96,31	121,32	25,01	0,79	20,45	6,87	140,42	3,32	6,79	1,42	79,15	4,840E+05	3,855E-02
7599	80,3	93,66	125,35	31,69	0,75	20,45	5,80	118,66	3,02	6,19	1,47	64,55	2,702E+05	2,813E-02
6078	77,3	90,52	129,67	39,15	0,70	20,45	4,99	102,02	2,79	5,75	1,52	53,76	1,720E+05	3,533E-02
2128	72,2	85,1	134,04	48,94	0,63	20,45	4,23	86,42	2,57	5,33	1,57	43,98	1,139E+05	1,868E-02
1725	61,3	73,7	139,29	65,59	0,53	20,45	3,37	68,81	2,32	4,86	1,65	33,38	7,223E+04	2,388E-02
1505	58,9	71,49	147,07	75,58	0,49	20,45	3,11	63,55	2,25	4,71	1,68	30,31	5,731E+04	2,626E-02
462	56,4	69,05	153,23	84,18	0,45	20,45	2,92	59,78	2,19	4,61	1,70	28,15	4,854E+04	9,518E-03
231	53,9	66,47	159,12	92,65	0,42	20,45	2,77	56,66	2,15	4,52	1,72	26,38	4,207E+04	5,490E-03
112	51,4	63,95	164,94	100,99	0,39	20,45	2,64	54,08	2,11	4,45	1,74	24,94	3,709E+04	3,019E-03
43	48,9	61,47	171,26	109,79	0,36	20,45	2,53	51,83	2,08	4,38	1,75	23,68	3,285E+04	1,309E-03
600	0,0	0	108,63	108,63	0,00	20,45	1,67	34,08	1,79	3,85	1,91	14,26	5,235E+04	1,146E-02

Danno tot 0,3340

Conclusioni del calcolo Fail safe dei tensionatori.

Tutte le verifiche sono soddisfatte rispetto al valore limite del danno totale pari a 0.5.

Per la Bocca di Treporti, la verifica più critica è per la zona sottotesta dove il danno totale è pari a 0.463 rispetto ad un valore limite di 0.5. In realtà esiste un margine di sicurezza ulteriore. Infatti sono stati assunti come dati caratteristici del materiale quelli di riferimento imposti dalla normativa. Se invece si fa uso di minimi effettivamente riscontrati nelle prove di caratterizzazione di materiali (Tab. 6) il carico di rottura è pari a 798 MPa al quale corrisponde un limite di fatica per il ciclo alterno simmetrico di 399 MPa, di conseguenza il danno totale diventa 0.379 con un margine di sicurezza pari a 31.9 %.

Per le altre bocche, la verifica più critica è per la zona del primo filetto in presa, dove il danno totale è pari a 0.334 rispetto ad un valore limite di 0.5. In realtà esiste un margine di sicurezza ulteriore. Infatti sono stati assunti come dati caratteristici del materiale quelli di riferimento imposti dalla normativa. Se invece si fa uso di minimi effettivamente riscontrati nelle prove di caratterizzazione di materiali (Tab. 6) il carico di rottura è pari a 763 MPa al quale corrisponde un limite di fatica per il ciclo alterno simmetrico di 381 MPa, di conseguenza il danno totale diventa 0.305 con un margine di sicurezza pari a 63.9 %.