

BOCCA DI MALAMOCCO

ATTIVITA' SVOLTE PER LA VERIFICA E RIPRISTINO DEI GRUPPI DI AGGANCIO DOPO L'ALLAGAMENTO DEL FEBBRAIO 2015.

Prof. Ing. Carlo Brutti

Prof. Ing. Donatella Mascia

Rev.0 19.6.2017

Sommario

1. Oggetto e scopo.....	3
2. Documenti di riferimento	4
2.1. Documenti tecnici di progetto.....	4
2.2. Verbali sopralluoghi.....	4
2.3. Relazioni	5
2.4. Lettere, Comunicazioni e altro	5
3. Descrizione dell’evento	6
4. Le condizioni dei gruppi di aggancio dopo l’allagamento	9
4.1. Sopralluoghi in galleria e smontaggio dei gruppi di aggancio	9
4.2. Analisi eseguite sui prodotti di corrosione	12
4.3. Smontaggio di gruppi di aggancio e successivi controlli	13
5. Verifiche eseguite sul progetto strutturale	19
5.1. Revisione del progetto originario	19
5.2. Valutazione preliminare della durata degli steli in caso di generazione di una cricca.....	20
6. Procedura di ripristino e manutenzione.....	22
7. Conclusioni	24

1. Oggetto e scopo

A seguito degli eventi meteomarinari dei primi giorni di Febbraio 2015, si è verificato l'allagamento con acqua di mare dell'intera galleria sottomarina della Bocca di Malamocco. Tale allagamento ha interessato anche i 38 locali in cui sono alloggiati i gruppi di aggancio che realizzano il sistema di ancoraggio delle cerniere (elemento maschio) alla base in carpenteria metallica (elemento femmina).

Per valutare gli effetti di tale allagamento ai sottoscritti Prof. Ing. Carlo Brutti e Prof. Ing. Donatella Mascia, già incaricati a suo tempo del collaudo statico della fornitura dei gruppi di aggancio, è stato conferito un incarico aggiuntivo di consulenza per valutare gli effetti di tali allagamento sugli elementi componenti il gruppo di aggancio. Con lo stesso obiettivo il RUP ing. Riva ha incaricato il prof. Paolucci, già nominato a suo tempo esperto di problemi metallurgici e dei materiali dal Magistrato alle Acque per l'esame dei progetti del sistema MOSE. Nel corso dei lavori, inoltre, con riferimento alle problematiche di corrosione riscontrate sui gruppi di aggancio, lo stesso RUP e, successivamente il Provveditore, hanno incaricato l'ing. Ramundo di partecipare ai lavori come esperto.

Contemporaneamente, visto che gli eventi eccezionali avvenuti potevano mettere in luce eventuali vizi occulti della fornitura dei tensionatori di Malamocco, i collaudi statici delle forniture dei gruppi di aggancio delle Bocche di Malamocco e di Chioggia, che erano in fase conclusiva, sono stati momentaneamente sospesi in attesa di completare tutte le valutazioni del caso.

A seguito dei primi controlli, come verrà meglio e più in dettaglio esposto nel seguito, si sono evidenziati dei segni di corrosione. Tale risultato ha indotto ad eseguire più approfonditi controlli anche sui gruppi di aggancio delle altre bocche con particolare riferimento a quella di Treporti, dove erano già state installate e movimentate le paratoie e per la quale tutti i corrispondenti collaudi statici delle forniture erano già stati conclusi con esito positivo. Tutto ciò ha indotto il Consorzio Venezia Nuova a conferire ai sottoscritti l'incarico di riapertura del collaudo statico dei gruppi di aggancio della Bocca di Treporti.

Nei mesi a decorrere dal maggio 2015 a oggi sono stati eseguiti studi, verifiche e controlli che hanno condotto a definire due possibili soluzioni da sperimentare comparativamente per il miglioramento della resistenza alla corrosione: l'impiego dell'acciaio SUPERDUPLEX SAF2507 per la realizzazione di un gruppo di aggancio prototipale, e l'applicazione, sui tensionatori esistenti in 39NiCrMo3, mediante tecnologia "laser cladding", di un rivestimento con lega INCONEL 625 o equivalente sulla parte cilindrica e di un doppio rivestimento costituito da lega INCONEL 625 e lega UNS R31233 o equivalente sulla testa a martello. Per la soluzione in acciaio inossidabile SUPERDUPLEX è stata avviata la fase di studio prototipale. Inoltre si è giunti a definire un nuovo ciclo di operazioni di pulizia, controllo e manutenzione da mettere in atto durante la vita dei gruppi di aggancio così come già realizzati.

Per i tensionatori già realizzati, forniti e installati i sottoscritti collaudatori statici, nell'ambito delle loro competenze e degli incarichi attribuiti dal Consorzio Venezia Nuova, hanno sviluppato uno studio sulla durata residua che è riportato nel documento *"Gruppi di aggancio e tensionamento. Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future. 23.5.2017"* (Rif. 2.3.12) le cui conclusioni saranno utilizzate nel presente documento per analizzare gli effetti dell'allagamento nella Bocca di Malamocco. Contemporaneamente anche il progettista TECHNITAL ha elaborato indipendentemente una valutazione sulla durabilità dei soli gruppi di Treporti, riportata nel documento (rif. 2.3.13) *"Bocca di Lido Treporti. GRUPPI DI AGGANCIO E TENSIONAMENTO STIMA DELLA VITA RESIDUA DEGLI STELI TENSIONATORI- Relazione Tecnica MV089P-PE-TAR-0001-C0"*.

La presente relazione pertanto costituisce l'atto conclusivo delle operazioni di controllo, verifica e studio compiuti sui gruppi di aggancio della Bocca di Malamocco. Per la Bocca di Treporti si rimanda ai corrispondenti documenti che verranno emessi all'atto della chiusura del collaudo statico.

2. Documenti di riferimento

2.1. Documenti tecnici di progetto

Identificativo	Data	Oggetto
2.1.1 MV079P-PE-MCR-2010-C0	25.6.2009	Bocca di Malamocco – Cassone di soglia - Relazione tecnica generale
2.1.2 MV080P-PE-MMR-3202-C1	04.06.2012	Gruppo di aggancio e tensionamento - Relazione tecnica
2.1.3 MV080P-PE-MMR-3203-C1	04.07.2012	Gruppo di aggancio e tensionamento – Relazione di calcolo – Parte meccanica
2.1.4 MV080P-PE-NMR-3210-C0	11.09.2012	Gruppo di aggancio e tensionamento - Nota tecnica integrativa
2.1.5 MV080P-PE-TZM-3209-C0	10.7.2013	Gruppo di aggancio e tensionamento - Piano di manutenzione da fine WBS
2.1.6 TECHNITAL 01 C1	15.5.2017	BOCCE DI PORTO DI LIDO, MALAMOCCO E CHIOGGIA INTERVENTI INTEGRATIVI GRUPPI CERNIERA-CONNETTORE - RELAZIONE TECNICA. 01 C1

2.2. Verbali sopralluoghi

Identificativo	Data	Oggetto
2.2.1 Verbale N. 19	08.05.2015	Sopralluogo presso la galleria di Malamocco. Constatazione dello stato dei gruppi di aggancio.
2.2.2 Verbale N. 20	19.06.2015	Risultati delle indagini sui campioni prelevati nei locali tensionatori di Malamocco, eseguite dal prof. Paolucci.
2.2.3 Verbale N. 22	15.07.2015	Smontaggio del gruppo di aggancio 03C presso FIP.
2.2.4 Verbale N. 23	29.09.2015	Verifica dell'avanzamento dello smontaggio dei gruppi di aggancio.
2.2.5 Verbale N. 25	03.11.2015	Smontaggio del gruppo di aggancio 09M presso FIP.
2.2.6 Verbale N. 26	17.11.2015	Definizione delle attività di controllo sui gruppi di aggancio della Bocca di Malamocco.
2.2.7 Verbale N. 28	18.01.2016	Verifica dell'avanzamento delle attività di controllo e smontaggio sui gruppi di aggancio.
2.2.8 Verbale N. 31	19.05.2016	Ispezione ai gruppi di aggancio e alle barre di inghisaggio nella galleria di Malamocco.
2.2.9 Verbale N. 35	07-08.09.2016	Interventi protettivi sui gruppi di aggancio delle bocche di San Nicolò, Malamocco e Chioggia.
2.2.10 Verbale N. 37	09-10.01.2017	Ispezione dei gruppi di aggancio installati nella galleria di Malamocco.
2.2.11 Verbale N. 43	02.03.2017	Sopralluogo ai gruppi di aggancio nella galleria di Malamocco durante l'installazione delle paratoie

2.3. Relazioni

Identificativo	Data	Oggetto
2.3.1 FIP Industriale – Ing. Colato	15.04.2015	Procedura per la pulizia straordinaria dei gruppi di aggancio TP 369 Rev.0
2.3.2 Rel. Proff. Brutti, Mascia	12.05.2015	Risultati dell'ispezione del 8.5.2015 presso la galleria di Malamocco.
2.3.3 Rel. Proff. Brutti, Mascia	07.06.2015	Interventi, controlli e prove da eseguire sui gruppi di aggancio di Malamocco.
2.3.4 Rel. Prof. Paolucci	14.07.2015	Indagine sperimentale per l'individuazione dei danni alla barriera di Malamocco dopo la mareggiata del 6 e 7 febbraio 2015.
2.3.5 FIP- Prof.ssa Zanella	16.10.2015	Relazione tecnica: indagine di dettaglio sull'ossidazione presente su alcuni gruppi di aggancio.
2.3.6 Rel. Proff. Brutti, Mascia	09.11.2015	Attività condotte per il ripristino dell'efficienza dei gruppi di aggancio di Malamocco.
2.3.7 Ing. Pinton	04.04.2016	Movimentazione gruppi di aggancio ed ispezione carter di tenuta dei tensionatori della barriera di Malamocco.
2.3.8 FIP Industriale – Ing. Colato	5.12.2016	Stelo tensionatore. Procedura di verifica e ripristino Nichel. TP 392 Rev. 1 (Annulla e sostituisce la Rev. 0 del 16.10.2015).
2.3.9 MATED s.r.l.	20.12.2016	Protocollo specifico per applicazione di MP Shield su steli nichelati
2.3.10 MATED s.r.l.	21.12.2016	Intervento MATED su steli dei gruppi di aggancio di Malamocco.
2.3.11 TECHNITAL	15.05.2017	Interventi integrativi gruppi cerniera-connettore. Relazione tecnica 01-C1
2.3.12 Rel. Proff. Brutti, Mascia	23.05.2017	Gruppi di aggancio e tensionamento. Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future.
2.3.13 MV089P-PE-TAR-0001-C0	Maggio 2017	Bocca di Lido Treporti. GRUPPI DI AGGANCIO E TENSIONAMENTO STIMA DELLA VITA RESIDUA DEGLI STELI TENSIONATORI- Relazione Tecnica

2.4. Lettere, Comunicazioni e altro

Identificativo	Data	Oggetto
2.4.1 e-mail ing. Gambillara CVN	26.3.2015	Bocca di Malamocco - Gruppi di aggancio e tensionamento - Manutenzione straordinaria. Richiesta di collaborazione
2.4.1 Lettera CVN – Prof. Ossola a FIP	01.10.2015	Richiesta verifiche sui gruppi di aggancio delle Bocche di S.Nicolò, Malamocco, Chioggia.
2.4.1 Lettera FIP – Ing. Colato	20.10.2015	Lettera di trasmissione della relazione tecnica della prof.ssa Zanella e della procedura TP 392.
2.4.1 Lettera Proff. Brutti, Mascia	18.3.2016	Proposta di estensione incarico.
2.4.1 Lettera Ing. Pinton a CVN e Provveditore Veneto	18.11.2016	Gruppi di aggancio e tensionamento. Risultati visita ispettiva.
2.4.1 Lettera FIP – Ing. Colato	06.12.2016	Lettera di trasmissione della procedura TP 392 in Rev.1
2.4.1 Lettera CVN – Prof. Ossola a Ing. Pinton D.L.	24.07.2017	Azioni del CVN sui tensionatori 33M-34M-37M della Bocca di Malamocco

3. Descrizione dell'evento

In data 6 e 7 Febbraio in condizioni meteomarine particolarmente avverse si è verificata una mareggiata con intensità tale da superare i muri di contenimento del cantiere nel quale erano in costruzione gli Edifici Tecnici della Bocca di Malamocco. Ad ultimazione dei lavori, infatti, gli edifici di spalla segregheranno completamente la galleria sottomarina, in cui sono alloggiati i gruppi di aggancio, proteggendola dagli effetti di eventi meteorici. Purtroppo all'epoca dell'evento tali edifici non erano ancora stati realizzati e, pertanto, la galleria è stata allagata completamente in quanto il suo ingresso non era protetto rispetto ad un evento dell'intensità effettivamente riscontrata (Figura 1 e Figura 2).

Tutte le apparecchiature sono state quindi sommerse dall'acqua di mare per alcuni giorni finché le operazioni di svuotamento sono terminate. Successivamente si è provveduto a lavare con acqua dolce tutte le apparecchiature presenti nella galleria per pulirle dai residui salmastri dell'acqua e dai depositi che si erano accumulati.



Figura 1 La mareggiata del 5 – 6 Febbraio 2015- Prima inquadratura del cantiere di Malamocco.



Figura 2 La mareggiata del 5 – 6 Febbraio 2015- Seconda inquadratura del cantiere di Malamocco.

Come accennato nella galleria oltre agli elementi costituenti i vari impianti necessari al funzionamento dell'intero sistema sono alloggiati i gruppi di aggancio oggetto della presente relazione. Il gruppo in esame è sinteticamente rappresentato in Figura 3. A tale proposito risulta dal documento MV080P-PE-TZM-3209-C0 "Gruppo di aggancio e tensionamento - Piano di manutenzione da fine WBS" (rif. 2.1.5) al para. 3.3 "Descrizione del gruppo di aggancio e tensionamento" pag.17:

"Il gruppo di aggancio e tensionamento è stato progettato per funzionare anche immerso, con locale allagato alla pressione di 2.2. bar".

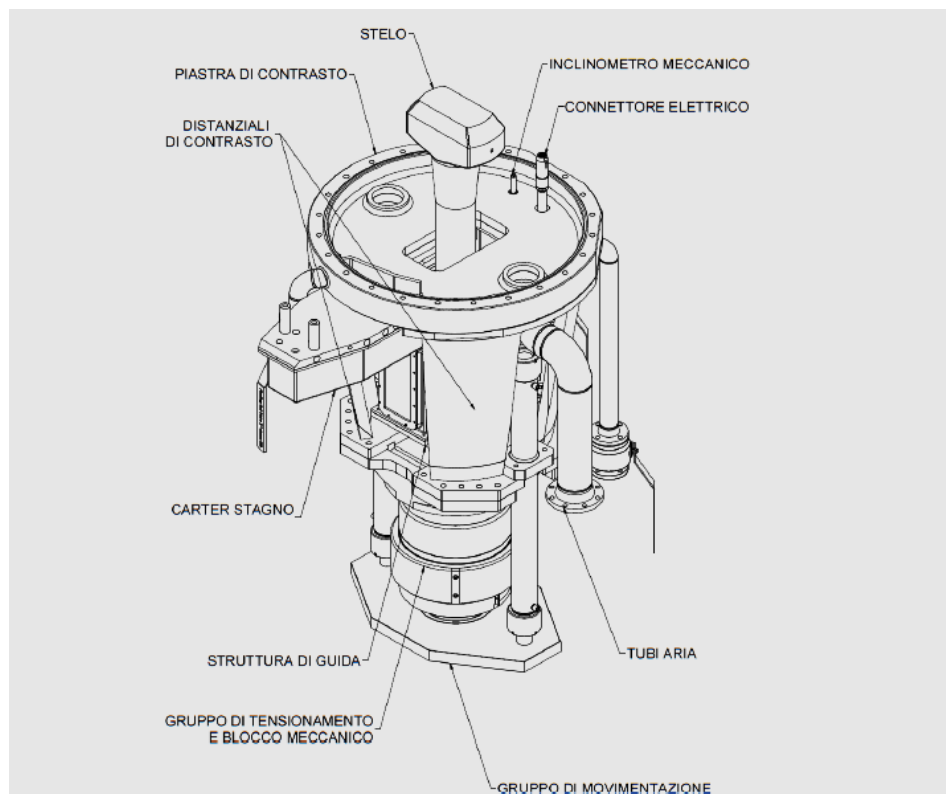


Figura 3 Gruppo di aggancio

Per completezza di informazione, si deve sottolineare che nel manuale non sono indicate le eventuali operazioni da eseguire dopo l'evento che ha allagato il locale. Tuttavia, se si considera l'evento come straordinario e quindi le successive operazioni come manutenzione straordinaria, nello stesso manuale si riportano le prescrizioni riguardanti tale tipologia di attività. In particolare si sottolinea quando di seguito riportato (rif. 2.1.5 para. 4.5 Manutenzione straordinaria pag.68).

5. Operazioni di manutenzione straordinaria

Per interventi di manutenzione straordinaria si intendono interventi che potranno rendersi necessari a causa di imprevisti stati di degrado o di danneggiamento accidentale che possano compromettere la funzionalità degli elementi in oggetto.

A seconda della gravità dell'incidente, potrà rendersi necessario attuare:

- ◊ Sostituzione di qualche componente del gruppo;
- ◊ Procedere alle operazioni di sgancio con modalità di emergenza;
- ◊ Sopprimerne alla mancata chiusura della valvola di segregazione;
- ◊ Sostituzione dell'intero gruppo di aggancio, causa vari gradi di danneggiamento dello stesso.

All'atto pratico, per alcune disfunzioni, potrebbero essere ipotizzate più alternative di intervento, comunque valide dal punto di vista tecnico.

Poiché tali alternative si differenzieranno tra loro per il costo, la durata e l'efficacia, sarà necessario un confronto tecnico-economico, da effettuarsi mediante un'analisi dei costi unitari ed una definizione quantitativa del lavoro relativo a ciascuna soluzione, al fine di ottenere un elemento utile alla scelta definitiva.

Ciascun intervento straordinario richiederà un progetto dedicato, che sarà redatto tenendo conto dell'estensione del danneggiamento, delle condizioni ambientali, dei tempi, dei mezzi e delle risorse disponibili, nonché di tutti gli aspetti della sicurezza connessi all'opera e alle persone.

Per eseguire le operazioni di manutenzione previste all'interno del locale connettore, si rende indispensabile garantire l'accessibilità in sicurezza sia in condizioni operative che di emergenza. Il locale connettore rappresenta l'unica area della barriera dotata di un passaggio a scafo permanente, il gruppo cerniera-connettore, e pertanto esige delle predisposizioni specifiche.

Pertanto è evidente che a valle di un evento che implichi una manutenzione straordinaria è necessario stabilire i danni riscontrati e le operazioni di riparazione/sostituzione in un quadro che assicuri contemporaneamente l'efficacia dell'intervento e la sua compatibilità economica.

4. Le condizioni dei gruppi di aggancio dopo l'allagamento

4.1. Sopralluoghi in galleria e smontaggio dei gruppi di aggancio

In data 8.5.2015 si è proceduto pertanto ad una visita ai locali della galleria rilevando le modificazioni e i segni di eventuale danneggiamento presenti a seguito dell'allagamento. Nei locali sono state anche scattate alcune fotografie che vengono riportate come esempio tipico di quanto rilevato. Limitando le constatazioni ai soli gruppi di aggancio è stato possibile rilevare che su tutti gli elementi presenti nei locali esaminati sono presenti evidenti depositi di sale che il lavaggio eseguito con sola acqua dolce non è stato in grado di rimuovere. Nelle figure (1-2-3-4-5-6) seguenti sono riportati esempi tipici di tutti i segni lasciati dall'allagamento sugli elementi in esame. Tali configurazioni sono ripetitive in tutti i locali allagati.

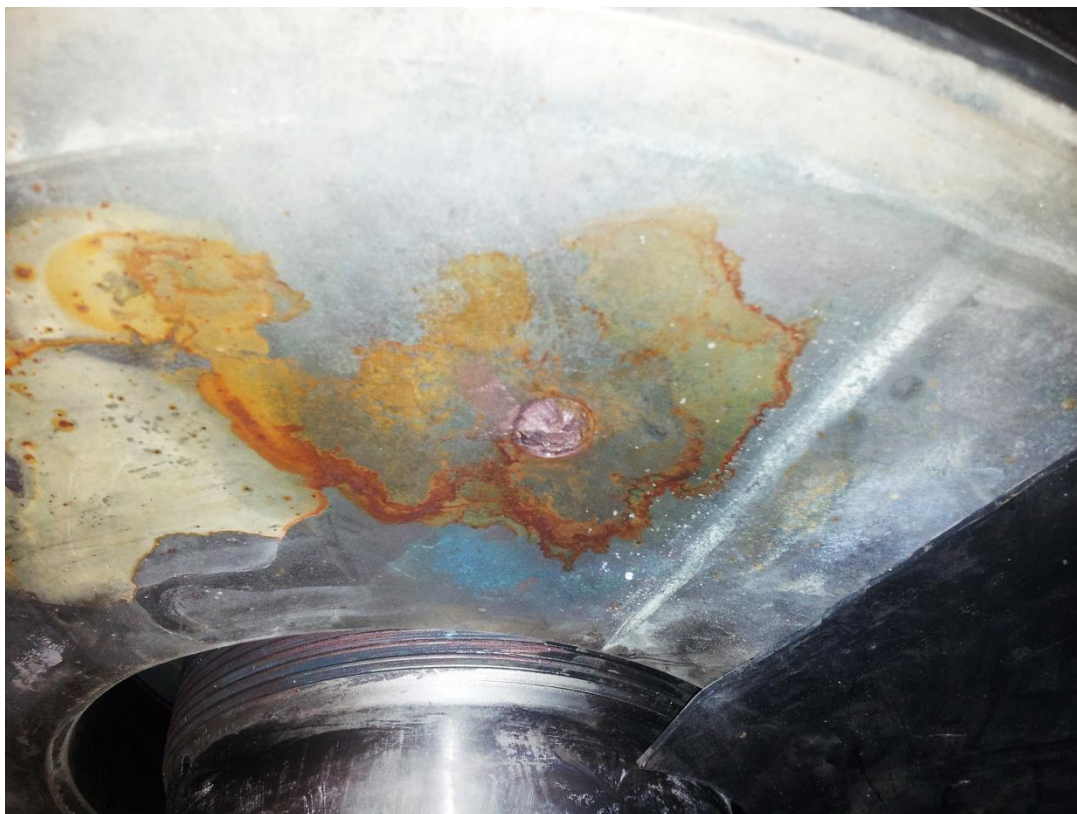


Figura 4 Elemento connettore – Depositi di sale e presumibile ossido percolato

L'esame congiunto della situazione ha portato a richiedere:

- Disinstallazione, trasporto e smontaggio in officina di un gruppo di aggancio per verificare lo stato interno.
- Analisi dei prodotti prelevati sulla superficie degli elementi per verificare, attraverso la composizione, l'eventuale sviluppo di processi corrosivi. Quest'ultima attività fu affidata al prof. Paolucci.

Durante il sopralluogo sia i collaudatori statici sia il Prof. Paolucci hanno sottolineato l'urgenza degli interventi di bonifica per evitare il progredirsi degli eventuali processi corrosivi. Per tale bonifica la Direzione Lavori ha applicato quanto contenuto nel documento elaborato da FIP Industriale TP-369 "Procedura per la pulizia straordinaria dei gruppi di aggancio" (Rif. 2.3.1).



Figura 5 Elemento connettore – Depositi di sale e piccoli segni di corrosione



Figura 6 Elemento connettore – Segni di corrosione sulle viti classe 8.8 di serraggio della flangia di chiusura

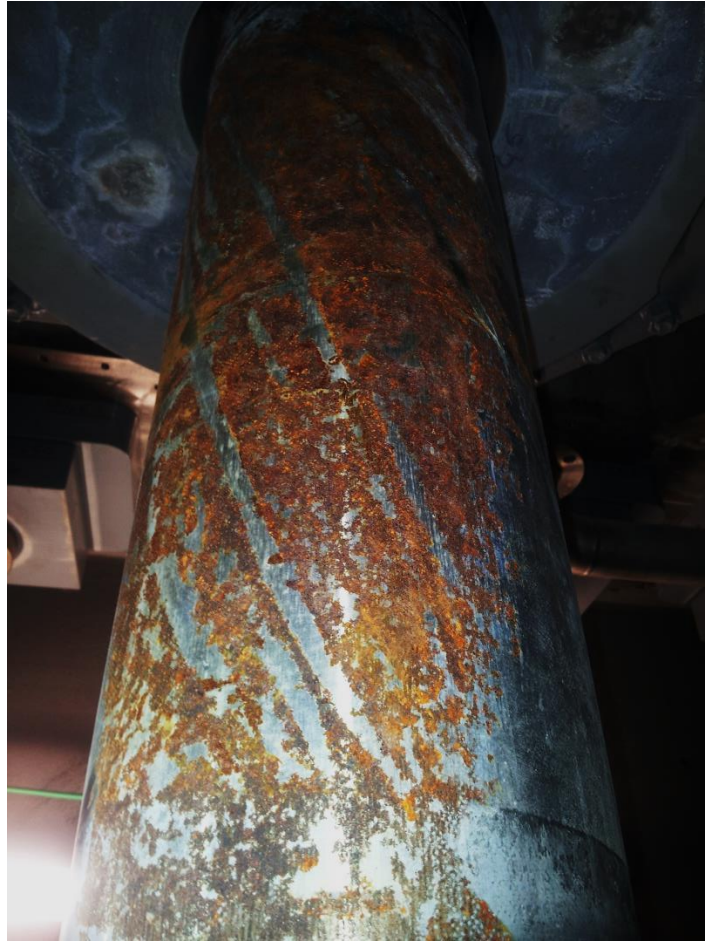


Figura 7 Elemento connettore – Presumibile percolamento di lubrificante



Figura 8 Corrosione della parte terminale delle barre di inghisaggio in corrispondenza del foro per la movimentazione durante le lavorazioni e i trattamenti. Cerchiato il foro di afferraggio

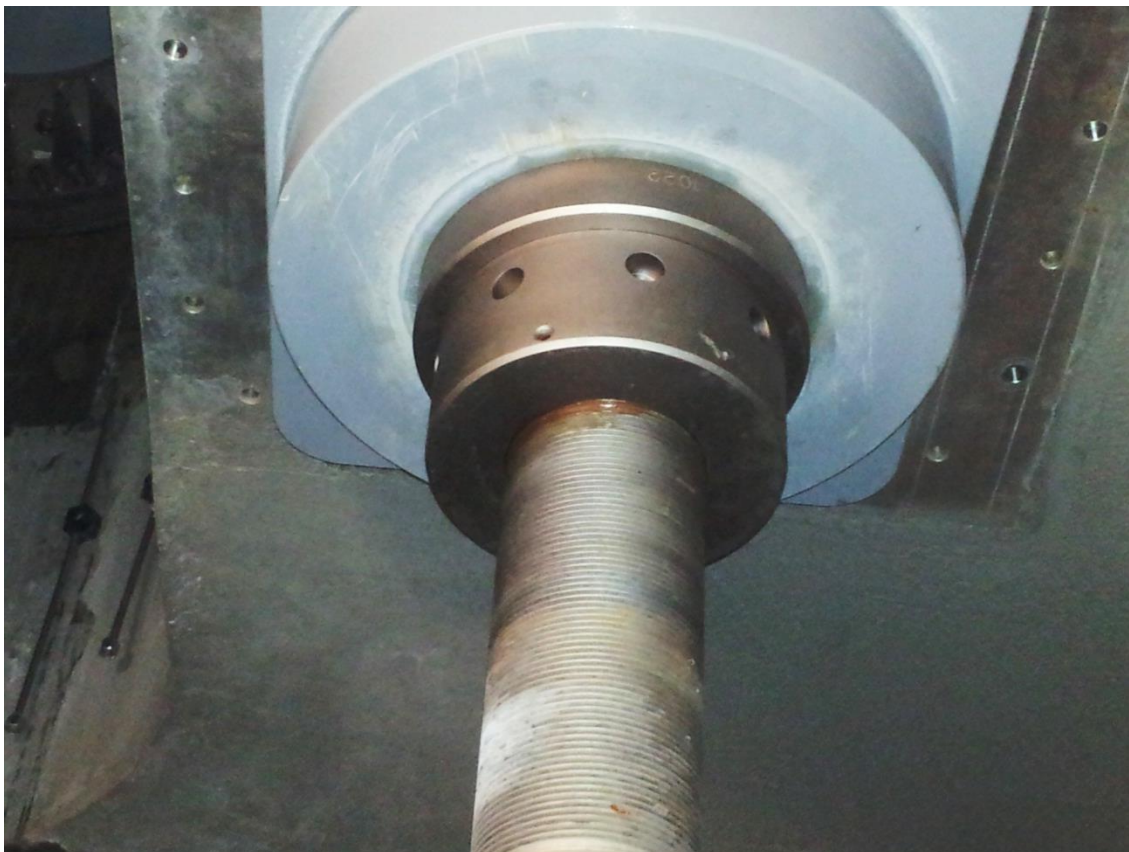


Figura 9 Barra di inghisaggio – presumibile trafilamento di grasso

4.2. Analisi eseguite sui prodotti di corrosione

L'esame dei campioni di prodotti prelevati dalle superfici degli elementi presenti nella galleria di Malamocco è stato affidato al prof. Paolucci che ne ha dato puntuale ed esaustivo riscontro nella relazione "Indagine sperimentale per l'individuazione dei danni alla barriera di Malamocco dopo la mareggiata del 6 e 7 febbraio 2015" (Rif. 2.3.4).

Complessivamente i campioni prelevati erano costituiti da

- N° 2 viti prigioniere prelevate dalla flangia inferiore del gruppo di aggancio.
- N° 7 campioni d'incrostazioni, asportate allo stato di polvere da componenti metallici vari.
- N° 2 campioni di acciaio inossidabile prelevati, mediante taglio, dal tallone di un passaparete.

I prelievi non metallici sono stati effettuati in occasione del sopralluogo del giorno 08/05/2015; quelli metallici sono stati eseguiti il giorno 12/06/2015 dalla DL. Il criterio per la scelta dei componenti da indagare è stato quello di scegliere gli elementi con incrostazioni più vistose che potevano essere segno, verosimilmente, di corrosione. Limitando la sintesi del lavoro svolto dal prof. Paolucci ai soli campioni prelevati da elementi facenti parte dei gruppi di aggancio e delle barre di inghisaggio, è stata riscontrata la seguente situazione:

- a) Vite delle flange inferiori del tensionatore (Vite T25M, Cam. 19): disfacimento della zincatura originale a causa dell'acqua di mare, e alla rimozione, durante il lavaggio del grasso protettivo senza il successivo ripristino di quest'ultimo. Ovviamente anche l'acciaio delle viti è stato corrosivo, quando la protezione offerta dallo zinco è venuta meno.

- b) Viti delle flange inferiori del tensionatore (vite T29M, Cam. 23): condizione analoga alla precedente, anche se in misura minore, probabilmente a causa di una minore infiltrazione di acqua marina.
- c) Deposito sulla barra di ancoraggio n° 601 del tensionatore T28M nella Cam. 22 del cassone MB-B-03: presenza esclusiva di ossido di zinco, di origine evidentemente esogena (si è formato altrove ed è stato trasportato dall'acqua o di allagamento o di lavaggio); inoltre si è rilevata la presenza di bisolfuro di molibdeno, usato come lubrificante e pertanto non dovuto a corrosione. Nel complesso l'assenza di nickel è testimonianza del fatto che non si sono innescati fenomeni di corrosione.
- d) Campione con contrassegno T29M, prelevato dal deposito dello stelo del tensionatore posizionato nella cam. 23: presenza di ossido di zinco e rame, con segni di ossido di ferro. Anche in questo caso l'assenza di nickel fa escludere fenomeni di corrosione.
- e) Campione con contrassegno T32M, prelevato dal deposito sul foro della barra di ancoraggio relativo alla femmina n° T1160, posizionato nella cm 26: l'assenza di nickel fa escludere fenomeni di corrosione; i composti rilevati sono tutti di origine esogena.
- f) Campione con contrassegno T32M prelevato dal deposito sul dado della barra d'ancoraggio 0998, posizionato nella cam. 26: assenza di tracce di nickel; i sali presenti (cloruri di sodio, calcio, stagno, piombo, ferro et al.) sono tutti di origine esogena.
- g) Campione con contrassegno T33M prelevato dal deposito sullo stelo del tensionatore posizionato nella cam. 27 del cassone MB-B04: presenza nel tracciato di scansione di segnali d'energia corrispondenti al nickel; poiché esso è stato prelevato dallo stelo nickelato di un tensionatore ciò è segno di un fenomeno di corrosione. Il complesso dei dati rilevati fa concludere che lo stelo in questione abbia subito una limitata aggressione corrosiva da parte dell'acqua entrata nella camera 27.
- h) Campione con contrassegno T34M prelevato dal deposito sulla barra di ancoraggio della femmina n. 601, posizionato nella cam. 28 del cassone MB-B04: presenza di una particella di metallo pesante ma questa volta si tratta di piombo e quindi non vi sono indizi di corrosione.

Dai risultati prima sintetizzati è stato possibile concludere che

- Tutte le viti zincate devono essere sostituite con altre zincate¹ opportunamente protette con pasta anticorrosiva.
- La presenza in misura notevole di composti di zinco potrebbe derivare anche dalla corrosione di elementi zincati (strutture grigliate, tubazioni, ecc.), oltre che dagli additivi aggiunti ai grassi lubrificanti.
- I composti di ferro derivano tutti dalla corrosione di componenti in acciaio in quanto non o poco o male protetti.
- Uno solo dei depositi prelevati dai componenti nickelati ha rivelato tracce di nickel.

Pertanto la campagna di prelievi non ha fatto emergere risultati che indichino danni irreparabili ai gruppi di aggancio della Bocca di Malamocco.

4.3. Smontaggio di gruppi di aggancio e successivi controlli

In data 15.7.2015 fu poi eseguito lo smontaggio del gruppo 03C attraverso la separazione, mediante rotazione, del corpo inferiore e l'apertura di quest'ultimo per visionare e analizzare gli elementi componenti. Il sistema ha ruotato senza particolari difficoltà e anomalie. L'apertura e l'esame delle parti interne hanno evidenziato, come risulta dal rilievo fotografico eseguito, i seguenti punti principali:

- Nessun segno di danneggiamento è presente né dal punto di vista meccanico (cricche, ammaccature, ecc.) né dal punto di vista della corrosione.
- Sono presenti depositi salini diffusi.

¹ La sostituzione con viti in acciaio superduplex, che resiste all'attacco corrosivo, a parere dei tecnici della FIP, non è possibile sia per problemi di resistenza sia di reperibilità sul mercato.

- Sono presenti residui di acqua contenuti nell'intercapedine tra spallamento e guarnizioni di tenuta.
- Le guarnizioni appaiono in buono stato.

L'esito dello smontaggio non ha evidenziato condizioni critiche e pertanto è possibile concludere che il tensionatore 03C, stante l'esame visivo compiuto, non ha subito danneggiamenti a seguito dell'allagamento. I controlli sul gruppo sono successivamente proseguiti (con esito positivo), ripetendo, oltre alle normali operazioni di pulizia, sostituzione delle parti soggette a consumo, ingrassaggio ecc., tutti i controlli e le prove che vengono normalmente eseguiti sui tensionatori all'atto del collaudo per accettazione. Comunque al termine dell'esame del gruppo 03C, dopo approfondita discussione, fu stabilito di seguire la seguente procedura per portare a termine i controlli sui tensionatori di Malamocco.

1. Movimentare tutti i restanti 37 tensionatori, rilevando i valori di pressione nel circuito oleodinamico per evidenziare eventuali incollaggi o impuntamenti interni. Le pressioni di riferimento sono quelle rilevate nella movimentazione del gruppo 03C.
2. Procedere per ulteriore controllo allo smontaggio di un altro gruppo, dall'altro lato della galleria rispetto a quello del gruppo 03C, ripetendo tutti i controlli eseguiti su quest'ultimo.
3. Nell'eventualità di anomalie di comportamento durante la prova di movimentazione, si procederà allo smontaggio del o dei tensionatori che presentano malfunzionamento.
4. Gli smontaggi, quello del punto 2 o, in alternativa, quelli del punto 3 dovranno essere eseguiti dopo il 15 di settembre per valutare, come ulteriore dato significativo, l'eventuale effetto dell'invecchiamento.

In occasione del sopralluogo del 29.9.2015 (Rif. 2.2.4) su segnalazione del Direttore dei Lavori Ing. Pinton si è eseguito una ulteriore ispezione dei gruppi di aggancio di Malamocco in quanto, nel periodo intercorso, sono comparsi alcuni segni di corrosione sullo stelo in corrispondenza della variazione di diametro da 190 mm (diametro di filettatura) a 181.7 mm.

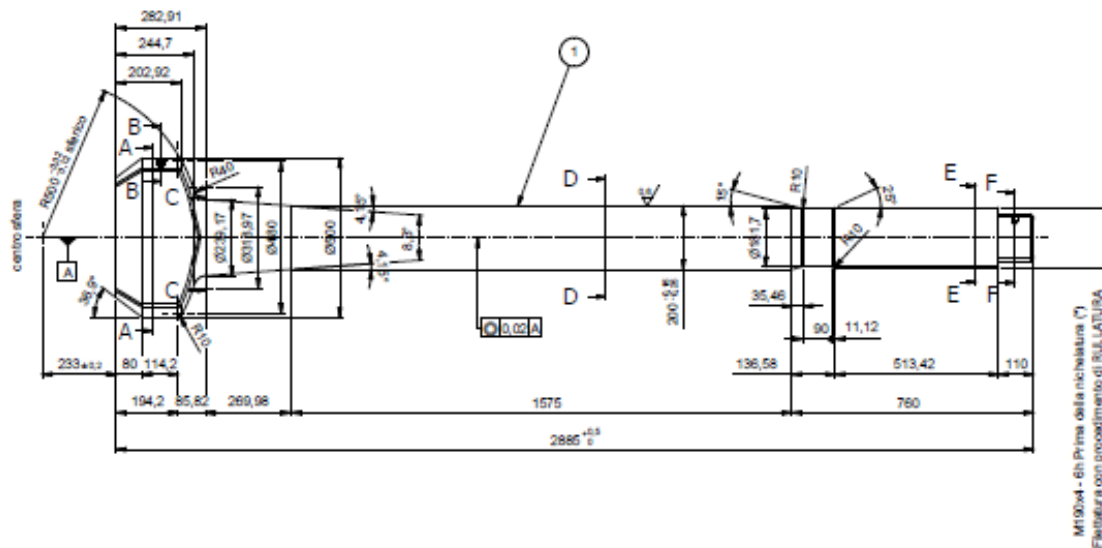


Figura 10 Stelo tensionatore

I segni riscontrati durante il sopralluogo hanno riguardato i gruppi 6-7-30-32-33. Le anomalie corrispondono, sulla base di un esame visivo, a porosità del trattamento superficiale o a lievi intacche avvenute per urti accidentali. In queste ultime si depositano prodotti che possono essere asportati con sola azione meccanica di un panno o di carta. E' necessario accertare la natura di tali prodotti mediante analisi chimica e provvedere alla riparazione applicando la procedura di riparazione.

I sottoscritti collaudatori statici segnarono in tale occasione (rif 2.2.4) la necessità di estendere il controllo anche ai gruppi delle altre bocche con particolare riferimento a quelli di Treporti che sono stati i primi installati da più tempo.

Per quanto riguarda la procedura di riparazione TP 392, è stata preparata da FIP industriale in rev.0 del 16.10.2015 e successivamente emendata e revisionata (Rev.1 del 5.12.2016 Rif. 2.3.8) nonché approvata dalla Direzione Lavori.

In data 16.10.2015 la prof.ssa Zanella, appositamente incaricata da FIP Industriale ha redatto una relazione sui controlli ed esami compiuti sui gruppi di aggancio, particolarmente riferita ai gruppi 01C, 20M, 31M e 19M. Sui primi tre vi è un danneggiamento del tutto simile costituito da una cricatura in corrispondenza del cambio di sezione. Tale variazione di dimensioni separa due zone a finitura diversa 0.6 μm quella superiore e 1.2 μm quella inferiore.

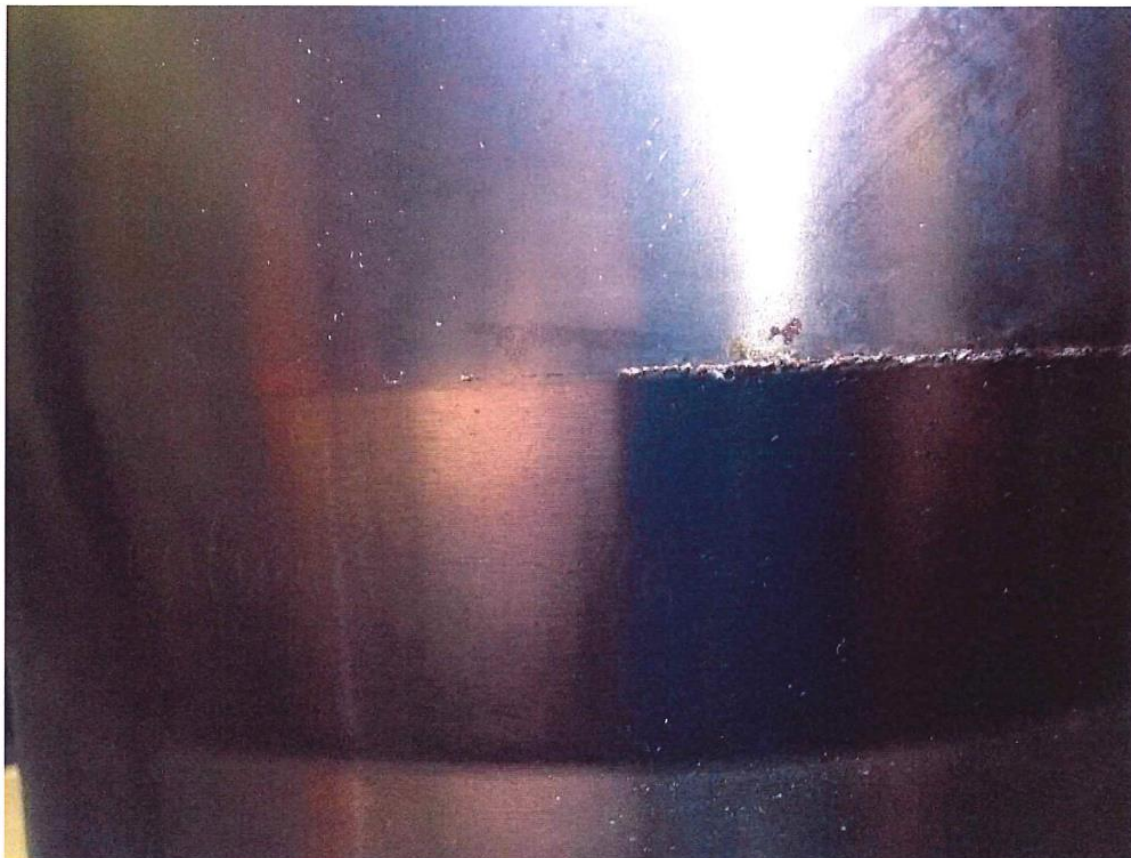


Figura 11 Danneggiamento tipico al cambio di sezione

E' possibile che, prescindendo da eventuali asportazioni eccessive dello strato di nichelatura in conseguenza di errata esecuzione della lavorazione finale (che pure non sono da escludere), il trattamento di lucidatura abbia provocato un surriscaldamento locale e circoscritto che ha determinato un indurimento del nichel amorfo, più resistente alla corrosione, con precipitazione di quest'ultimo e quindi la creazione di tensioni residue. Ciò pur essendo plausibile non spiega però il fatto che tutti gli steli sono danneggiati solo su una parte della circonferenza e, in particolare, sempre dalla parte opposta alla porta di ingresso del locale. Quest'ultimo aspetto sembrerebbe indicare una aerazione non uniforme del locale e quindi un deposito preferenziale di umidità sulle superfici dal lato nascosto. Invece l'esame dello stelo 09M ha messo in evidenza gli effetti di danneggiamenti meccanici casuali della superficie esterna che pur non superando lo strato di nichel (esito negativo della prova con Ferroxyll) forniscono la prova che la manipolazione durante il montaggio e le successive operazioni di assemblaggio degli impianti, avvenute nello stesso locale tensionatori, possono essere causa di danneggiamenti e inneschi di corrosione.

In data 3.11.2015 (verbale n.25 Rif. 2.2.5) fu eseguito lo smontaggio del gruppo 09M rilevando:

- Tracce di ossidazione presenti lungo lo stelo per una porzione estesa longitudinalmente su metà del "cilindro". La zona degradata è caratterizzata da assenza pressoché totale di nichelatura, 5-10 μm , in luogo dei 70-50 μm applicati.

- Nella parte alta dello stelo, immediatamente sotto il cambio di sezione, si è constatata la presenza di una incisione, che ha intaccato l'acciaio. L'incisione è posizionata in riscontro della guarnizione di tenuta del carter, per un'altezza di circa 45 mm, corrispondente all'altezza della guarnizione.

Il difetto riscontrato sembra confermare che possono essere avvenuti danneggiamenti da abrasione meccanica presumibilmente durante le operazioni di trasporto e/o montaggio; tale deterioramento dello strato superficiale ha facilitato l'attacco corrosivo derivante dall'allagamento. Si può ipotizzare che anche in assenza dell'allagamento i segni di corrosione sarebbero comunque apparsi, magari più in là nel tempo.

Successivamente in data 17.11.2015 (Verbale n. 26 Rif. 2.2.6) si è fatto nuovamente il punto della situazione determinando le seguenti operazioni da eseguire:

- Smontaggio di 4 carter appartenenti ai tensionatori di Malamocco;
- Montaggio del gruppo di riserva 39M al posto del gruppo 09M, danneggiato;
- Rifacimento dello stelo del 09M, che resterà come elemento di scorta;
- Movimentazione di tutti i gruppi di Malamocco, salvo l'insorgere di problemi non prevedibili al momento;
- Su tutti tensionatori con anomalie evidenti sulla nichelatura eseguire le prove con il ferroxil e le successive attività di ripristino.

In occasione della riunione del 18.01.2016 (Verbale n.28 Rif. 2.2.7) si è preso atto che contestualmente al collaudo del gruppo n° 39M, da installare al posto del 09M, sarà effettuato lo smontaggio dei carter dei 4 gruppi, a suo tempo individuati per l'esecuzione del controllo a campione, verificandone l'integrità della nichelatura. In data 4.4.2016 (Rif. 2.3.7) l'ing. Pinton, Direttore dei Lavori, ha emesso una relazione in cui ha dato puntuale riscontro di tutti i controlli eseguiti. In particolare:

- La movimentazione ha dato in generale risultati positivi e non si sono verificati problemi tecnici particolari per quanto attiene all'impiantistica necessaria al movimento del gruppo.
- I carter oggetto dello smontaggio ed ispezionati (gruppi 8M, 18M, 33M, 03C) risultano integri e privi di fenomeni di ossidazione.
- L'ispezione, la movimentazione e lo smontaggio hanno messo in luce punti di corrosione che sono circoscritti e pertanto riparabili applicando la procedura di ripristino TP392 (Rif. 2.3.8).
- La movimentazione ha evidenziato inoltre alcune difficoltà nella partenza del movimento rotatorio che è stato avviato spesso in modo manuale la prima volta e che non ha rivelato difficoltà alle movimentazioni successive. Ciò è probabilmente dovuto all'addensamento del grasso presente e può essere risolto aumentando la pressione del circuito oleodinamico, purché tale aumento rientri entro i limiti progettuali di tutte le apparecchiature coinvolte.
- Nonostante nei locali connettori e nelle gallerie non siano stati rilevati fenomeni di condensa, all'interno della quasi totalità dei carter di tenuta e sulla superficie degli steli, sono sempre stati rilevati, in tutte le ispezioni compiute, abbondanti fenomeni di condensazione con presenza di diffusi gocciolamenti e conseguenti ristagni di acqua.

Infine nel sopralluogo del 19.5.2016 (Verbale n.31 Rif. 2.2.8) è stata eseguita un'ispezione approfondita sullo stato degli steli e delle barre di inghisaggio constatando quanto segue:

- Tutti i tensionatori sono protetti da un telo di cellophane come risulta dalla Figura 12 e, in corrispondenza del cambio di diametro, sono ulteriormente protetti dalla pasta anticorrosiva. La stessa pasta è stata applicata alle teste delle viti dell'elemento di chiusura del meccanismo di rotazione del dado (Figura 13) e ai fori filettati di afferraggio delle barre di inghisaggio (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).
- Allo stato attuale nessun segno di attacco corrosivo è visibile sulla parte esposta del tensionatore e sulla filettatura delle barre di inghisaggio. In particolare sui filetti delle barre sono

presenti depositi di sporcizia al di sotto dei quali non è possibile, con un semplice esame visivo, stabilire se ci sono segni di corrosione. Sono invece presenti alcuni segni di corrosione sugli spigoli dell'elemento di chiusura del gruppo oleodinamico di tensionamento con particolare evidenza per l'elemento n.37 (Figura 14)

- Sono anche presenti segni di corrosione sugli spigoli di alcune piastre di riscontro dovuti probabilmente ad urti accidentali che hanno rimosso il trattamento protettivo.
- Come già altre volte notato, nelle gallerie di tutte le bocche sono sempre presenti evidenti segni di condensa e di deposito salino (Figura 15)².

Sulla base di quanto rilevato si ritenne indispensabile provvedere alla rimozione dei prodotti di corrosione e al ripristino della protezione in tutti i punti in cui si presentano segni di ossidazione sia sugli elementi nichelati sia su quelli verniciati.

Per quanto riguarda le barre di inghisaggio l'esame visivo non manifesta la presenza di segni di corrosione evidente tuttavia, considerando la presenza di alcuni depositi di sporcizia, i notevoli fenomeni di condensa, la composizione salina dell'atmosfera e l'esperienza di quanto accaduto nella Bocca di Treporti, si ritenne indispensabile, anche sulla base del parere dell'esperto in corrosione Prof. Gusmano, di proteggere le barre di inghisaggio mediante pasta anticorrosiva. In ogni caso, in via preventiva, si raccomanda di provvedere alla pulizia delle barre di inghisaggio e alla riparazione dei punti di corrosione eventualmente rilevati, applicando la procedura suggerita dalla Prof. Zanella e già utilizzata per i tensionatori.



Figura 12 Protezione degli steli con teli di cellophane



Figura 13 Pasta anticorrosiva sulla testa delle viti

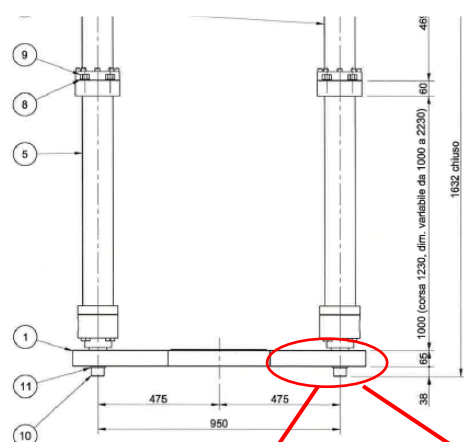


Figura 14 Corrosione sulla rondella di chiusura del meccanismo di rotazione del gruppo 37.

² In realtà le ispezioni compiute presso la bocca di Chioggia hanno evidenziato la quasi totale assenza di fenomeni di condensa nei carter. L'unica differenza presente è che in tale galleria sono installati, alle due estremità, due ventilatori industriali per il miglioramento delle condizioni climatiche di lavoro. Questo fatto mette in evidenza la necessità del trattamento e movimentazione dell'aria nelle gallerie per evitare o comunque diminuire i fenomeni di condensa che possono essere poi innesco di corrosione.



Figura 15 Condensa sulla parte alta dei gruppi di aggancio



11	2	Rondella UNI 5714 - DIAM 33 Zincatura Elettrolitica	Acciaio C50 UNI UNI 533
10	2	Vite TCEI M3x40 UNI 5931	Acciaio classe 8.8
9	8	Dado M20 UNI 5587	Acciaio classe 8
8	8	Rondella UNI 5714 - DIAM 20 Zincatura Elettrolitica	Acciaio C50 UNI UNI 533
7	16	Vite TCEI M10x25 UNI 5931	Acciaio classe 8.8
6	1	Servocintolo idraulico tipo ATOS 09K1313 CNMAIO-9-100/70X1230-0.007 -K-B1X1	
5	1	Cilindro idraulico tipo ATOS 09K1296 CNM-9-100/70X1230-0.007 -K-B1X1	
4	1	Pattino circolante ae374,5 ae34,5e5	PTFE CNR 10016
3	1	Anello di guida ae325,5 ae282,3x25	PTFE CNR 10016
2	1	Assale ae390 ae395x20	SS35S12-N EN 10025-2
1	1	Piastra inferiore 1190x770x65	SS35S12-N EN 10025-2
POS	QT	DESCRIZIONE - DIMENSIONI	MATERIALE



Figura 16 Teta della vite corrosa

Inoltre in occasione del sopralluogo del 10.1.2017 (Verbale n. 37 Rif. 2.2.10) si è constatato che le viti di fissaggio del meccanismo di accostamento rapido del gruppo di aggancio sono fortemente corrosive (Figura 16), probabilmente perché all'atto della pulizia e del lavaggio dopo l'allagamento, vista la loro posizione di non agevole raggiungimento non sono state correttamente pulite. Tali elementi devono essere sostituiti durante le operazioni di bonifica finale dopo l'installazione delle paratoie di cui al para. 6 della presente relazione.

5. Verifiche eseguite sul progetto strutturale

5.1. Revisione del progetto originario

La rilevazione di punti di corrosione sui tensionatori di Malamocco nonché delle altre bocche, ha messo quindi in evidenza la necessità di una revisione del progetto strutturale dei gruppi di aggancio per verificare la rispondenza di essi ai requisiti iniziali in termini di durata a fatica. Infatti il progettista all'epoca di esecuzione delle verifiche strutturali (Rif. 2.1.2, 2.1.3, 2.1.4) ha assunto che il trattamento di nichelatura proteggesse completamente il materiale del gruppo di aggancio (39NiCrMo3) e quindi nei calcoli a fatica ha presupposto assente la riduzione di resistenza derivante dall'attacco corrosivo. Quanto avvenuto dopo l'allagamento della galleria di Malamocco e quanto rilevato sui gruppi di Treporti e su alcuni altri delle altre bocche (Chioggia e S.Nicolò), suggerisce invece che, a causa di porosità, condizioni ambientali avverse e cause accidentali, tale attacco corrosivo può avvenire. Pertanto i sottoscritti hanno revisionato i calcoli di resistenza a fatica assumendo, in accordo alla normativa utilizzata, una riduzione dello sforzo limite secondo un fattore 3.6 (resistenza a fatica disponibile pari al 28% di quella base in assenza dell'attacco corrosivo). Le modalità di esecuzione del calcolo e i risultati sono esposti in dettaglio nella relazione "Gruppi di aggancio e tensionamento. Relazione sull'adeguatezza strutturale, sulla durabilità e sulle operazioni di manutenzione attuali e future. Rev. 0 23.5.2017" (Rif. 2.3.12). In estrema sintesi:

- Si è utilizzata la normativa UNI 7670-1988 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.
- 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 utilizzati due spettri di carico 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) e che simulano tutti i cicli significativi per una durata equivalente pari a 100 anni.
- Sebbene i controlli abbiano 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 che in corrispondenza a tale sezione il coefficiente di concentrazione delle tensioni è prossimo all'unità, mentre nelle altre sezioni è pari a 3.16 (sottotesta) e 5.89 (primo filetto in presa) i risultati sono sempre meno gravosi degli altri e pertanto sono stati omessi.
- 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 nella bibliografia scientifica di riferimento 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 Risultati della riesecuzione della verifica a fatica considerando l'attacco corrosivo

Zona di verifica	Danno Totale	Danno totale ammissibile
Sottotesta	0.276	0.500
Primo filetto in presa	0.334	0.500

In base ai risultati esposti nella Tab. 1 è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- Tutte le verifiche sono soddisfatte rispetto al valore limite del danno totale pari a 0.5.
- 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 dei minimi effettivamente riscontrati nelle prove di caratterizzazione dei materiali eseguite durante l'accettazione dei materiali a cura della D.L., che sono più elevati di quelli prescritti dalla norma di riferimento, il danno totale diventa 0.305 con un margine di sicurezza pari a 63.9 %.

La verifica eseguita consente quindi di affermare che il progetto strutturale è corretto anche considerando l'effetto della corrosione e quindi i nuovi valori di resistenza del materiale, più bassi rispetto a quelli assunti dal progettista. In particolare nei limiti di validità dello spettro dei carichi applicati, la durata a fatica soddisfa il requisito dei 100 anni, previsto a Capitolato.

5.2. Valutazione preliminare della durata degli steli in caso di generazione di una cricca

La presenza di un potenziale 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", in grado di prevedere la durata dell'elemento strutturale dopo che si è generata la cricca. Nella già citata relazione (Rif. 2.3.12) i sottoscritti, in via del tutto preliminare, hanno svolto un calcolo sovrapponendo il danneggiamento derivante dalla fatica a quello da corrosione. Infatti i gruppi di aggancio sono caratterizzati da un aspetto peculiare che impone particolari accorgimenti per la valutazione della progressione delle cricche di fatica: i cicli di sollecitazione a fatica 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. Quindi non è possibile considerare solamente l'aumento di velocità di propagazione della cricca dovuto all'effetto sinergico di corrosione e fatica ma ad esso si deve sovrapporre una velocità di corrosione che dipende dall'ambiente esterno e dalle caratteristiche di resistenza a corrosione della superficie metallica con esso a contatto. E' evidente però, sia basandosi sui valori di riferimento suggeriti dalle normative sia utilizzando i valori sperimentali effettivamente misurati da numerosi ricercatori, che i valori delle velocità di corrosione sono affetti, in generale, 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).

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. E' da notare inoltre che la velocità di corrosione è stata assunta costante durante tutta la vita del gruppo di aggancio trascurando così un'eventuale effetto di passivazione. Tale scelta corrisponde, da un lato, a tenere conto che la progressione della cricca di fatica offre al contatto con l'ambiente sempre nuovo materiale vergine per la corrosione e dall'altro che mettere in contatto con l'ambiente contemporaneamente lo strato di nichel superficiale e l'acciaio al carbonio sottostante, instaura meccanismi di corrosione dovuti all'effetto pila.

I calcoli di durata 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. I risultati, per una velocità di corrosione pari a 0.300mm/y, sono riepilogati nelle Tab. 2 e Tab. 2³. 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 per una profondità iniziale di 5 mm. E' da notare inoltre che la velocità di corrosione di 0.300 mm/anno, secondo DNV-RP.0416, corrisponde ad una superficie metallica non protetta nella cosiddetta "splash zone" cioè nella zona alternativamente asciutta-bagnata. Quest'ultima condizione è più gravosa di quella teoricamente 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 sottotesta⁴.

Tab. 2 Bocca di Malamocco. Profondità di cricca (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. 3 Bocca di Malamocco. Profondità di cricca (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 esposte 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 quelli studiati estensivamente. Per esempio, come è riportato nell'allegato 2 della citata relazione (Rif. 2.3.12), una cricca circonferenziale, cioè estesa su tutto il perimetro, ha una propagazione più veloce di quelle triangolari o semicircolari. La durata attesa, ad esempio 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 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 di quella sviluppata dai sottoscritti per quanto riguarda le forme delle cricche applicabili e dall'altro può servire da guida preliminare per discernere quali siano i tensionatori potenzialmente pericolosi. In particolare, a parere dei sottoscritti, l'eventuale rilevamento di una cricca, di qualsiasi forma, deve generare un intervento non solo di manutenzione e riparazione, in base a quanto riportato nel successivo para.6, ma anche ad un'analisi approfondita di "Fitness for Service" applicando gli strumenti della meccanica della frattura per prevedere l'evoluzione nel tempo dei difetti e quindi la necessità di eventuali interventi di sostituzione prima che possano avvenire cedimenti catastrofici.

³ I risultati esposti sono validi anche per le Bocche di Chioggia e S.Nicolò dato che gli spettri utilizzati sono un involuppo in sicurezza di tutte le sollecitazioni possibili nelle tre bocche.

⁴ Anche il progettista TECHNITAL ha svolto un'analisi con finalità analoghe (Rif. 2.3.13), limitata alla bocca di Treporti e con un approccio diverso. I risultati ottenuti sono però sostanzialmente congruenti con quelli qui esposti.

6. Procedura di ripristino e manutenzione

Durante l'attività di studio e verifica conseguente all'allagamento della galleria di Malamocco, è stato svolto un intenso lavoro sperimentale teso a determinare i prodotti migliori per conseguire la completa protezione del tensionatore nichelato. Tale lavoro riguarda, ovviamente, tutte le bocche, stante la perfetta intercambiabilità dei gruppi di aggancio e l'omogeneità delle condizioni ambientali. La descrizione delle attività sperimentali eseguite e i risultati ottenuti sono stati discussi nella relazione già citata (Rif. 2.3.12).

Considerando i risultati soddisfacenti ottenuti utilizzando come strato protettivo delle superfici nichelate il prodotto Master Proshield (Sol-Gel) accoppiato con l'applicazione della pasta RT-2400 LT è stata messa a punto la procedura di seguito descritta che è stata già applicata su ciascun gruppo di aggancio di Malamocco immediatamente dopo l'installazione della paratoia corrispondente.

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 Viscotak 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.
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, fino a rifiuto dello stesso, 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 sono ovviamente da ripetere ogni volta che si smonta lo stelo e/o lo si movimenta.

La descrizione puntuale di queste attività e delle responsabilità esecutive e di quelle di verifica e controllo, già descritte nel documento “BOCCHHE DI PORTO DI LIDO, MALAMOCCO E CHIOGGIA INTERVENTI INTEGRATIVI GRUPPI CERNIERA-CONNETTORE - RELAZIONE TECNICA” sono parte integrante del manuale di manutenzione.

Le attività di manutenzione sui gruppi di aggancio, fin qui descritte, sono state monitorate e verificate dai sottoscritti durante i sopralluoghi del 7-8 Settembre 2016 (Verbale n. 35 Rif. 2.2.9), 10 Gennaio 2017 (Verbale n. 37 Rif. 2.2.10) e 2 Marzo 2016 (Verbale n. 43 Rif. 2.2.11).

7. Conclusioni

A seguito dell'allagamento della galleria di Malamocco, che ha provocato il contatto prolungato dei gruppi di aggancio con acqua di mare, è stato svolto un intenso lavoro di esame, studio e manutenzione dei suddetti gruppi al quale i sottoscritti hanno partecipato e di cui la presente relazione è la sintesi.

Al termine di tale lavoro è possibile evidenziare le seguenti conclusioni:

- L'allagamento ha provocato la presenza di punti di corrosione localizzata che sono stati approfonditamente studiati giungendo alla conclusione che essi si sono generati non solo per il contatto con l'acqua di mare ma anche per alcune imperfezioni e porosità dello strato protettivo di nichelatura in presenza di un ambiente con atmosfera marina.
- Tali imperfezioni sono in generale derivate da porosità insite al trattamento di nichelatura, dalla trasformazione della struttura del nichel conseguente alla lucidatura, da danni accidentali avvenuti per urti o sfregamenti dovuti alle manipolazioni di montaggio o alle lavorazioni successivamente avvenute nei locali nei quali essi sono alloggiati.
- I punti di corrosione sono abbastanza omogenei sulle bocche di Malamocco, Chioggia e S. Nicolò dove hanno carattere puntuale ed episodico, mentre sono sistematici e molto più rilevanti nei gruppi di aggancio della bocca di Treporti dove ha giocato un ruolo fondamentale la pulizia non approfondita dopo il montaggio delle paratoie e quindi il contatto prolungato nel tempo (molti mesi) con sabbia ricca di cloruri.
- Quanto avvenuto nella bocca di Malamocco ha determinato la necessità di revisionare i calcoli strutturali per tenere conto della diminuita resistenza a fatica derivante dalla presenza di un ambiente corrosivo. I sottoscritti hanno eseguito i calcoli di resistenza in tali condizioni con esito positivo nell'ipotesi di piena applicabilità degli spettri di carico determinati a suo tempo dal progettista.
- Considerando poi l'eventualità della presenza di un danneggiamento in corso con la progressione di cricche di fatica, i sottoscritti hanno svolto una valutazione preliminare della durata dei tensionatori di Malamocco sovrapponendo il danno da fatica a quello da corrosione. In particolare la velocità di corrosione, espressione quantitativa della severità dell'attacco corrosivo, è stata assunta parametricamente, giungendo alla conclusione, si sottolinea preliminare, che se la velocità è limitata a 0.300 mm/anno la durata prevedibile, con le forme di cricca indagate, è congruente con il requisito di progetto di 100 anni. Tale conclusione è indispensabile che venga suffragata da calcoli analoghi o equivalenti del progettista o da un ente terzo qualificato.
- I calcoli eseguiti tuttavia suggeriscono la necessità di eseguire in caso di rinvenimento di una cricca non solo attività tempestive di manutenzione e riparazione ma anche un'approfondita analisi di Fitness for Service con gli strumenti della Meccanica della Frattura per valutare la possibile evoluzione del danno e l'eventuale necessità di sostituzione del gruppo.
- Le attività di studio e sperimentazione hanno dato luogo alla definizione di una procedura di riparazione e manutenzione che sembra, allo stato attuale delle conoscenze disponibili, adeguata a migliorare la protezione superficiale degli steli. Essa è attualmente in corso di applicazione nella Bocca di Malamocco a valle dell'installazione delle paratoie e verrà applicata nella Bocca di Chioggia e S. Nicolò all'atto dell'installazione delle rispettive paratoie.

19-06-2017

I collaudatori Statici

Prof. Ing. Carlo Brutti

Prof. Ing. Donatella Mascia