



Analisi del cedimento strutturale del braccio di una gru portuale

Francesco Frendo

Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione

frendo@ing.unipi.it

RIASSUNTO. Nel presente lavoro vengono discusse le cause del cedimento strutturale del braccio di una gru portuale a portata variabile. L'ispezione delle sezioni di rottura ha mostrato in particolare la presenza di una grossa fessura preesistente al momento del crollo, che si estendeva per circa metà sezione di uno degli elementi tubolari principali che costituiscono il traliccio del braccio.

Al fine di stabilire le modalità del crollo, nel lavoro vengono presentati un modello per l'analisi della propagazione della fessura, che fa uso del metodo delle weight functions ed un modello per l'analisi di collasso della sezione. Le analisi condotte hanno permesso di concludere che il crollo si è verificato per collasso plastico della sezione ed hanno messo in evidenza come la fessura in esame, per una parte considerevole della vita, sia propagata in condizioni stabili con velocità di avanzamento circa costante.

ABSTRACT. In the present paper the structural failure of a crane arm is analysed and discussed. During inspections, a significant pre-existing crack was observed, which extended to about half the cross section of one of the main tubular elements which constitute the arm frame. In order to determine the failure cause, a model for the crack growth analysis and a model for the plastic collapse were developed; the model for the analysis of crack growth is based on the weight functions method. The analyses allowed to conclude that the failure was due to plastic collapse and to assess how, for a considerable part of the life, the crack propagated under stable conditions with an almost constant rate.

PAROLE CHIAVE. Integrità strutturale; Apparecchi di sollevamento; Meccanica della frattura; Collasso plastico.

INTRODUZIONE

I modelli di calcolo dell'integrità strutturale ed i modelli fenomenologici che descrivono il danneggiamento dei materiali rappresentano uno strumento fondamentale per l'ingegnere sia nelle fasi di progettazione, che per l'analisi e l'interpretazione delle modalità di cedimento delle parti di una macchina che svolgono le funzioni strutturali. Vale la pena di osservare come, in particolare nel secondo caso, le difficoltà maggiori risiedono spesso nella conoscenza della storia operativa effettiva della macchina; nonostante ciò, tali modelli permettono di fare delle stime utili, relative ad esempio alla fase di propagazione di un difetto o alla vita del componente e alle cause di collasso.

La problematica affrontata nel presente lavoro riguarda l'analisi del crollo del braccio di una gru portuale a portata variabile. Il braccio è costituito da un traliccio di tubi saldati; più in particolare vi sono tre correnti longitudinali principali tubolari, disposti ai vertici di un triangolo equilatero e degli elementi tubolari di sezione minore che realizzano il traliccio di collegamento. Il materiale del braccio è l'acciaio API 5L x52, un acciaio al carbonio tipicamente impiegato per la produzione di tubi utilizzati nella realizzazione di gasdotti.

Il crollo del braccio è avvenuto in prossimità della zona di collegamento alla parte fissa della gru (Fig. 1); l'esame delle sezioni di rottura ha mostrato in particolare la presenza di un grosso difetto preesistente in uno dei correnti principali, che al momento del crollo interessava circa metà sezione (Fig. 2). Come risulta evidente dalla figura, il difetto si è originato in



corrispondenza del bordo di una saldatura di un elemento di rinforzo ed è poi propagato nel materiale in un piano ortogonale all'asse del tubo.

Obiettivi principali dello studio sono stati l'analisi della fase di propagazione per fatica del difetto e valutare se il cedimento è avvenuto per raggiungimento del valore critico del fattore di intensificazione degli sforzi o per il collasso della sezione residua.

L'analisi della fase di propagazione è servita a valutare quella che può essere stata l'evoluzione temporale del difetto; tuttavia, non essendo disponibile una registrazione dei cicli di carico effettivi, è stato possibile effettuare una stima per eccesso della velocità di propagazione assumendo un ciclo di riferimento relativamente severo.

La disponibilità delle caratteristiche di resistenza e della tenacità a frattura del materiale costituente il tubo ha invece permesso di identificare con certezza la causa del crollo; a questo riguardo, le caratteristiche meccaniche del materiale costituente il braccio sono state determinate con delle prove standard di trazione secondo normativa UNI, utilizzando dei campioni estratti da uno dei correnti principali del traliccio costituente il braccio; la tenacità a frattura del materiale è stata reperita in letteratura (si veda ad es. [1, 2, 6]).

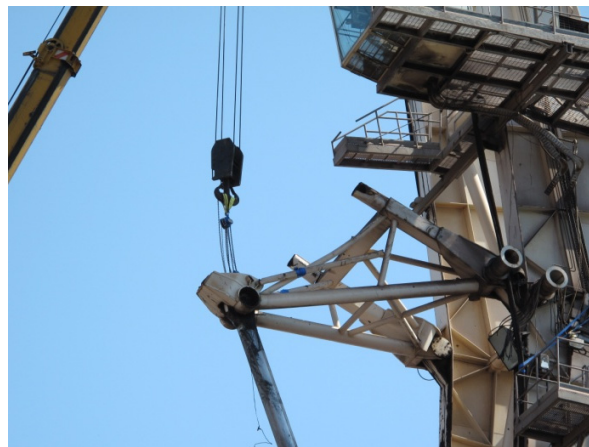


Figura 1: Zona di rottura del traliccio costituente il braccio della gru.

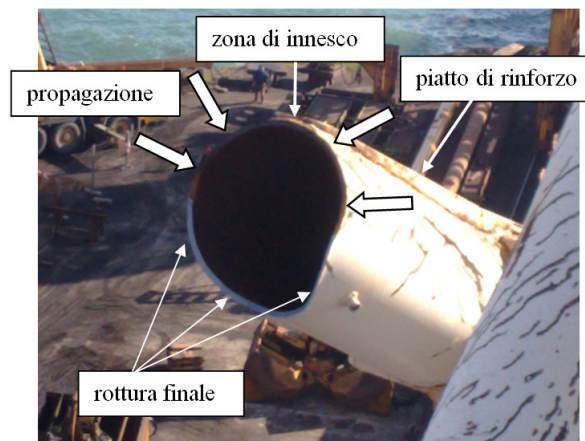


Figura 2: Immagine della sezione di uno dei correnti principali del braccio; è evidente l'ossidazione di una grossa porzione della sezione.

PROPAGAZIONE DEL DIFETTO

La fessura osservata rappresenta un difetto passante in un tubo sollecitato in trazione e flessione; in questi casi la modalità di danneggiamento è riconducibile alla nucleazione di un difetto sulla superficie esterna, alla sua crescita all'interno dello spessore del tubo sino a quando la fessura non diventa passante; successivamente si ha

l'avanzamento della fessura in un piano ortogonale all'asse del tubo (modo I), che va ad interessare una porzione sempre maggiore della sezione del tubo.

Nel caso specifico la fase di nucleazione e crescita del difetto iniziale è stata condizionata dalla presenza di un elemento di rinforzo, un piatto saldato sulla superficie esterna del tubo visibile in Fig.2; questa fase dell'avanzamento risulta complessa per effetto della geometria e delle proprietà del materiale nella zona della saldatura. Si è deciso quindi di restringere l'analisi alla sola fase di avanzamento del difetto passante e si è presa a riferimento una dimensione iniziale del difetto pari alla larghezza dell'elemento di rinforzo (Fig.3); non è stata quindi analizzata la fase antecedente di crescita di una o più cricche al bordo del cordone di saldatura sino a che non si è avuta la fessura passante di tale estensione.

Ciò rappresenta evidentemente una semplificazione che ha portato ad ottenere una stima per difetto del tempo di crescita della fessura; tale stima risulterà per difetto anche per il fatto che, come è già stato accennato, si è preso a riferimento un ciclo di carico relativamente severo.

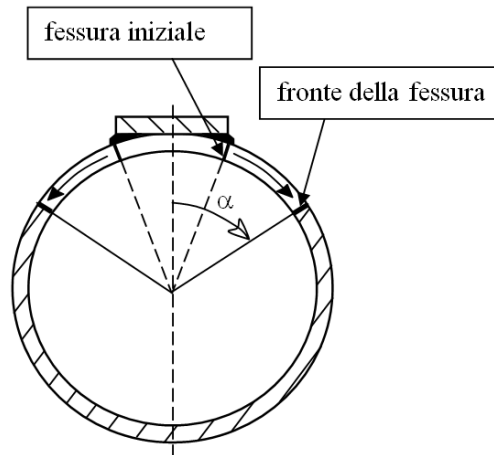


Figura 3: Modello di avanzamento del difetto.

Con riferimento alla Fig.3 si è indicata con α la semiestensione angolare della fessura; si indicherà con ϑ la coordinata angolare generica (stessa convenzione utilizzata per α).

La fase di propagazione del difetto può essere descritta tramite la legge di Paris; sono state prese in considerazione le due formulazioni seguenti:

$$\frac{da}{dN} = C_1 \Delta K^{m_1} \quad (1)$$

con $C_1=4 \cdot 10^{-11}$ m/ciclo ed $m_1=3$ (dati ricavati per un acciaio al carbonio da [1]);

$$\frac{da}{dN} = C_2 (\Delta K - \Delta K_{th})^{m_2} \quad (2)$$

con $C_2=2 \cdot 10^{-10}$ m/ciclo, $\Delta K_{th}=8$ MPa m^{0.5}, $m_2=2.4$ per il materiale API 5L gr X52 [5].

In entrambe le relazioni, per studiare l'avanzamento della fessura è stata considerata la parte positiva del ΔK ottenuto sulla base del ciclo di carico.

I fattori di intensificazione degli sforzi, necessari per il calcolo del ΔK , sono stati valutati con il metodo delle *weight functions* (si veda ad es. [3, 4]); il fattore di intensificazione degli sforzi può essere ottenuto con il seguente integrale:

$$K = \sqrt{W} \int_0^a \sigma(x) m(a, x) dx \quad (3)$$

nel quale W rappresenta lo spessore, $a = A/W$ rappresenta la larghezza adimensionalizzata della fessura, $\sigma(x)$ l'andamento della tensione agente in corrispondenza del piano in cui è presente la fessura, valutata nel pezzo integro ed $m(a, x)$ l'espressione della weight function.

Il caso in esame, già schematizzato in Fig.3, è riconducibile per motivi di simmetria a quello mostrato in Fig.4 (la figura si riferisce alla geometria effettiva, non adimensionalizzata), relativo ad una serie periodica di fessure in una lastra infinita, con le seguenti trasformazioni:



$$A = \alpha R ,$$

$$W = \pi R ,$$

$$X = \mathcal{G} R$$

ove R rappresenta il raggio medio del tubo e \mathcal{G} la coordinata angolare.

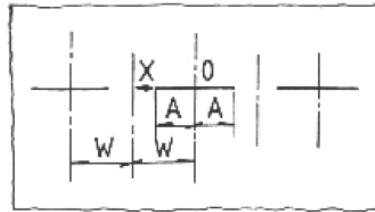


Figura 4: Serie periodica di fessure passanti in una lastra infinita (tratta da[3]).

La weight function per il caso di Fig.4 è stata presa da [3]. L'applicazione del metodo al caso in esame ha però richiesto un passaggio intermedio, in quanto, essendo il braccio della gru una struttura internamente iperstatica, le caratteristiche di sollecitazione agenti sul corrente ove si è avuto l'avanzamento della fessura, sono funzione della dimensione del difetto; per questo motivo anche la tensione normale che compare nella (3), agente nel tubo integro, risulta funzione della dimensione del difetto. Per il calcolo del fattore di intensificazione degli sforzi va quindi considerata la relazione seguente al posto della precedente (3):

$$K = \sqrt{W} \int_0^a \sigma(a, x) m(a, x) dx \quad (4)$$

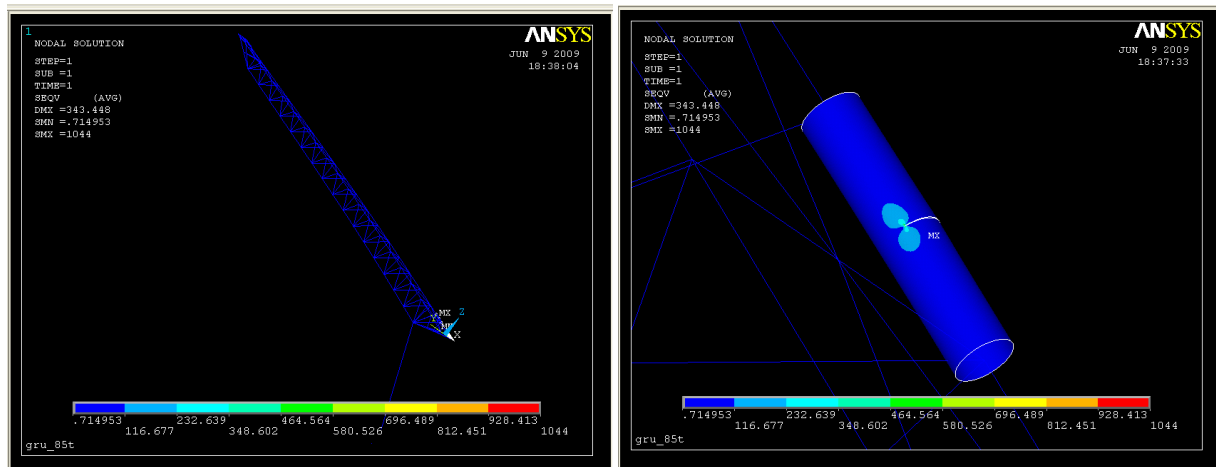


Figura 5: Modello impiegato per valutare le caratteristiche di sollecitazione nella sezione contenente il difetto.

Per studiare l'avanzamento della fessura è stato quindi precedentemente ricostruito l'andamento $\sigma(a, x)$ utilizzando la seguente procedura: è stato sviluppato un modello agli elementi finiti del braccio della gru, contenente un difetto di dimensioni variabili ($\alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$) nella sezione di tubo corrispondente al caso reale (Fig.5); il modello è stato interamente realizzato con elementi *pipe*, tranne la porzione di corrente ove è presente la fessura, che è stata modellata con elementi *shell*. A partire dai carichi nodali agenti negli elementi a monte e a valle della porzione modellata con elementi *shell*, sono state valutate le caratteristiche di sollecitazione (sforzo normale e momento flettente) agenti nella sezione in cui è presente il difetto; tali caratteristiche, riferite alla sezione integra, sono mostrate nelle Fig. 6 e 7 per varie estensioni del difetto. Vale la pena osservare che, per effetto del tiro delle funi agenti in punta al braccio, la condizione più gravosa per l'avanzamento del difetto, quella cioè in cui si ha l'apertura massima della fessura, si ha quando le strutture del braccio sono sottoposte all'azione della gravità; tale considerazione rende verosimili le ipotesi fatte sul ciclo di carico, in quanto

porta a considerare equivalenti tutte le condizioni di carico (dovute al sollevamento del carico da parte della gru) a partire da quella che provoca la chiusura del difetto.

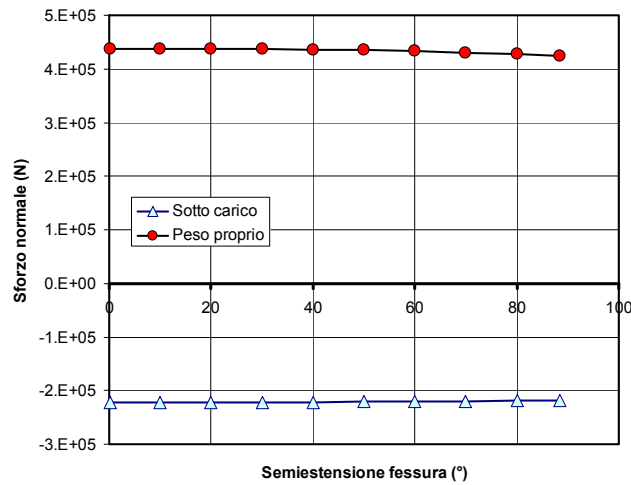


Figura 6: Sforzo normale agente nella sezione del tubo in funzione della semiampiezza del difetto; le due curve si riferiscono alle due condizioni utilizzate per definire il ciclo di carico.

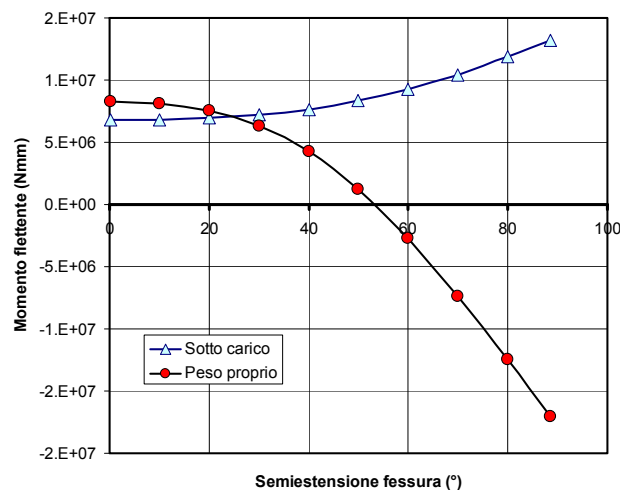


Figura 7: Momento flettente valutato rispetto al baricentro della sezione integra in funzione della semiampiezza del difetto; le curve si riferiscono alle due condizioni di carico.

Con queste caratteristiche di sollecitazione è stato possibile valutare la tensione normale, da impiegare nella (4), utilizzando semplicemente la teoria delle travi ed utilizzando le caratteristiche della sezione integra:

$$\sigma(a, x) = \frac{N(a)}{A} + \frac{M_y(a)}{J} R \cos(\pi x) \quad (5)$$

È interessante osservare come all'aumentare dell'estensione del difetto lo sforzo normale vari lievemente, mentre più rilevante è la variazione del momento flettente, che nella condizione relativa al peso proprio cambia segno, per una semiestensione della fessura pari a circa 53°; questi andamenti hanno un'influenza determinante sulla velocità di avanzamento della fessura.

Le Fig. 8, 9 e 10 mostrano il ΔK , la velocità di propagazione e la semiestensione della fessura che si ottengono utilizzando le precedenti relazioni (1) e (2) e la procedura precedentemente descritta, assumendo un difetto iniziale di semiestensione pari a circa 25°, corrispondente alla larghezza del piatto di rinforzo; come si può osservare le due leggi di propagazione forniscono risultati in ragionevole accordo, sebbene la (1) fornisca velocità di avanzamento superiori.



La linea tratteggiata rappresentata in Fig. 10 rappresenta la semiestensione della fessura osservata nella sezione di rottura rappresentata in Fig. 2. Se ne ricava quindi che, con il ciclo di carico ipotizzato, la fase di crescita del difetto a partire dalla estensione iniziale, utilizzando la (1), ha richiesto poco più di 80000 cicli; dalle Fig. 8 e 9 si deduce inoltre che la propagazione è avvenuta con un ΔK ed una velocità di avanzamento circa costanti; ciò è dovuto alla variazione delle caratteristiche di sollecitazione e della tensione normale da impiegare nella (4) all'aumentare delle dimensioni del difetto; la velocità di avanzamento media, stimata utilizzando la relazione (1), è risultata pari a circa $1.8 \mu\text{m}/\text{ciclo}$; il ΔK in questa fase è compreso tra 30 e $37 \text{ MPa m}^{0.5}$, significativamente inferiore rispetto al K_{IC} del il materiale in questione. Prendendo a riferimento la (2) si ha che la fase di avanzamento è durata circa 260000 cicli, la velocità di avanzamento in questa fase è stata pari a circa $0.6 \mu\text{m}/\text{ciclo}$, mentre il ΔK risulta analogo a quello precedente.

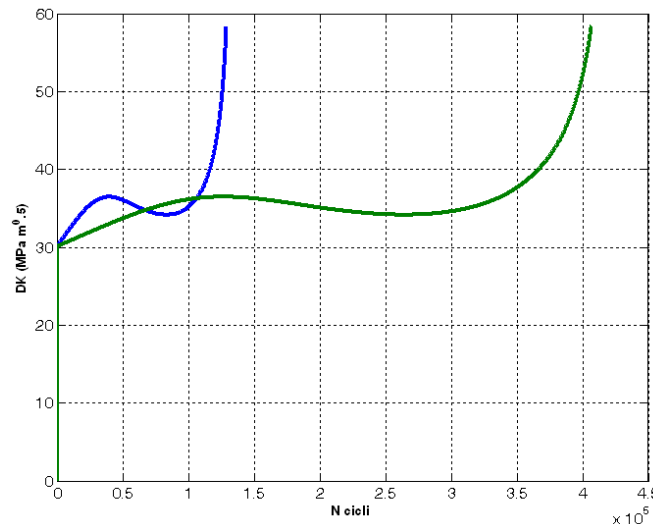


Figura 8: Parametro ΔK di sollecitazione della fessura; in blu ed in verde le curve relative alla (1) e alla (2) rispettivamente.

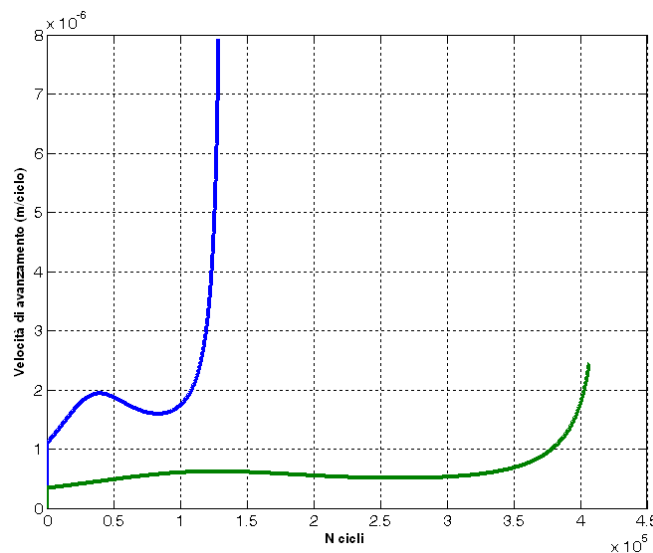


Figura 9: Velocità di avanzamento; in blu ed in verde le curve relative alla (1) e alla (2) rispettivamente.

MODALITÀ DI CEDIMENTO

L'analisi dei risultati ottenuti al paragrafo precedente ha messo in evidenza come in presenza di un difetto di semiestensione pari a circa 85° , quale quello osservato sulla sezione di rottura, con il ciclo di sollecitazione assunto non si raggiunge il valore critico K_{IC} , che per il materiale in questione è circa $70 \text{ MPa m}^{0.5}$ (si veda [2, 6]); infatti,

affinché il ΔK cresca rapidamente e raggiunga valori comparabili con la tenacità a frattura bisogna che la fessura superi l'ampiezza complessiva di 220° , cosa che non trova conferma nell'osservazione diretta della sezione di rottura.

È stato quindi sviluppato un modello di collasso plastico della sezione per valutare se il meccanismo di cedimento potesse essere spiegato con questa modalità. Il modello è illustrato in Fig.11 in cui è mostrato anche il sistema di riferimento avente origine nel centro della sezione integra; come prima, α indica la semiampiezza del difetto e β ($\alpha < \beta < \pi$) la posizione della cerniera plastica.

Si è ipotizzato quindi che in tutti i punti della sezione del corrente si raggiunga una tensione di scorrimento σ_s , convenzionalmente assunta come media tra la tensione di snervamento e la tensione di rottura; la caratterizzazione sperimentale del materiale ha fornito per questo parametro il valore di 460 MPa (Fig.12).

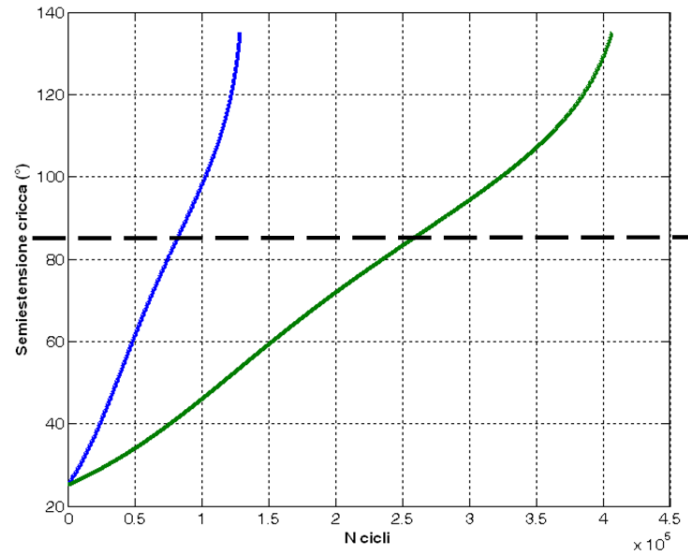


Figura 10: Semiestensione della fessura; in blu ed in verde le curve relative alla (1) e alla (2) rispettivamente.

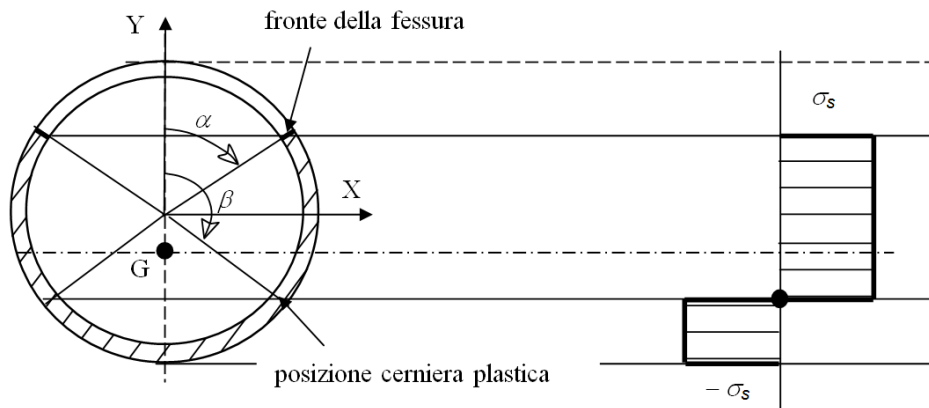


Figura 11: Modello di collasso della sezione.

Detti R e t il raggio medio della sezione e lo spessore del tubo rispettivamente (si considera per semplicità $t/R \ll 1$), è possibile valutare le caratteristiche geometriche della sezione; in particolare, la posizione del baricentro della sezione residua rispetto al sistema di riferimento mostrato in figura si ottiene dalla seguente espressione:

$$Y_G = \frac{\int_{\alpha}^{\pi} R^2 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \vartheta\right) d\vartheta}{R(\pi - \alpha)}$$

$$Y_G = -\frac{R \operatorname{sen} \alpha}{\pi - \alpha} \quad (6)$$



In maniera analoga è facile determinare lo sforzo normale N ed il momento flettente M_G , valutato rispetto al baricentro della sezione residua, risultanti dal profilo di tensione ipotizzato in Fig. 11. Si ha rispettivamente:

$$\begin{aligned} N &= 2Rt\sigma_{sc}(\beta - \alpha) - 2Rt\sigma_{sc}(\pi - \beta) = 2Rt\sigma_{sc}(2\beta - \alpha - \pi), \\ M_G &= 2Rt\sigma_{sc}(\beta - \alpha) \left[\frac{R(\sin \beta - \sin \alpha)}{\beta - \alpha} + \frac{R \sin \alpha}{\pi - \alpha} \right] + 2Rt\sigma_{sc}(\pi - \beta) \left[-\frac{R \sin \alpha}{\pi - \alpha} + \frac{R \sin \beta}{\pi - \beta} \right] \\ &= 2R^2t\sigma_{sc} \left[2 \sin \beta - \sin \alpha \left(\frac{2\beta - 2\alpha}{\pi - \alpha} \right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

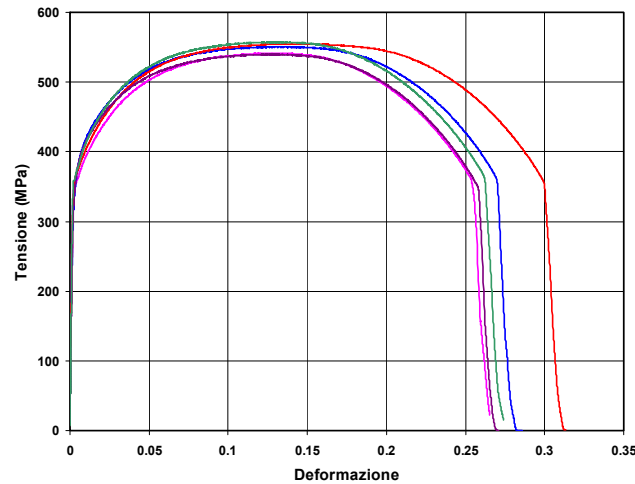


Figura 12: Curve σ - ε ottenute dalla caratterizzazione sperimentale del materiale effettuata mediante prove di trazione effettuate su provini estratti da uno degli elementi costituenti il braccio.

Le espressioni precedenti mostrano la dipendenza delle caratteristiche di sollecitazione dai parametri che rappresentano la semiapertura della fessura e la posizione della cerniera plastica; utilizzando tali espressioni è possibile costruire la mappa mostrata in Fig.13, che mostra il legame tra lo sforzo normale ed il momento flettente al collasso; le diverse curve si riferiscono a diversi valori della semiapertura α della fessura, mentre i diversi punti di una curva si riferiscono a diversi valori del parametro β che indica la posizione della cerniera plastica; all'aumentare del parametro β aumenta il valore dello sforzo normale, come risulta evidente anche dalla distribuzione di tensioni mostrata in Fig.11.

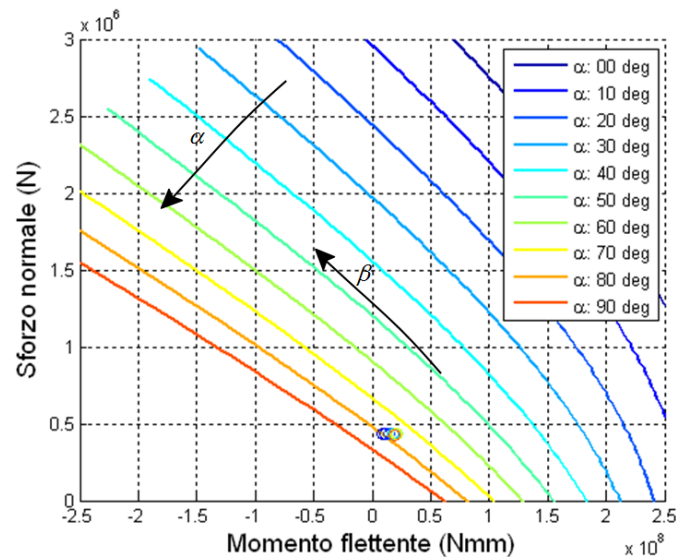


Figura 13: Relazione tra sforzo normale e momento flettente al collasso e sollecitazioni effettive.



Se si considera la singola curva del grafico di Fig.13 che, essendo univocamente determinata dal parametro α , corrisponde ad una certa ampiezza della fessura, si può dire che, se le condizioni effettive di carico (sforzo normale e momento flettente) sono rappresentate da un punto sul grafico posto al di sotto della curva, queste non sono sufficienti per far collassare la sezione; viceversa se il punto rappresentativo dei carichi agenti sulla sezione è posto al di sopra della curva si può avere il collasso. Le varie curve tracciate per diversi valori del parametro α mostrano che, come è ragionevole aspettarsi, all'aumentare dell'ampiezza della fessura presente nella sezione diminuiscono i valori minimi delle caratteristiche di sollecitazione che provocano il collasso plastico della sezione.

Nello stesso grafico di Fig. 13 sono anche riportati i valori delle caratteristiche di sollecitazione che si verificano nella sezione in cui è presente il difetto, per diversi valori del parametro α , nella condizione in cui il braccio è sottoposto alla sola azione del proprio peso. Questi dati sono stati ottenuti con il modello agli elementi finiti già descritto; il valore del momento flettente, in particolare, differisce da quello già mostrato nella Fig. 7, che si riferiva alla sezione integra. Come si può osservare, all'aumentare della dimensione della fessura, lo sforzo normale diminuisce leggermente mentre il momento flettente aumenta.

Il grafico di Fig. 13 dimostra chiaramente come con fessure di estensione complessiva compresa tra i 140° e i 180° si hanno effettivamente le condizioni per le quali si può verificare il collasso plastico della sezione del corrente. L'analisi delle curve mostra inoltre che il collasso si verifica con un valore dell'angolo β , che rappresenta la posizione della cerniera plastica, dell'ordine dei 140° .

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono state presentate alcune metodologie di analisi applicate ad un caso reale per stabilire quale sia stato il meccanismo di cedimento della struttura a traliccio del braccio di una gru portuale a portata variabile. Le analisi svolte hanno permesso di concludere che il crollo del braccio si è verificato per il meccanismo di collasso plastico della sezione di uno dei correnti principali, nella quale era presente una fessura che interessava circa metà sezione. La fessura si è originata al bordo del cordone di saldatura ed è propagata in condizioni stabili a velocità di avanzamento circa costante sino alla dimensione finale.

La durata della fase di avanzamento del difetto è stata stimata utilizzando due diverse formulazioni della legge di Paris, in cui si è fatto uso del metodo delle weight functions per valutare il fattore di intensificazione degli sforzi; tale analisi ha inoltre permesso di ricavare come il valore critico del K_{IC} reperito in letteratura risultasse significativamente superiore al fattore di intensificazione degli sforzi che si verificava per i carichi agenti e per le dimensioni della fessura prese a riferimento.

Il collasso plastico della sezione in cui era presente il difetto, ha prodotto il cedimento degli altri elementi portanti e quindi il crollo del braccio della gru.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Kleesnil, P. Lukas, *Fatigue of metallic materials*, Elsevier (1992).
- [2] F. Bolzoni, M. Guagliano, L. Lazzari, L. Vergani, M. Vimercati, In: *Atti del XXXI Convegno Nazionale AIAS (Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni)*, Parma (2002).
- [3] Xue-Ren Wu, A. Jane Carlsson, *Weight functions and stress intensity factor solutions*, London Pergamon Press (1991).
- [4] T. Fett, D. Munz, *Stress Intensity Factors and Weight Functions*, Computational Mechanics Publications, Southampton (1997).
- [5] J.T.P. de Castro, M.A.Meggiolaro, A.C. de Oliveira Miranda, *Computational Materials Science*, 46(1) (2009) 115.
- [6] J. Capelle, J. Gilbert, I. Dmytrakh, G. Pluinage, *Structural Integrity and Life*, 9(1) (2009) 9.