



## Analisi del cedimento di un gancio di traino per autocarri

Sara Bagherifard, Mario Guagliano

*Politecnico di Milano, Dip.to di Meccanica, via La Masa, 34 – 20156 Milano*

*sara.bagherifard@mail.polimi.it, mario.guagliano@polimi.it*

Inés Fernandez Pariente

*Universidad de Oviedo, Dip.to Ciencia de los Materiales, Campus de Viesques, edificio de Energia - Gijón (España)*

*inesfp@uniovi.es*

---

**RIASSUNTO.** La memoria presenta lo sviluppo dell'analisi del cedimento di un gancio di traino per autocarri. Il lavoro prende spunto da alcuni anomale rotture verificatesi in esercizio, richiedendo l'approfondimento del caso sia con indagini sperimentali, che con calcoli numerici.

Per quanto riguarda l'analisi sperimentale, l'osservazione delle superfici di frattura ha permesso di appurare che la causa del cedimento era la fatica. L'individuazione dei motivi che hanno indotto l'affaticamento del pezzo ha richiesto lo sviluppo di analisi a elementi finiti che hanno simulato le condizioni di carico indotte dal montaggio e quelle prescritte dalla norma per l'omologazione del gancio. Le indagini sperimentali hanno coinvolto osservazioni frattografiche al SEM, analisi metallografiche e microstrutturali del materiale, misure di sforzi residui. Il risultato dello studio è stato l'attribuzione delle cause del cedimento ad un non corretto montaggio degli elementi del gancio. L'esecuzione di prove di fatica su ganci montati correttamente ed in maniera scorretta ha permesso di convalidare i risultati delle indagini eseguite e di formulare proposte progettuali per il ripetersi di tali situazioni.

**ABSTRACT.** This paper deals with the failure analysis of a pin drawbar coupling used in trucks. The origin of the present work are some anomalous in-service failures, requiring to look in depth at the problem with numerical analyses and experimental investigations.

As regards the experimental analyses, the visual observation of fracture surfaces allowed to assess that fatigue was the cause of the failure. The determination of the causes inducing the failures required the development of finite element analyses simulating the assembly loads and of the ones prescribed for the international code approval. As regards the experimental investigations, they included fractographic SEM observations, metallurgical, microstructural analyses and residual stress measurements. The results shows that the cause of the failure was an uncorrect assembly of the lock washer of the system. The execution of fatigue tests allowed to confirm the results of the failure analysis.

**PAROLE CHIAVE.** Gancio di traino; Fatica; FEM; XRD.

---

### INTRODUZIONE

Il cedimento di un gancio per traino è un evento poco comune e non è possibile trovare in letteratura adeguati riferimenti in tal senso relativi al caso di interesse: in [1] si descrivono gli studi condotti per trovare le cause del cedimento di un gancio di uso ferroviario, mentre non è stato possibile trovare indicazioni relative a ganci per autocarri.

---



Lo studio presentato si riferisce a questi ultimi e trae spunto da un cedimento verificatosi in esercizio su alcuni ganci utilizzati come organi di collegamento tra motrice e rimorchio. In Fig. 1 è riportato il disegno schematico esploso dei principali elementi costituenti i ganci: si osserva che sono costituiti da un blocco in ghisa austemperata ( $R_m=1000$  MPa,  $R_s=700$  MPa,  $A\%=5$ ) che comprende il perno di fissaggio (1), da una flangia di accoppiamento pure in ghisa (7), da una ghiera d'acciaio (51), da boccole in PA66 (7a, 7b), da un anello vulcanizzato in gomma (52) e da un dado di chiusura (9) che consente di imporre il precarico voluto al perno di fissaggio, attraverso un montaggio con chiave dinamometrica.

Il cedimento oggetto dell'analisi è avvenuto lungo la sezione di raccordo sul perno di fissaggio, come si vede in Fig. 2.

Si osserva, già da questa osservazione visiva, che è possibile attribuire la causa del cedimento alla fatica, indotta dalla variabilità nel tempo dei carichi applicati.

Prima di essere posto in esercizio il tipo di gancio in questione era stato sottoposto, superandole, alle prove di fatica previste in sede di omologazione 94/20/CE. Queste ultime comprendono quattro differenti condizioni di carico, indicate in Fig. 3, da ripetersi ognuna per 2.000.000 di cicli.

La ricerca delle cause che hanno portato alla rottura del pezzo ha coinvolto diverse metodologie di analisi, finalizzate ad ottenere differenti tipi di informazioni.

La prima parte del lavoro riguarda le analisi sperimentali, volte a caratterizzare il materiale e a valutare eventuali difformità rispetto a quanto previsto dal fornitore. Una seconda parte delle indagini ha riguardato le osservazioni frattografiche delle superfici di frattura e la misura degli sforzi residui in prossimità della sezione di rottura (su un gancio nuovo e non rotto, ovviamente), al fine di verificare la correttezza, da questo punto di vista, dei parametri di lavorazione del perno di fissaggio.

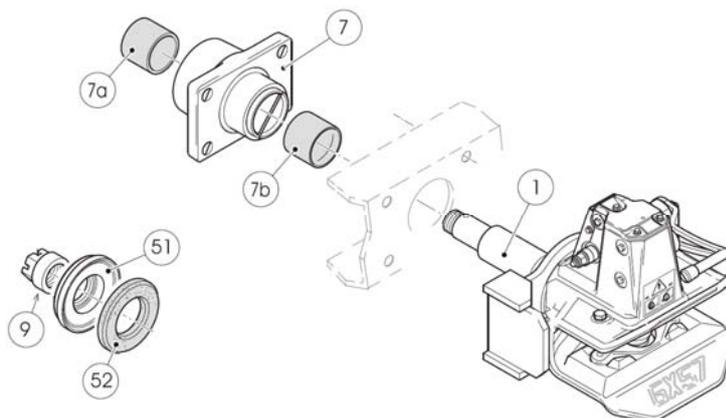


Figura 1: Esploso dei principali componenti del gancio.



Figura 2: Aspetto della superficie di frattura del gancio.

E' stato poi sviluppato un modello a elementi finiti del gancio con l'intento di simulare le effettive condizioni di lavoro del gancio stesso per effetto del carico di serraggio e dei carichi esterni applicati e verificare, quindi, la bontà del progetto e la sua robustezza rispetto a fattori esterni, quali un montaggio non corretto o sovraccarichi non previsti. Il modello ha

permesso, quindi, di orientare le seguenti analisi e, soprattutto, le prove sperimentali in funzione dei risultati ottenuti, evitando di indirizzare la sperimentazione verso aspetti di minor interesse applicativo.

Sulla base dei risultati ottenuti è stata definita una campagna di prove di fatica mirata a verificare le ipotesi formulate a valle dei calcoli numerici e delle indagini sperimentali.

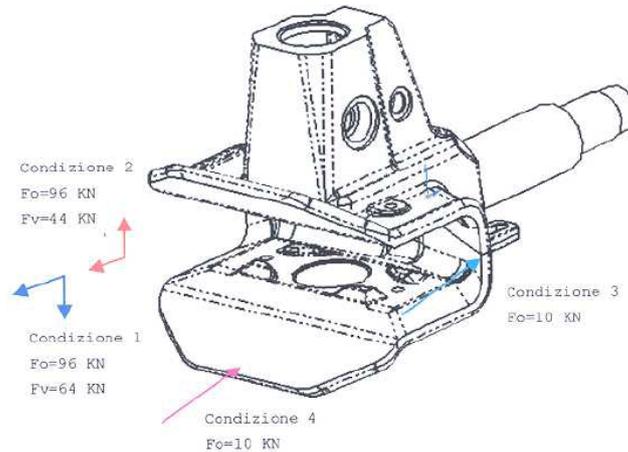


Figura 3: Condizioni di carico di fatica previste per l'omologazione del gancio.

## ANALISI SPERIMENTALI

**L**e analisi sperimentali eseguite riguardano osservazioni delle superfici di frattura e la misura degli sforzi residui in prossimità della zona di rottura.

### *Analisi delle superfici di frattura*

E' stata eseguita l'analisi frattografica di uno dei ganci rotti in esercizio [2]. In una prima fase si è analizzata la superficie di frattura con osservazioni al microscopio ottico e ingrandimenti modesti (50X). In un secondo momento si è osservata la superficie di frattura al microscopio elettronico cercando di evidenziare eventuali peculiarità osservabili con ingrandimenti elevati.

In Fig.4 sono riportate alcune immagini prese al microscopio ottico, in cui si focalizza l'attenzione sul più evidente innesco della frattura. Si tratta di un innesco per fatica in cui è ben riconoscibile la posizione di inizio propagazione e la traiettoria seguita dal fronte della cricca durante la propagazione. Le differenti colorazioni che appaiono sono dovute a periodi di riposo del gancio.

In Fig. 5 sono, invece, riportate alcune delle micrografie scattate al microscopio elettronico della stessa zona. Si può notare la struttura nodulare del materiale e la mancanza di elevate deformazioni plastiche al passaggio della cricca e la natura transgranulare della propagazione.



Figura 4: Immagini delle superficie di frattura al microscopio ottico.

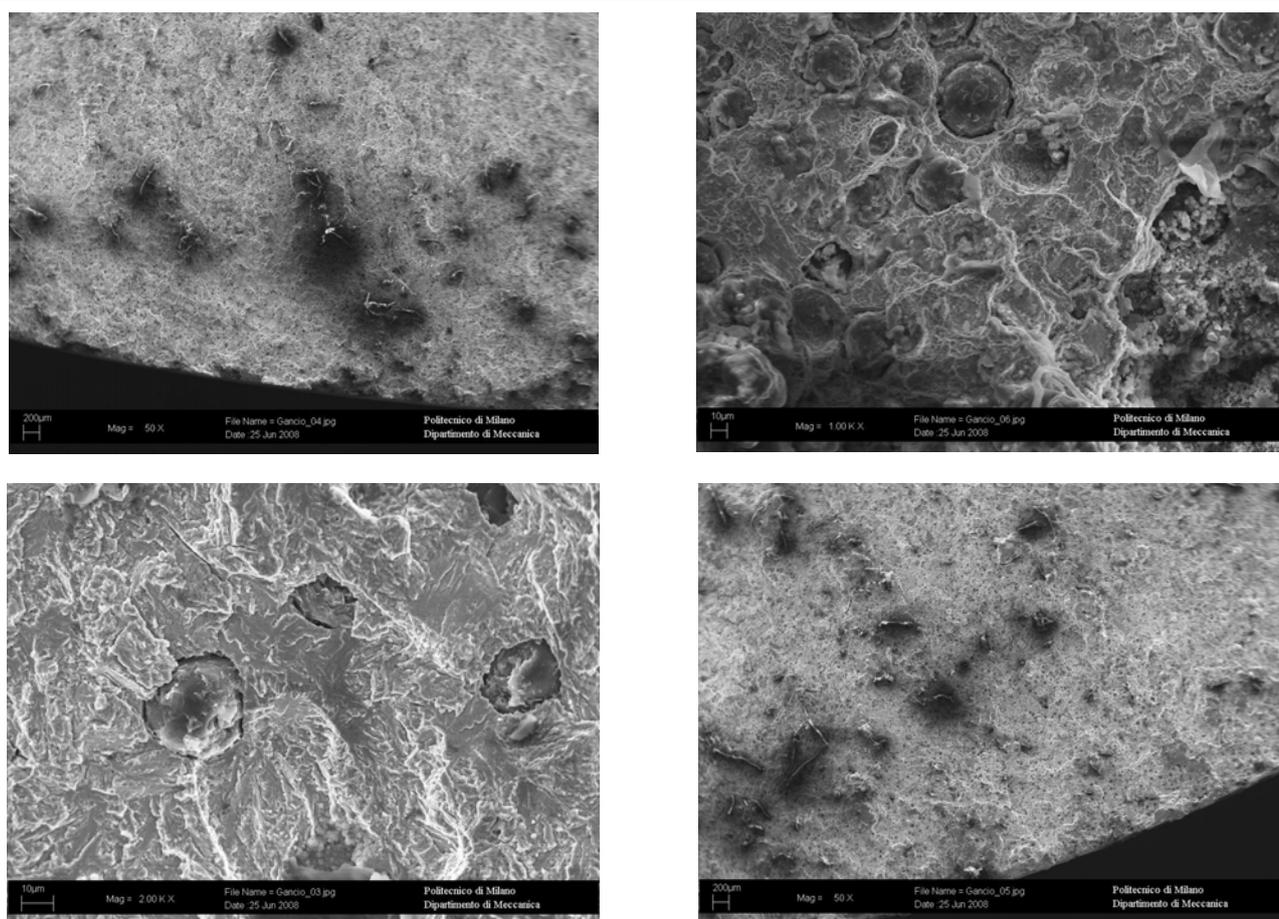


Figura 5: Micrografie della superficie di frattura scattate al microscopio elettronico a scansione (SEM).

Le conclusioni di queste analisi confermano che la rottura è dovuta alla ripetizione ciclica di carichi di ampiezza variabile, ed è quindi classificabile come cedimento per fatica. Lo stato delle superfici non permette di stimare con accuratezza la percentuale di superficie interessata dalla propagazione stabile della microcricca di fatica e la parte di cedimento di schianto, impedendo di stimare se il cedimento sia dovuto a carichi elevati piuttosto che ad un insufficiente dimensionamento della sezione.

#### *Misura degli sforzi residui*

Per l'esecuzione delle misure è stato utilizzato un diffrattometro AST X3000. Le misure sono state condotte con uno spot 2x2mm, utilizzando n° 5 angoli  $\psi$  positivi e n° 5 angoli  $\psi$  negativi, più  $\psi = 0^\circ$ ; si è cercato il picco di diffrazione prossimo a  $2\theta = 156,7^\circ$  (escursione angolare  $2\theta = 153^\circ - 159^\circ$ ).

Il catodo usato per le misure è al Cromo, la radiazione di interesse la  $K\alpha$ . La corrente di alimentazione è pari a 6 mA. Le misure sono state condotte in geometria  $\Psi$  (Psi), secondo la quale gli angoli  $\Psi$  e  $\theta$  sono, rispettivamente, impostati e misurati nel medesimo piano; i picchi di diffrazione sono stati rilevati con 2 sensori PSD simmetricamente disposti rispetto alla sorgente radiogena: per ogni misura condotta è stato misurato il picco di diffrazione in 11 posizioni angolari, ad intervalli regolari rispetto a  $\sin^2\Psi = 0^\circ, \pm 16,7^\circ, \pm 24,0^\circ, \pm 29,9^\circ, \pm 35,1^\circ, \pm 40,0^\circ$ . La determinazione dei picchi di diffrazione è stata eseguita con il metodo "Cross Correlation". Il tempo di esposizione al fascio di RX è pari a 30 s per ogni angolo  $\Psi$  considerato [3].

Le misure hanno riguardato due punti, uno dei quali posto in prossimità della sezione "critica", il secondo distante 20 mm da questa lungo il tratto cilindrico del perno. In Fig. 6 sono riportati i risultati ottenuti.

Si nota che lo stato tensionale residuo in superficie presenta valori di trazione che si annullano rapidamente per divenire di compressione sottopelle. Alla luce dei valori misurati si può affermare che gli sforzi residui risultano in linea con corretti parametri di lavorazione del perno.

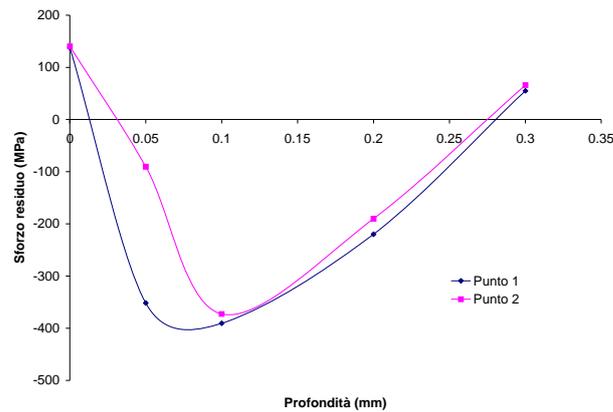


Figura 6: Andamento degli sforzi residui in prossimità della sezione di rottura.

## ANALISI A ELEMENTI FINITI

### *Sviluppo del modello*

**I**l modello a elementi finiti del gancio è stato costruito a partire da un modello solido sviluppato in ambiente ABAQUS [4, 5], visualizzato in Fig. 7.

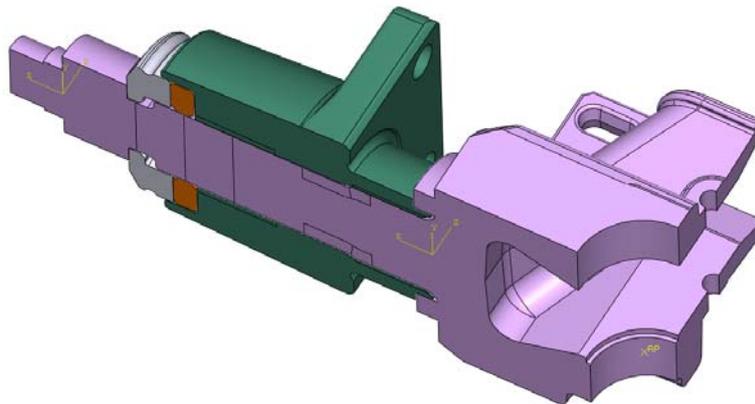


Figura 7: Vista in sezione del modello solido del gancio di traino.

Rispetto al componente reale, il modello presenta alcune semplificazioni che rendono il calcolo più veloce senza influenzare i risultati cercati. In particolare è stata eliminata la porzione geometrica in cui viene alloggiato il meccanismo di aggancio e sgancio rapido mentre il dado di serraggio e la ralla sono stati considerati parte integranti del componente. Per quanto riguarda la flangia di accoppiamento si è scelto di ricavare le boccole direttamente sul componente ed assegnare semplicemente proprietà diverse di materiale alle celle ricavate (boccola 1, boccola 2, flangia di accoppiamento). Tutti gli altri contatti previsti tra gli elementi del gancio sono stati simulati con algoritmi “slave/master surface” [6].

La discretizzazione in elementi finiti è stata ottenuta utilizzando elementi tetraedrici a 10 nodi per il tirante, la ghiera, le boccole in nylon e la flangia di supporto mentre per il tampone in gomma vulcanizzata si sono utilizzati elementi esaedrici a 8 nodi.

Nel complesso sono stati utilizzati 121252 elementi e 169934 nodi (modello con simmetria) e 241399 elementi e 599450 nodi per il modello intero.

In Fig. 8 si riporta la mesh utilizzata per le simulazioni, scelta a valle della verifica della convergenza dei risultati a partire da mesh più rade.

Le configurazioni di carico esaminate sono state 4 e sono le stesse indicate in Fig. 3. La simulazione del serraggio è stata impostata imponendo una differenza negativa di temperatura a una parte del perno di fissaggio, il cui valore è stato imposto fino ad ottenere il precarico previsto in sede di progetto. Per quanto riguarda la schematizzazione delle condizioni



di vincolo, oltre a sfruttare, per le condizioni di carico per le quali era possibile, le simmetrie geometriche e dei carichi applicati, la superficie della flangia di accoppiamento, che nella realtà sarebbe serrata al telaio del veicolo, è stata vincolata a terra.

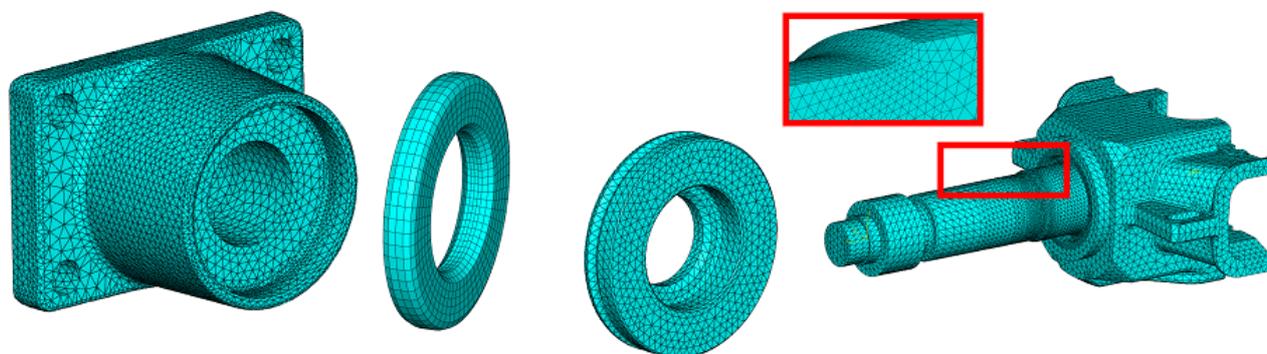


Figura 8: Modello FEM degli elementi del gancio.

### *Risultati*

Serraggio Il risultato della fase di serraggio evidenzia come la condizione al contorno “termica” comporti delle discontinuità che non interessano comunque in alcun modo la zona di interesse. I risultati evidenziano che, nella sezione di interesse, lo sforzo medio è di circa 75 MPa, con una concentrazione di tensione pari a 1.6 in corrispondenza del raccordo superficiale (lo sforzo assiale è pari a 122 MPa). La risultante degli sforzi risulta essere pari al precarico nominale imposto in sede di esercizio.

Condizioni di carico 1-4 A valle dell’analisi del precarico è stata eseguita la simulazione delle quattro condizioni di carico considerate.

Nelle Fig. 9 e 10 sono illustrati i risultati ottenuti in termini di massimo sforzo principale per le 4 condizioni di carico considerate, lungo il perno e nella sezione di rottura.

Verifica a fatica I risultati delle analisi a elementi finiti hanno mostrato che la variabilità degli sforzi agenti sul gancio passando dal carico dovuto al solo serraggio alle quattro condizioni di prova considerate (serraggio+condizione di prova). Conseguenza di ciò è la necessità di eseguire la verifica a fatica, effettuata base dei risultati delle analisi a elementi finiti, in corrispondenza della sezione in cui il cedimento per fatica ha, effettivamente, avuto luogo.

Il caso comprende uno sforzo iniziale indotto dal precarico di serraggio più una parte variabile dovuta alle differenti condizioni di carico. La verifica richiede la costruzione del diagramma di Haigh del pezzo, nel quale si assume che il limite di fatica assiale del materiale sia pari a 0.35 del carico di rottura del materiale ( $=1000$  MPa) e un fattore di finitura superficiale pari a 0.8. Il limite di fatica alterna simmetrica del pezzo risulta pari a 250 MPa. Il risultato indica che la verifica di resistenza è soddisfatta con un margine di sicurezza maggiore di 2.

E’ quindi possibile affermare che il rispetto delle condizioni di montaggio previste in sede di progetto assicura relativamente al pericolo della rottura per fatica nelle condizioni di carico previste per l’omologazione del gancio.

Ulteriori analisi a elementi finiti Sulla base dei risultati, numerici e sperimentali, ottenuti, sono state seguite ulteriori analisi a elementi finiti miranti a verificare la possibilità che il cedimento fosse imputabile a eventuali condizioni di funzionamento impreviste (sovraccarichi) o a montaggi non corretti. Più in particolare, le analisi volte a determinare l’effetto di eventuali sovraccarichi hanno considerato condizioni di carico analoghe a quelle delle prove di omologazione (vedi Fig. 3) ma con valori dei carichi amplificati rispetto a queste ultime. Per quanto riguarda le analisi FEM che considerano condizioni di montaggio scorrette, si è imposto un carico assiale di serraggio ridotto rispetto a quello previsto dal costruttore nella misura del 20%, 40% e 70%. Le tre situazioni simulano, rispettivamente, un serraggio con una coppia minore di quella prevista (le prime due analisi) e un serraggio con un posizionamento non corretto dei componenti, in particolare la rondella interposta tra flangia di collegamento e il blocco in ghisa. Tale situazione determina, infatti, il venir meno della maggior parte del carico assiale di serraggio a causa delle condizioni di contatto flangia/rondella e della possibilità di movimenti reciproci che si verifica durante l’esercizio. I risultati numerici hanno evidenziato che sono necessari sovraccarichi molto elevati (estremamente improbabili) per arrivare in condizioni di utilizzo che comportano il cedimento per fatica mentre il non corretto posizionamento della rondella comporta condizioni di lavoro che giustificano le rotture verificatesi.

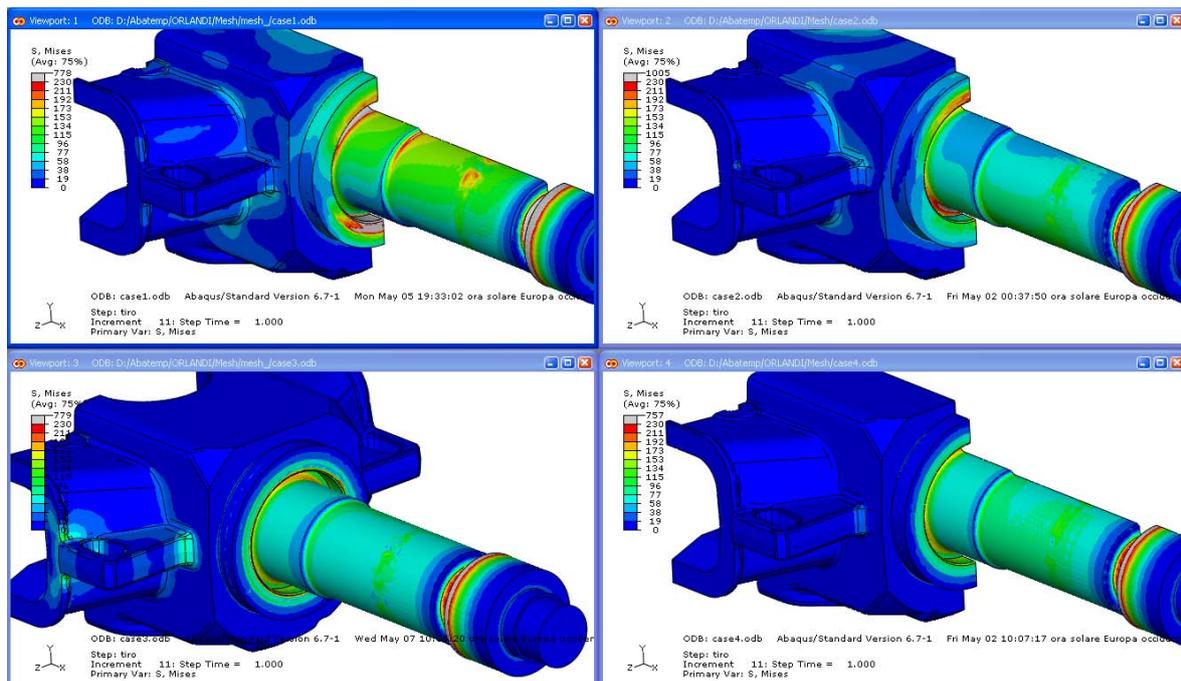


Figura 9: Sforzo di von Mises, condizioni di carico 1-4.

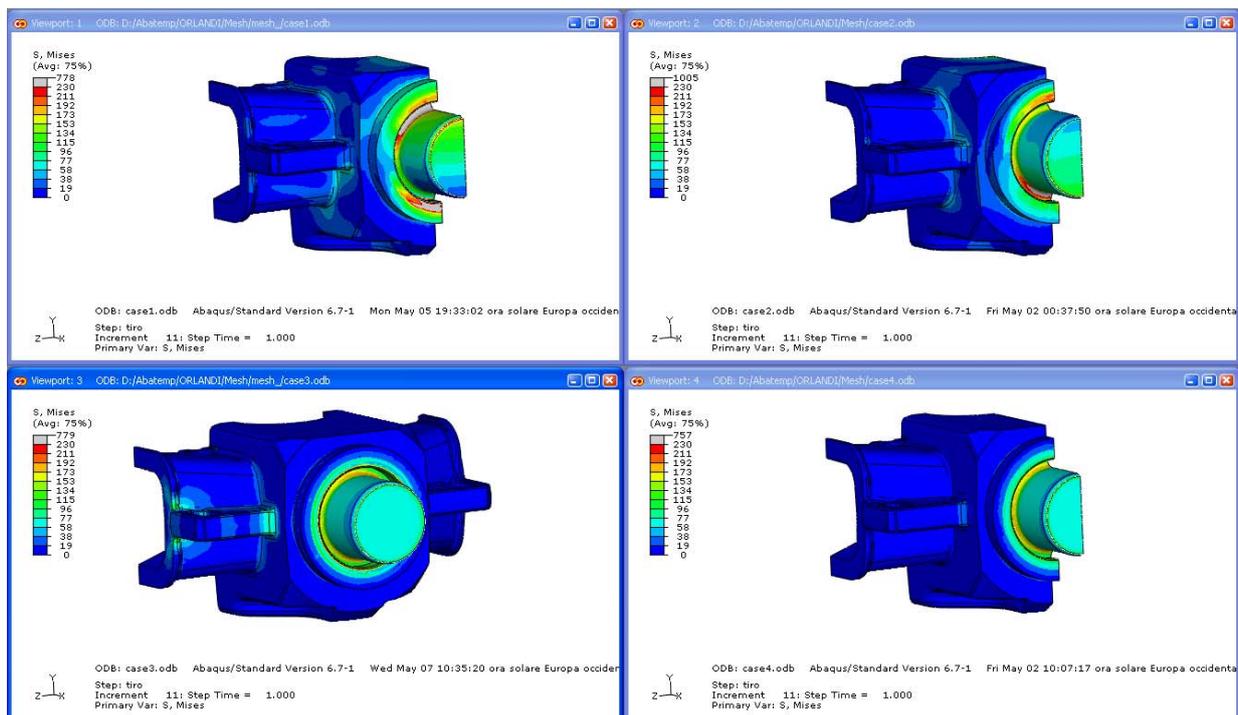


Figura 10: Sforzo di von Mises per le quattro fasi di carico, particolare della sezione di rottura.

## PROVE DI FATICA

Le analisi eseguite hanno suggerito la definizione di un piano di prove di fatica volto alla determinazione della resistenza del gancio e alla verifica dei risultati ottenuti. Le prove hanno riprodotto le condizioni di carico descritte nel paragrafo 3., sottoparagrafo *Ulteriori analisi a elementi finiti* e si sono protratte per 2.000.000 di cicli, a meno di



rottura per un numero di cicli inferiore. Le prove relative a serraggi eseguiti con coppie minori di quanto previsto in sede di progetto nella misura del 20% e del 40% non hanno dato luogo a cedimenti prematuri, confermando le indicazioni date dalle simulazioni numeriche.

Per quanto riguarda le possibili errate condizioni di montaggio, sono state seguite prove con la rondella interposta tra flangia e corpo in ghisa montata eccentricamente e a contatto, sulla superficie laterale con il perno di fissaggio. Tale condizione induce condizioni di contatto localizzate solo in alcune aree della rondella e favorisce scorrimenti degli elementi a contatto, con perdita del carico di serraggio con l'aumentare del numero di cicli. In tali condizioni di lavoro si sono registrate diverse rotture precoci del gancio.

In Fig. 11 si mostra l'aspetto della rondella al termine di una prova: si notano le ricalcature che individuano la zona a contatto.



Figura 11: Aspetto della rondella al termine della prova in cui è stata montata erroneamente.

## CONCLUSIONI

**N**ella presente memoria è stato considerato il cedimento di un gancio traino per autocarri. Le osservazioni sperimentali eseguite hanno consentito di determinare che la rottura è imputabile a un fenomeno di danneggiamento per fatica, mentre le misure di sforzi residui hanno permesso di verificare la correttezza dei parametri di lavorazione del perno di fissaggio.

Le analisi a elementi finiti hanno evidenziato come la rottura non sia giustificabile se si considerano le condizioni di carico previste in sede di omologazione e che solo una marcata perdita del precarico di serraggio può aver indotto condizioni di sforzo tali da giustificare il cedimento. Sulla base di queste indicazioni si è ipotizzato che tali condizioni di lavoro siano state indotte da un non corretto montaggio della rondella interposta tra la flangia e il blocco in ghisa, ed è stata avviata una serie di prove di fatica che hanno considerato un montaggio eccentrico della rondella. Le prove si sono concluse con la rottura del perno, avvalorando le ipotesi di cedimento avanzate. Sulla base di tali indicazioni è stato rivisto il disegno della rondella in modo da evitarne il montaggio scorretto e, con esso, situazioni di esercizio anomale.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] V. Infante, P. Duarte, C. Moura Branco, *Engineering Failure Analysis*, 14 (2007) 1175.
- [2] R.J. Shipley and W.T. Becker (Eds.), *ASM Handbook Volume 11: Failure Analysis and Prevention*, (2002).
- [3] I.C. Noyan, J.B. Cohen, *Residual Stress: Measurement by Diffraction and Interpretation*, Springer-Verlag, (1987).
- [4] *ABAQUS/CAE User Manual, Version 6.6*, Simulia, (2007).
- [5] *ABAQUS Analysis User Manual, Version 6.6*.
- [6] R. D. Cook, *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, John Wiley & Sons, (2001).