



ANDREA
GENNARO
Consulente
navale

Il fenomeno Hydro-lock come colpo d'acqua

ANDREA GENNARO

Negli ultimi tempi si è avuto modo di esaminare alcune avarie dovute al fenomeno noto in letteratura come "colpo d'acqua" ("hydro-lock" o "water-lock"), molto interessanti dal punto di vista tecnico, assicurativo ed euristico, occorse a motori Diesel navali, sia di propulsione sia elettrogeni. Si è così potuto constatare che le cause di queste avarie non sono state sempre comprese, talvolta esse sono state attribuite a motivi fantasiosi, altre volte sono state lasciate nel limbo. Il fenomeno dell'hydro-lock avviene nei motori termici alternativi quando la camera di combustione di un cilindro si riempie, più o meno parzialmente, di un fluido incompressibile (quale acqua od olio) e può avere come primi effetti deleteri sollecitazioni di compressione e di flessione della biella e/o la distruzione del cilindro. La casistica della causa del fenomeno dell'hydro-lock, ossia del riempimento più o meno parziale del cilindro, è molto articolata. Nelle presenti note non si entra in merito alla casistica degli avvenimenti e si fa riferimento a quelli che accadono con maggiore probabilità, cioè a quelli che avvengono nel corso della procedura di avviamento del motore. Inoltre si considerano principalmente avarie da hydro-lock, occorse a motori Diesel navali.

I parametri che fondamentalmente determinano il fenomeno dello water lock con flessione del fusto di biella sono:

- l'incompressibilità del fluido liquido;
 - il conseguente elevatissimo valore del gradiente di pressione in relazione allo spostamento rettilineo del pistone;
 - la conseguente disponibilità di energia cinetica che va ad operare sulla biella del cilindro nella fase di spostamento minimo, quasi nullo, del piede di biella;
 - la presenza di una sollecitazione inerziale trasversale, agente sulla biella; sollecitazione piccola, essendo il motore in fase di avviamento e quindi dotato di rotazione a bassa velocità, ma sufficiente a superare il concetto di indifferenza nel piano trasversale della deformazione della biella, anticipando pertanto la sua instabilità flessionale rispetto al valore di sollecitazione previsto da Eulero. Infatti in questo caso si potrebbe parlare per la biella di una instabilità di forma anticipata, dovuta ad una sollecitazione assiale minore di quella prevista dalla relazione di Eulero.
- Sono storici i fenomeni di hydro-lock avvenuti ai motori navali di propulsione a cilindri contrapposti Harland Doxford, a causa di trafileamento di acqua di raffreddamento della camicie attraverso le cannuole di lubrificazione delle camicie stesse, con conseguente scalettamento dei perni di banco degli alberi a manovelle di tipo composto, in cui l'anello debole della catena cinematica di trasmissione della coppia era costituito dal forzamento tra perni di banco e maschette. Con l'impiego di alberi a manovelle di pezzo l'anello debole strutturale per il fenomeno di water lock è divenuto, per molti tipi di motori, il fusto delle bielle.
- Si desidera tuttavia ricordare che avarie da hydro-lock sono occorse a molti motori alternativi terrestri per locomotori ferroviari e per autotrazione e a parecchi motori per aviazione. In questi ultimi, si è tal-

volta verificato che nei cilindri rivolti verso il basso si accumulasse, accidentalmente e a motore fermo e per cause varie, una certa quantità di olio lubrificante e che ci si accorgesse della avvenuta flessione della biella, dovuta ad hydro-lock, solo nel corso delle previste operazioni manutentive.

Anche in ambito navale si sono avuti casi in cui lo hydro lock si è verificato senza alterazioni significative dei parametri meccanici e termodinamici. Generalmente un'avaria da water lock si manifesta con una compressione ed una flessione della biella e un accorciamento della lunghezza attiva della stessa. L'entità dell'accorciamento della biella dipende dalla tipologia della biella e dall'entità del water lock. Qualora l'accorciamento fosse di piccola entità si avrebbero variazioni dei parametri funzionali del cilindro talmente limitati da essere difficilmente rilevabili. Qualora invece l'accorciamento della lunghezza attiva della biella fosse considerevole si potrebbero verificare mancate accensioni dovute ad un non più sufficiente rapporto di compressione e quindi ad una insufficiente temperatura di pre-ossida-

dazione e di accensione del combustibile; inoltre è possibile che si determini anche la rottura della parte bassa della camicia a motivo della sua interferenza con lo stelo flesso della biella. E' bene ricordare che la flessione dello stelo di biella può avvenire unicamente nel piano ortogonale all'asse di rotazione dell'albero a manovella, cioè nel piano trasversale del motore. Infatti in questo piano il coefficiente di riduzione della lunghezza libera vale 1 (a motivo del fatto che i vincoli di estremità sono cerniere) mentre nel piano longitudinale del motore il coefficiente di riduzione delle lunghezze vale 1/2 (a motivo del fatto che i vincoli di estremità sono incastri). Inoltre la freccia

della deformata flessionale della biella (elastica o elasto-plastica) deve essere concorde al verso di rotazione dell'albero a manovella a motivo dell'inerzia di rotazione della biella in fase di decelerazione assiale del piede di biella e rotazionale della biella.

Spostando l'attenzione sulla quantità di liquido entrata nel cilindro è possibile concludere che qualora essa sia tale da saturare il volume della camera di combustione al punto morto superiore (PMS, spazio nocivo) l'operazione di avviamento del motore (generalmente ad aria) sottoporrebbe la biella del cilindro ad una sollecitazione assiale di compressione (sollecitazione di punta) con conseguente eventuale instabilità di forma della biella stessa. Qualora invece la quantità di liquido non sia tale da saturare il volume della camera di combustione al PMS, parte del liquido si surriscalderebbe e brucerebbe con il combustibile (in caso fosse olio) o evaporerebbe (in caso fosse acqua) nei cicli termodinamici successivi all'avviamento, mentre parte del liquido verrebbe espulsa durante le fasi di scarico. Nel caso in cui un cilindro contenesse un volume di fluido ben superiore al volume della camera di combustione al PMS, il motore potrebbe non avviarsi o danneggiarsi seriamente. In effetti durante l'avviamento l'albero a manovella si bloccherebbe se l'energia accumulata dal sistema fosse inferiore al lavoro di deformazione necessario per superare il blocco, mentre deformerebbe e danneggerebbe i componenti della linea qualora la sua energia fosse sufficiente.

Nel caso un evento di water lock non sia catastrofico esiste comun-



che la possibilità che la biella rimanga deformata e che la sua freccia sia tale da rendere le normali sollecitazioni dovute al ciclo Diesel sufficienti all'evoluzione della flessione del fusto della biella stessa, rendendo l'avaria catastrofica dopo un determinato numero di cicli Diesel. Esaminiamo le conseguenze dell'hydro-lock

1) La flessione della biella avviene con collasso plastico di alcune sezioni del fusto della biella stessa e nessuna avaria apparente occorre ai componenti la linea. Si verifica invece una sovra-sollecitazione, senza apparente avaria, alle eventuali viti di collegamento del fusto alla testa di biella (in caso di biella di tipo marino) e delle ralle della testa di biella, dei cuscinetti di perno di manovella, di perno di banco, dello spinotto. Il motore si avvia e seguita a funzionare in termini sufficientemente corretti e pertanto le variazioni dei parametri di funzionamento, temperatura e pressione dei gas di scarico non sono tali da indicare la presenza di anomalie. Si hanno i seguenti due casi:

1a) La flessione della biella non causa innesco a rottura a fatica nella sezione di maggiore collasso plastico ed il suo accorciamento non causa mancate accensioni. In questo caso ci si rende conto della avvenuta flessione della biella solo nel corso del successivo intervento manutentivo. Quanto detto è avvenuto, con una certa frequenza, nei motori stellari per aviazione e in alcuni motori Diesel, anche di impiego navale.

1b) La flessione della biella causa innesco sufficiente per una rottura a fatica. Pertanto per la biella inizia la fase I di evoluzione della rottura a fatica (Paris-Erdogan, modo I) sotto l'azione dei cicli Diesel di intensità sufficiente a rendere critico l'innesco a rottura. Una volta divenuto critico l'innesco a rottura ha inizio la fase II dell'evoluzione della rottura a fatica. Le sollecitazioni che maggiormente impegnano la resistenza del fusto di biella sono la compressione (che a motivo della flessione della biella causa momento flettente e quindi tensione a trazione sull'estradosso flesso della sezione della crina), il colpo di frusta (che tende ad aprire ulteriormente l'estradosso della biella) e la sollecitazione di trazione con il pistone al PMS in fase di fine scarico dei gas (che causa una tensione di trazione sull'estradosso della biella).

2) La flessione della biella marina avviene con sovrasollecitazione e collasso plastico dei perni di collegamento della ralla dalla testa di biella alla flangia del fusto di biella, mentre nessuna avaria apparente occorre al fusto di biella e agli altri componenti. Si ha inoltre sovrasollecitazione, senza apparente avaria, dei cuscinetti di perno di manovella, di perno di banco, dello spinotto. Anche in questo caso il motore pare seguire a funzionare correttamente. Si hanno i seguenti casi:

2a) La biella ha sopportato la sollecitazione di punta senza aver subito innesco a rottura a fatica. La sovrasollecitazione di almeno 2 delle 4 viti del fusto di biella ha invece causato collasso plastico con innesco a rottura a fatica delle viti stesse. Pertanto per le 2 (o 4) viti ha inizio la fase I di evoluzione della rottura a fatica (Paris-Erdogan, modo I) e successivamente, raggiunta la dimensione critica della crina per una o entrambe le due viti, ha inizio la fase II dell'evoluzione della rottura a fatica delle viti stesse. In questo caso le sollecitazioni di trazione che maggiormente impegnano le due viti sono quella di trazione dovuta alla massa alterna della linea al PMS in fase di scarico dei gas e quella dovuta al colpo di frusta concorde alla trazione delle 2 viti. L'evoluzione e la rottura finale delle 2 viti causa la rottura delle altre 2 viti, l'apertura per urti, con la camicia o con l'incastellatura, della testa di biella con conseguente rottura del fusto di biella, della cami-

cia, dei cuscinetti, del pistone e dell'incastellatura.

2b) Talvolta lo scenario di avaria di cui al punto 2a) si presenta con il fusto di biella sufficientemente indeformato ed integro, pur se, ovviamente, con le viti di connessione del fusto alla testa di biella rotte per sollecitazione di trazione-taglio e le viti della testa di biella rotte per sollecitazione di trazione-flessione, con evidenti segni di strizione delle viti e segni di urti delle ralle con l'inviluppo interno del carter.

3) L'ultimo caso è quello di un hydro-lock catastrofico che causa una sollecitazione tale da distruggere la testata.

Nel caso in cui l'hydro lock non distruttivo e abbia causato unicamente deformazione flessionale della biella con innesco a rottura (immediato o successivo dovuto ai cicli Diesel), il tempo che inter-

corre da quando l'innesco a rottura diviene critico al momento della rottura è di poche ore. Il numero delle ore di vita residue dipende dalla velocità di rotazione dell'albero a manovelle oltre che dall'entità delle tensioni in gioco. L'hydro-lock sollecita a trazione le colonnette della testata. Dette colonnette sono in genere abbastanza lunghe da poter far fronte a questo allungamento in campo elastico, ma alcune volte la deformazione è anche plastica. A seguito dell'allungamento delle colonnette si può avere una fuga di fluido attraverso la tenuta della testata (il diamante). Per quanto attiene la così detta valvola di sicurezza la sua portata è talmente limitata da non produrre alcuna riduzione significativa della pressione di hydro-lock. In genere i cuscinetti di banco e di manovella, se in buon ordine, sono i componenti che soffrono meno l'hydro-lock a motivo dello loro lubrificazione a spiazzamento ("squeezing" cioè portanza elasto-plastica per spiazzamento dell'olio lubrificante) che si produce nel film di olio lubrificante con il regime di velocità di rotazione differenziale già acquisito dopo i primi radianti di rotazione dell'albero a manovelle in avviamento. Anche lo spinotto soffre poco l'hydro-lock perché il fenomeno avviene praticamente a cinematismo lubrificato, benché fermo, ma con il meato pieno di olio (pistone frenato al PMS). Si ha pertanto anche in questo caso squeeze. Inoltre il limitato spessore del metallo bianco garantisce una adeguata resistenza alla compressione. L'accorciamento della biella comporta la riduzione del rapporto di compressione geometrico e quindi anche di quello termodinamico, fatto quest'ultimo che può dare luogo, come già detto, a mancate accensioni del cilindro dovute a insufficiente temperatura a fine della fase di compressione del ciclo Diesel a motivo dell'aumentato volume della camera di combustione al PMS. In questo caso l'accensione del cilindro diviene incerta, la tem-

peratura dei gas di scarico diminuisce e l'ufficiale di macchina non può che pensare che il polverizzatore debba essere sostituito. Pertanto è bene sottolineare che qualora la sostituzione di un polverizzatore non risolvesse il problema di cui sopra si dovrà prendere in considerazione l'eventualità di un avvenuto hydro lock "morbido" con flessione della biella probabilmente in evoluzione distruttiva. Si riporta in apertura la foto di due bielle marine di uno stesso motore, flesse per water lock, in cui le frecce di flessione (frecce) dei fusti delle bielle erano di circa 200 mm. La flessione delle due bielle è stata rilevata a motivo di un mancato avviamento del motore. Il successivo smontaggio del motore ha evidenziato la rottura della parte bassa delle relative camicie, causata dall'interferenza dei fusti di biella flessi con le camicie nel corso della corsa di discesa del pistone. I calcoli energetici effettuati per questo caso hanno dimostrato che i due water lock sono avvenuti in tempi diversi. #

The hydro lock is a peculiar failure of reciprocating engines which occurs when the combustion chamber is filled with an incompressible fluid.

In general hydro lock occurs when starting an engine having a cylinder filled, partially or totally, by a fluid, in general cooling water or lubricating oil that leaked in the cylinder. As the engine is started and the piston travels toward the top dead centre it compresses the content of the cylinder, in case an incompressible fluid is present the compression is impeded, the degree of such impediment depends whether the combustion chamber is saturated by such fluid or not. In case the energy of the system is sufficient the impediment is overcome, and the engine starts, in case the energy is insufficient the rotation of the crankshaft is stopped abruptly. In either cases it is possible that the energy of the system is sufficient to bend the connecting rod, thereby increasing the combustion chamber volume at the top dead centre and reducing the compression ration of that cylinder. The bending of the connecting rods can be limited and without fatigue fracture activation, in such case the cylinder will continue to operate indefinitely at a slightly reduced performance. In such case the hydro lock will be discovered at the subsequent overhaul of the engine. In case the bending of the connecting rod has resulted also in a notch in the connecting rod a fatigue crack will be activated (Phase I, Paris-Erdogan, mode I) and then it will start to grow, leading to the fatigue fracture of the connecting rod, with consequential damages to the the other components of that line. The time to failure, in such case, is a few hundred of hours.