

Tommaso FRANCA, Franco QUARANTA

IL PROBLEMA DEI BASSI CARICHI
NEI MOTORI DIESEL AD ALTO
GRADO DI SOVRALIMENTAZIONE
PER LA PROPULSIONE NAVALE

Università degli Studi di Napoli

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA NAVALE

Napoli, Dicembre 1989

Tommaso FRANCA
Responsabile del Reparto Calcoli Termodinamici
Diesel Ricerche, Trieste

Franco QUARANTA
Ingegnere Navale

IL PROBLEMA DEI BASSI CARICHI NEI MOTORI DIESEL AD ALTO GRADO DI SOVRALIMENTAZIONE PER LA PROPULSIONE NAVALE

Introduzione

L'evoluzione tecnologica del motore diesel ha avuto una fase determinante nella sperimentazione e messa a punto di sovralimentazione ed interrefrigerazione, gli unici processi rivelatisi in grado di ottenere il progressivo aumento delle prestazioni. La fig. 1 mostra l'andamento medio della potenza specifica caratteristica dei diesel 2T e 4T prodotti nel corso dei cento anni che ne hanno visto la nascita e la progressiva affermazione nei tanti campi rivelatisi idonei alla sua applicazione. Si nota che la pendenza delle curve aumenta decisamente a partire dagli anni '40, periodo nel quale si ebbero sensibili miglioramenti delle prestazioni dei diesel in conseguenza dell'adozione dei primi turbocompressori a gas di scarico.

Al crescere del livello di sovralimentazione ha iniziato a rivelarsi un fenomeno alquanto negativo per il funzionamento del motore: ai carichi parziali ed a basse velocità si riscontrava un aumento della temperatura dei gas di scarico, anche al di sopra del valore di pieno carico, indice di una condizione pericolosa per il funzionamento del motore.

Questa fenomenologia, del tutto sconosciuta ai motori aspirati o

poco sovralimentati, fu ben presto attribuita al difetto di alimentazione d'aria per la combustione che si poteva riscontrare al diminuire del carico. Tale difetto d'aria determina un aumento delle temperature di combustione, e di conseguenza di quelle dei gas di scarico, ed è in grado di influenzare il carico termico al motore.

E' vero peraltro che, anche se le temperature del ciclo sono più alte, le pressioni sono relativamente basse e si riducono i coefficienti di scambio termico tra gas e pareti del cilindro. Questa condizione è da considerarsi "protettiva" nei confronti del motore in quanto limita la trasmissione del calore dal gas caldo al motore e, in definitiva, contiene le temperature di esercizio delle varie parti esposte direttamente al flusso termico. In questi termini, non sempre si nota ai carichi parziali l'aumento delle temperature dei vari organi coinvolti nella combustione oltre il livello di pieno carico, condizione che può invece verificarsi nelle valvole di scarico, da sempre punto debole dei motori che le adottano (in particolare dei medium speed), e che può dar luogo a seri inconvenienti di servizio.

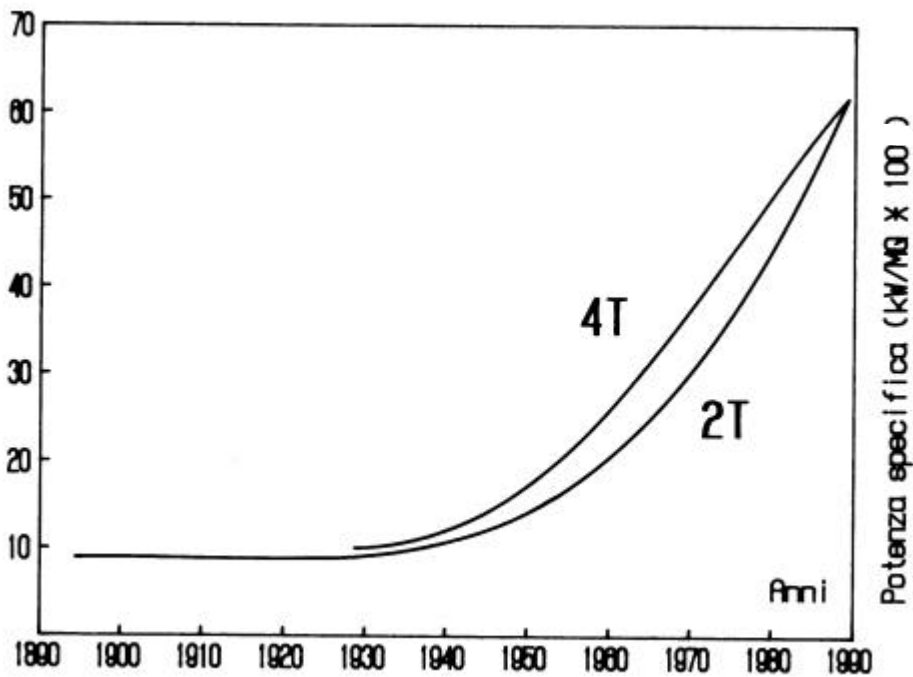


Fig. 1

Il diesel navale nelle operazioni ai carichi parziali

L'applicazione del motore diesel più soggetta ai rischi derivanti dalle operazioni a "part load" è senza dubbio quella marina; infatti, essendo la propulsione navale legata alle condizioni di erogazione della potenza secondo la cosiddetta "cubica" (ossia secondo una legge di dipendenza della potenza erogata dal numero di giri descrivibile dalla funzione potenza di terzo grado) è proprio quello il caso in cui il motore può trovarsi a funzionare a velocità minori di quella nominale e coppie relativamente elevate.

Il fenomeno in esame ha peraltro effetti tanto più rilevanti quanto più alto è il grado di sovralimentazione del motore. Tale parametro (indicato con il simbolo X nella trattazione) è pari al rapporto tra la pressione assoluta dell'aria effettivamente disponibile all'ingresso nel cilindro e quella che verrebbe aspirata dallo stesso motore in assenza di sovralimentazione (in pratica la pressione atmosferica diminuita della depressione all'aspirazione dovuta alle perdite di carico fino al collettore). E' quindi:

$$X = p_s / p_{amb} - p$$

Riguardo alla questione in esame, c'è da rimarcare la netta differenza di comportamento tra diesel 2T e 4T. Mentre il primo, infatti, non sembra avere troppi problemi nel funzionamento a "part load", il secondo lavora in condizioni di gran lunga peggiori se il carico scende al di sotto di un certo valore, da ritenersi critico per il motore.

Ciò è dovuto al fatto che il motore 2T non vede cambiare significativamente, al variare del numero di giri, la portata d'aria all'aspirazione in quanto l'alimentazione, in quel caso, è realizzata attraverso le luci di lavaggio i cui tempi di scoprimento sono sostanzialmente indipendenti dalla velocità del motore.

Nel 4T invece è molto più sensibile l' "effetto pompa" ossia la dipendenza della portata d'aria all'aspirazione dalla velocità del motore; ciò perché i tempi di apertura e chiusura delle

valvole (che regolano tale portata) variano proprio con il numero di giri.

Si può dire che l'esigenza di contrastare i danni derivanti dal funzionamento ai carichi parziali ha grossa influenza sulla definizione dell'apparato di propulsione di una nave in funzione del tipo di motore primo da installare a bordo. Quando, infatti, la scelta ricade sul 4T, più soggetto ai danni derivanti dal prolungato funzionamento in condizioni di "overload" ai bassi carichi, si preferisce in genere adottare un'elica a passo variabile; essa, infatti, alleggerendo il passo ove le condizioni di navigazione lo richiedano, consente di tenere sempre il motore in condizioni di funzionamento favorevoli.

Se l'apparato motore è invece costituito da un diesel 2T si può tranquillamente adottare un'elica a passo fisso (di maggior rendimento rispetto a quella a pale orientabili) non essendoci, in tal caso, particolare esigenza di tutelare il motore dagli effetti di eventuali operazioni ai carichi parziali.

Una rappresentazione analitica del fenomeno

La dinamica del funzionamento del motore diesel, ad alto grado di sovralimentazione ai carichi parziali in cubica, si presenta assai complessa in quanto dominata da una lunga serie di parametri.

Accettando tuttavia alcune ipotesi semplificative, si può giungere ad una semplice rappresentazione analitica del fenomeno che permette di individuare l'andamento delle sue caratteristiche peculiari.

Ricordando che tutte le grandezze che compaiono nella trattazione con pedice "o" sono riferite alle condizioni nominali di funzionamento del motore (in corrispondenza, cioè, del 100% di n e di P), si indichino con:

- P potenza (come frazione di quella nominale)

- M momento motore

- p_{me} pressione media effettiva

- p_s pressione di sovralimentazione assoluta
- p_n pressione di sovralimentazione effettiva
- p_{amb} pressione ambiente
- rapporto aria - combustibile
- X grado di sovralimentazione

per il diesel 4T si suppongono valide le seguenti ipotesi:

- il rapporto aria/combustibile è proporzionale al parametro p_s/p_{me} (il che è molto vicino alla realtà nei diesel interrefrigerati in cui le variazioni di consumo specifico e della temperatura dell'aria di sovralimentazione sono sempre molto piccole).

Viene quindi ritenuta valida l'espressione:

$$\sim p_s/p_{me} \quad (1)$$

- la pressione effettiva di sovralimentazione prodotta dalla turbosoffiante viene assunta proporzionale al carico ed alla velocità del motore. E' anche questa una ipotesi semplificativa in relazione al gran numero di parametri coinvolti nel fenomeno (rendimento della turbosoffiante, coefficienti di efflusso in turbina, perdite di carico circuiti aria e gas, etc.) che risulta sufficientemente confermata in sede pratica.

Si ritiene valida pertanto la seguente relazione:

$$p_n/p_{no} = P_n \quad (2)$$

- Nella valutazione del grado di sovralimentazione, in prima approssimazione, si ritengono trascurabili le perdite di carico p all'aspirazione per cui si assume:

$$X = p_s/p_{amb} \quad (3)$$

Per il motore 2T si assumono le medesime condizioni, eccetto quella che lega tra loro la pressione effettiva di sovralimentazione ed il carico; le risultanze sperimentali, per il caso in questione, indicano piuttosto l'espressione:

$$p_n/p_{no} \sim P \quad (4)$$

Dalla proporzionalità tra momento motore e pressione media effettiva si può scrivere:

$$p_{me}/p_{me_o} \quad M = P/n \quad (5)$$

tra numero di giri e potenza, in cubica, vale l'espressione:

$$n = P^{1/3} \quad (6)$$

dalle definizioni di p_n e p_s e tenendo presente la (3) si ha:

$$X_o = p_{so}/p_{amb} \quad (7)$$

$$p_{no} = p_{so} - p_{amb} = p_{amb} (p_{so}/p_{amb} - 1) = p_{amb} (X_o - 1) \quad (8)$$

combinando le espressioni (5), (6) e (8) con la (2) (per il 4T) e con la (4) (per il 2T) si ottengono le seguenti equazioni:

$$p_{me}/p_{me_o} = P/n = P/P^{1/3} = P^{2/3} \quad (9)$$

per i 4T

$$p_n/p_{no} = P/n = P/P^{1/3} = P^{4/3}$$

$$\begin{aligned} p_s &= p_n + p_{amb} = p_{no} P^{4/3} + p_{amb} = \\ &= p_{amb} (X_o - 1) P^{3/4} + p_{amb} = \\ &= p_{amb} [1 + (X_o - 1) P^{4/3}] \end{aligned} \quad (10)$$

per i 2T

$$p_n/p_{no} = P$$

$$\begin{aligned} p_s &= p_n + p_{amb} = p_{no} P + p_{amb} = \\ &= p_{amb} (X_o - 1) P + p_{amb} = \\ &= p_{amb} [1 + (X_o - 1) P] \end{aligned} \quad (11)$$

dalla espressione (1), applicata al carico nominale ed a quello generico, si può scrivere:

$$\frac{p_s}{p_{so}} = \frac{p_s}{p_{me}} * \frac{p_{me_o}}{p_{so}} = \frac{p_s p_{me_o}}{p_{me} p_{so}} \quad (12)$$

dalla (12), attraverso le (7), (9), (10) e (11) si ottiene, infine:

per i 4T

$$\frac{p_s}{p_{so}} = \frac{1 + (X_o - 1) P^{4/3}}{X_o P^{2/3}} \quad (13)$$

per i 2T

$$\frac{p_s}{p_{so}} = \frac{1 + (X_o - 1) P}{X_o P^{2/3}} \quad (14)$$

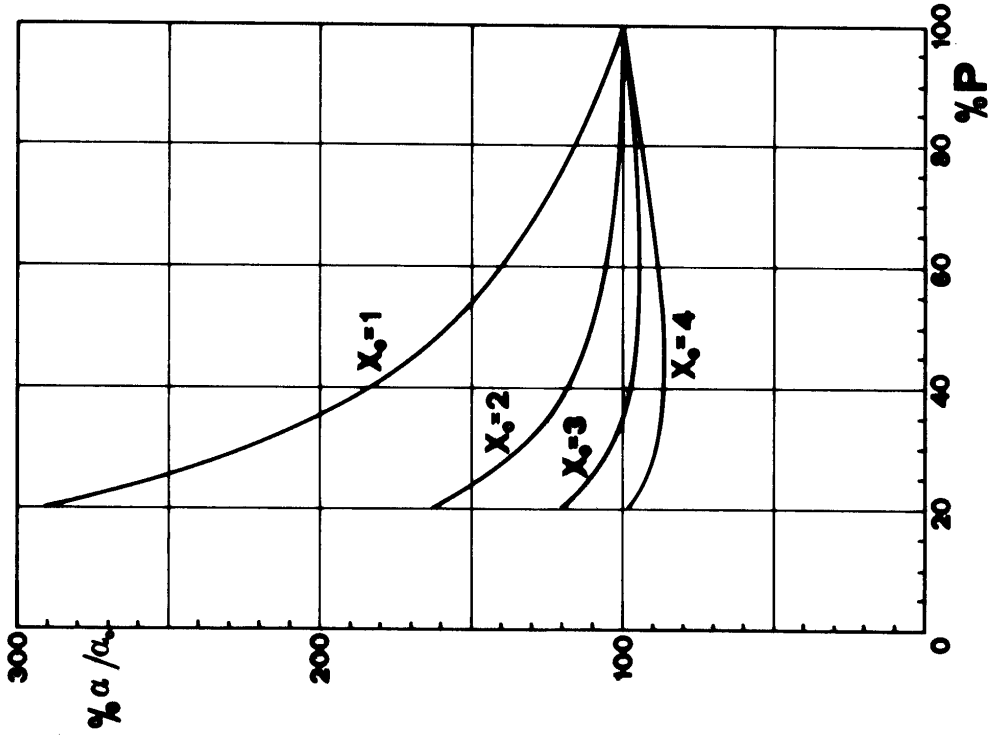


Fig. 2

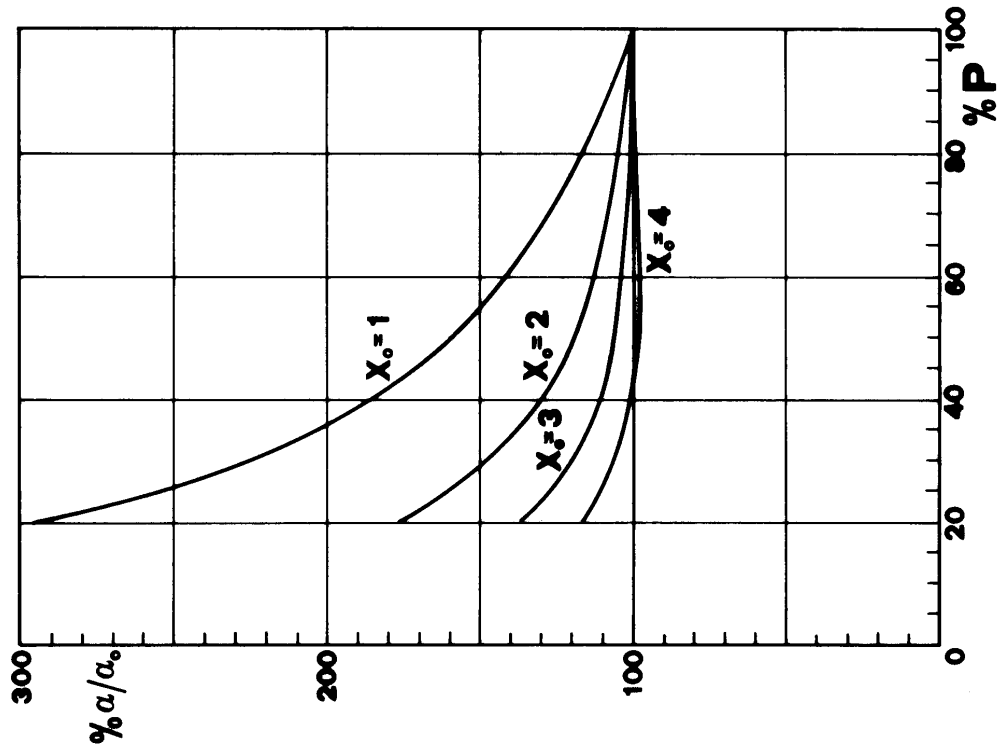


Fig. 3

I grafici nelle figg. 2 e 3 contengono, nel piano P, λ_0 (con entrambe le coordinate espresse in percentuale del loro valore nominale) le curve di livello ad X_0 costante, costruite con le relazioni (13) e (14), rispettivamente per motori 4T e 2T. Da essi si possono ricavare le seguenti considerazioni:

Motore 4T (fig 2)

- per $X_0 = 1$ (motore aspirato) il valore del rapporto λ_0 cresce al decrescere della frazione di potenza; ciò è in accordo con l'osservazione precedentemente evidenziata: il 4T aspirato non ha problemi nel funzionamento ai carichi parziali.
- All'aumentare del grado di sovralimentazione le curve si abbassano; da un certo valore di X_0 compreso tra 2 e 3, le curve $\lambda_0 = f(P)$ cominciano a presentare un tratto di valori inferiori a 100.
Ciò significa che, da quel valore del grado di sovralimentazione in poi, si ha un intervallo di erogazione della potenza in cui $\lambda_0 < 1$; in queste condizioni, essendo la pressione di sovralimentazione diminuita più della p_{me} sviluppata nel cilindro, non è possibile sostenere il corretto eccesso d'aria e quindi il funzionamento del motore avviene in condizioni di precaria alimentazione.
- Il "buco d'aria" diventa più esteso, in termini di intervallo di potenze coinvolto nel fenomeno, al crescere di X_0 , il che significa che il problema dei carichi parziali è tanto più sentito quanto più è alto il grado di sovralimentazione.

Motore 2T (fig. 3)

- L'andamento delle curve è molto più favorevole e presenta potenziali difetti di alimentazione d'aria per valori di X_0 molto più alti di quelli relativi al caso del 4T.

- I discostamenti dei valori di λ minori di 100 da quelli nominali sono inoltre molto modesti e non tali da generare grosse carenze d'alimentazione, come invece avviene nel 4T.

Il modello descritto ha il vantaggio di permettere una visione molto diretta dei complessi fenomeni che portano al difetto di alimentazione ai carichi parziali nei motori diesel ad alto grado di sovralimentazione impiegati nella propulsione navale. Va sottolineato che le risultanze di sperimentazioni effettuate sui motori in questione sono in sostanziale accordo con le indicazioni derivanti dall'elaborazione analitica esposta.

Conseguenze del funzionamento ai bassi carichi e rimedi adottati

Quando un motore 4T è sovralimentato con rapporto X_0 prossimo a 3 (come è il caso di molti diesel di produzione attuale), si creano condizioni di carenza di alimentazione, per cui, ad una certa frazione del carico nominale (dipendente dal grado di sovralimentazione ed in genere prossima al 40%), in cubica, si ha un picco di temperature che può anche provocare all'interno dei cilindri surriscaldamenti inammissibili per il buon funzionamento del motore. Pertanto i motori esposti a questi rischi devono essere dotati di sistemi atti a limitare le temperature di esercizio.

Si vuole mettere in evidenza il fatto che i problemi suddetti sono tutti dovuti al funzionamento in cubica: in fig. 4 si riporta l'andamento qualitativo delle temperature medie in camera di combustione in funzione del carico al motore.

Se (curva 1) il motore è caricato in modo proporzionale (come può avvenire durante le prove al freno od in altre applicazioni del diesel) la temperatura in camera di combustione decresce (ed in modo pressoché lineare) con il numero di giri, per cui, ai regimi parziali non si pone alcun problema essendo i livelli di temperatura più favorevoli che a pieno carico.

La situazione cambia sensibilmente (curva 2) quando il carico segue la legge cubica.

Per limitare i rischi di danni causati dal funzionamento ai bassi carichi si può operare in vari modi: la turbina del

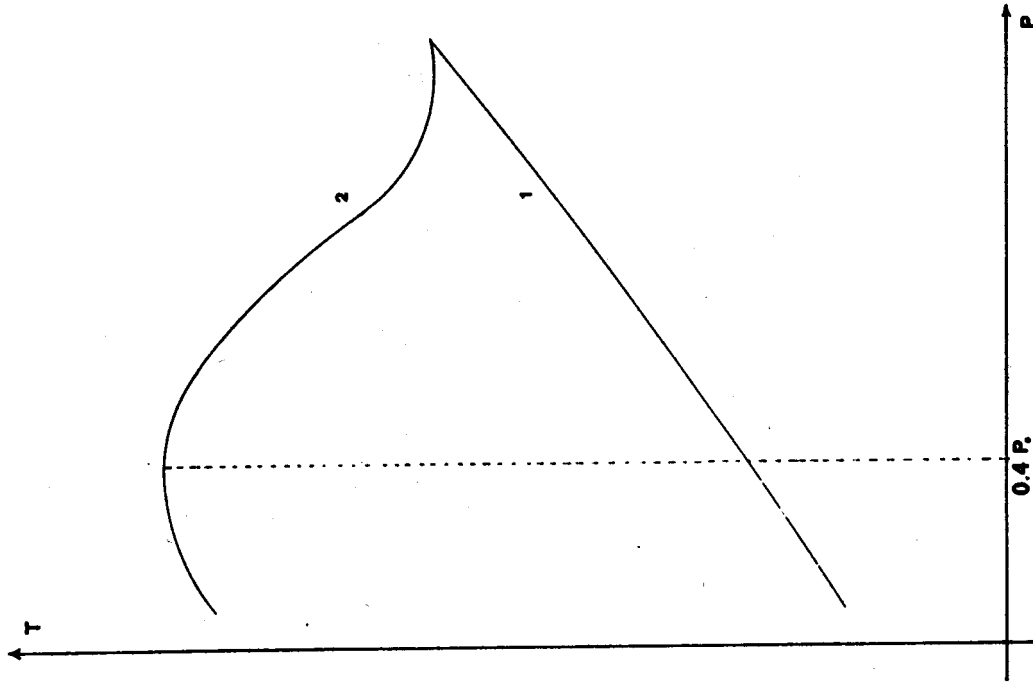


Fig. 4

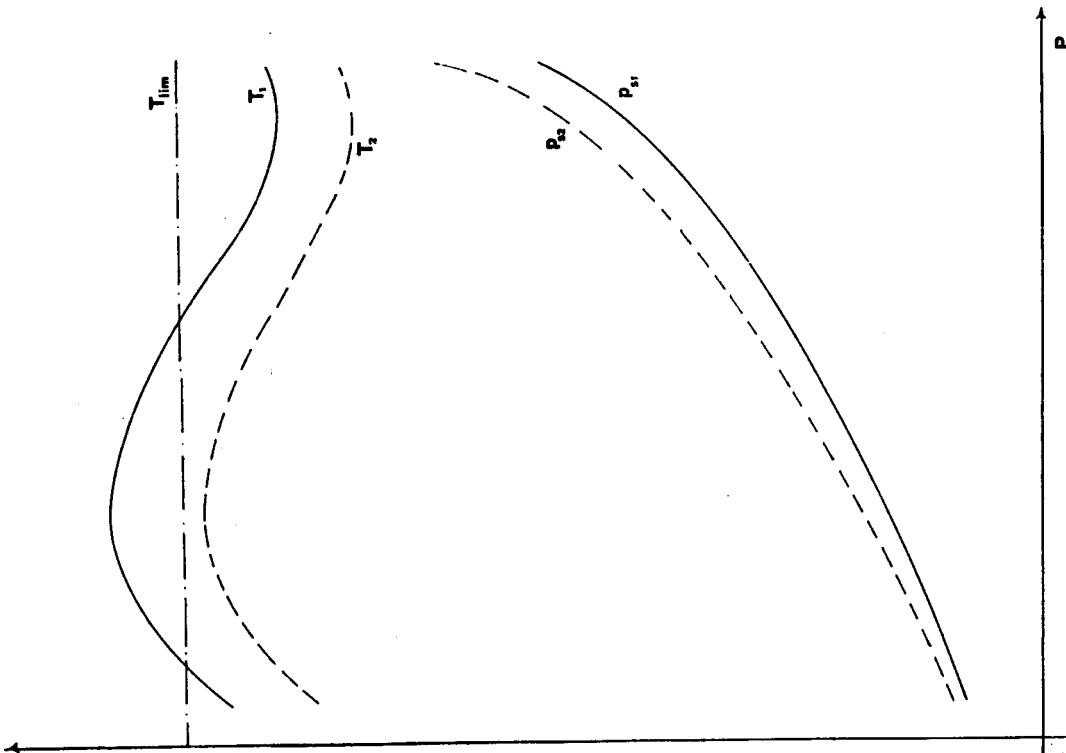


Fig. 5

sovralimentatore può essere progettata in modo tale da realizzare pressioni più elevate (p_{s2}) di quelle che si avrebbero (p_{s1}) con un turbocompressore capace di fornire, al carico nominale, la sola pressione di progetto. Essendo il motore alimentato a pressione maggiore ad ogni carico (fig. 5) si otterrà una più conveniente distribuzione di temperatura (T_2). Se con l'andamento delle pressioni descritto dalla curva p_{s1} si superava la temperatura limite ammissibile per il motore, in questo modo si è ridotto il rischio di sottoporre gli organi a sollecitazioni termiche eccessive.

Sorge però il problema di avere un eccesso d'aria di combustione indesiderato se non previsto perché porta le pressioni in gioco a valori maggiori di quelli di calcolo.

Per porre rimedio a questo inconveniente si può adottare una valvola WASTE-GATE tarata alla pressione massima del ciclo (fig. 6) la quale, dal carico P^* corrispondente alla pressione nominale, estrae aria dalla aspirazione o gas combusti dallo scarico in modo da limitare la pressione di sovralimentazione al valore di progetto. Il diagramma delle temperature segue così una legge più favorevole fino a P^* per poi, al carico di progetto, raggiungere la temperatura che si sarebbe avuta utilizzando un distributore capace di fornire al carico nominale la pressione nominale di esercizio.

L'aspetto più negativo dell'adozione della valvola WASTE-GATE consiste nella perdita di una parte di energia (sotto forma di pressione) che non viene utilizzata nella turbina la quale non potrà pertanto funzionare in condizioni di massimo rendimento. Se però si fa confluire il gas in eccesso in una turbinetta collegata tramite un riduttore di giri alla linea d'assi, si ottiene un recupero di energia; questo dispositivo (generalmente denominato "turbina di potenza" o "turbocompound" o "eta booster") permette un incremento della potenza massima del motore (che può arrivare, in certe applicazioni, anche a valori dell'ordine del 3%) o rendimenti migliori a parità di potenza. A tal riguardo c'è da aggiungere che la messa a punto di questo sistema ha addirittura motivato l'incremento della tecnologia delle turbosoffianti. Per ottenere le pressioni massime attuali, può essere sufficiente un rendimento di sovralimentazione pari a circa $0.60 \div 0.65$.

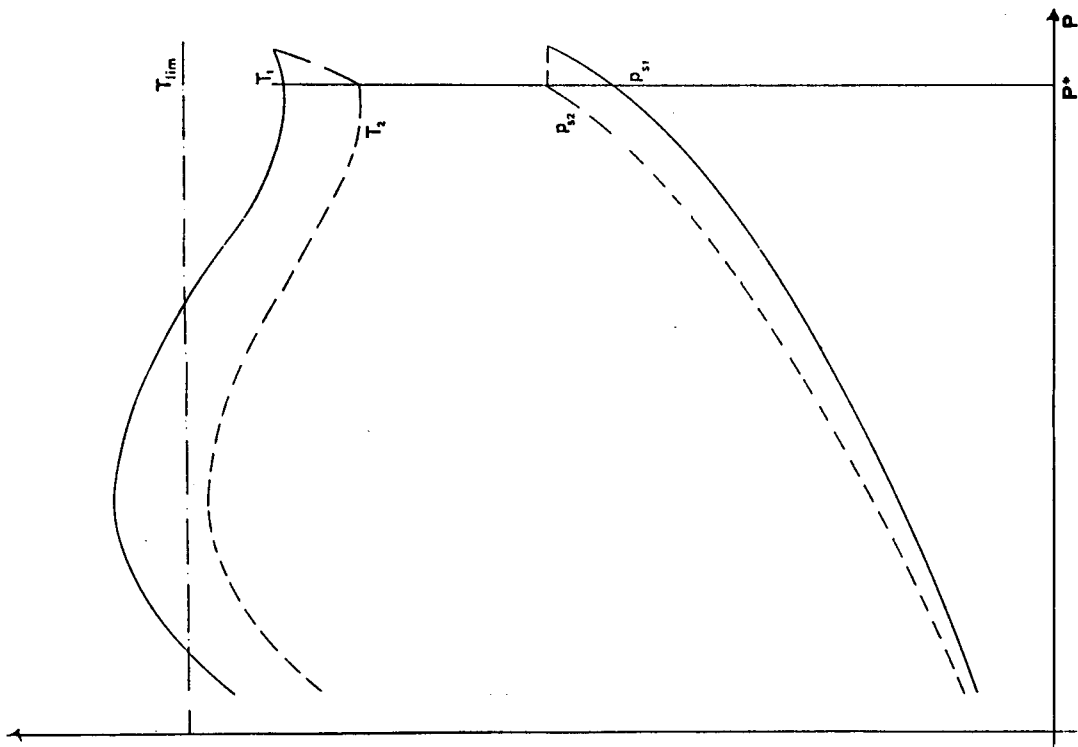


Fig. 6

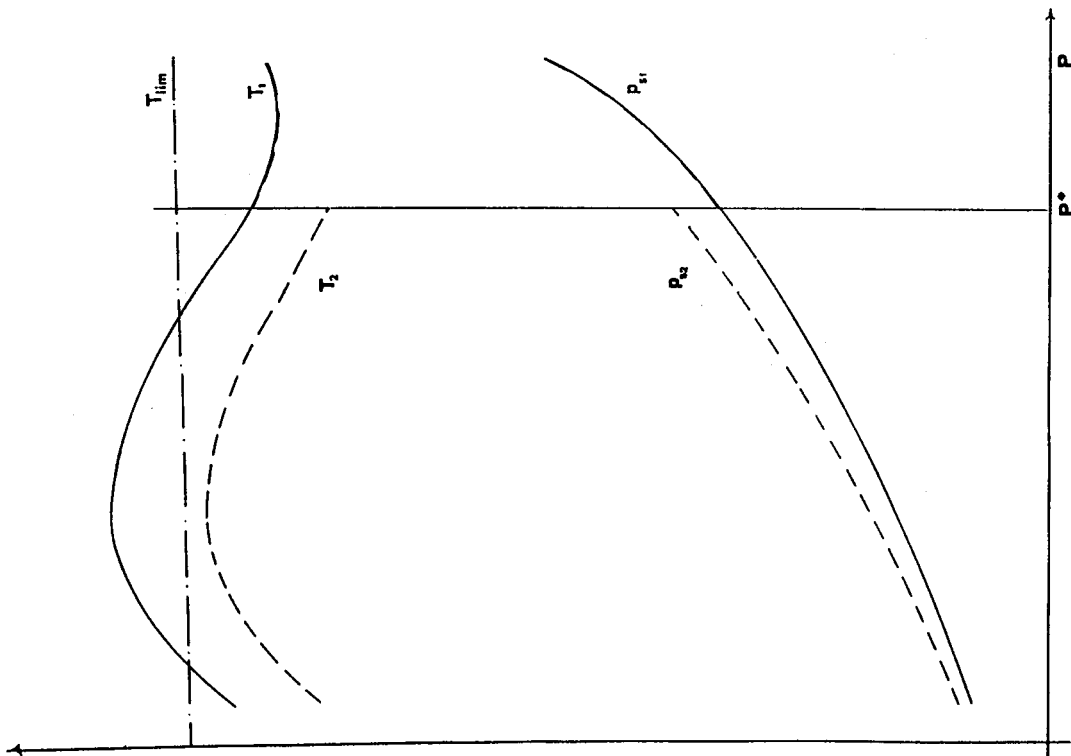


Fig. 7

La tecnologia della sovralimentazione è oggi in grado di permettere la produzione di turbosoffianti aventi rendimenti prossimi allo 0.75. Le pressioni teoricamente raggiungibili con questi rendimenti sono, dunque, più alte di quelle necessarie al ciclo per cui c'è un surplus di pressione che, se inviato alle turbine di potenza, permette di realizzare un recupero di energia; ciò giustifica l'adozione di un sovralimentatore a rendimento più elevato di quello che sarebbe stato sufficiente a garantire la sola alimentazione d'aria al motore.

Il sostenimento della pressione di alimentazione ai carichi parziali si può ottenere anche attraverso la parzializzazione della turbina (fig. 7). L'aumento della pressione ai bassi regimi è ottenuto senza cambiare la geometria della turbosoffiante ma facendo in modo che per carichi minori di P^* l'ammissione in turbina avvenga soltanto attraverso parte degli ugelli disponibili. La pressione misurata all'ingresso della girante risulterà così più alta di quella che si sarebbe ottenuta con l'ammissione totale.

Da P^* in poi viene invece ripristinata l'ammissione totale ed il diagramma delle temperature torna ad essere quello che si aveva in assenza di parzializzazione.

Questo dispositivo ha il grosso svantaggio di mettere la turbina in precarie condizioni di esercizio in quanto, se l'ammissione non è completa, il carico sulla girante della turbina è applicato in maniera non uniforme e la rotazione della girante può avvenire in situazione di squilibrio dinamico.

Dal punto di vista delle pressioni in gioco, stessa situazione si ha nel caso della cosiddetta sovralimentazione sequenziale ove al posto della parzializzazione della singola turbina si fa in modo da escludere le turbine presenti una per volta al ridursi del carico. Così facendo le turbine attive sono sollecitate meccanicamente sempre in modo corretto e tutta l'energia dei gas di scarico viene utilizzata al meglio. Lo svantaggio di questo dispositivo è nelle complicazioni costruttive che sorgono in un impianto in cui si devono far confluire i gas di scarico ora in una turbina ora in altre.

Altro sistema adottato per scavalcare l'insufficienza d'aria ai carichi parziali è quello di dotare il motore di un ventilatore

azionato elettricamente, in modo da realizzare una situazione simile a quella descritta in fig. 5.

Con questo sistema occorre installare una macchina ingombrante che, tra l'altro, funziona non gratuitamente o recuperando energia altrimenti dissipata ma a spese del sistema di produzione di energia elettrica a bordo. Peraltro l'elettrosoffiante è praticamente sempre presente sui motori 2T che, come accade per tutti quelli di recente sviluppo, non sono dotati di pompe di lavaggio; infatti, all'avviamento, il 2T non è autosufficiente dal punto di vista del lavaggio e si richiede un compressore ausiliario che garantisca, in quelle circostanze, l'alimentazione d'aria ai cilindri.

Sulla carta, per superare il problema dei carichi parziali si potrebbe ricorrere a turbine a geometria variabile; al momento attuale già alcune case costruttrici di turbocompressori hanno in listino sovralimentatori dotati di tale dispositivo.

Va detto comunque che sembra difficile ottenere il risultato cercato attraverso l'ottimizzazione della sola turbina: occorrerebbe adattare alle condizioni di funzionamento del motore (in termini di contenuto energetico dei gas di scarico, loro velocità, numero di giri del motore etc.) anche la girante del compressore, operazione che si presenta assai ardua date le caratteristiche costruttive dello stesso.

L'ottimizzazione è dunque incerta ed ancor più problematiche si presentano le condizioni di lavoro in quanto, se si rende mobile il diffusore, si creano inevitabilmente dei giochi tra le parti in movimento e quelle fisse con conseguente netto peggioramento del rendimento di turbocompressione. Inoltre il funzionamento a nafta pesante (che è largamente diffuso nei diesel di grande diametro) diventa pressoché proibitivo per lo sporco che le sostanze presenti in quei combustibili generano già dopo poche ore di funzionamento, causando la compromissione del delicato meccanismo di rotazione del distributore della turbina.

Conclusioni

La spinta all'aumento delle prestazioni dei motori diesel 2T e 4T ha permesso forti innalzamenti dei rendimenti e delle potenze specifiche ottenibili dalle singole unità ma ha generato, nel contempo, il problema del funzionamento ai carichi minori di quello nominale.

Tanto più spinta è la sovralimentazione tanto più forte è la carenza di alimentazione d'aria al motore in cubica e, in definitiva, tanto più ridotti risultano gli intervalli dei carichi in cui il motore funziona in modo accettabile.

Il fenomeno può essere interpretato, sul piano analitico, attraverso le espressioni (13) e (14) che ne descrivono in modo molto semplice le caratteristiche salienti sulla base di alcune ipotesi iniziali tratte dall'analisi del funzionamento ai carichi parziali del motore diesel ad alto grado di sovralimentazione.

Stampato a cura del Dipartimento di Ingegneria
Navale dell'Università degli Studi di Napoli

Napoli, Dicembre 1989