

ACCADEMIA NAVALE
1° ANNO CORSO APPLICATIVO GENIO NAVALE

CORSO DI
IMPIANTI DI PROPULSIONE NAVALE

Lezione 08

Motori a combustione interna

parte D

A.A. 2011 /2012

Prof. Flavio Balsamo

Motori a combustione interna

Lubrificazione

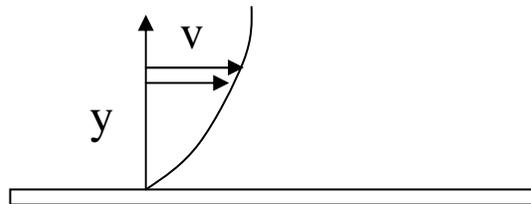
In tutte le macchine costituite da parti in moto relativo è necessario ridurre la presenza delle forze di attrito; queste infatti, oltre a costituire una importante fonte di dissipazione di energia, causano anche il danneggiamento della macchina.

L'attrito si manifesta con l'insorgere di una forza tangenziale che si oppone al moto che dipende dalla componente ortogonale alle superfici della forza applicata.

$$F_t = f F_N$$

Il coefficiente di attrito dipende dalla presenza o meno di una sostanza viscosa tra le due superfici e dal moto relativo delle due superfici.

Infatti nel caso di un fluido viscoso nasce uno sforzo tangenziale proporzionale al gradiente di velocità lungo la componente ortogonale alla superficie, che si oppone al moto



$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

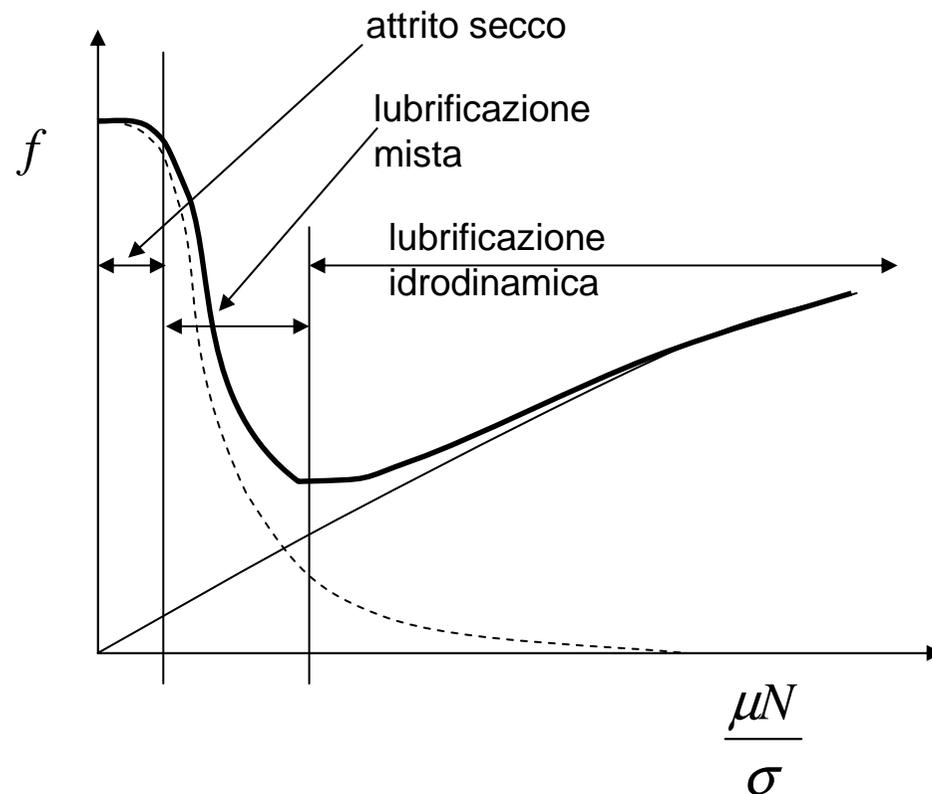
Motori a combustione interna

Lubrificazione

Nel caso di contatto diretto tra le superfici si parla di attrito secco, nel caso in cui esiste un film di sostanza lubrificante in grado di trasmettere la componente ortogonale si parla di lubrificazione idrodinamica. Tra le due condizioni si considera un regime intermedio.

Nel caso di un albero ruotante in un cuscinetto, il coefficiente di attrito f viene individuato tramite il diagramma di Stribeck, che lo esprime in funzione di un coefficiente adimensionale che tiene conto della viscosità, della velocità di rotazione dell'albero e della forza di accoppiamento.

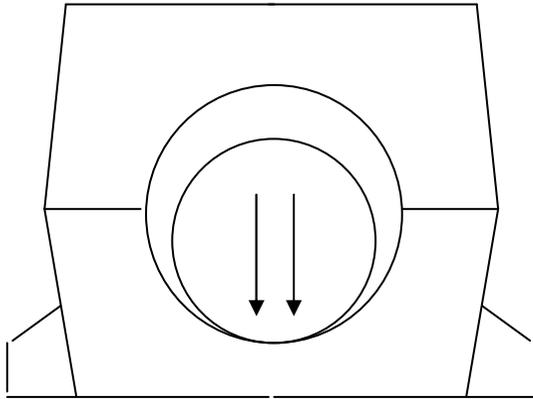
Ad ognuna delle diverse zone del diagramma corrisponde un diverso meccanismo di attrito.



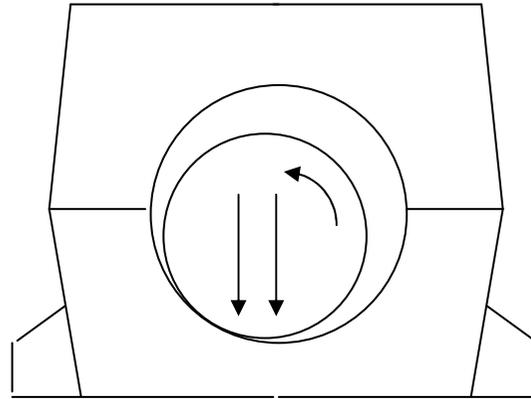
Motori a combustione interna

Lubrificazione

La presenza o meno della giusta quantità di olio determina il differente comportamento dell'asse nel cuscinetto; nel terzo caso l'asse è supportato dalla pressione idrodinamica creata dall'olio

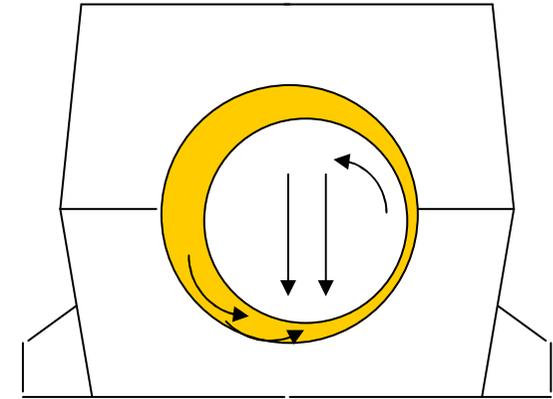


asse fermo



asse in moto

mancanza di olio,
oppure olio
inadeguato, il
velo si rompe



asse in moto

presenza di olio
dalle giuste
caratteristiche

Motori a combustione interna

Lubrificazione

Molti sono gli organi che necessitano di lubrificazione;

Scorrimento pistone – cilindro; il contatto avviene tramite le fasce elastiche

Cuscinetti di banco (supporti dell'albero a manovella)

Cuscinetti di testa e piede di biella

Albero a camme

Ruote della distribuzione

Punterie e valvole

Gruppo turbocompressore

Oltre a ridurre gli attriti tra le parti in movimento, l'olio di lubrificazione svolge anche numerosi altri compiti

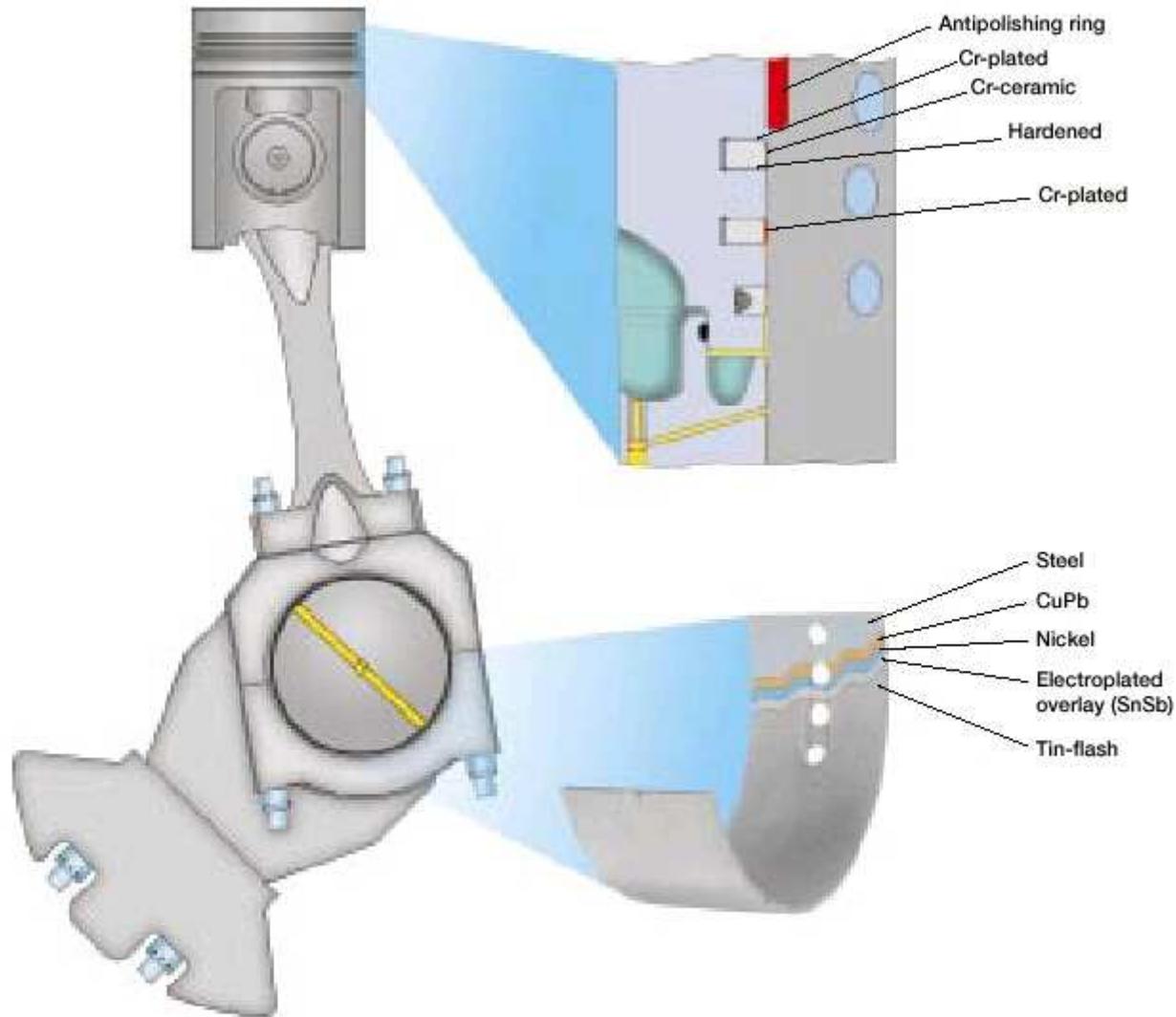
Raffreddare cuscinetti, pistoni etc.

Evitare la corrosione delle parti metalliche

Inglobare ed assorbire residui di combustione, sostanze contaminanti e particelle solide, che verranno poi allontanate definitivamente tramite i filtri che sono sempre installati

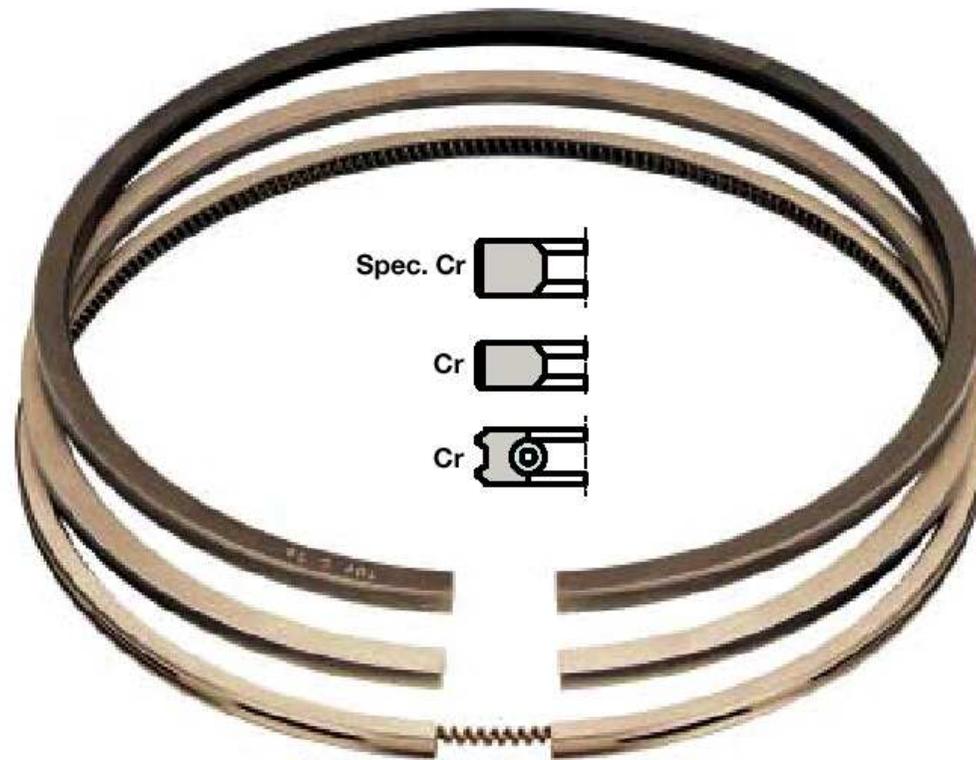
Motori a combustione interna

Lubrificazione



Motori a combustione interna

Lubrificazione



Motori a combustione interna

Lubrificazione

L'olio è quindi ottenuto da una sostanza base che può essere derivata dal petrolio o sintetica e da una serie di additivi atti a conferirgli le proprietà richieste, quali al viscosità,

Tra i principali additivi sono presenti sostanze detergenti, disperdenti, antiossidanti, agenti antiusura e sostanze per ottenere la richiesta alcalinità.

Infatti una delle caratteristiche principali è l'indice che misura l'alcalinità dell'olio, detto TBN, Total Base Number.

Per i motori che bruciano combustibili ad alto tenore di zolfo, i composti della combustione danno luogo alla contaminazione acida dell'olio, in particolare nella zona della camera di combustione attraverso le fasce elastiche.

Una importante caratteristica dell'olio deve essere anche quella di mantenere, per quanto possibile, inalterate le sue proprietà anche al variare della temperatura.

Motori a combustione interna

Raffreddamento

Durante il funzionamento del motore si generano sollecitazioni notevoli, in particolare su tutti gli organi in movimento ma non solo.

Alcune di queste parti sono soggette anche ad una elevata temperatura, che causa una diminuzione delle proprietà di resistenza meccanica del materiale.

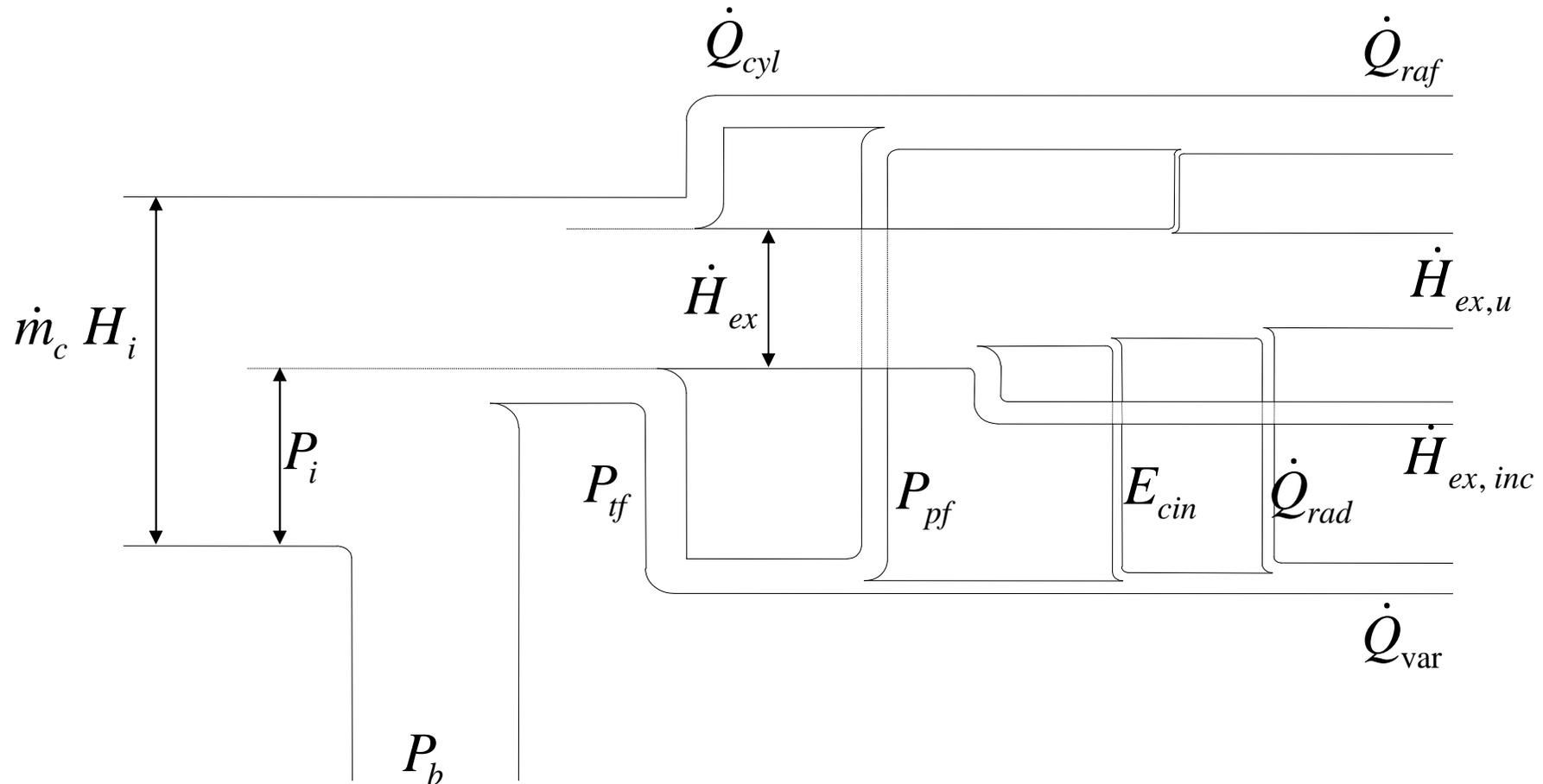
Si rende quindi indispensabile provvedere alla sottrazione del calore trasmesso dal fluido alle strutture del motore, per evitare che un eccessivo incremento di temperatura ne causi il cedimento.

L'effetto della temperatura non causa solo problemi strutturali ma anche il decadimento delle proprietà dei lubrificanti utilizzati per ridurre gli attriti tra le parti in moto relativo, con conseguente pericolo di grippaggio, ovvero contatto diretto metallo-metallo.

Nella figura a lato è mostrato l'effetto di sollecitazioni termiche eccessive su pistoni e testate.



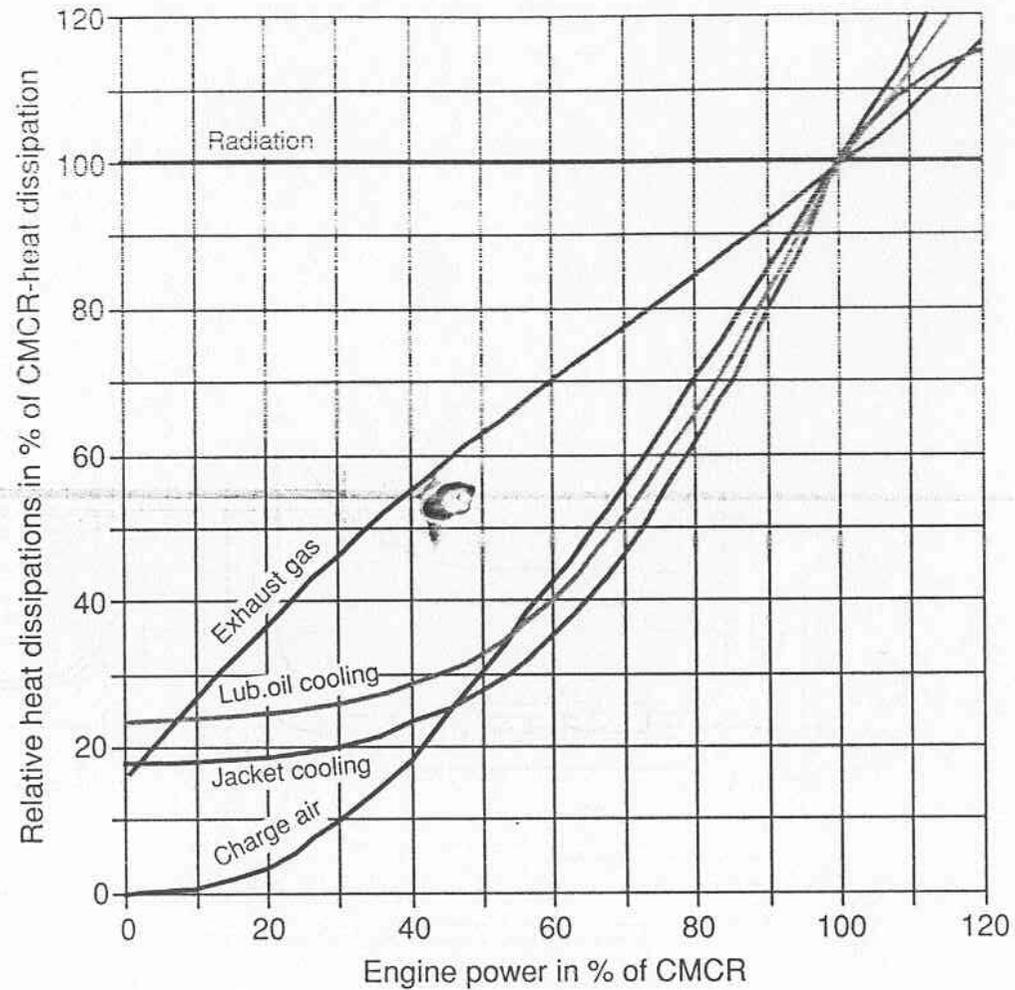
Motori a combustione interna



Nella figura si vede la suddivisione dell'energia contenuta inizialmente nel combustibile nelle varie forme, tra cui la potenza utile P_b e il calore che è necessario sottrarre \dot{Q}_{raf} .

In particolare si nota come il calore che è necessario sottrarre proviene dall'energia ceduta alle pareti del cilindro dal fluido nelle varie fasi, dall'attrito del pistone e dal calore che è necessario sottrarre ai gas di scarico.

Motori a combustione interna



La figura mostra la variazione percentuale della quantità di calore dissipata in funzione della potenza erogata dal motore. Nel dimensionare le parti bisogna tener conto anche del funzionamento ai carichi parziali.

Motori a combustione interna

Raffreddamento

La trasmissione del calore avviene, come è noto, secondo tre meccanismi fondamentali, la conduzione, la convezione e l'irraggiamento.

La quantità di calore scambiata per convezione è proporzionale alla differenza di temperatura tra fluido e parete

$$\dot{q}_{conv} = h_c (T - T_p)$$

Poiché la quantità di calore scambiato dipende dalle caratteristiche del fluido ma anche dalla sua velocità e dal tipo di moto, il coefficiente di trasmissione si ottiene con relazioni del tipo

$$\frac{h_c D}{k} = 0.023 \cdot \left(\frac{v D}{\mu} \right)^{0.6} \cdot \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)^{0.4}$$

Quella proposta è valida per condotti dritti in moto turbolento, in cui k è il coefficiente di conducibilità del fluido, v la velocità, μ la viscosità, c_p il calore specifico e D una dimensione caratteristica.

I gruppi adimensionali al primo e secondo membro sono rispettivamente il numero di Nusselt, che esprime il termine di trasmissione del calore, il numero di Reynolds, che individua il tipo di moto del fluido ed il numero di Prandtl, che tiene conto delle proprietà termiche del fluido.

Motori a combustione interna

Raffreddamento

La conduzione interviene invece quando le parti sono a differenti temperature ma a contatto; è il meccanismo con cui il calore dalla pareti del cilindro viene trasmesso a tutta la struttura del motore.

$$\dot{q}_{cond} = k (T_1 - T_2)$$

ove k è il coefficiente di conducibilità termica

Il calore può essere trasmesso anche per irraggiamento, ed è funzione della quarta potenza della temperatura.

$$\dot{q}_{irr} = k_B (T_1^4 - T_2^4)$$

Dall'esame del diagramma di flusso appare che l'energia contenuta nel combustibile prima dell'ingresso nel motore venga suddivisa nella potenza al freno P_b , in una aliquota contenuta nei gas di scarico sia come entalpia che come energia residua delle frazioni eventualmente incombuste, in un termine vario (irraggiamento, attrito, etc) ed infine in calore sottratto al motore dai vari fluidi

$$\dot{m}_c H_i = P_b + (\dot{H}_{ex,u} + \dot{H}_{ex,inc}) + \dot{Q}_{var} + \dot{Q}_{raf}$$

È possibile esprimere la quantità di calore sottratta con il raffreddamento come una percentuale di quella totale

$$\dot{Q}_{raf} = x \dot{m}_c H_i$$

Motori a combustione interna

Raffreddamento

Poiché la portata di combustibile è pari al prodotto della potenza per il consumo specifico, si può scrivere

$$\dot{Q}_{raf} = x \dot{m}_c H_i = x c_s P H_i$$

il che significa che a regime una aliquota di energia dovrà essere sottratta e ceduta ad un fluido refrigerante per cui, assegnata una differenza di temperatura ed un certo valore della capacità termica del fluido, dovrà fluire una certa portata.

$$\dot{m}_{f,r} = \frac{x c_s P H_i}{c_m (T_{out} - T_{in})}$$

Gli organi che hanno necessità di essere raffreddati sono i cilindri e le testate, eventualmente la turbina e l'aria a valle del compressore, i pistoni, i cuscinetti ed i polverizzatori.

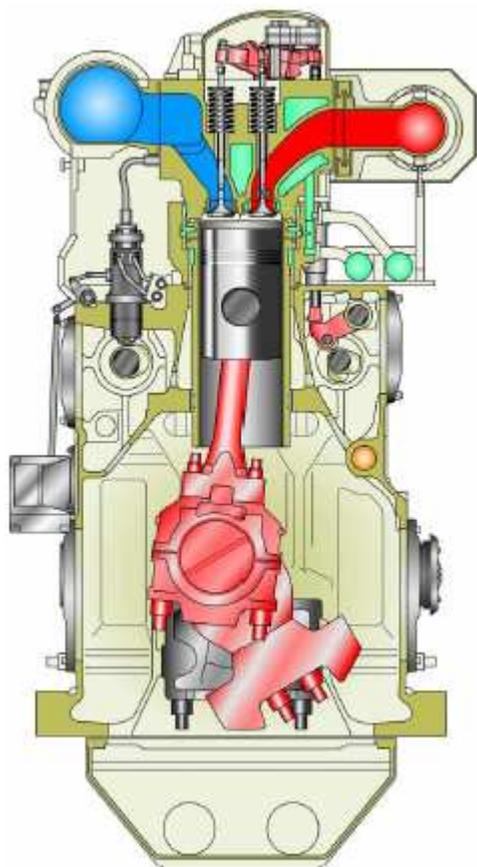
Per non essere costretti a portate molto grandi e a grandi superfici di scambio è preferibile che il fluido sia dotato di una grande capacità termica, per cui si usa generalmente acqua dolce.

Per alcuni componenti, quali i pistoni ed i polverizzatori, l'utilizzo dell'acqua pone seri problemi di sicurezza; ad esempio in caso di perdite, si potrebbero avere inquinamenti dell'olio

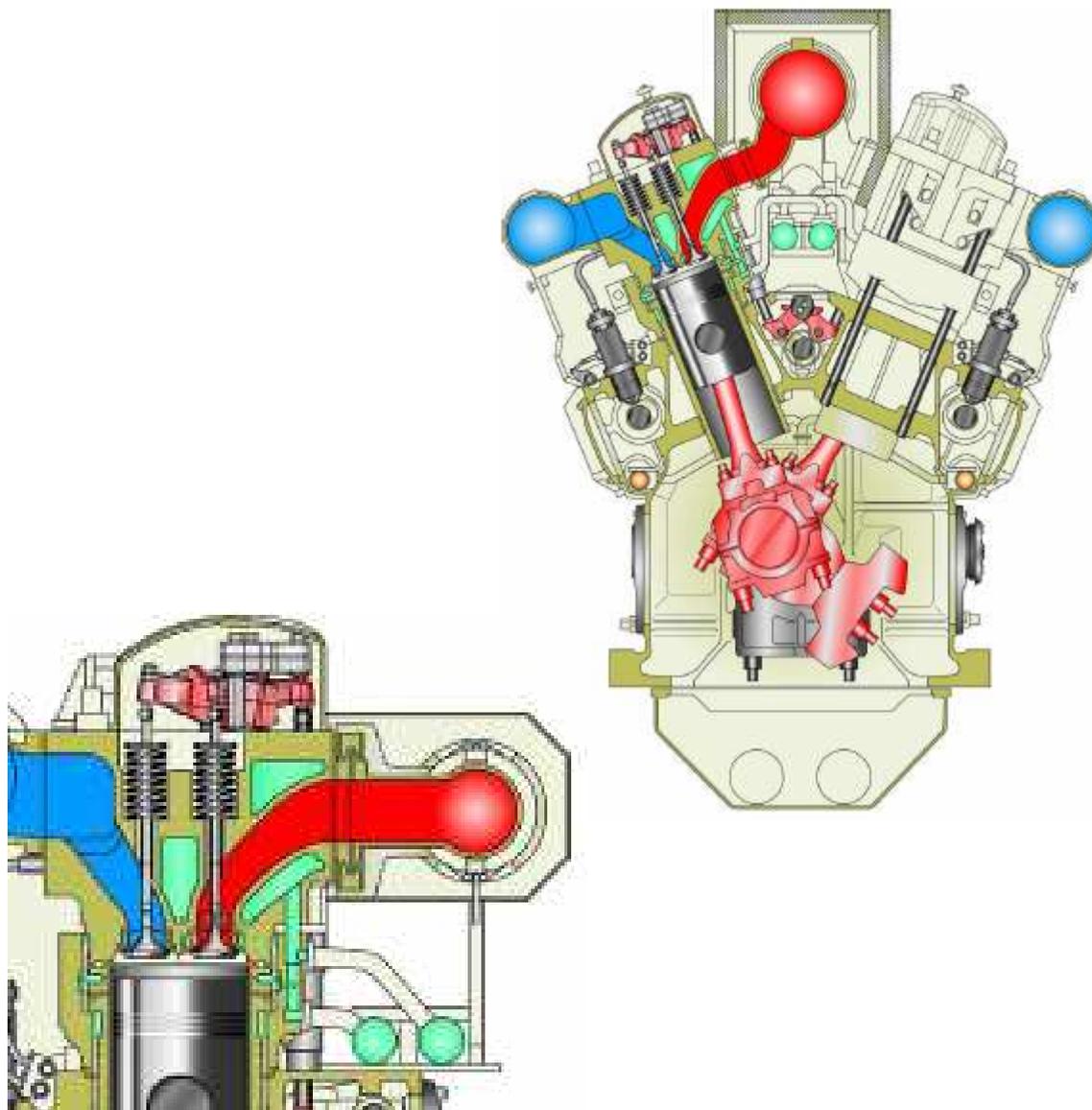
Si preferisce allora utilizzare nel caso dei pistoni l'olio di lubrificazione e nel caso dei polverizzatori lo stesso combustibile, che le pompe di alimento fanno circolare in quantità superiori a quella massima richiesta dal motore.

Per dissipare l'energia raccolta dai fluidi refrigeranti è necessario prevedere degli opportuni scambiatori sia per l'acqua che per l'olio, ed in alcuni casi anche per il combustibile.

Motori a combustione interna



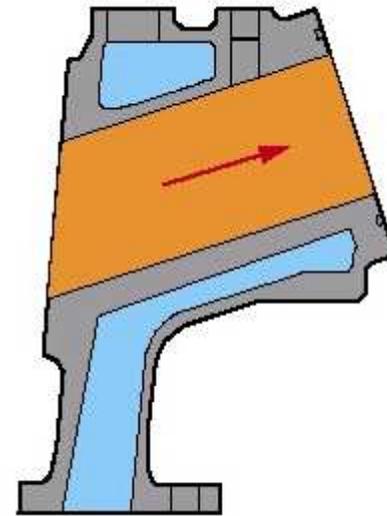
Dettaglio condotti di raffreddamento ad acqua della testata di un motore a quattro tempi



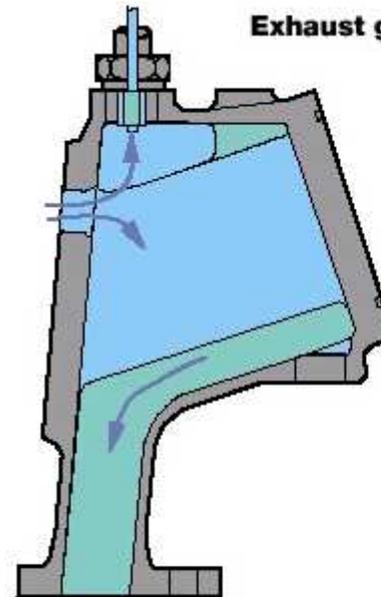
Motori a combustione interna



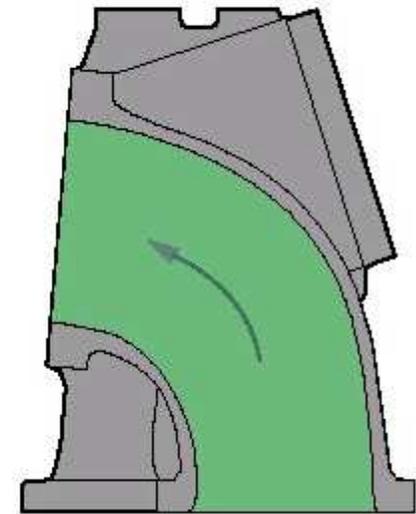
Esempio di raffreddamento della testata di un motore a quattro tempi



Exhaust gas

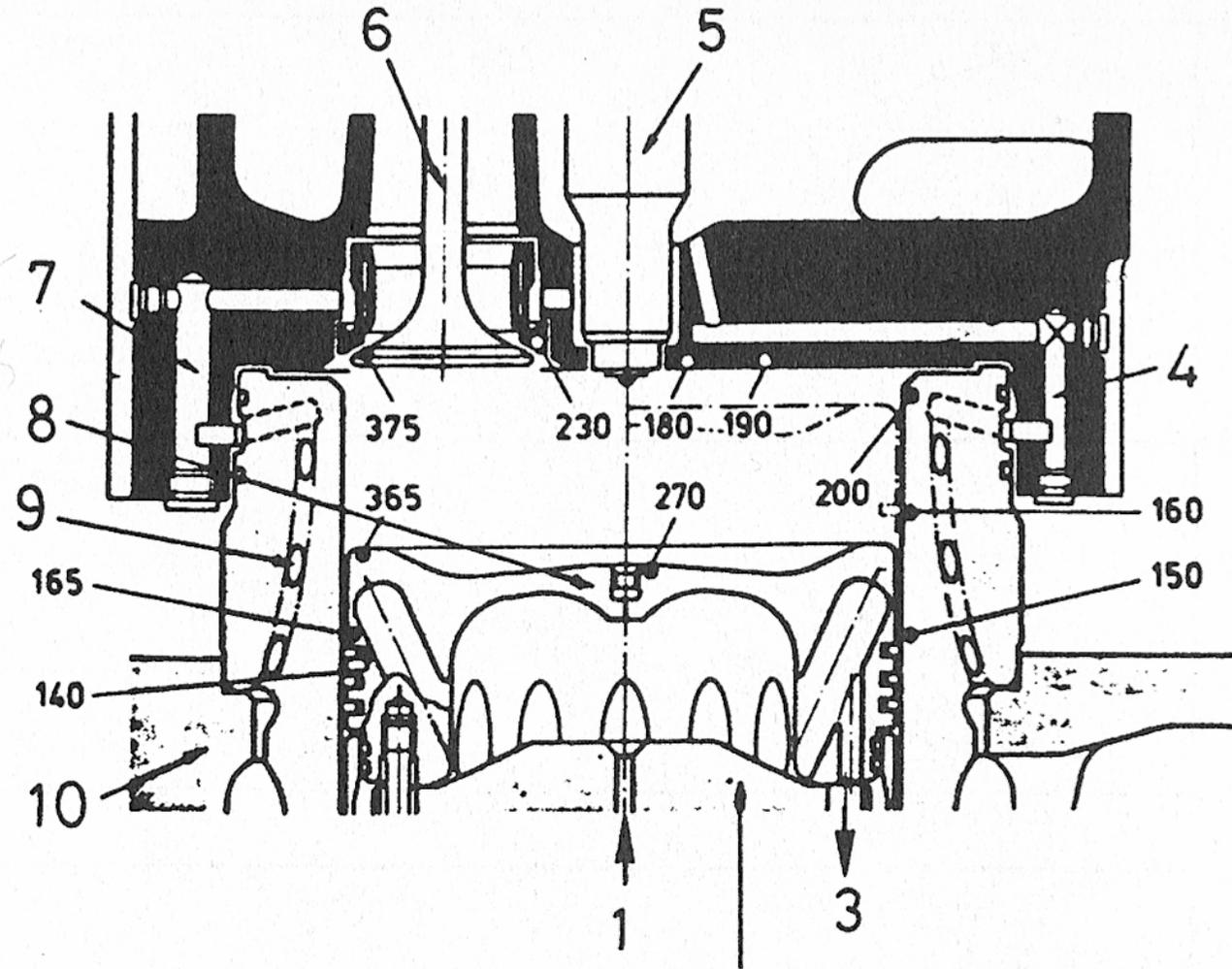


Cooling water



Charge air

Motori a combustione interna

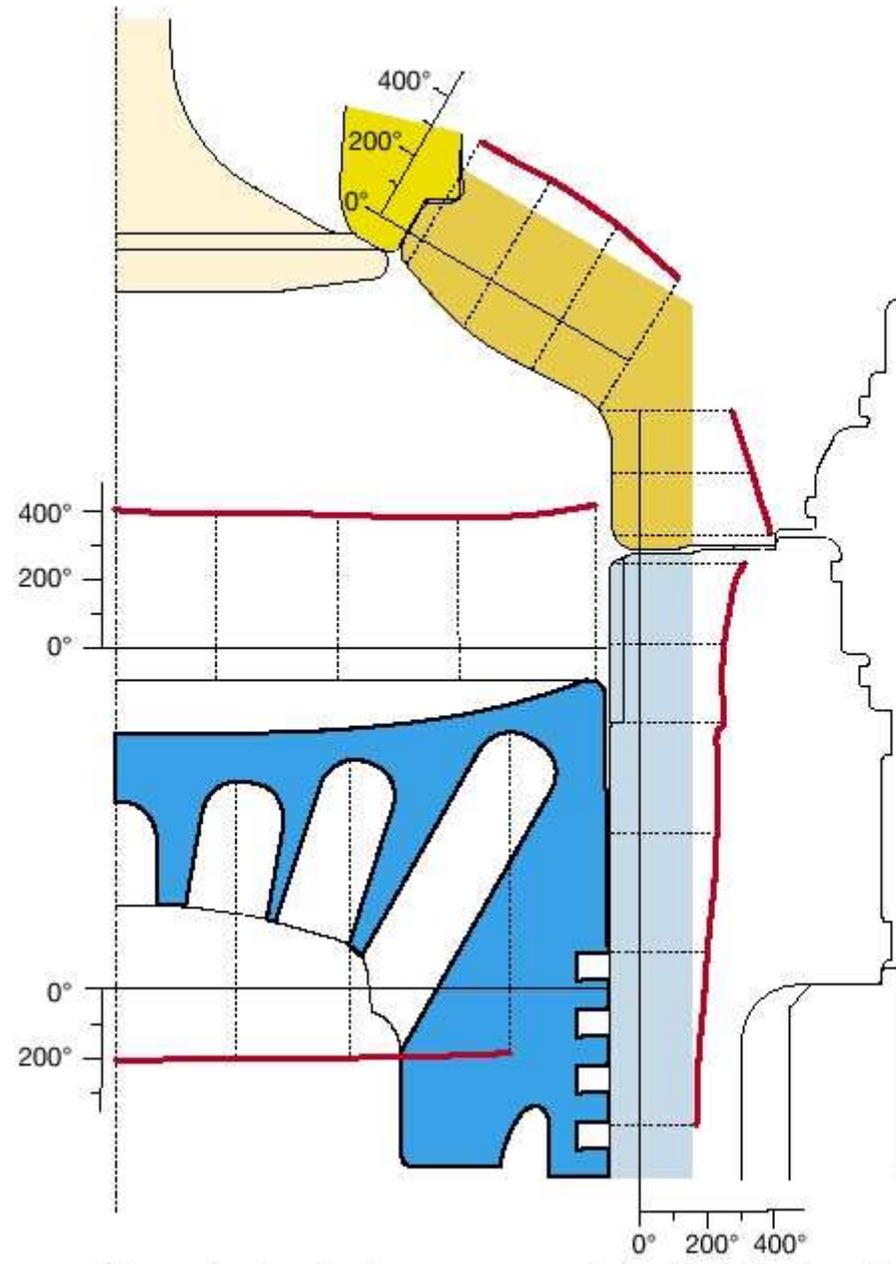


Andamento delle temperature sulle pareti della camera di combustione di un motore a quattro tempi (Sulzer ZA40)

$P = 660 \text{ kW/cilindro}$; $n = 600 \text{ giri/min}$; $p_{me} = 21,9 \text{ bar}$.

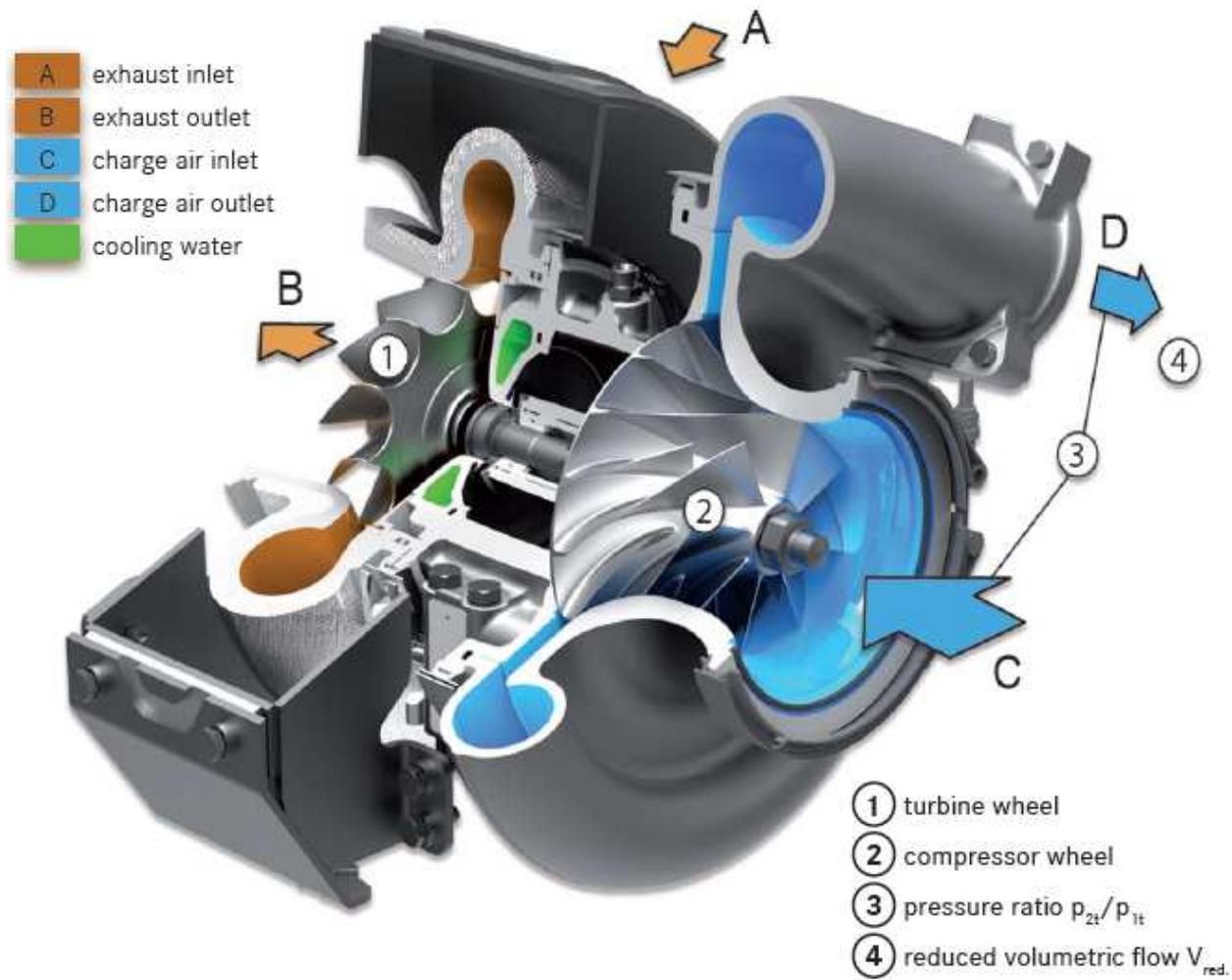
1. Ingresso olio raffreddamento pistone; 2. Mantello del pistone; 3. Uscita olio raffreddamento pistone; 4. Acqua raffreddamento testata bore cooled; 5. Inietttore; 6. Valvola di scarico; 7. Acqua raffreddamento sede valvola di scarico; 8. Corona del pistone in acciaio legato raffreddato con sistema bore cooling; 9. Passaggio acqua raffreddamento canna cilindro; 10. Involucro cilindro.

Motori a combustione interna



Andamento delle temperature sulle pareti della camera di combustione di un motore a due tempi

Motori a combustione interna



Raffreddamento del gruppo turbo compressore

Motori a combustione interna

Raffreddamento

Dagli esempi mostrati si nota come il raffreddamento della testata, della camicia e del turbocompressore venga realizzato ad acqua dolce. Il percorso è stabilito dal progettista del motore in maniera che l'acqua in ingresso, a temperatura inferiore venga a contatto prima con le parti meno calde e successivamente raggiunga le zone del motore a più alta temperatura, in maniera che ci sia sempre un gradiente termico vantaggioso

Nei motori a quattro tempi il raffreddamento del pistone, che pure è soggetto nella parte superiore a temperature elevate, si ottiene facendo circolare olio, che viene utilizzato anche per la lubrificazione delle parti mobili. La pompa di lubrificazione trascinata dal motore aspira olio dal carter e lo manda ai cuscinetti di banco, dai quali raggiunge la testa di biella attraverso dei fori realizzati nell'albero a manovella. Un ulteriore condotto realizzato nella biella conduce l'olio al piede di biella e da lì raggiunge il pistone. In questo percorso l'olio oltre al raffreddamento esegue anche la funzione di lubrificazione dei cuscinetti di banco, del cuscinetto della testa di biella ed infine di quello del piede di biella. Dalla testa del pistone l'olio ricade nel carter.

Va sottolineato come l'olio sia meno efficace dell'acqua per sottrarre calore, dato che possiede una capacità termica minore. A parità di calore da sottrarre è quindi necessaria una superficie di scambio maggiore e una maggiore portata.

Tra le fasi di sviluppo di un nuovo motore vi è spesso la modifica dei condotti di raffreddamento per migliorare lo scambio termico, ad esempio riducendo le dimensioni delle forature. In tale maniera si incrementa la potenza specifica mantenendo inalterata l'affidabilità dei componenti.

Motori a combustione interna

Raffreddamento

Negli schemi che seguono viene proposto lo schema dell'impianto acqua dolce di raffreddamento di motori semiveloci e veloci.

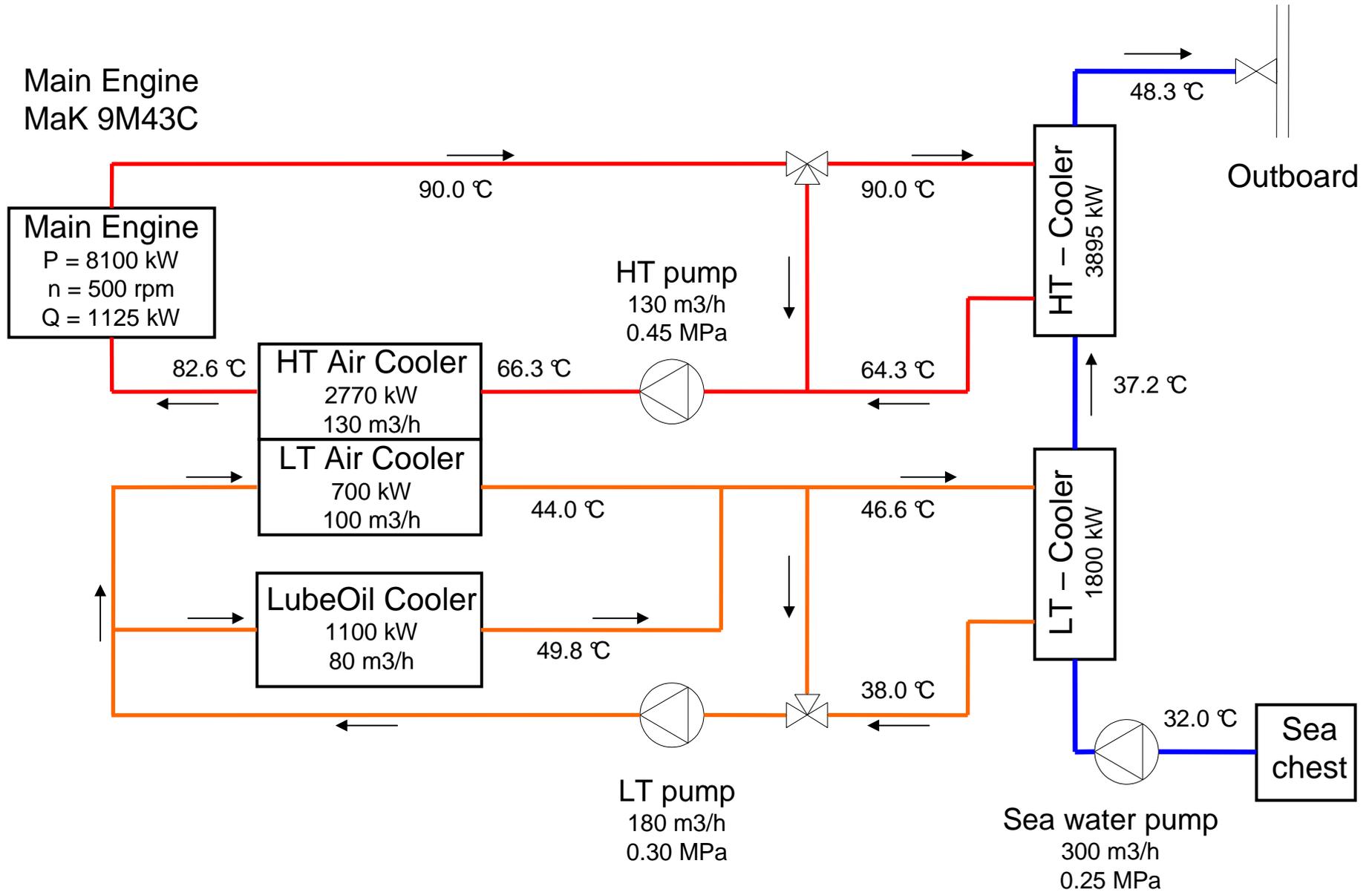
Il raffreddamento delle parti più calde del motore, camicie, testate e lo stadio alta temperatura dello scambiatore di calore dell'aria di alimentazione viene effettuato da un circuito in cui circola acqua dolce ad alta temperatura; in uscita dal motore infatti si raggiungono i 90 °C

È previsto inoltre un ulteriore circuito in cui circola acqua dolce a bassa temperatura (max 50°C) che invece raffredda lo stadio a bassa temperatura dello scambiatore di calore dell'aria di alimentazione e lo scambiatore di calore del circuito dell'olio di lubrificazione.

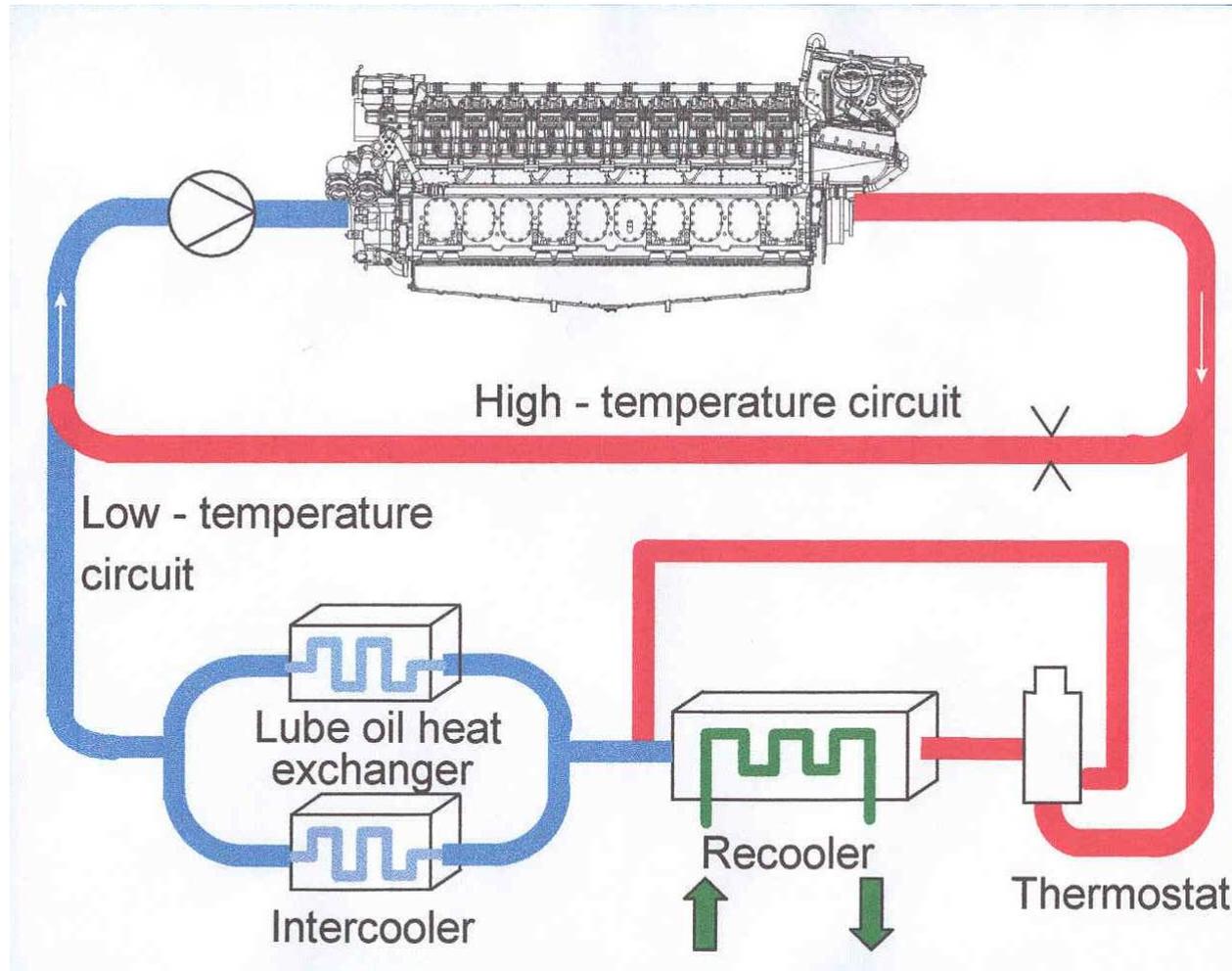
Entrambi i circuiti infine cedono il loro calore all'acqua di mare tramite due scambiatori separati; si noti come anche in questo caso l'acqua di mare a bassa temperatura (in genere assunta con un valore massimo pari a 32°C) incontra prima lo scambiatore a bassa temperatura e poi quello ad alta.

L'acqua dolce utilizzata, soprattutto quella del circuito ad alta temperatura, deve essere priva di sostanze in grado di formare depositi sui condotti ed avere un pH controllato; infatti le incrostazioni sui condotti di raffreddamento oltre a diminuire lo scambio termico riducono anche la portata di fluido refrigerante. Un pH non adeguato può invece innescare fenomeni di corrosione.

Motori a combustione interna

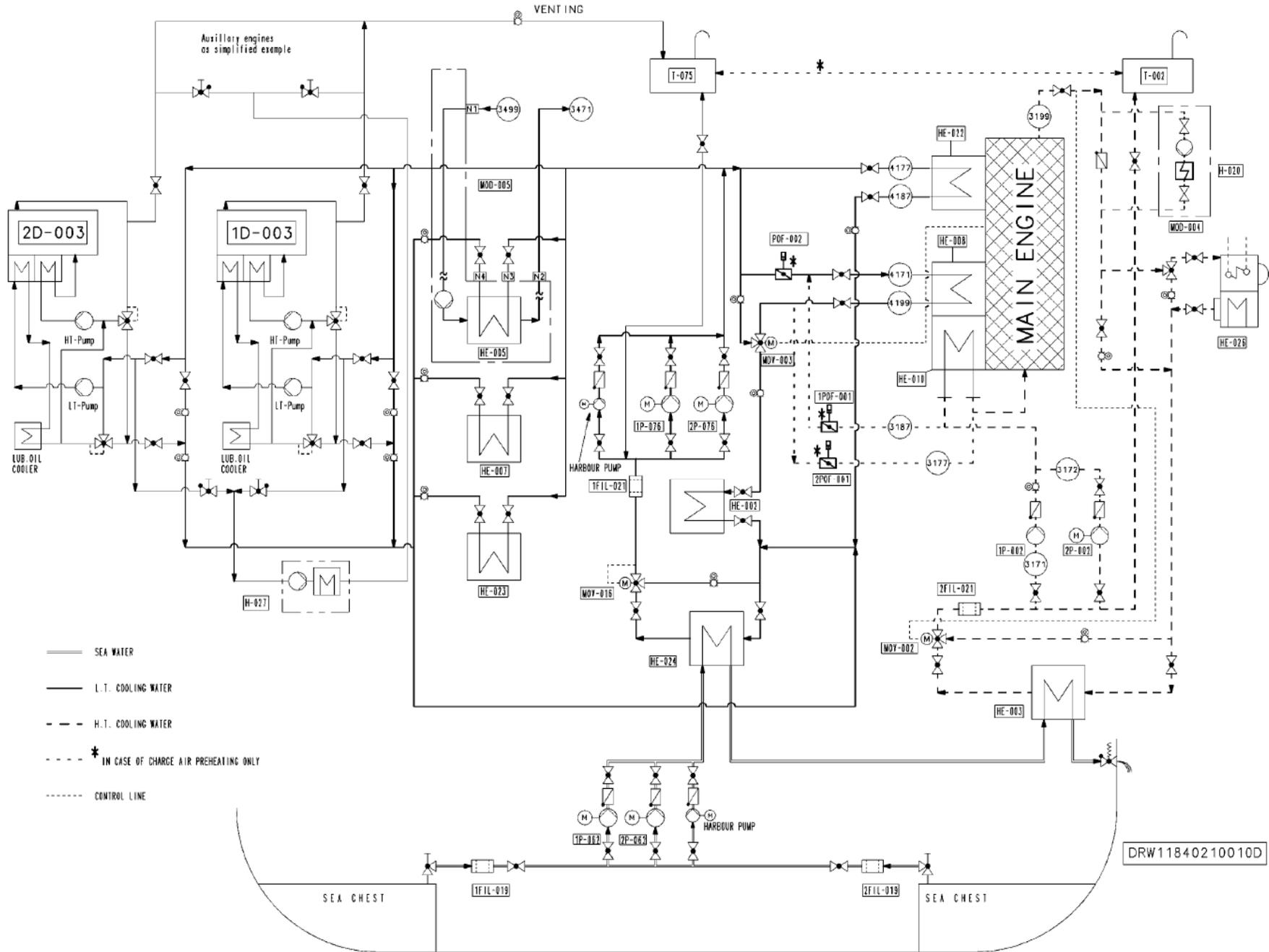


Motori a combustione interna

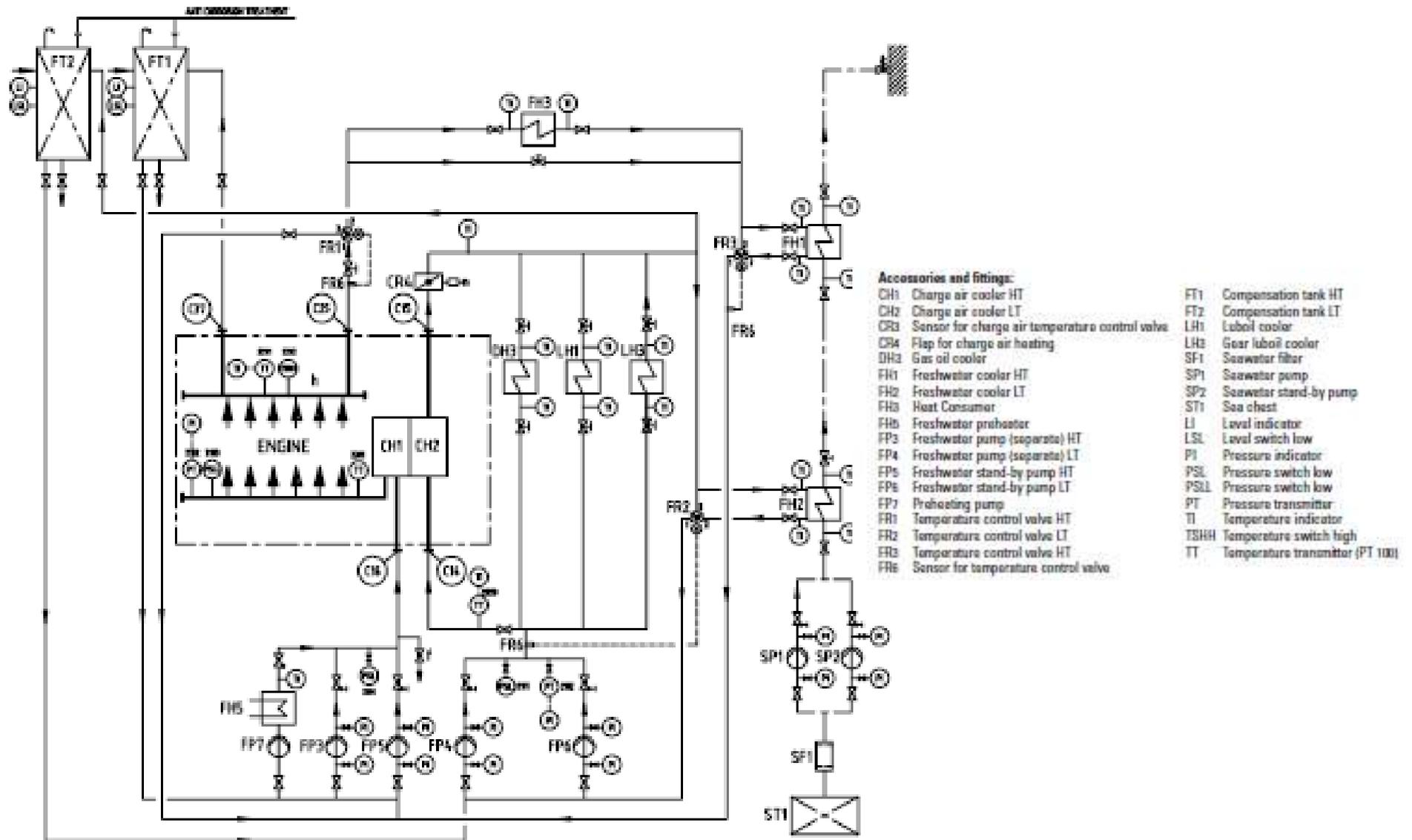


Circuito di raffreddamento di un motore veloce

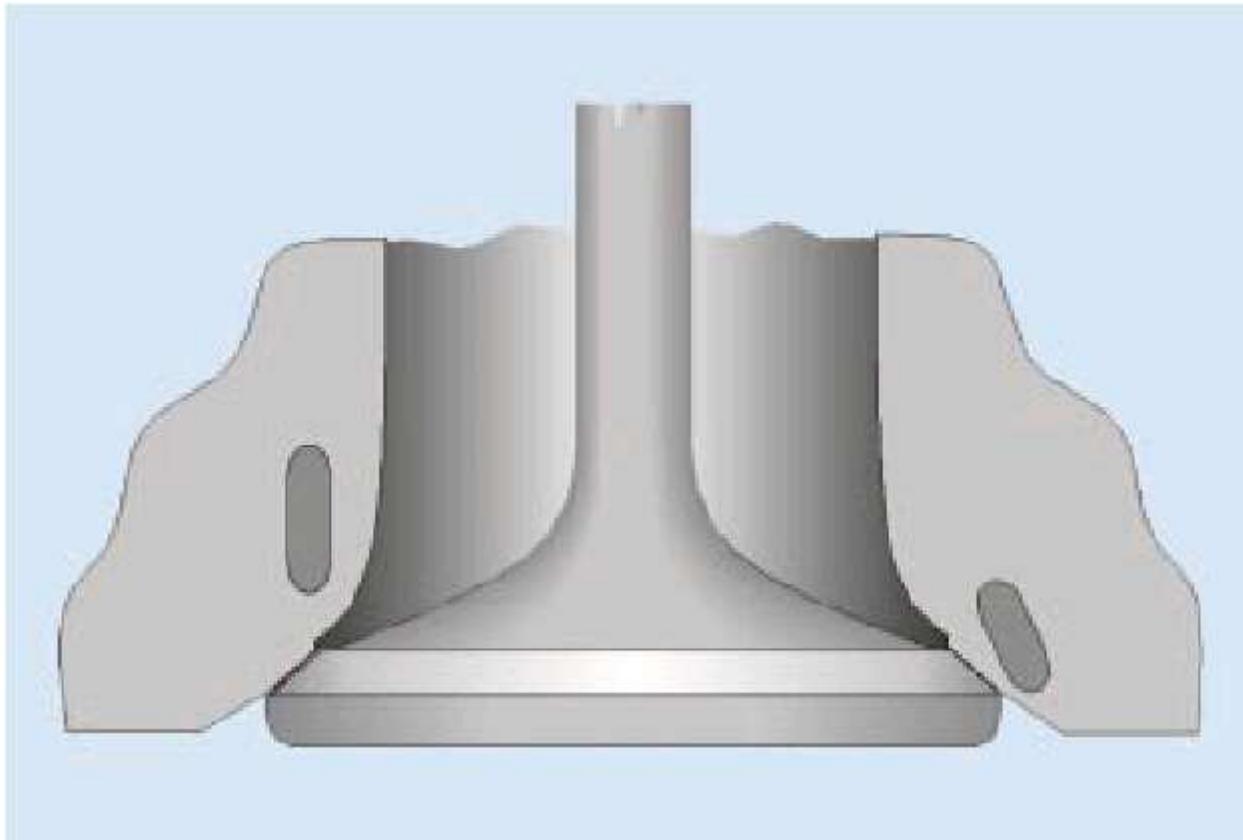
Motori a combustione interna



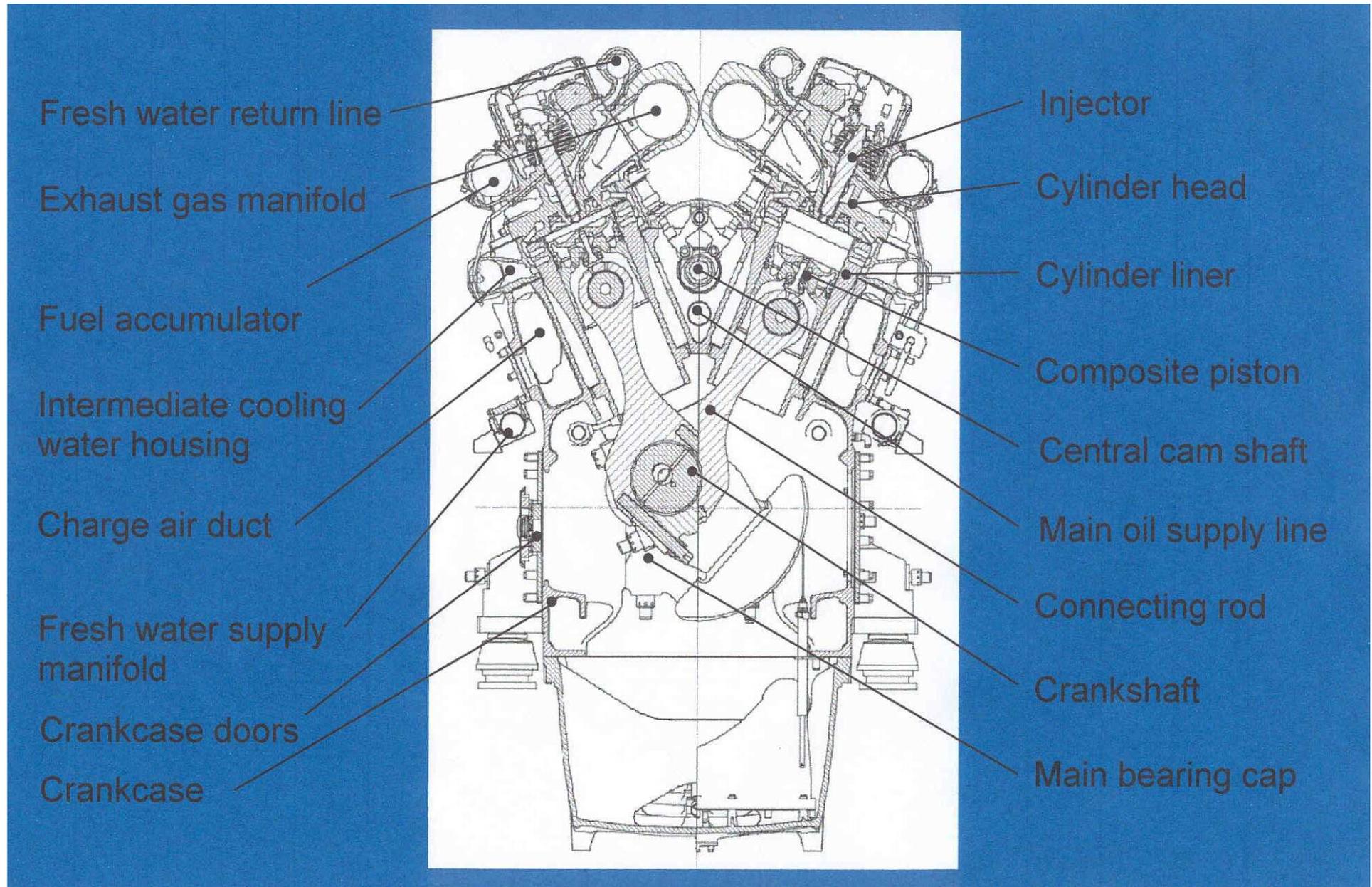
Motori a combustione interna



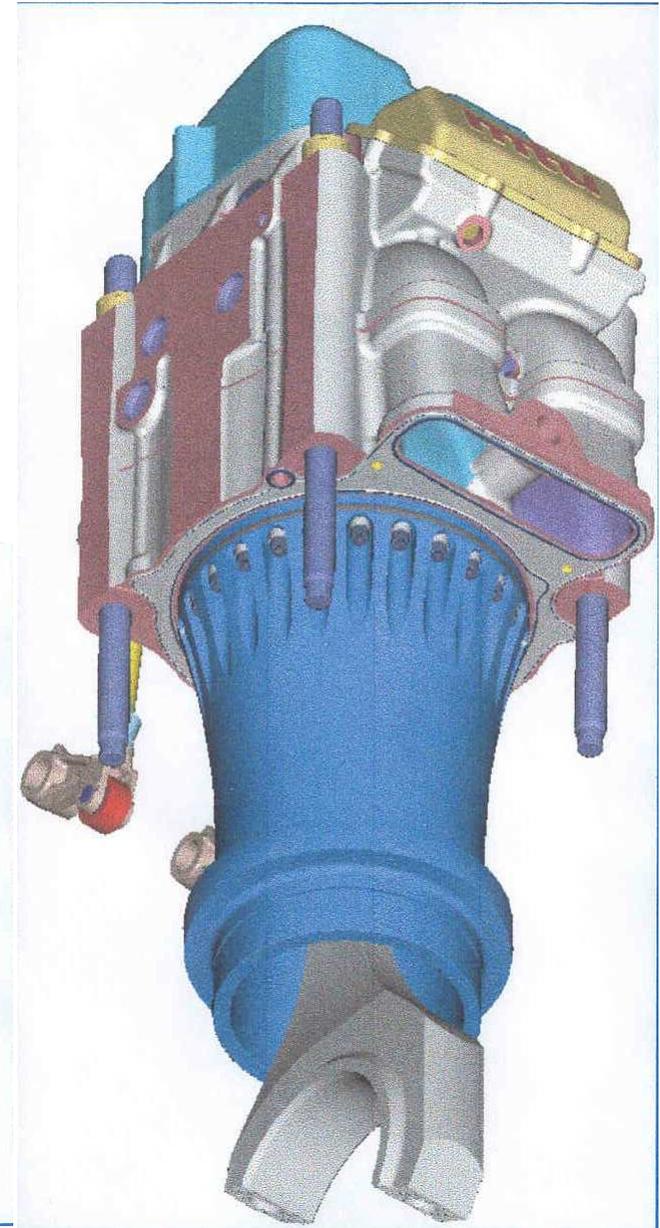
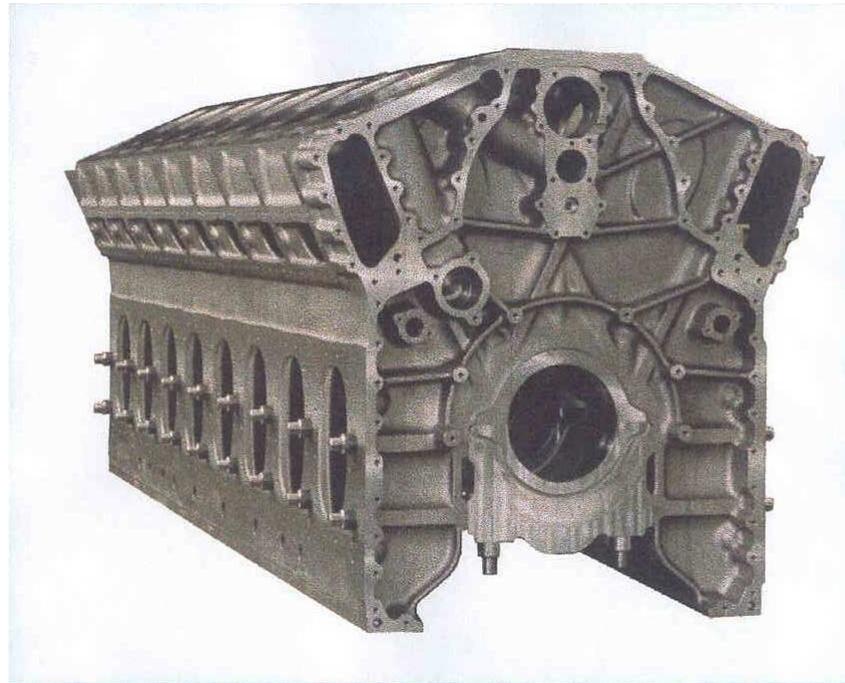
Motori a combustione interna



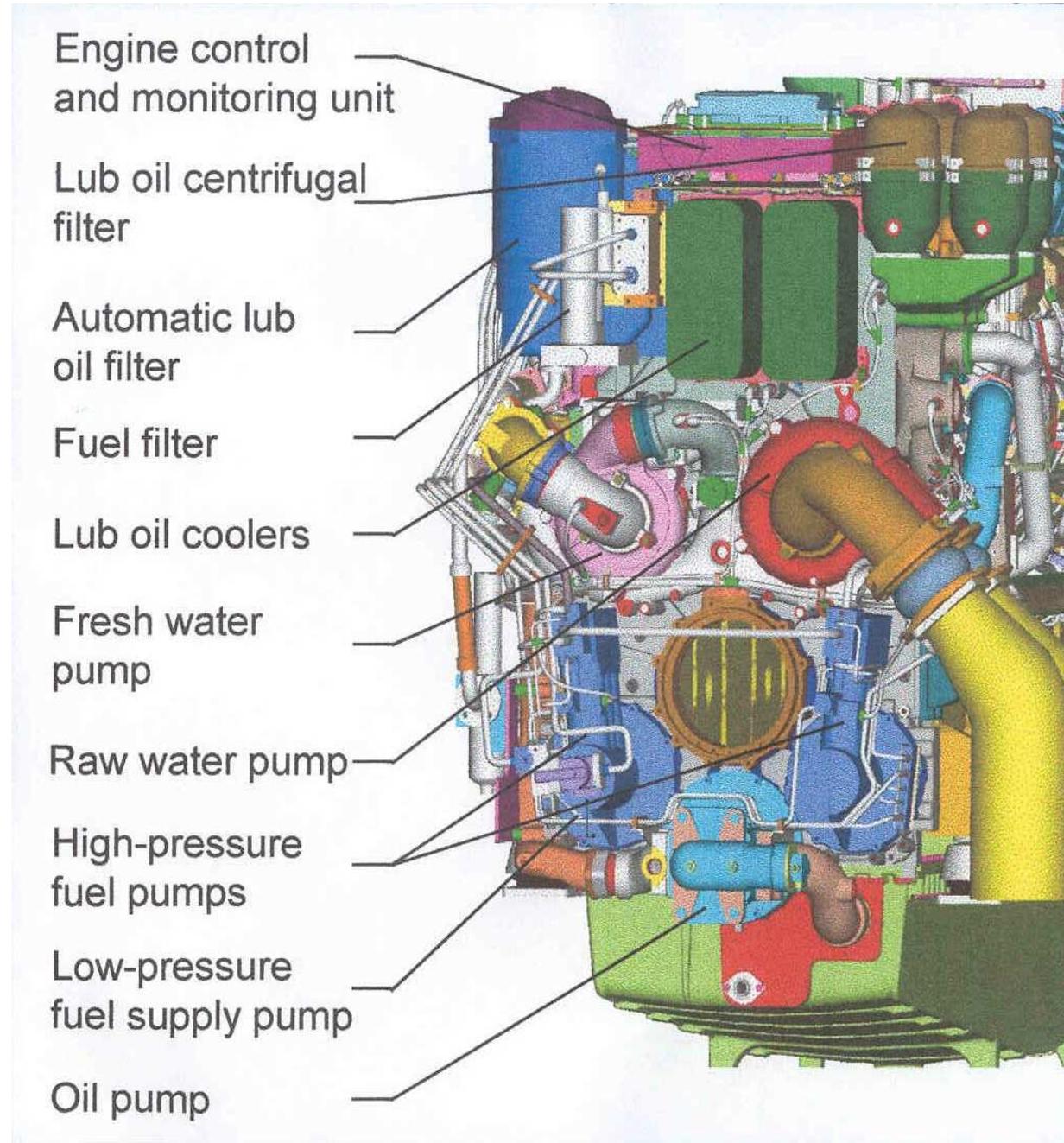
Motori a combustione interna



Motori a combustione interna



Motori a combustione interna

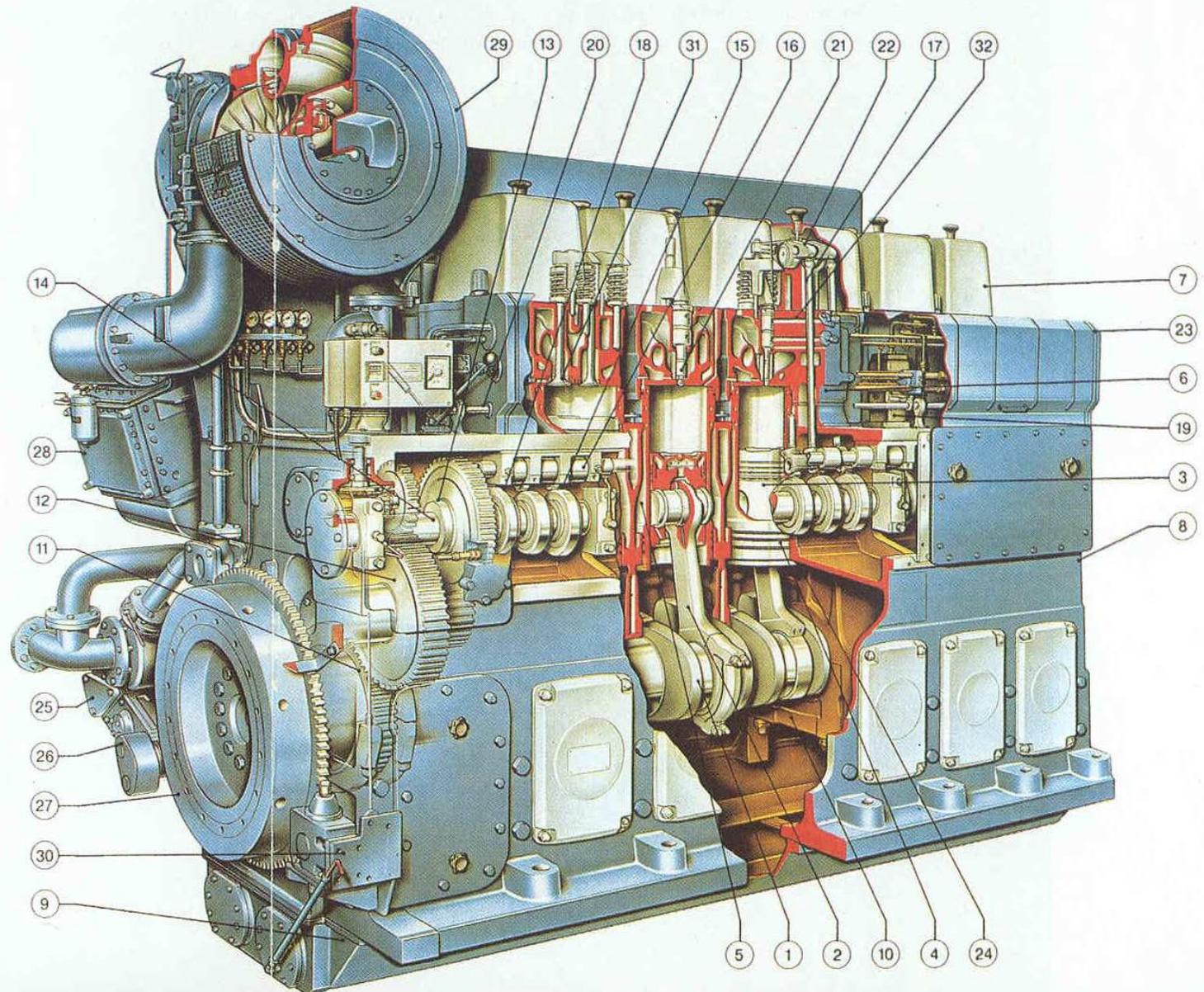


Motori a combustione interna

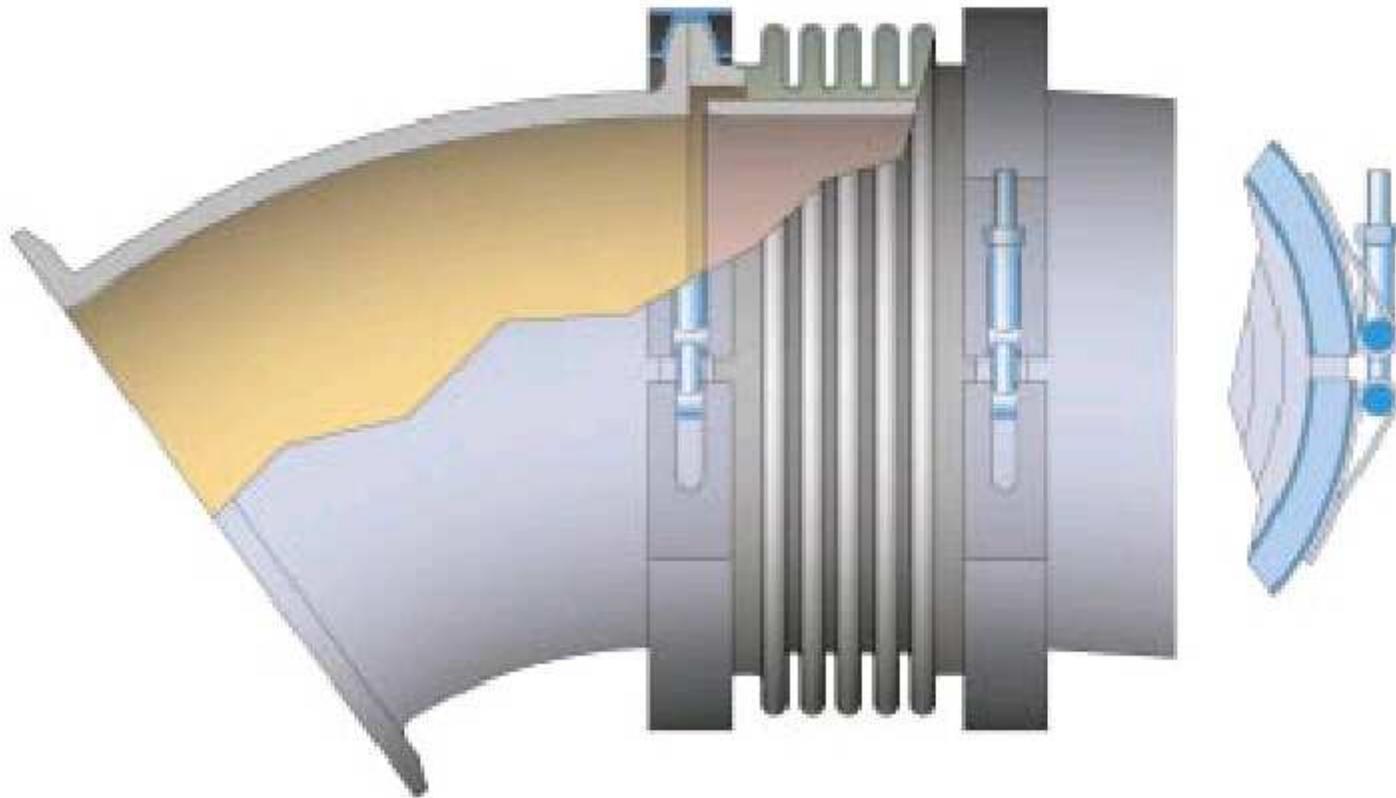
Tav. XXVI — Motore diesel a quattro tempi sovralimentato con cilindri in linea SW 280 destinato alla propulsione navale (STORK-WÄRTSILÄ DIESEL).

$C = 300 \text{ mm}$; $D = 280 \text{ mm}$; $C/D = 1,07$; $n = 1.000 \text{ giri/min}$; $v_m = 10 \text{ m/s}$; $P/\text{cil.} = 295 \text{ kW}$; $n.\text{cil.} = 6, 8, 9$; $P = 1.770 \div 2.655 \text{ kW}$; $\rho = 12,7 : 1$.

1. Albero a manovelle; 2. Biella; 3. Pistone; 4. Canna cilindro; 5. Passaggi acqua raffreddamento; 6. Testata cilindro; 7. Coperchio bilancieri; 8. Blocco cilindri; 9. Carter; 10. Cappello di banco; 11. Ingranaggio principale di presa del moto; 12. Ingranaggio intermedio; 13. Ingranaggio azionamento albero a camme; 14. Albero a camme; 15. Camma; 16. Rullini interposti tra camma e punteria; 17. Asta punteria; 18. Camma azionamento pompa combustibile; 19. Pompa combustibile; 20. Asta cremagliera; 21. Iniettore; 22. Bilanciere; 23. Copertura; 24. Passaggi olio lubrificazione; 25. Pompa; 26. Motore di avviamento ad aria compressa; 27. Volano con ingranaggio per l'avviamento; 28. Refrigeratore aria sovralimentazione; 29. Turbosoffiante a gas di scarico; 30. Viratore; 31. Valvola di scarico raffreddata; 32. Percorso fluido raffreddamento iniettori.



Motori a combustione interna



Motori a combustione interna



Motori a combustione interna

