



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE

Potenza propulsiva delle navi

Prof. Paolo Frandoli

A.A. 2022-2023

Introduzione

- Definita la geometria di carena è necessario determinare la **potenza del motore**
 - Rispetto requisiti operativi (V_{trials} , V_{service})
 - Scelta del sistema propulsivo
 - Dimensionamento casse combustibile
- **Potenza:**
 - Resistenza al moto
 - Rendimento dell'elica isolata
 - Interazione elica carena
- **Previsioni di potenza:**
 - Formule di regressione
 - Esperimenti (resistenza e autopropulsione)
 - CFD



Sistemi propulsivi

- Per effettuare le previsioni di potenza propulsive occorre conoscere le caratteristiche delle prestazioni del **sistema propulsivo** adottato, in quanto da queste dipende **l'efficienza complessiva** del sistema propulsivo.
- Corpo in moto in un fluido a velocità V : soggetto a resistenza R
- Spinta (T): forza che si oppone a R
- Propulsore: organo che fornisce alla nave la spinta



Propulsori navali (remi e vele)



Vela quadra.



Vela latina.



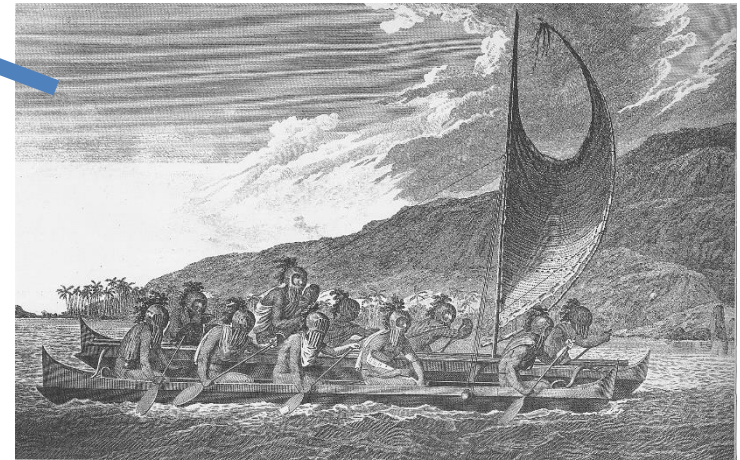
Vela aurica.



Vela al terzo.



Vela a tarchia.

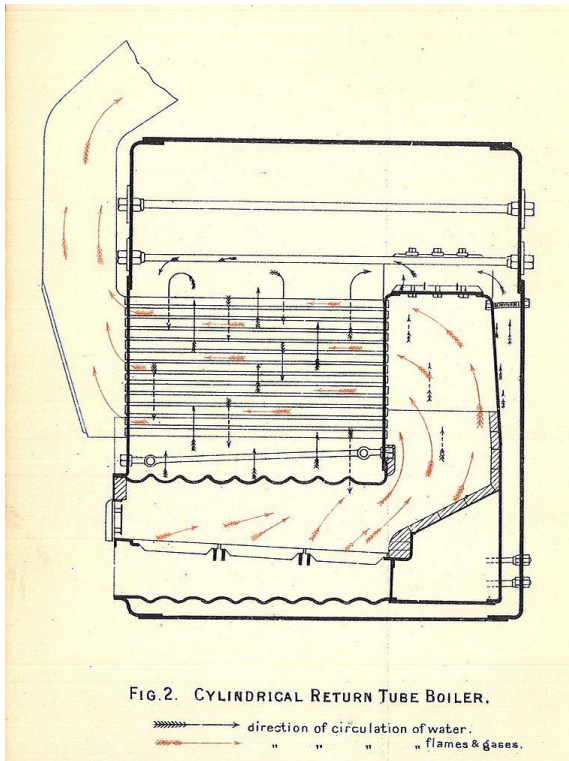


Macchine marine

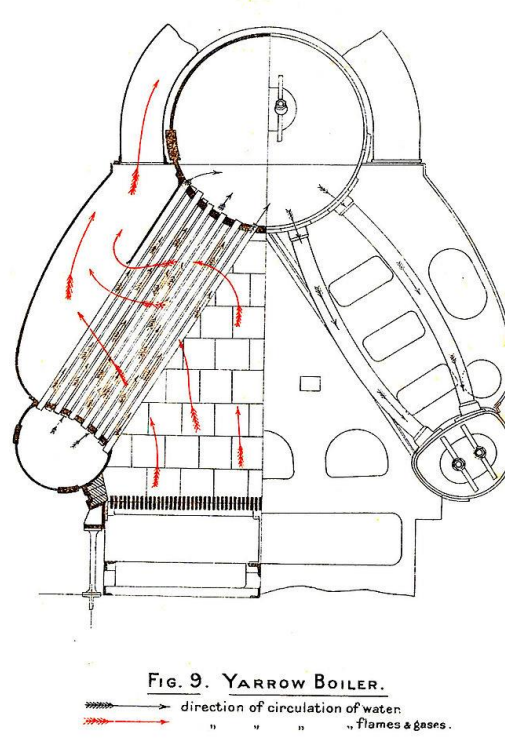
- **Potenza installata = potenza motrice + potenza altri apparati**
- Principali apparati di bordo:
 - impianto di generazione e distribuzione di energia elettrica
 - impianto di condizionamento
 - Telecomunicazioni
 - sistema di navigazione, ecc.
- La **potenza motrice** è di solito **preponderante**
- Diverse tipologie di macchine vengono/sono state usate per azionare i **sistemi propulsivi**



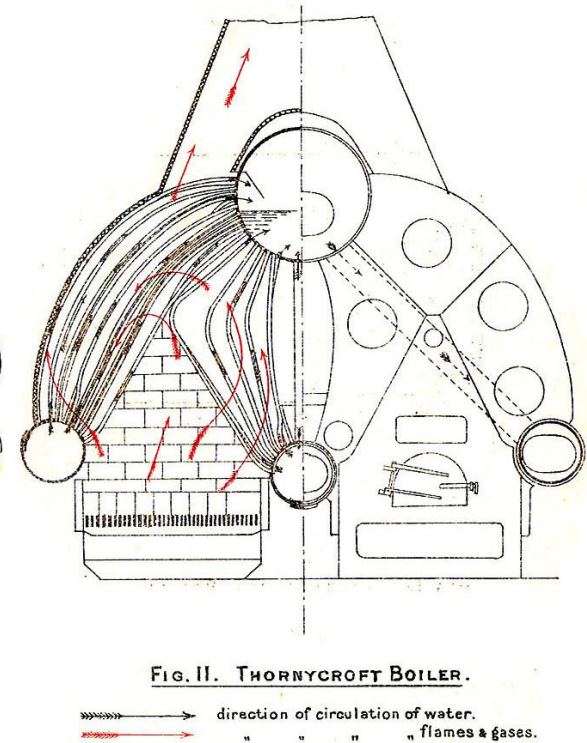
Caldaie



Caldaia a tubi di fumo

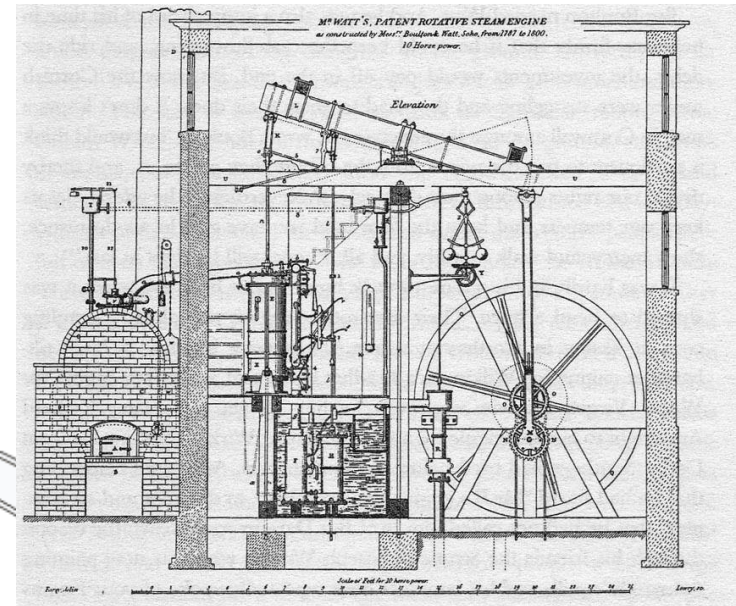
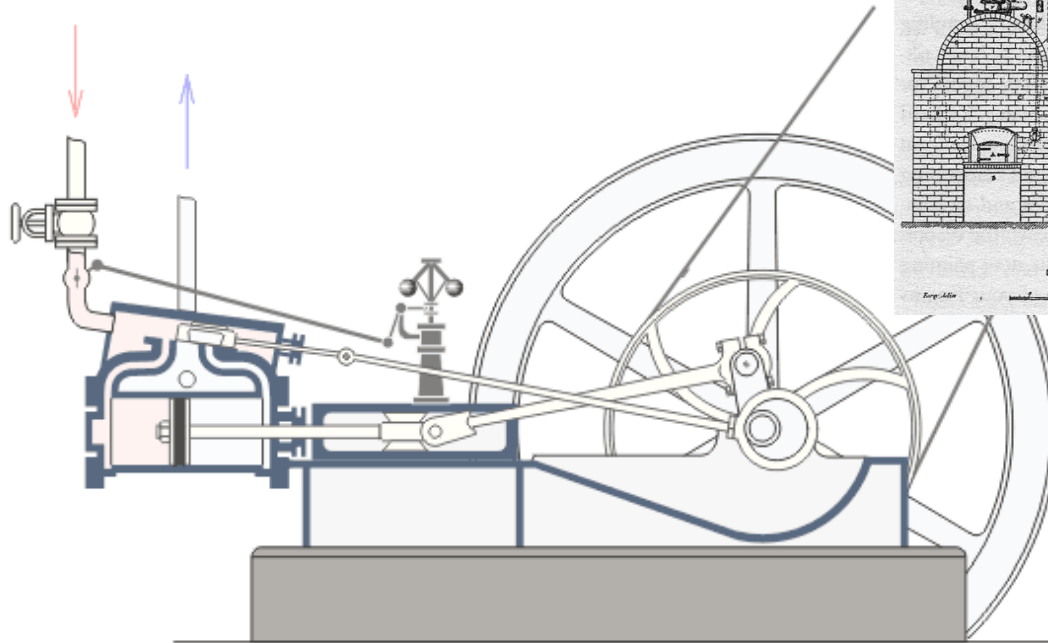


Caldaie a tubi d'acqua



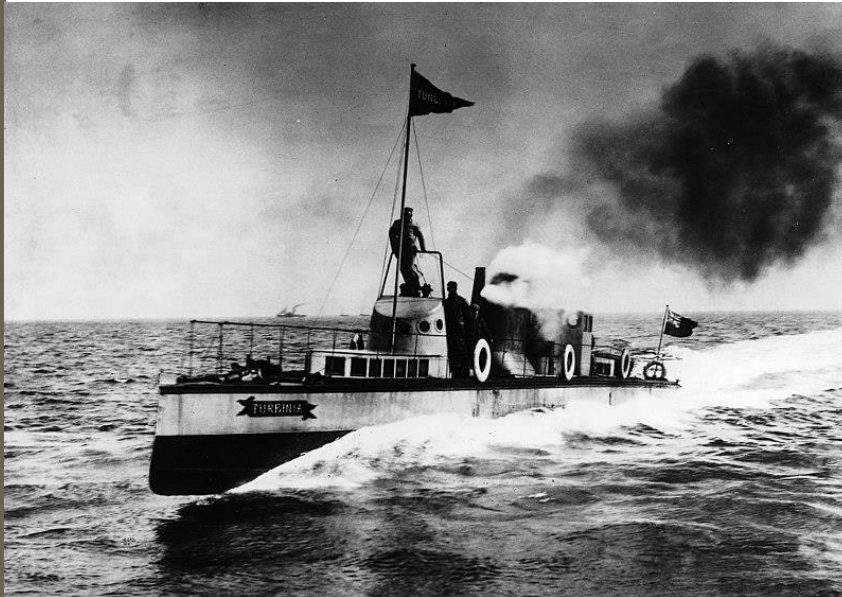
Macchina alternativa

- Pioniere della propulsione meccanica
- J. Watt (1763)

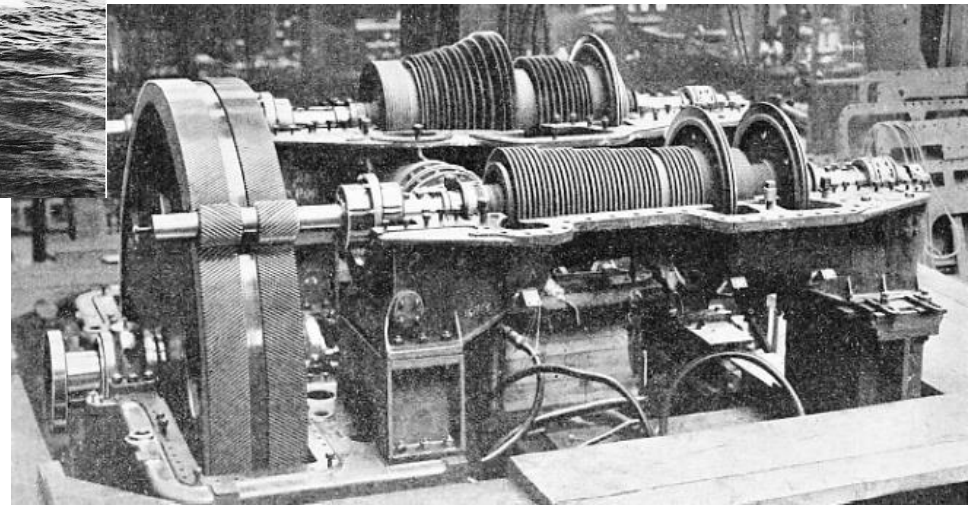


Turbina a vapore

1884 – C.J. Parsons (1854-1931) sviluppa la prima turbina



Turbinia (1894)

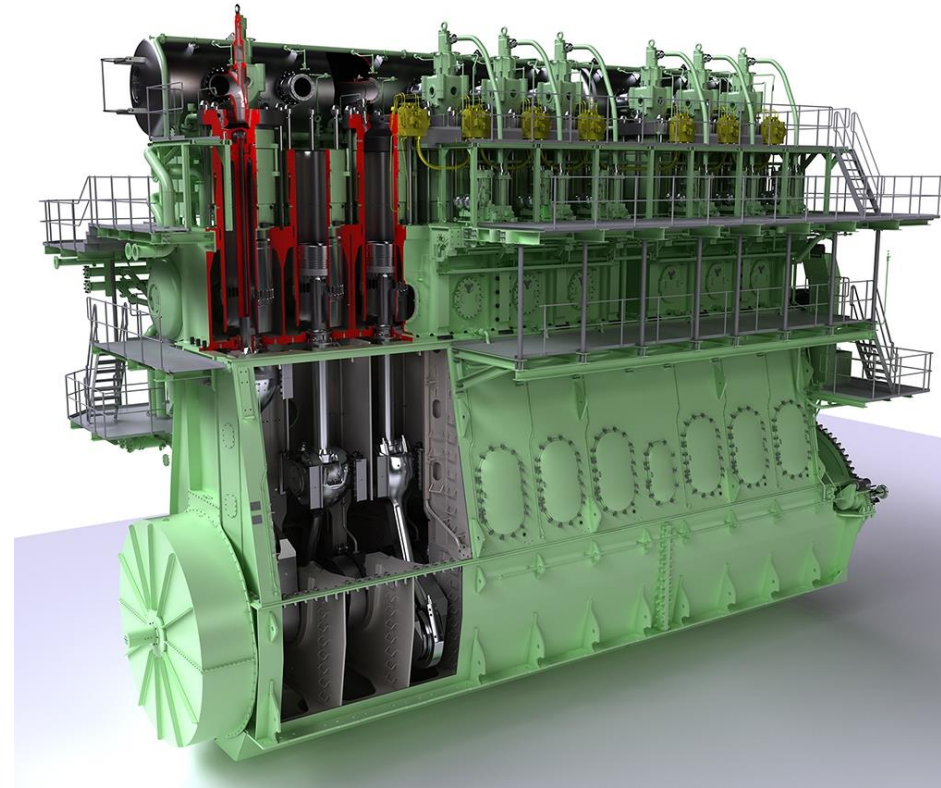


Turbina a vapore navale



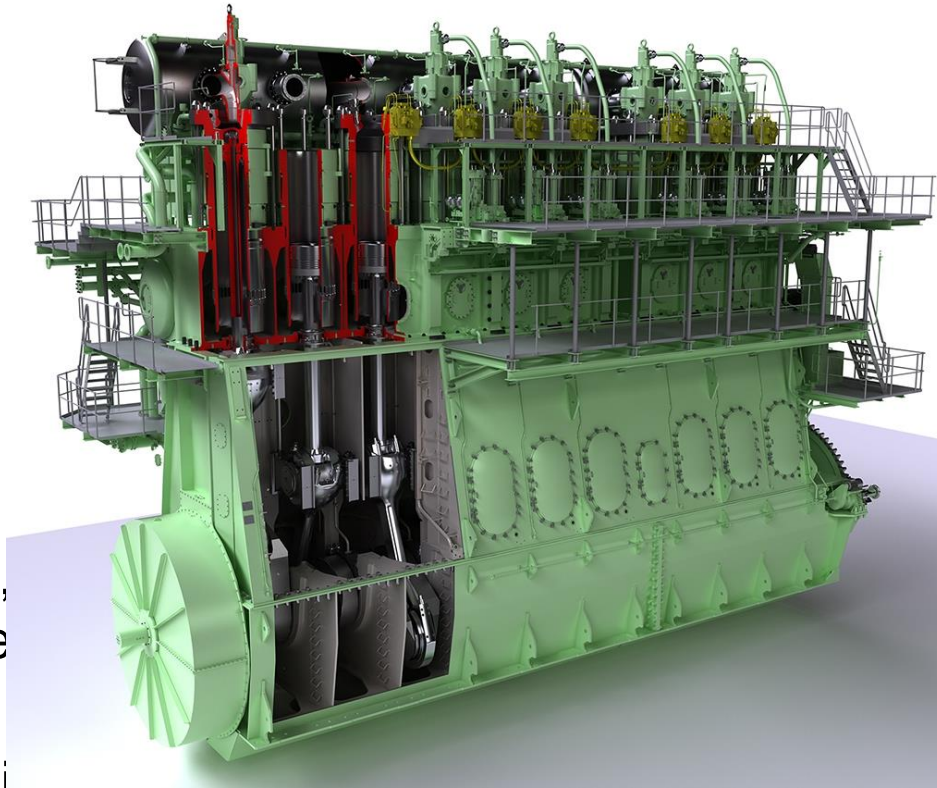
Motore Diesel

- 1892 Rudolf Diesel deposita a Berlino il brevetto n° 67207
- 1902 la MAN inizia la produzione di motori (centrale elettrica di Kiev)
- 1903 prima applicazione navale (*Petit Pierre*)
- 1904 primo sottomarino (motore Diesel in superficie, elettrico in immersione)
- 1910 Prima motonave (*MN Romagna*) equipaggiata con motori Sulzer 2T



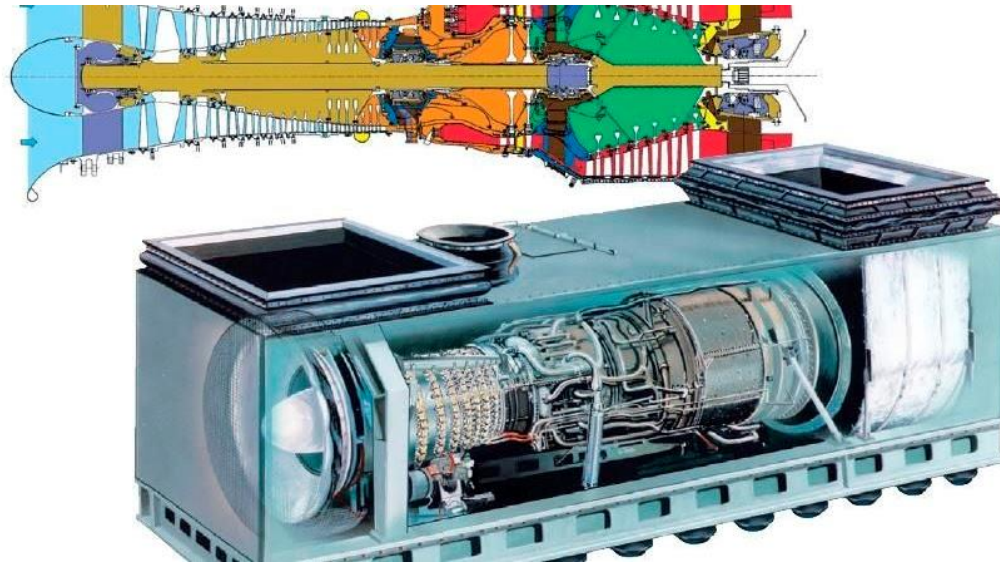
Motore Diesel

- **Macchina marina più usata**
- 2 e 4 tempi
- Vasto intervallo di potenze
- Basso consumo specifico
- Categorie motori diesel:
 - Veloci (1000-2000 rpm)
 - Semiveloci (300-800 rpm)
 - Lenti (60-180 rpm, 2 tempi, reversibili e direttamente accoppiabili all'elica)
 - Piccole imbarcazioni (2000-2400 rpm)



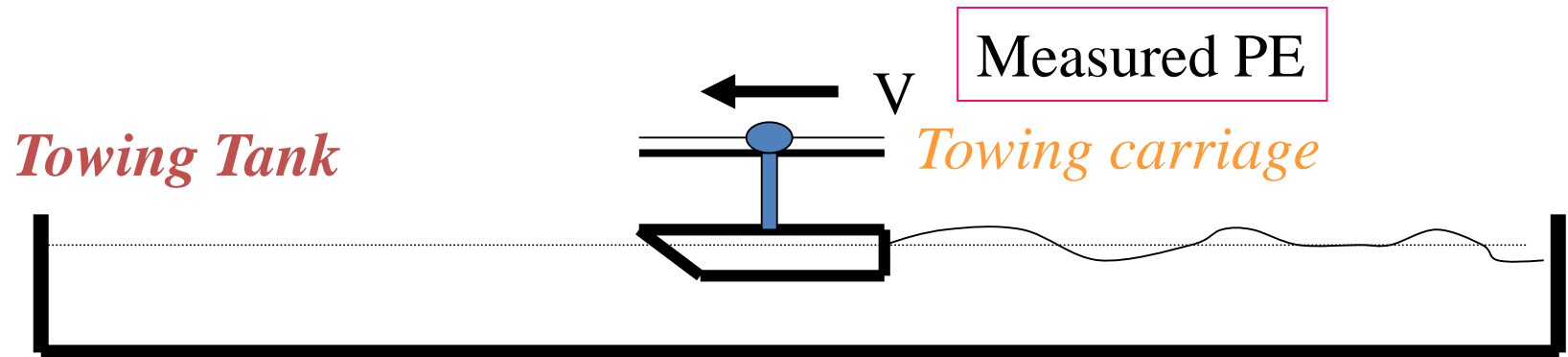
Turbina a gas

- **Grandi potenze, pesi e ingombri ridotti**
- Ausiliari limitati
- Rapido avvio e variazione di carico
- Alta velocità di rotazione (necessità di riduttore)
- Elevato consumo

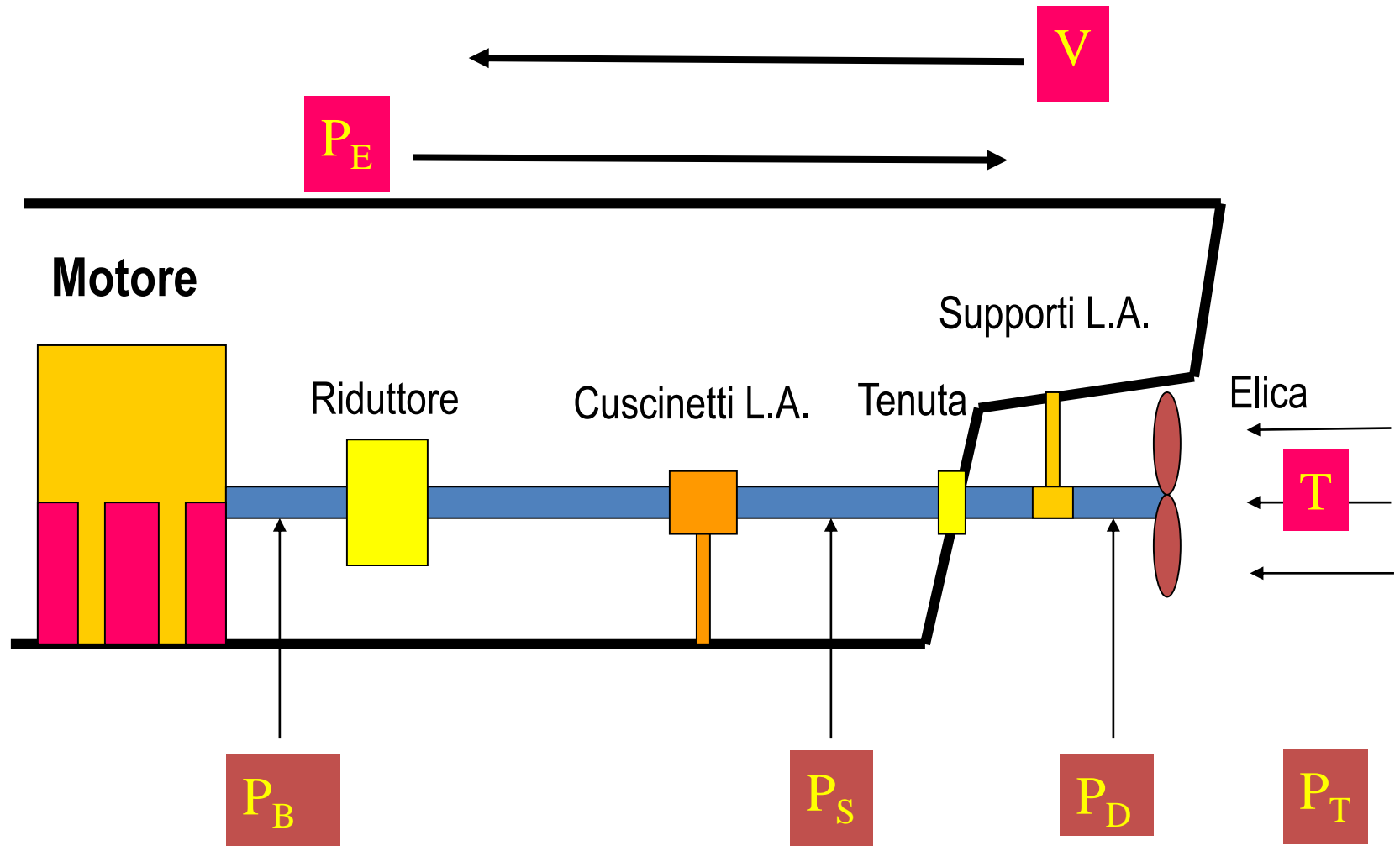


Potenza effettiva

- **Potenza effettiva (effective power, P_E)**
 - Potenza richiesta per muovere la nave ad una velocità V in assenza della spinta dell'elica
 - $P_E = R_T V$
 - R_T : resistenza totale (carena con appendici)
 - Si determina da prove vasca (prova di rimorchio) o da calcoli (statistici, serie sistematiche, CFD)

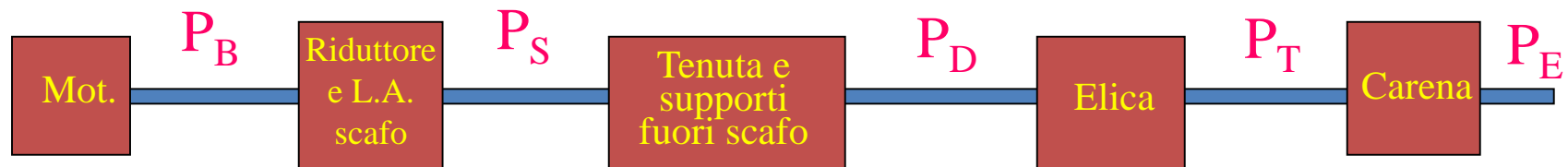


Trasmissione di potenza



Trasmissione di potenza

- **Potenza al freno (brake power, P_B):**
 - Potenza erogata dal motore prima dell'eventuale riduttore
 - $P_B = 2\pi n Q_M$
- **Potenza asse (shaft power, P_S):**
 - Potenza misurata in un punto entro carena quanto più vicino all'elica
 - $P_S = P_B - \text{perdite sul riduttore e su parte dell'asse}$
 - $P_S = P_B \cdot \eta_m$ ($\eta_m = 0,97 \div 0,99$)



Trasmissione di potenza

- **Potenza all'elica (delivered power, P_D):**
 - Potenza al mozzo dell'elica
 - $P_D = P_S - \text{perdite nella tenuta e nei supporti fuori scafo}$
 - $P_D = 2\pi n Q = P_S \eta_S$ ($\eta_S = 0,98 \div 0,99$)
- **Potenza di spinta (thrust power, P_T):**
 - Lavoro utile del propulsore nel generare la spinta T
 - $P_T = T V_A$



Catena dei Rendimenti

- Rendimento di carena (hull efficiency, η_H)

$$\eta_H = \frac{P_E}{P_T} = \frac{R_T V}{T V_A} = \frac{R_T / T}{V_A / V} = \frac{1 - t}{(1 - w)_{eff}}$$

- Dove: t è il fattore di deduzione di spinta, $(1 - w)_{eff}$ la frazione di scia media assiale effettiva



Catena dei Rendimenti

- **Rendimento elica dietro carena (efficiency behind hull, η_B)**

$$\eta_B = \frac{P_T}{P_D} = \frac{T V_A}{2\pi n Q} = \frac{T V_A}{2\pi n Q_0} \eta_R = \eta_0 \eta_R$$

- η_0 : rendimento dell'elica isolata = $\frac{T V_A}{2\pi n Q_0}$
- Q_0 : momento misurato in flusso omogeneo quando l'elica produce la spinta T alla velocità d'avanzo V_A
- Q : momento misurato dietro carena quando l'elica produce la spinta T alla velocità d'avanzo V_A
- η_R : rendimento relativo rotativo = Q_0/Q (valori di riferimento 0,95 ÷ 1,05)



Catena dei Rendimenti

- Rendimento quasi propulsivo (quasi-propulsive efficiency, η_D)

$$\eta_D = \frac{P_E}{P_D} = \frac{P_E}{P_T} \cdot \frac{P_T}{P_D} = \eta_H \eta_0 \eta_R$$

$$\eta_D \approx 0.65 \quad \text{monoelica}$$

$$\eta_D \approx 0.75 \quad \text{bielica}$$



Catena dei Rendimenti

- **Rendimento propulsivo totale (propulsive efficiency, η_P)**

$$\eta_P = \frac{P_E}{P_B} = \frac{P_E}{P_T} \cdot \frac{P_T}{P_D} \cdot \frac{P_D}{P_B} = (\eta_H \eta_O \eta_R) (\eta_m \eta_s)$$

- Range: 0.45 ÷ 0.72



Potenza di propulsione

$$\text{Potenza motore: } P_B = \frac{P_E}{\eta_P}$$

- Stabilire la velocità contrattuale e relative condizioni (immersione ed assetto oppure portata lorda)
- Stabilire il sovraccarico dovuto alle condizioni meteomarine ed alla sporcizia della carena e dell'elica
- Determinare la curva della potenza effettiva P_E in funzione della velocità
- Determinare il rendimento propulsivo η_P
- Determinare la curva della potenza P_B erogata dal motore di propulsione in funzione della velocità



Curve di potenza della carena

- Condizione ideale di prove mare (trial condition): carena ed eliche pulite, mare calmo, assenza di vento, acque profonde (almeno una lunghezza nave)
- Condizione di servizio (service condition): carena ed eliche con accumulo di sporcizia, mare ondoso, presenza di vento
- Curva di potenza in condizione di prove mare: è quella richiesta dalla nave nella condizione ideale di prove mare
- Curva di potenza in condizione di servizio: è quella richiesta dalla nave nella condizione di normale servizio; l'accumulo di sporcizia su carena ed eliche nonché le condizioni meteo marine provocano un aumento della resistenza per cui la potenza in servizio risulta più alta di quella alle prove mare. L'elica ne risulta sovraccaricata con conseguente leggera diminuzione di giri ($\sim 2\%$) a pari potenza (la legge cubica si sposta verso sinistra nel diagramma potenza-giri)
- Sea Margin: differenza percentuale tra la curva di potenza in servizio e quella alle prove. Si può calcolare assumendo un sovraccarico in funzione del profilo operativo della nave. Viene convenzionalmente assunto pari al 15%



Potenza del motore e relativi margini

- MCR (Maximum Continuous Rating): potenza massima continuativa erogata dal motore di propulsione e certificata dal costruttore alle prove al banco condotte in fabbrica
- Potenza di servizio: erogata continuamente in normale navigazione dal motore di propulsione. Nel caso di un motore diesel è normalmente l'85% MCR, mentre nel caso di un motore elettrico può arrivare al 100% MCR in quanto, contrariamente al diesel, può erogare continuamente la potenza massima senza causare eccessivo logorio alla macchina
- Velocità di servizio: velocità raggiunta nella condizione di servizio quando il motore di propulsione eroga la potenza di servizio. E' considerata la velocità commerciale di una nave mercantile



Potenza contrattuale

- Potenza contrattuale: potenza erogata dal motore di propulsione in condizione di prova mare (trial condition) in corrispondenza alla quale la nave deve raggiungere la velocità contrattuale. E' stabilita nella specifica nave e nel contratto.
- Può essere assunta come:
 - Potenza massima (MCR)
 - Potenza di servizio (stabilita nella specifica nave e nel contratto)
 - Potenza di servizio dedotta di una percentuale pari al sea margin (stabilita nella specifica nave e nel contratto)

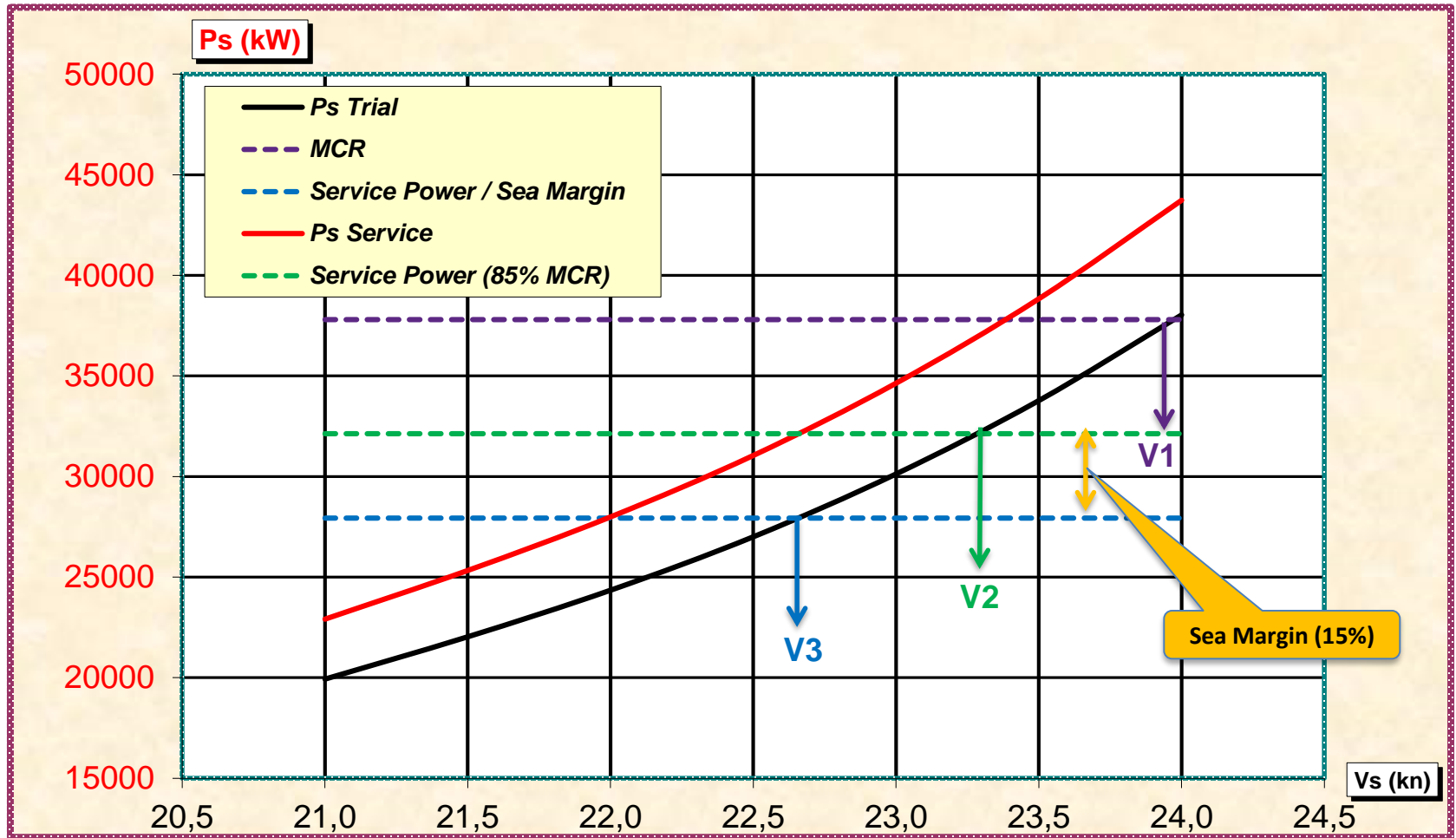


Velocità contrattuale

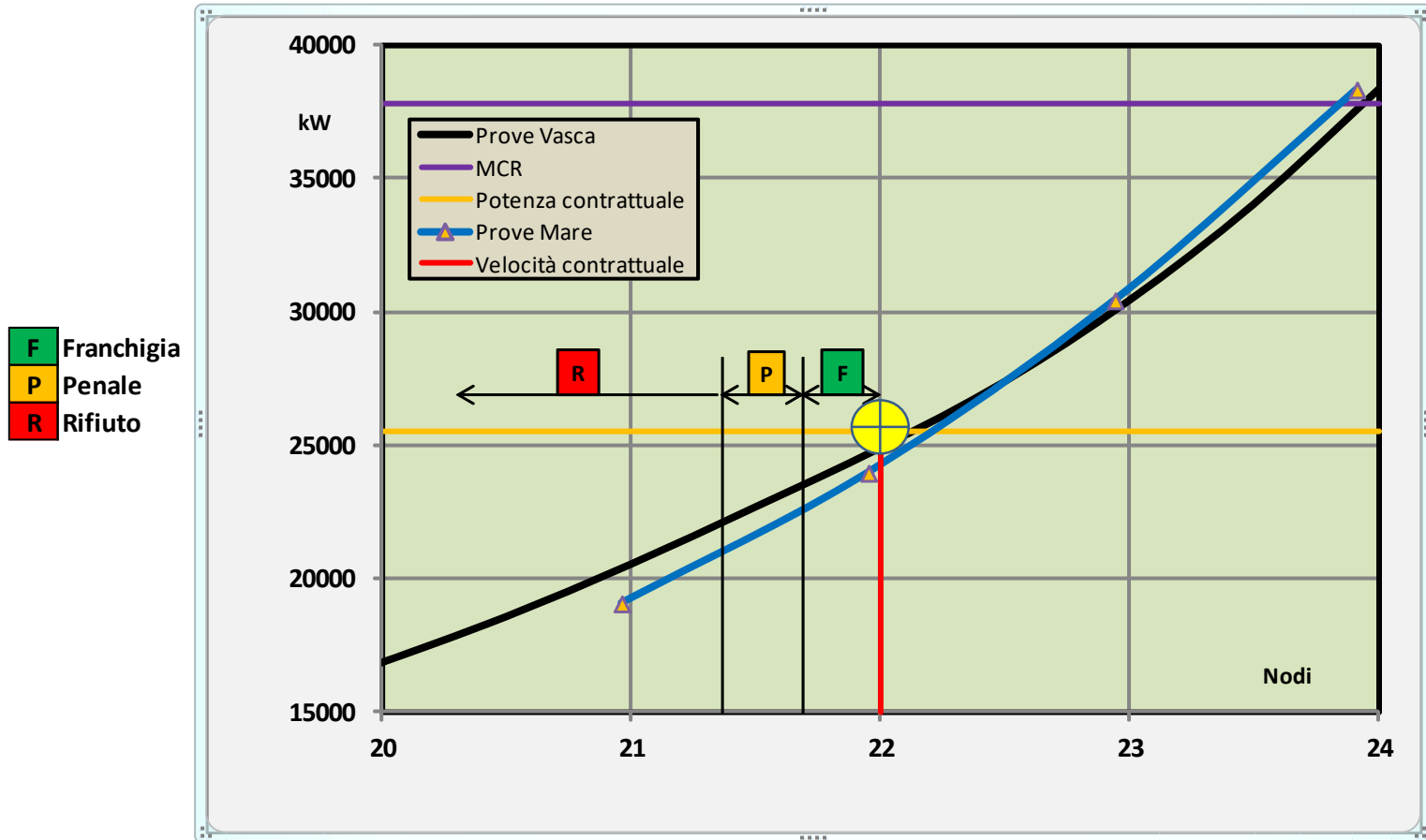
- Velocità contrattuale: velocità da raggiungere in condizioni ideali di prove mare (trial condition) alla potenza contrattuale ad una determinata immersione oppure ad una determinata portata. Può essere assunta in corrispondenza alle tre sopracitate definizioni di potenza contrattuale e va definita chiaramente nella specifica nave e nel contratto:
 - V1: Velocità a MCR. In questo caso non ha un significato pratico in quanto non verrà mai utilizzata in condizioni di servizio. È significativa per le navi militari
 - V2: Velocità alla potenza di servizio. Anche in questo caso, essendo l'effettiva velocità di servizio più bassa di quella contrattuale, non è rappresentativa di una situazione reale
 - V3: Velocità alla potenza ricavata da quella di servizio deducendo una percentuale corrispondente al sea margin. È il caso più realistico in quanto rappresenta la reale velocità di servizio



Definizione della velocità contrattuale

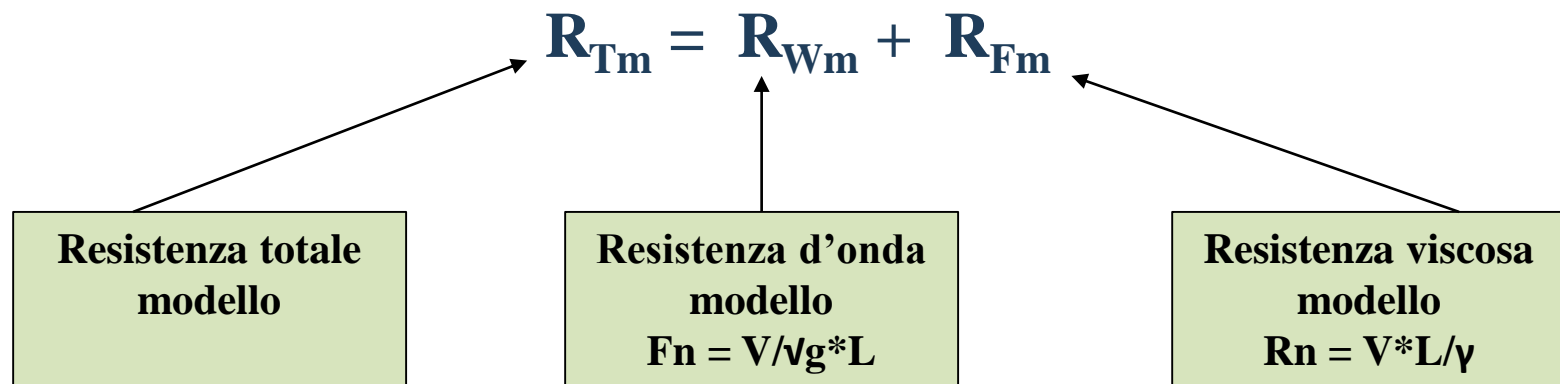


Verifica della velocità alle prove mare



Previsione della resistenza nave R_s

- Le prove su modello sono lo strumento fondamentale per la previsione della resistenza. Sono utilizzate direttamente su specifici progetti e sono alla base di varie serie sistematiche e metodi statistici
- Servono a determinare la resistenza d'onda, altrimenti non calcolabile se non con gli attuali metodi numerici (CFD) disponibili da poche decine d'anni grazie allo sviluppo del calcolo elettronico



Previsione della resistenza nave R_s

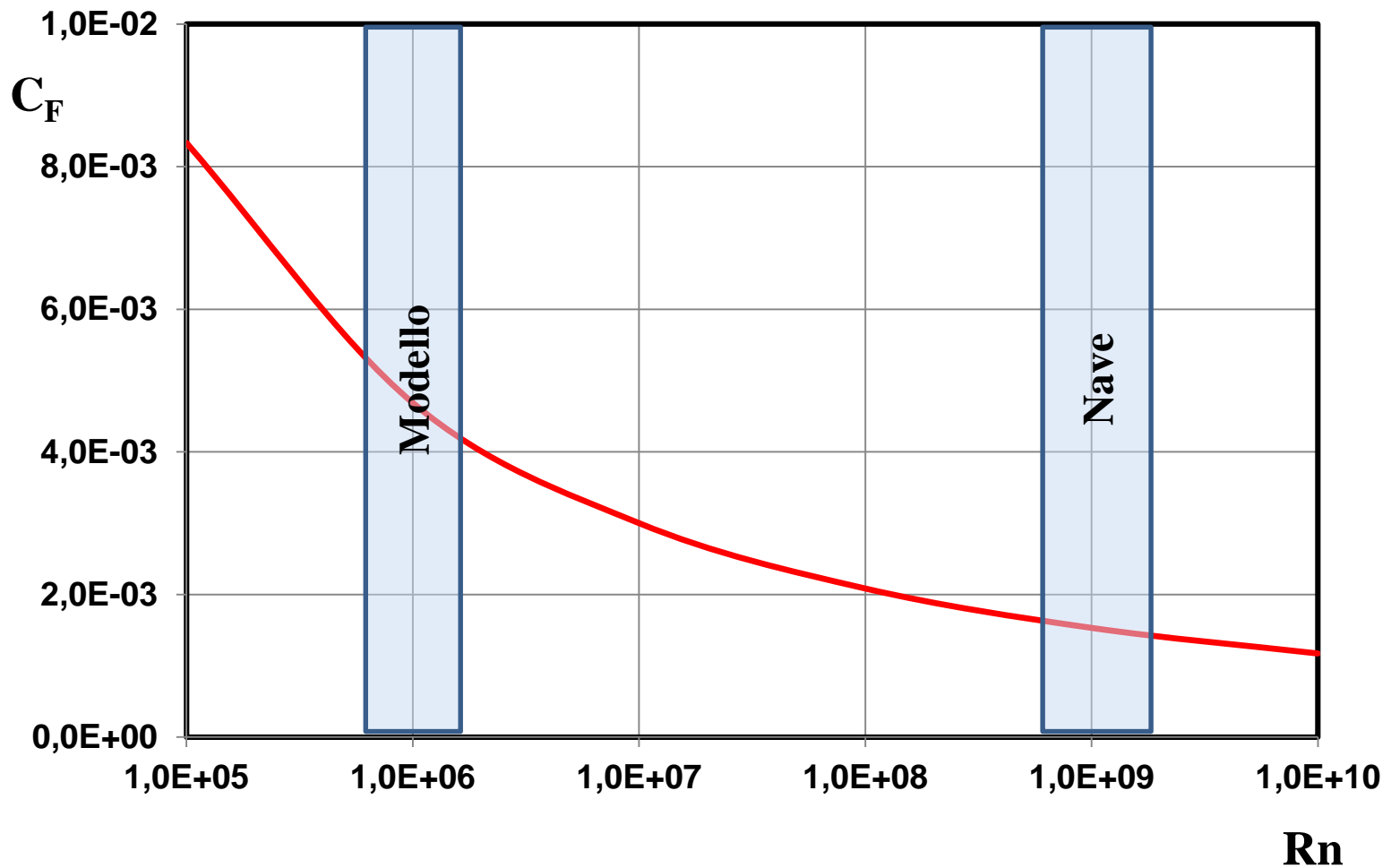
Coefficienti di resistenza

- **Coefficiente di resistenza totale:** $C_{Tm} = R_{Tm}/(\rho_m/2 * S_m * V_m^2)$
- $C_{Tm} = C_{Wm} + C_{Fm}$
- **Coefficiente di resistenza d'attrito:** $C_F = 0.075/(\log_{10} R_n - 2)^2$
(ITTC 57)
- **Coefficiente di resistenza d'onda:** $C_{Wm} = C_{Tm} - C_{Fm}$

NOTA: La resistenza d'onda C_w è denominata più correttamente “resistenza residua” in quanto comprende anche altre componenti (vorticità, ecc.). Si indica con il simbolo C_R

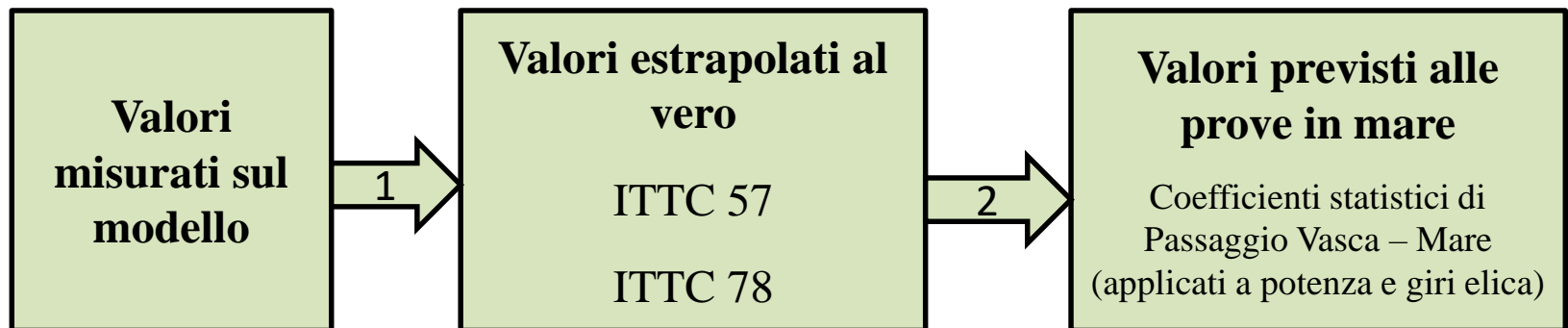


C_F (ITTC 57)



Estrapolazione al vero dei valori modello

- L'estrapolazione al vero dei valori misurati sul modello si può realizzare con due metodologie
 1. Formulazione classica ITTC 57
 2. Formulazione ITTC 78 aggiornata nel 2011
- I valori estrapolati devono essere corretti per ottenere i valori previsti in mare (passaggio vasca – mare)



1 – Formulazione classica ITTC 57

- $V_s = V_m * \sqrt{\lambda}$
- $C_R = C_{Tm} - C_{Fm}$
- $R_s = (C_R + C_{Fs} + C_A) * \rho_s / 2 * S_s * V_s^2$

C_R : coefficiente di resistenza residua

C_{Fs} : coefficiente di resistenza d'attrito

S_s : area della superficie di carena

V_s : velocità nave

ρ_s : peso specifico dell'acqua di mare

C_A : fattore di correlazione modello-nave (model – ship correlation allowance)



Fattore di correlazione C_A

Fattori che influiscono sul valore di C_A

A. Resistenze addizionali presenti sulla nave, ma non sul modello:

- Rugosità della carena
- Cordoni di saldatura del fasciame esterno
- Zinchi per la protezione catodica
- Marche d'immersione
- Barrotti per la protezione del bulbo dallo sfregamento delle catene delle ancore
- Scarichi fuori bordo
- Resistenza dell'aria (se non prevista separatamente dal coefficiente C_{AA})



Fattore di correlazione C_A

Fattori che influiscono sul valore di C_A

B - Resistenze addizionali dovute a metodologia di prova, errori, ecc.

- Dimensioni e qualità del modello
- Metodologia di acquisizione ed elaborazione dei dati, qualità degli strumenti
- Errori nelle misure (random e sistematici)
- Standard adottati per l'esecuzione delle prove mare
- Calcolo di C_R a partire da C_{Tm}
- Incertezza nella misura di $(1+k)$
- Metodo utilizzato per trattare la resistenza delle appendici
- Metodo di estrapolazione al vero (ITTC 57 - ITTC 78 - altri)



Fattore di correlazione C_A

Valore di C_A

Il valore da assegnare a C_A non si basa su presupposti teorici, ma solamente su assunzioni più o meno soggettive nonché sull'esperienza acquisita dai cantieri e dalle vasche analizzando i risultati delle prove mare. Assegnare un valore a C_A presenta quindi dubbi e punti interrogativi:

- Alcune vasche considerano solo la componente dovuta alla rugosità della carena (ΔC_F , solitamente assunto pari a $0.2 \cdot 10^{-3}$)
- Ogni vasca ha una propria formulazione (esperienza, analisi statistiche)
- Molti cantieri utilizzano propri valori e li impongono alle vasche
- ITTC 78 prevede solamente ΔC_F per il quale suggerisce una formula
- ITTC 78 (mod. 2011) introduce C_A e suggerisce formule separate per ΔC_F e C_A , ma riporta:

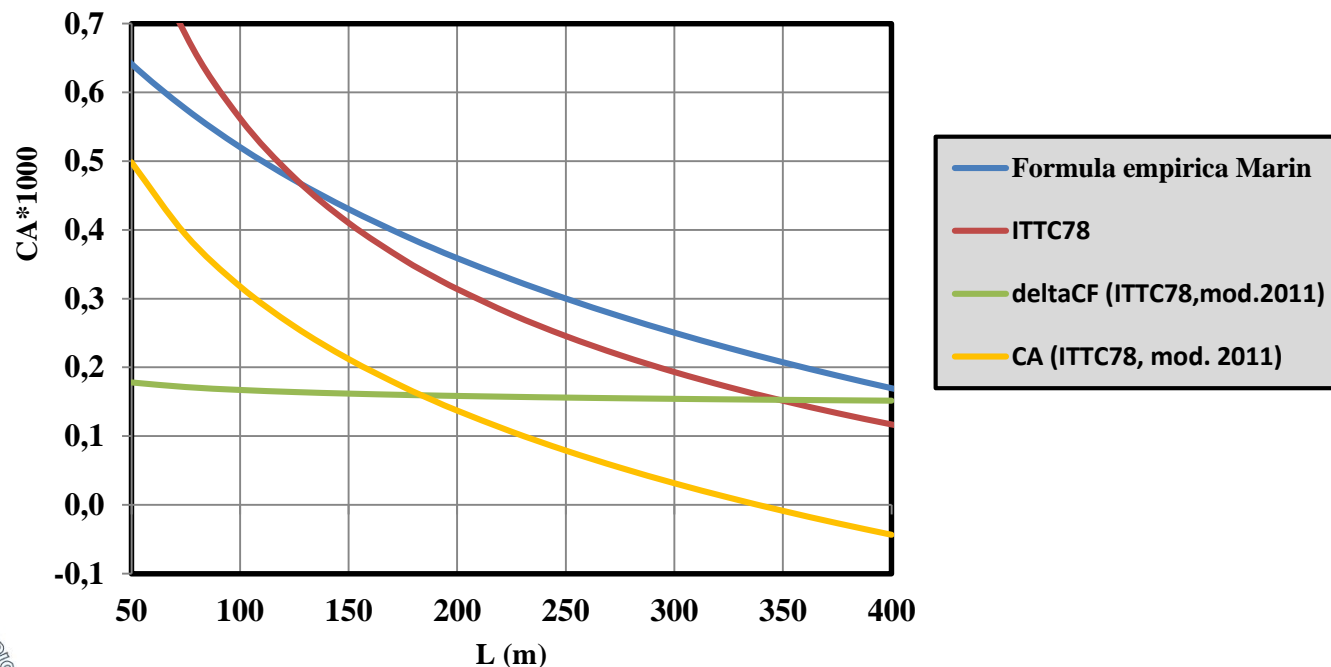
“It is recommended that each institution maintains their own model-full scale correlation”



Fattore di correlazione C_A

Suggerimenti per assegnare un valore a C_A

- Il valore di C_A varia solitamente tra $0.1 \cdot 10^{-3}$ e $0.5 \cdot 10^{-3}$
- Generalmente $0.4 \cdot 10^{-3}$ è considerato un valore ragionevole di default
- Il diagramma sottostante riporta il valore statistico proposto dalla vasca olandese Marin assieme a quello indicato da ITTC 78 e da ITTC 78, versione 2011

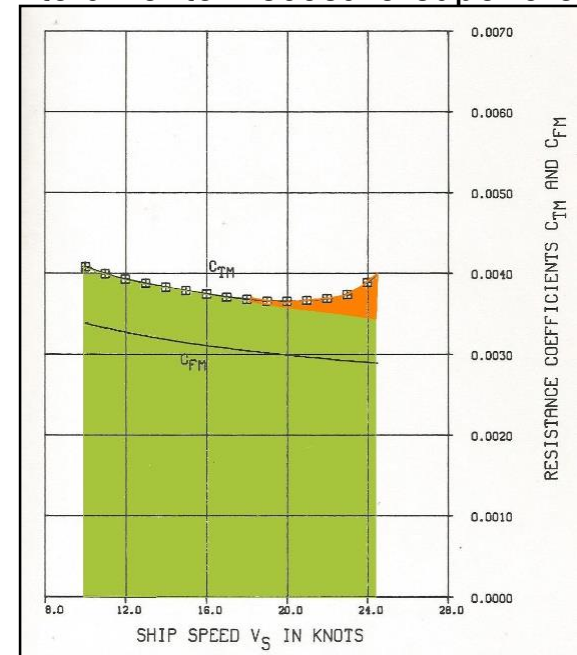


Fattore di forma (1+k)

Fattore di forma (1+k): la carena non è una lastra piana, ma una superficie tridimensionale che introduce resistenze viscosi in aggiunta a quelle di attrito calcolabili con la formula ITTC 57. A bassi numeri di Froude la resistenza totale è interamente viscosa e superiore, nel rapporto (1+k), a quella d'attrito calcolata con ITTC 57

$$C_{Vs} = (1+k) C_{Fs \text{ ITTC } 57}$$

$$(1+k) = 1.15 \div 1.30$$



Parliamo quindi di coefficiente di resistenza viscosa C_{Vs} e non solo d'attrito

Il calcolo della resistenza viscosa con il fattore di forma è un approccio più corretto dal punto di vista teorico, ma in pratica è da tenere presente che gran parte dei dati storici delle vasche e dei cantieri nonché quelli utilizzati dalla serie sistematiche non considerano (1+k)



2 – Formulazione ITTC 78

Aggiornata nel 2011, 26th ITTC, originariamente per monoelica, poi estesa a bielica

$$\bullet V_s = V_m * \sqrt{\lambda}$$

$$\bullet C_R = C_{Tm} - (1+k) C_{Fm}$$

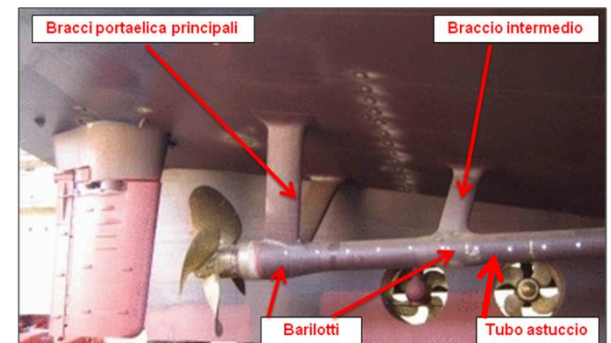
$$\bullet R_s = (C_R + (1+k) C_{Fs} + \Delta C_F + C_A + C_{AA} + C_{Apps}) * (\rho_s / 2 * S_s * V_s^2)$$

- C_R : coefficiente di resistenza residua
- $(1+k)$: fattore di forma determinato sperimentalmente a bassi numeri di Froude o da formulazioni statistiche
- ΔC_F : è in relazione alla sola rugosità della carena
- C_A : fattore di correlazione modello-nave. ITTC propone una formula, ma raccomanda che sia scelto in base all'esperienza del cantiere o della vasca
- C_{AA} : coefficiente di resistenza dell'aria = $0.001 A_T / S_s$.
- A_T : area trasversale della nave al disopra del galleggiamento
- C_{Apps} : coefficiente di resistenza delle appendici (vedi «Resistenza delle appendici di carena»)



Resistenza delle appendici di carena

- Alette antirollio
 - Timoni
 - Bracci portaelica
 - Linea d'asse e ringrossi
 - Aperture eliche di manovra
- La resistenza delle appendici è di solito inglobata nel coefficiente di resistenza residua C_R con la formulazione ITTC 57
- E' rappresentata dal coefficiente C_{Apps} con ITTC 78



Resistenza delle appendici di carena

- Navi monoelica

Nelle navi monoelica le appendici sono principalmente il timone e le alette antirollio che abitualmente vengono inglobate nella superficie bagnata di carena in quanto la resistenza è praticamente solo viscosa. Il coefficiente di resistenza residua C_R tiene conto della resistenza delle appendici

- Navi bielica

Le appendici sono corpi immersi e non superfici piane appartenenti alla carena. R_n è minore di quello della carena, la resistenza è proporzionalmente maggiore di quella della nave e non è possibile inglobarla totalmente in C_R

Con la formulazione ITTC 57 è prassi abbastanza consolidata calcolare C_R con appendici (C_{RApp}) incorporando solamente una parte di R_{appm}

Con ITTC 78 la procedura è simile: il coefficiente C_{Apps} è solamente una parte del valore relativo al modello



Resistenza delle appendici di carena

$$R_{Appm} = (R_{TAppm} - R_{Tm0})$$

R_{Tm0} : resistenza modello senza appendici

R_{TAppm} : resistenza modello con appendici

ITTC 78

$$R_{Apps} = k * R_{Appm} \longrightarrow C_{Apps} \quad (k = 0.6 \div 1.0) \quad (\text{oppure calcolo diretto})$$

ITTC 57

$$R_{TAppm} = [(R_{Rm0} + R_{Apps}) + R_{Fm}] = R_{RApp} + R_{Fm}$$

$$C_{TAppm} = [(C_{R0} + C_{Apps}) + C_{Fm}] = C_{RApp} + C_{Fm}$$

Comunemente si assume $k = 0.5$



Resistenza delle appendici di carena

Bielica, V= 27 nodi		
Appendice	$\Delta\%$ Superficie bagnata	$\Delta\%$ R_{Appm}
Bracci portaelica Asse e Ringrossi	2,7	9,1
Bracci portaelica Asse e Ringrossi Timoni	4,3	13,5
Timoni	1,6	4,5

Monoelica, V= 20 nodi		
Appendice	$\Delta\%$ Superficie bagnata	$\Delta\%$ R_{Appm}
Timone	1,3	1,5



Metodi di previsione della resistenza R_S

Problema principale: determinare il coefficiente C_R

La scelta del metodo dipende dalla fase del progetto in cui ci si trova

1. Metodo semplice
2. Dati storici ed analisi statistiche
3. Serie sistematiche
4. Metodo di Holtrop - Mennen
5. Prove vasca (in abbinamento a CFD)



1. Metodo semplice

Assumere la resistenza residua come percentuale su quella totale

- Navi lente (cisterne e bulkcarries): $F_n = 0.12 \div 0.18$

$$R_{Rm} = (0.10 \div 0.15) R_{Tm}$$

- Navi moderatamente veloci (portacontainer, crociera, traghetti): $F_n = 0.22 \div 0.28$

$$R_{Rm} = (0.15 \div 0.25) R_{Tm}$$

- Navi veloci (traghetti veloci, navi militari): $F_n = 0.30 \div 0.35$

$$R_{Rm} = (0.30 \div 0.45) R_{Tm}$$



2. Dati storici ed analisi statistiche

- I dati storici del cantiere, patrimonio aziendale di primaria importanza, è la prima opzione per individuare una rosa di carene le più vicine possibile a quella in progetto e fare le prime valutazioni
- Le vasche navali ed i maggiori cantieri dispongono di consistenti banche dati elaborate con analisi statistiche per ottenere una relazione empirica tra la resistenza, la potenza all'elica ed i parametri geometrici della carena
- Sono dati riservati e non disponibili, ma utilizzati dalle vasche per fornire al cliente una previsione delle prestazioni
- Analisi di regressione su dati sperimentali
 - Metodo di Holtrop – Mennen per scafi dislocanti
 - Metodo di Savitsky per scafi plananti



3. Serie sistematiche

In una fase preliminare si possono usare le serie sistematiche, cioè i risultati di prove sperimentali eseguite su vari modelli derivati da un capostipite variandone sistematicamente i principali parametri geometrici. I valori di C_R sono comunemente presentati in funzione di F_n e dei vari parametri geometrici. Noto C_F , calcolato con ITTC 57, si ottiene la resistenza totale

- Il risultato può essere fuorviante se usate come strumento unico. Devono essere utilizzate in abbinamento con dati sperimentali noti di navi simili a quella in progetto per calibrare il risultato
- E' raccomandabile l'utilizzo nei seguenti casi:
 - In modo comparativo: modificare i dati sperimentali noti per una carena base, simile a quella in progetto, applicando la differenza percentuale tra la resistenza di due navi della serie equivalenti a quella base e quella nuova
 - Processo di ottimizzazione: analizzare l'effetto di variare le dimensioni ed i coefficienti di carena sul risultato



3. Serie sistematiche

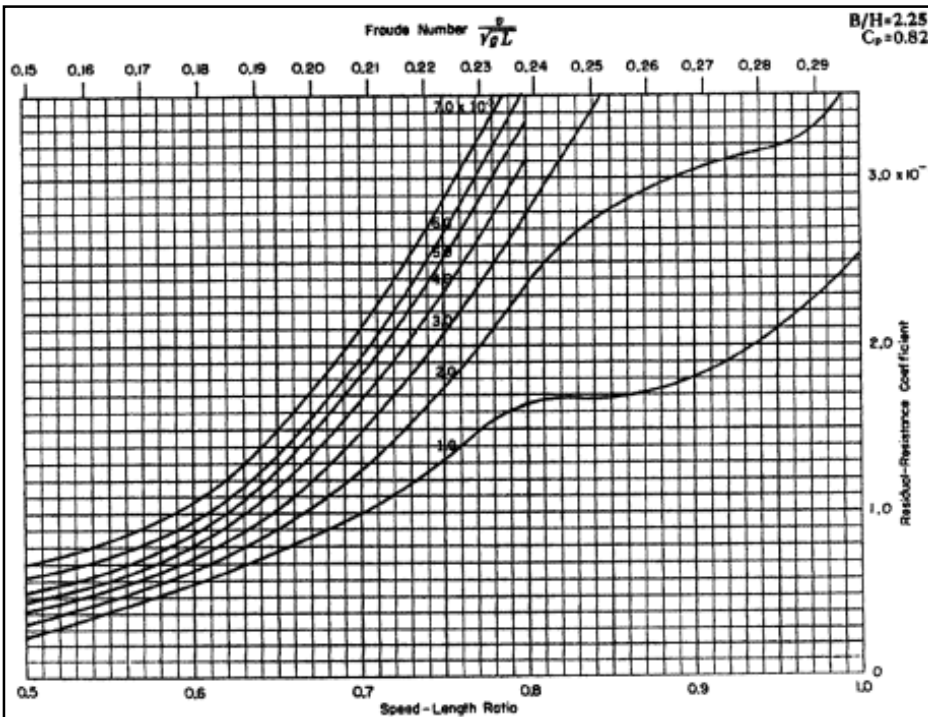
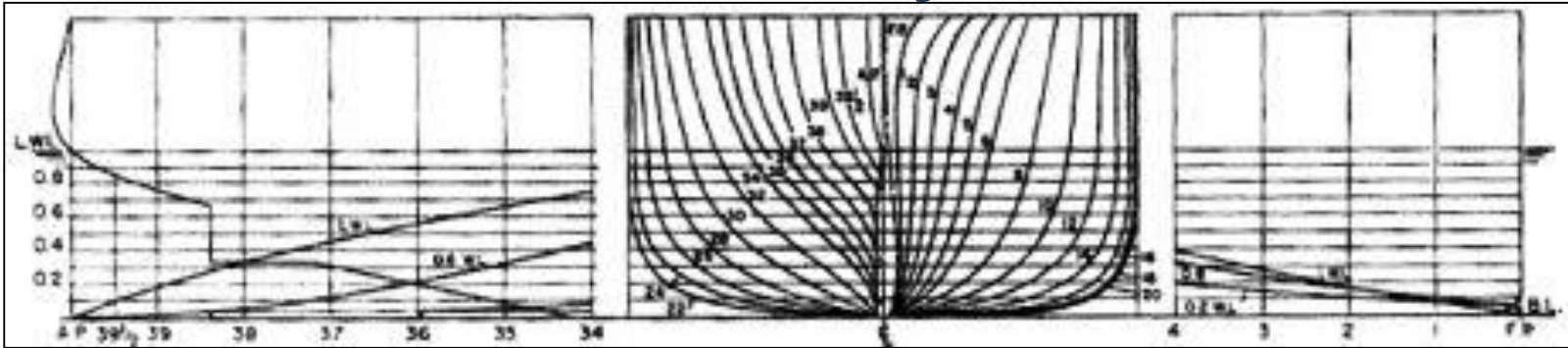
Table 10.1 Parameter Variation in Some Systematic Series

DISPLACEMENT SHIPS					
Series	C_B	$L/\nabla^{1/3}$	L/B	B/T	Fn_L
Taylor (1933)	0.48–0.86	5–11		2.25 and 3.75	0.09–0.6
Series 60 (Todd, 1963)	0.6–0.8	5.1–6.1	6.5–8.5	2.5–3.5	0.1–0.32
Lindblad (1946, 1948, 1950)	0.535–0.7		7.4	2.4	0.18–0.32
SSPA fast cargo liners (Nordström, 1948–1949)	0.625	5.5–6.8	6.3–8.7	2.2–2.8	0.21–0.31
SSPA cargo liners (Williams, 1969)	0.525–0.725	5.1–6.9	6.2–8.4	2.4	0.18–0.32
SSPA tankers (Edstrand, Freimanis, & Lindgren (1953–1956)	0.725–0.8		7.2–8.1	2.3–2.5	0.14–0.22
SSPA coastal ships (Warholm, 1953–1955)	0.60–0.75	4.5–6.1	5.5–7.5	2.0–2.8	0.16–0.36
BSRA (Lackenby & Parker, 1966)	0.65–0.80	4.2–5.8	5–8	2.1–3.9	0.14–0.28
MARAD (Roseman, 1987)	0.80–0.875		4.5–6.5	3.0–4.5	0.10–0.20
Delft sailing yachts (Keuning & Sonnenberg, 1998)	$C_p = 0.52–0.60$	4.34–8.5	2.73–5	2.46–19.4	0.1–0.6
SEMIDISPLACEMENT SHIPS					
Series	C_B	$L/\nabla^{1/3}$	L/B	B/T	Fn_L
Taylor, extended (Graff, Kracht, & Weinblum, 1964)	0.48–0.86	5–11		2.25–3.75	0.09–0.9
KTH/NSMB Series (Nordström, 1951)	0.35–0.55	5.8–7.8		3.2–4.4	> 0.9
Series 63 (Beys, 1963)			2.5–6.0		
Series 64 (Yeh, 1965)	0.35–0.55	8–12	8.5–18	2–4	0–1.5
SSPA small, fast displacement ships (Lindgren, 1969)	0.40–0.55	6–8		3–4	0.35–1.3
NPL (Bailey, 1976)	0.40		3.3–7.5	1.7–10.2	0.3–1.2
PLANING HULLS					
Series	C_B	$L/\nabla^{1/3}$	L/B	$A_p/\nabla^{2/3}$	Fn_v
EMB Series 50 (Davidson & Suarez, 1949)	0.35–0.42	5.5–9			< 4
Series 62 (Clement, 1963)	0.44–0.50	4.1–7.7	2–7	4.3–8.5	0.5–6
Series 65 (Hadler, Hubble, & Holling, 1974)		4–10.4	2.4–9.4	5–8.5	0–3

BSRA, British Ship Research Association; EMB, Experimental Model Basin (at the Washington Navy Yard); KTH, Royal Institute of Technology (Stockholm); NSMB, Netherland Ship Model Basin (presently MARIN); MARAD, Maritime Administration (USA); NPL, National Physical Laboratory (London).



Serie Taylor



Fn: 0.15 ÷ 0.30

Cp: 0.48 ÷ 0.86

B/T: 2.25, 3.00, 3.75

Volume/ L_{wl}^3 : $0.7 \cdot 10^{-3} \div 8.75 \cdot 10^{-3}$



4. Metodo di Holtrop - Mennen

È un complesso metodo statistico basato sull'analisi di regressione su più di 300 modelli di varie tipologie di navi provati alla vasca olandese Marin. È un metodo completo, calcola anche la superficie di carena, i coefficienti propulsivi e la potenza all'elica per poi valutare il diametro del propulsore. Può essere applicato utilizzando alcuni software disponibili. La resistenza totale R_T è espressa come segue:

$$R_T = R_F(1+k) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A$$

- R_F : resistenza d'attrito secondo ITTC 57
- $(1+k)$: fattore di forma
- R_{APP} : resistenza delle appendici, inclusi i tunnel per le eliche di manovra
- R_W : resistenza d'onda
- R_B : resistenza addizionale del bulbo
- R_{TR} : resistenza addizionale del transom poppiero
- R_A : resistenza di correlazione modello-nave

Ogni componente è calcolabile con una formula in funzione dei principali rapporti e coefficienti della carena. Analogamente per i coefficienti propulsivi $(1-w)$, $(1-t)$, η_R



4. Metodo di Holtrop - Mennen

Resistenza delle appendici: $R_{APP} = 0,5 \rho S_{app} V_S^2 (1+k)_{App} C_F$

- S_{app} : Superficie appendice
- C_F : Coefficiente d'attrito nave ITTC 57
- $(1+k)_{App}$: Fattore di forma appendice:
 - rudder behind skeg 1.5 ÷ 2.0,
 - rudder behind stern 1.3 ÷ 1.5
 - twin-screw balance rudders 2.8
 - shaft brackets 3.0
 - skeg 1.5 ÷ 2.0
 - strut bossings 3.0
 - hull bossings 2.0
 - shafts 2.0 ÷ 4.0
 - stabilizer fins 2.8
 - Dome 2.7
 - bilge keels 1.4



4. Metodo di Holtrop - Mennen

Commenti e raccomandazioni

- Il metodo va usato con cautela e deve essere validato con dati sperimentali certi
- L'analisi di regressione si basa su un ampio numero di parametri geometrici scelti fra quelli più comunemente usati dall'ingegnere navale, ma non completamente rappresentativi della carena in progetto implicando un limite nell'accuratezza del risultato
- La correlazione modello nave R_A deve essere tarata sull'esperienza del progettista



Determinazione della potenza all'elica P_D

1. Analisi statistica dei database storici (di solito includono anche la potenza all'elica P_D)
2. Nota la P_E valutare il rendimento propulsivo η_D
3. Metodo di Holtrop-Mennen
4. Prove vasca



Determinazione della potenza all'elica P_D

- Valutazione del rendimento propulsivo in combinazione con P_E (da navi simili oppure stimati con formule statistiche reperibili in letteratura)

$$P_D = P_E / \eta_D$$
$$\eta_D = [(1-t) / (1-w)_{\text{eff}}] * \eta_R * \eta_0$$

Monoelica

- $(1-w)_{\text{eff}} = 0.85 \div 0.75$, $C_B = 0.55 \div 0.80$
- $(1-t) = 0.70 \div 0.80$
- $\eta_R = 0.98 \div 1.03$
- $\eta_0 = 0,55 \div 0,65$
- $\eta_D = 0,55 \div 0,67$

Bielica

- $(1-w)_{\text{eff}} = 0.90 \div 0.88$, $C_B = 0.55 \div 0.75$
- $(1-t) = 0.85 \div 0.95$
- $\eta_R = 0.98 \div 1.02$
- $\eta_0 = 0.65 \div 0,72$
- $\eta_D = 0,60 \div 0,70$



5. Prove vasca

Impianto		L (m)	B (m)	T (m)	V (m/s)	L max Modello (m)	D max Elica (mm)	RMP Elica
MARIN Wageningen	Deep Water Basin	250	10,5	5,5	9	13		~1000
	Vacuum tank	240	18	8	8	12	400	
	Cavitation Tunnel	4			11	Solo Elica	400	3000
SSPA Goteborg	Deep Water Basin	260	10	5	11			~1000
	Cavitation Tunnel	2,5 ÷ 8			23 ÷ 9,9	Modello intero		
HSVA Hamburg	Deep Water Basin	300	18	6	10	12		~1000
	HYKAT	11			12,6	Modello intero	300	3600
	Medium cavitation tunnel	2			9,5	Solo Elica	290	3480
	Large high speed cavitation tunnel	2,25			19,5	Solo Elica	400	4500
ForceTecnology Lingby	Deep Water Basin	240	12	5,5	14	~10		~1000
SVA Vienna	Deep Water Basin	180	10	5	9	~8		~1000
INSEAN Roma	Deep Water Basin 1	470	13,5	6,5	15	8		~1000
	Deep Water Basin 2	220	9	3,5	10	8		~1000
Krylov Institute S. Petersburg	Deep Water Basin	1324	15	7	20	10		~1000
	Cavitation Tunnel	1,3			13	Solo Elica	600	

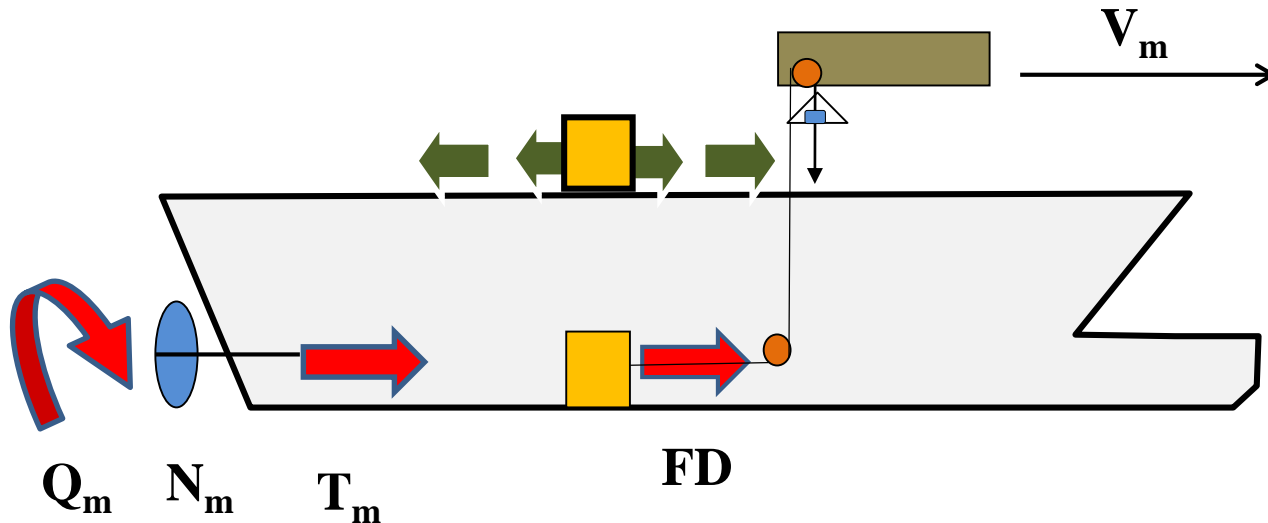


5. Prove vasca



5. Prove vasca

Prova di autopropulsione con modello libero
(metodo continentale - speed variation test)

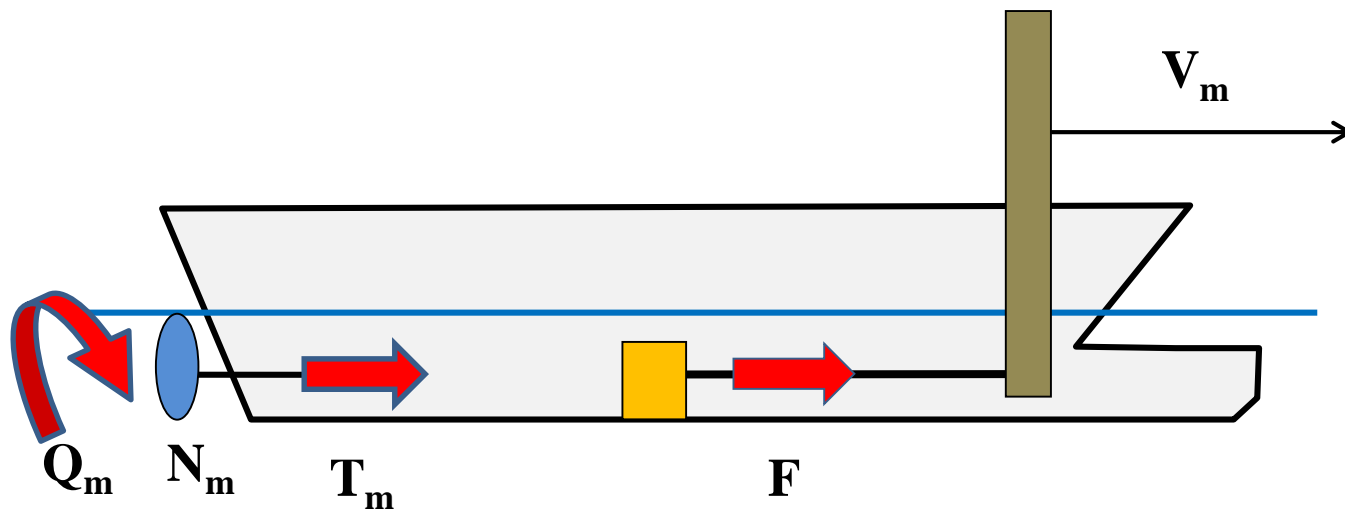


$$FD = (C_{Fm} - (C_{Fs} + C_A)) * (\rho_m/2 * S_m * V_m^2) \quad (\text{Friction Deduction})$$

$$\text{Resistenza "al vero" su modello} = (R_{Tm} - FD) = (C_R + C_{Fs} + C_A) * (\rho_m/2 * S_m * V_m^2)$$

5. Prove vasca

Prova di autopropulsione con modello vincolato
(metodo inglese - load variation test)



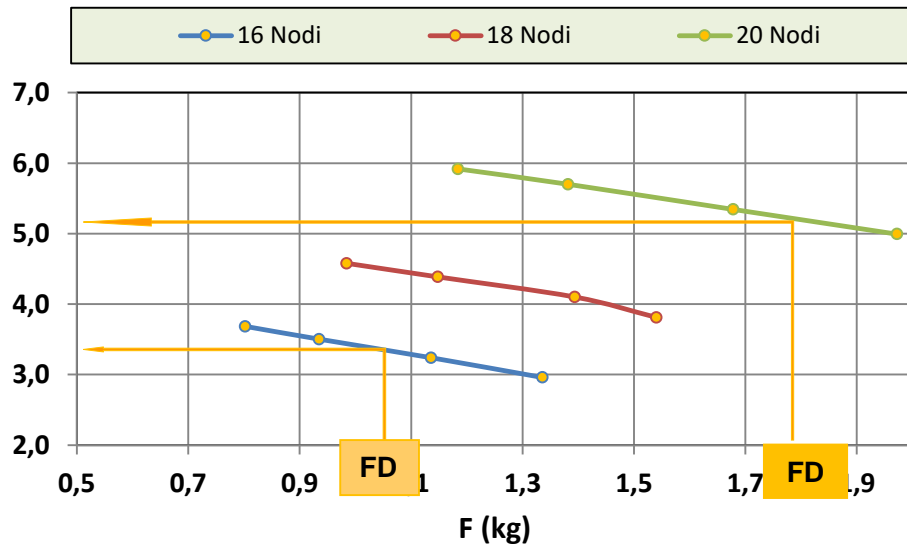
F : forza di traino agente sul modello

Quando $F = FD$ si realizza il “punto di autopropulsione” analogamente al caso del modello libero

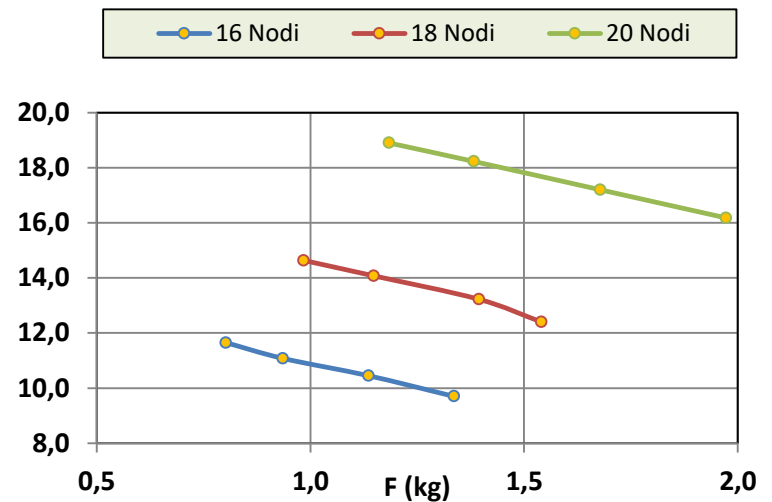
5. Prove vasca

Load variation test - valori modello

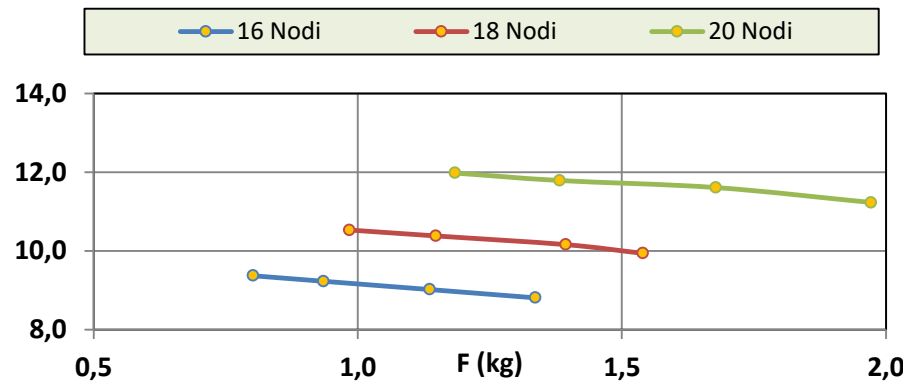
Tm (kg)



Qm (kg*cm)



Nm (n/s)



Estrapolazione al vero

ITTC 57

- $V_s = V_m * \sqrt{\lambda}$
- $R_s = (R_m - F_D) * \lambda^3 * \rho_s / \rho_m$
- $R_s = (C_R + C_{Fs} + C_A) * \rho_s / 2 * S_s * V_s^2$
- $P_e = R_s * V_s$
- $RPM_s = RPM_m / \sqrt{\lambda}$
- $T_s = T_m * \lambda^3 * \rho_s / \rho_m$
- $P_{dm} = Q_m * RPM_m$
- $P_{ds} = P_{dm} * \lambda^{3.5} * \rho_s / \rho_m$



Estrapolazione al vero

ITTC 78 (revisionato nel 2011, 26th ITTC)

- $V_s = V_m * \sqrt{\lambda}$
- $C_R = C_{Tm} - (1+k) C_{Fm}$
- $R_s = (C_R + (1+k) C_{Fs} + \Delta C_F + C_A + C_{AA} + C_{Apps}) * (\rho_s / 2 * S_s * V_s^2)$
- Da prova AP si ricava: $(1-t)$, $(1-w)_m$, η_R
- Trasposizione al vero della scia media (solo per monoelica)
 - $w_s = (t+0.04) + (w_m-t-0.04) * ((1+k) * C_{Fs} + \Delta C_F) / ((1+k) * C_{Fm})$
- $T_s = R_s / (1-t)$
- Trasposizione del diagramma di elica isolata al vero
- $K_{Ts} / J_s^2 = T_s / (\rho_s * D^4 * (V_s * (1-w)_s)^2)$
- Dal diagramma di elica isolata al vero si calcola J_s , K_{Q0s}

$$RPM_s = (V_s * (1-w)_s) / D * J_s$$

$$P_{ds} = K_{Q0s} * (\rho_s * D^5 * RPM_s^3) / \eta_R$$



Il passaggio vasca – mare

I valori di potenza e giri elica estrapolati al vero con entrambi i metodi vanno corretti per arrivare ai valori attesi alle prove in mare

$$P_{d \text{ trial}} = k_p * P_{ds}$$

$$\text{RPM}_{\text{trial}} = k_n * \text{RPM}_s$$

Non esiste una formulazione unica e condivisa per i coefficienti k_p e k_n poiché dipendono da vari fattori non analizzabili statisticamente:

- Valore di C_A adottato alle prove vasca
- Metodo di estrapolazione adottato
- Vasca utilizzata
- Modalità di esecuzione delle prove mare e del rilievo della potenza (torsionometro o consumi)
 - Torsionometro: $P_s = \text{RPM} * Q$
 - Consumi: $P_B = \{\text{consumo (litri/h)} * \text{densità (Kg/litro)}\} / \{\text{consumo specifico (Kg/Kwh)}\}$
 - Il consumo specifico va corretto per la differenza tra il potere calorifico del combustibile usato alle prove mare e quello alle prove al banco del motore



Il passaggio vasca – mare

- Correzione per vento e mare
- Correzione per fondale
- Correzione per temperatura acqua di mare
- Correzione per dislocamento
 - Potenza Contrattuale = Potenza alla prova $\cdot (D_c/D_p)^{2/3}$
 - Potenza Contrattuale = Potenza alla prova $\cdot (P_{VC}/P_{VP})$
P_{VC} : Potenza vasca al dislocamento contrattuale D_c
P_{VP} : Potenza vasca al dislocamento di prova D_p

- Esperienza del cantiere e della vasca

I coefficienti correttivi sono stabiliti dall'esperienza del cantiere o da quelle vasche che dispongano dei dati delle prove mare. Sono di solito dati riservati e non divulgati



Vasca navale: problemi e raccomandazioni

- Principali problemi
 - Vasche diverse forniscono risultati diversi per lo stesso modello. Valori medi del $3 \div 4\%$ per P_E e P_D e di 0,2 nodi per la velocità, ma con forti dispersioni. Valori estremi del $6 \div 9\%$ e $0,4 \div 0,6$ nodi
 - Ogni vasca ha la sua metodologia per le misure e l'elaborazione dei dati
 - Il valore di C_A ed il passaggio vasca mare sono stabiliti da ogni vasca in modo autonomo e generalmente non divulgato
 - Tempi e costi
- Raccomandazioni
 - Utilizzare la stessa vasca, per quanto possibile
 - Tarare i risultati di vasche diverse con la propria banca dati
 - Eventualmente imporre il valore di C_A in base alla propria esperienza
 - Utilizzare i dati prove mare per un continuo affinamento del passaggio vasca-mare



Condizioni ideali di prove mare (vasca)

VS	N	N	PD	PE	ETA-D	TH	R	THDF	FD	TH	CAD
KNOTS	RPM	HZ	KW	KW	PE/PD	UNIT KN	KN	1-R/ TH-UNIT	N	PROP KN	
20.0	117.0	1.950	17023	11148	.655	1216	1083	.109	35.10	1296	427
20.5	120.1	2.002	18465	12054	.653	1285	1143	.111	36.65	1369	424
21.0	123.3	2.056	20011	13020	.651	1358	1205	.112	38.23	1447	421
21.5	126.7	2.111	21732	14090	.648	1438	1274	.114	39.83	1532	416
22.0	130.2	2.169	23691	15296	.646	1528	1351	.116	41.46	1628	409
22.5	133.8	2.229	25833	16611	.643	1625	1435	.117	43.13	1731	401
23.0	137.3	2.289	28100	18022	.641	1725	1523	.117	44.82	1838	394
23.5	141.0	2.350	30545	19528	.639	1831	1615	.118	46.53	1950	386
24.0	144.7	2.412	33217	21122	.636	1944	1711	.120	48.28	2070	378
24.5	148.6	2.476	36127	22810	.631	2065	1810	.123	50.05	2199	370
25.0	152.5	2.542	39298	24597	.626	2194	1912	.128	51.85	2336	362

NOTES:-FOR EXPLANATION OF ABBREVIATIONS SEE LIST OF SYMBOLS

-THE RESULTS ABOVE HAVE BEEN OBTAINED BY FROUDE SCALING FROM SELF-PROPULSION POINT OF SHIP CORRESPONDING TO A SCALE EFFECT CORRECTION ON RESISTANCE FD DETERMINED BY MEANS OF

THE ITTC-1957 FORMULA

AND A MODEL-SHIP CORRELATION ALLOWANCE OF $CA = .00020$

FOR A WETTED AREA OF $S = 15.704 \text{ M}^2$ (SHIP VALUE = 9815.0 M^2)

AND A SUBMERGED OVERALL LENGTH OF $LOS = 10.741 \text{ M}$ (SHIP $L = 268.52 \text{ M}$)

FOR A TANK WATER TEMPERATURE OF 19.1 DEGREES C.

$\frac{2}{3} \quad 3$

- $CAD = .7477 * DISV \quad *VS / PD$ IN UNITS AS ABOVE AND $DISV = 42415.0 \text{ M}^3$

-THE RESULTS WERE SCALED UP TO WATER OF 15.0 DEGREES C

AND A MASS DENSITY OF 1025.0 KG/M^3

-NO CORRECTIONS HAVE BEEN MADE FOR OTHER SCALE EFFECTS

HENCE, THE VALUES ABOVE REPRESENT (FICTITIOUS) TANK CONDITIONS

-POWER AND THRUST ARE GIVEN AS SUM OF PORT AND STARBOARD VALUES

-MODELCONDITION: 3 BOW THRUSTER TUNNELS I WITH GRIDS I

BILGE KEELS I



Condizioni ideali di prove mare (mare)

VS KNOTS	N RPM	N HZ	PD-TANK KW	PS KW
20.0	121.2	2.020	17023	18385
20.5	124.5	2.074	18465	19942
21.0	127.8	2.130	20011	21612
21.5	131.2	2.187	21732	23470
22.0	134.9	2.248	23691	25587
22.5	138.6	2.310	25833	27899
23.0	142.3	2.372	28100	30348
23.5	146.1	2.435	30545	32988
24.0	150.0	2.500	33217	35874
24.5	154.0	2.567	36127	39017
25.0	158.1	2.635	39298	42442
23.07	142.8	2.380		30690

NOTES:-FOR EXPLANATION OF ABBREVIATIONS SEE LIST OF SYMBOLS

-THE RESULTS ABOVE HAVE BEEN OBTAINED BY APPLYING THE FOLLOWING CORRELATION FACTORS TO THE TANK VALUES

$$PS = 1.080 * PD-TANK$$

$$N = 1.020 * N-TANK + \text{CORRECTION FOR OVER/UNDERLOADING}$$

-THE RESULTS ARE FOR IDEAL TRIAL CONDITIONS, IMPLYING UNRESTRICTED DEEP WATER OF 15.0 DEGREES C. AND A MASS DENSITY OF 1025.0 KG/M3, A CLEAN HULL AND PROPELLER BLADES AND NO EFFECTS OF WIND AND WAVES

-POWER VALUES ARE TOTALS OF BOTH SHAFTS

-MODELCONDITION: 3 BOW THRUSTER TUNNELS I WITH GRIDS I
BILGE KEELS I

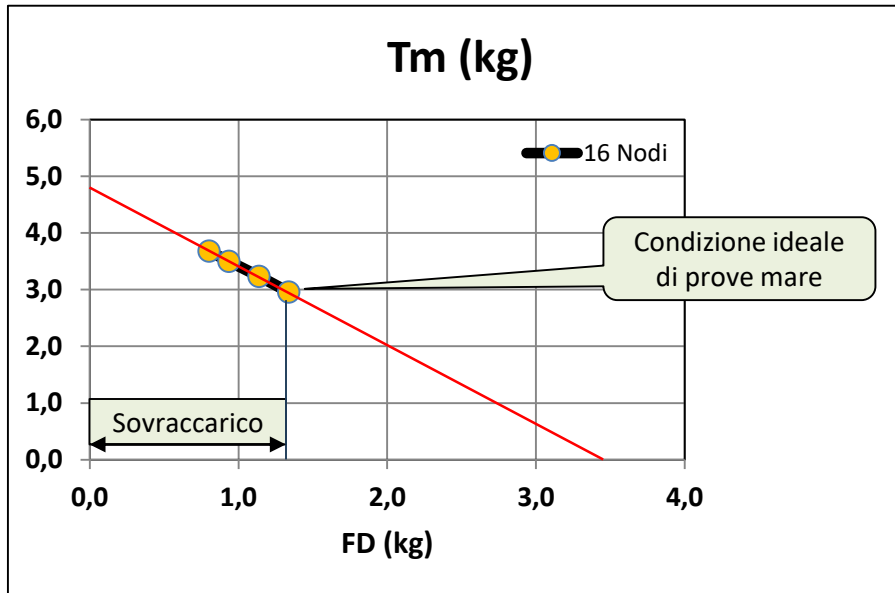


Sovraccarico

- La potenza determinata con qualsivoglia metodo si riferisce alle condizioni ideali di prove mare (trial condition)
- In servizio la potenza è più alta. Principali cause:
 - Condizioni meteomarine
 - Deterioramento della superficie della carena con incremento della rugosità, accumulo di sporcizia su carena ed elica
- Stima del sovraccarico e conseguenze sulle prestazioni
 - Valore assunto comunemente in base all'esperienza dell'esercizio nave: +15%
 - Valutare l'incremento di resistenza con calcoli o prove di seakeeping in relazione alla rotta ed al profilo operativo
 - Assumere un valore di C_A incrementato e condurre prove di autopropulsione. Il metodo inglese è il più adatto allo scopo

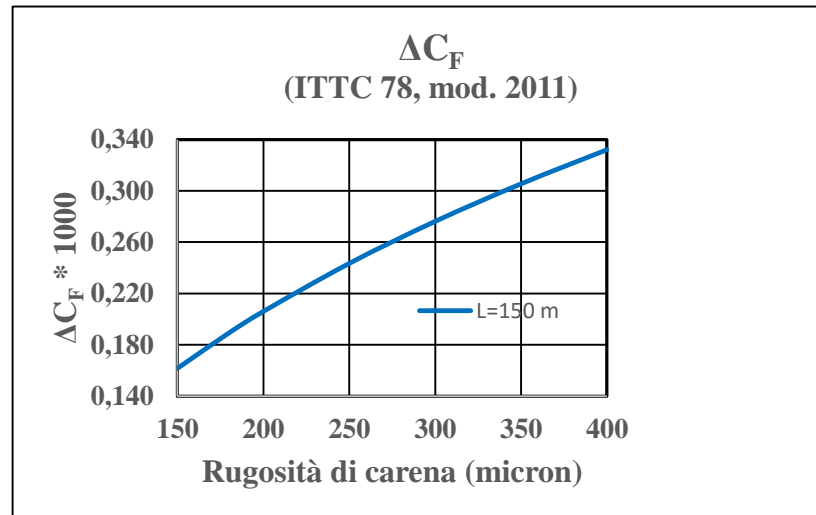


Sovraccarico



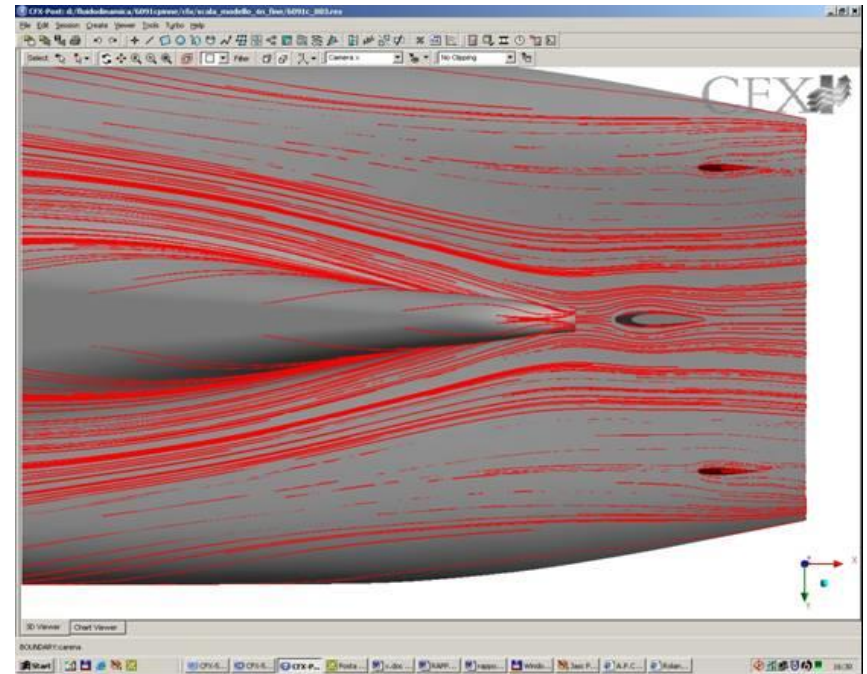
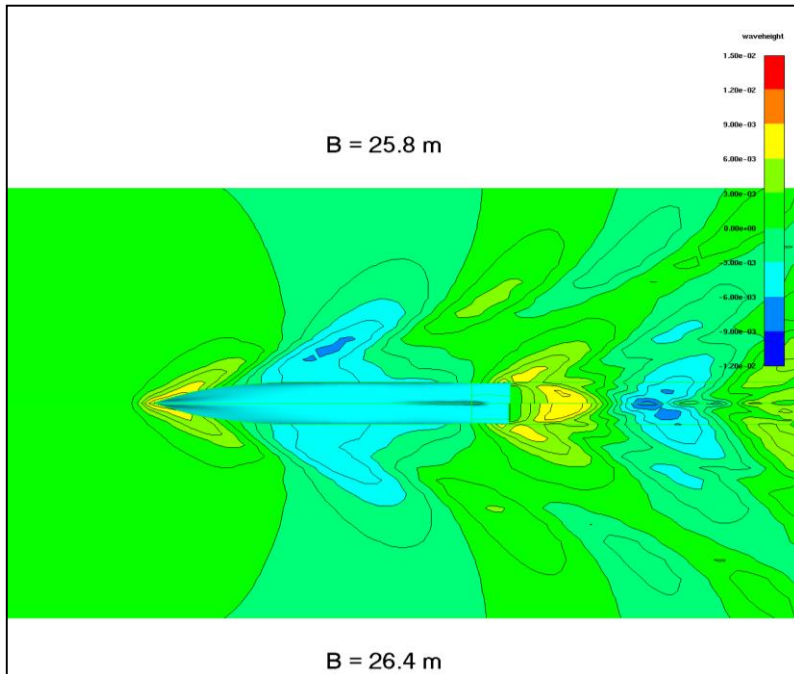
Spinta T_m sul modello: è il carico sull'elica corrispondente al vero

$$T_m = (R_{T_m} - FD) / (1-t)$$



CFD

- I calcoli CFD sono un complemento alle prove sperimentali
- Utili nella fase di ottimizzazione della carena
- Non sostituiscono le prove per stabilire le prestazioni finali



Confronto tra due carene

Cap 1 – Potenza di propulsione

Linee di corrente a poppa

Prof. Paolo Frandoli



Stabilire la potenza del motore di propulsione (MCR)

$$\text{Potenza all'elica: } P_D = \frac{P_E}{\eta_D} \quad \eta_D = \frac{P_E}{P_D} = \frac{P_E}{P_T} \cdot \frac{P_T}{P_D} = (\eta_H \eta_0 \eta_R)$$

$$MCR = \frac{P_E}{\eta_D \eta_m \eta_s (EM)} (SM)$$

- η_D : rendimento quasi propulsivo (0,65 ÷ 0,70)
- η_m : rendimento meccanico riduttore e linea d'asse entro scafo (0,97 ÷ 0,99)
- η_{ms} : rendimento meccanico linea d'asse fuori scafo (0,98 ÷ 0,99)
- EM: Engine Margin (0,85)
- SM: Sea Margin (1,15)

$$MCR = (2,0 \div 2,2) P_E$$

