



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE

Corso di
Propulsione

Elica Isolata

Prof. Paolo Frandoli

AA 2022-2023

Elica Isolata

Elica operante in un ambiente idrodinamicamente non disturbato lontana da corpi e ostacoli

Caratteristiche elica isolata ottenute con:

- Metodi analitici
- Prove su modelli

Grandezze

- **Caratteristiche geometriche** (geom. elica, inclinazione asse)
- **Caratteristiche cinematiche** (V_A , ω , grandezze adimensionali)
- **Caratteristiche dinamiche** (valori medi sul giro delle forze in gioco)



Caratteristiche Cinematiche

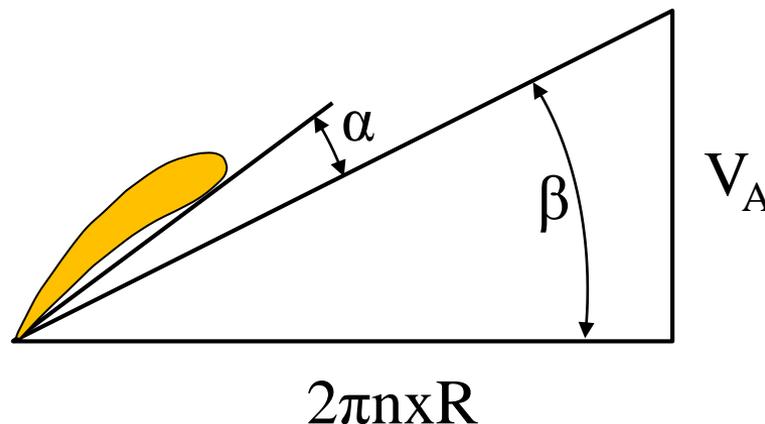
Moto dell'elica:

- Traslazione assiale con velocità d'avanzo V_A
- Rotazione attorno all'asse con velocità angolare $\omega = 2\pi n$

COEFFICIENTE D'AVANZO

$$J = \frac{V_A}{nD} = \pi \times \text{tg } \beta$$

($x=0,7$)



Caratteristiche Dinamiche

Le caratteristiche dinamiche vengono riassunte nei seguenti coefficienti adimensionali

Coefficiente di Spinta

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

Coefficiente di Momento Torcente

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

Rendimento elica isolata

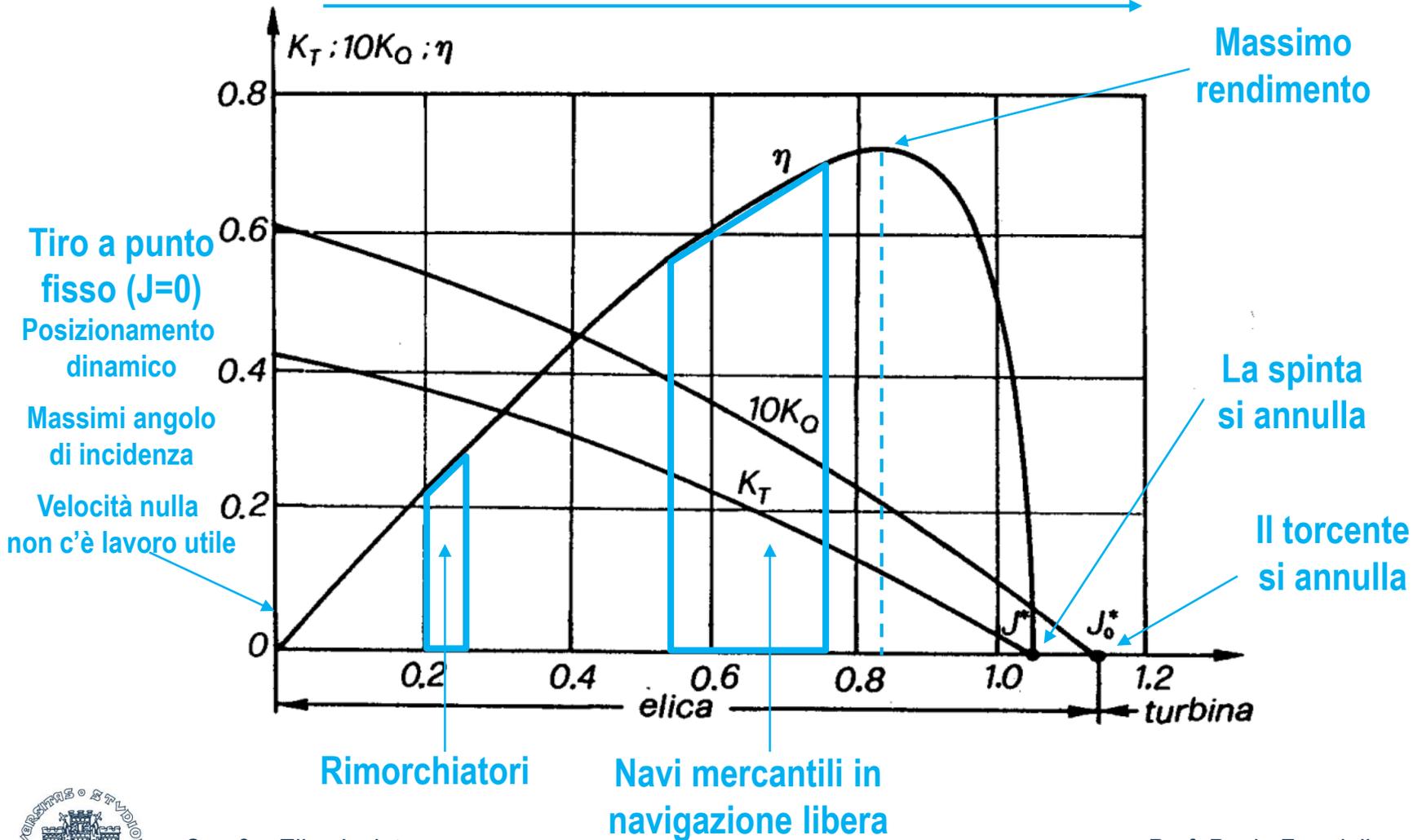
$$\eta_0 = \frac{TV_A}{\omega Q} = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_Q}$$

Eliche geometricamente simili operanti a pari J presentano valori uguali di K_T , K_Q e η_0



Diagramma di Funzionamento

Se J aumenta α si riduce e con esso la spinta e il torcente



Variazione di J , K_T e K_Q con velocità nave

VS KNOTS	VM M/S	NM HZ	FN	KT	KQ	KQ-D	J	WT	ETA-D	ETA-R
18.0	1.637	10.667	.199	.1950	.03915	.03933	.848	.136	.669	1.005
18.5	1.682	10.969	.205	.1951	.03917	.03935	.848	.136	.669	1.005
19.0	1.728	11.272	.210	.1952	.03919	.03937	.848	.136	.669	1.005
19.5	1.773	11.576	.216	.1955	.03922	.03940	.847	.136	.669	1.005
20.0	1.819	11.884	.222	.1958	.03928	.03946	.847	.135	.669	1.005
20.5	1.864	12.195	.227	.1963	.03934	.03953	.846	.135	.669	1.005
21.0	1.910	12.507	.233	.1968	.03942	.03960	.845	.135	.668	1.005

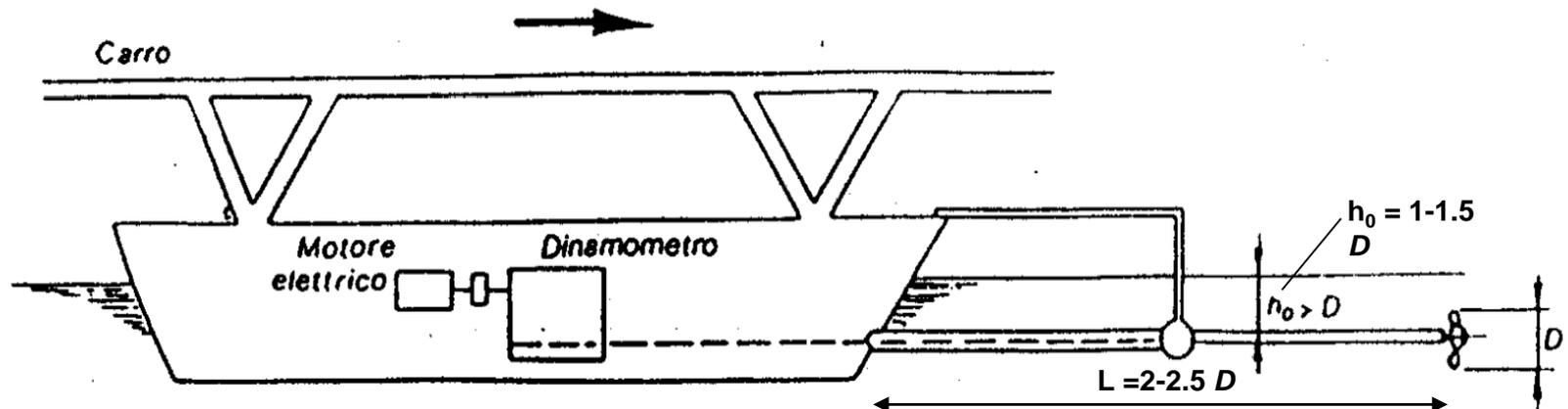
VS KNOTS	VM M/S	NM HZ	FN	KT	KQ	KQ-D	J	WT	ETA-D	ETA-R
16.0	1.666	7.276	.228	.1876	.03475	.03535	.795	.279	.671	1.017
16.5	1.718	7.553	.235	.1886	.03491	.03551	.793	.276	.670	1.017
17.0	1.770	7.830	.242	.1896	.03505	.03566	.791	.274	.669	1.017
17.5	1.823	8.107	.249	.1904	.03517	.03578	.789	.271	.668	1.017
18.0	1.875	8.392	.256	.1915	.03532	.03594	.787	.269	.667	1.017
18.5	1.927	8.689	.263	.1928	.03552	.03615	.784	.266	.665	1.018
19.0	1.979	9.007	.271	.1948	.03581	.03645	.779	.263	.663	1.018
19.5	2.031	9.349	.278	.1974	.03620	.03684	.774	.260	.660	1.018
20.0	2.083	9.686	.285	.1997	.03652	.03718	.769	.257	.657	1.018
20.5	2.135	10.025	.292	.2018	.03683	.03750	.764	.254	.655	1.018
21.0	2.187	10.368	.299	.2038	.03713	.03781	.760	.252	.652	1.018
21.5	2.239	10.715	.306	.2058	.03741	.03810	.756	.249	.650	1.018



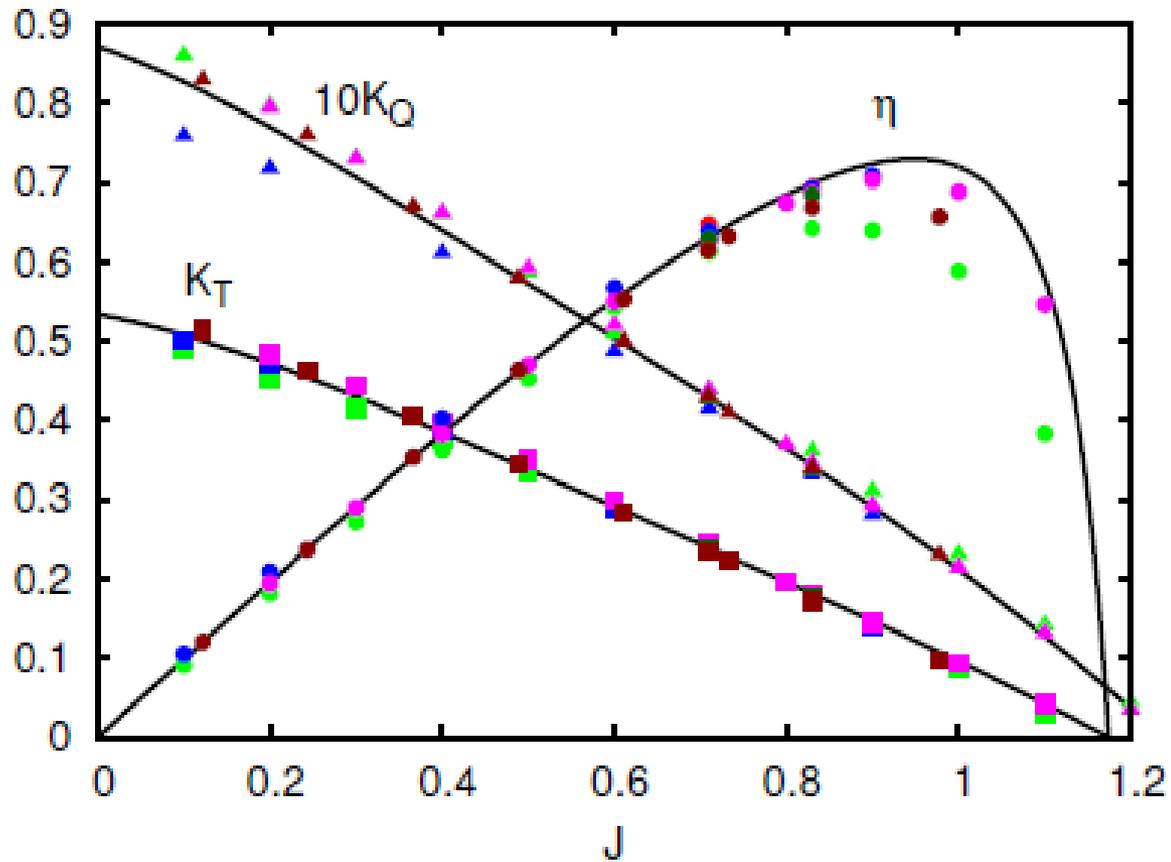
Prove Sperimentali

Determinare K_T , K_Q e η_0 al variare di J , misurando V , n , T e Q

- $h_0 = (1.0 \div 1.5)D$
- n costante e tale che $Rn > (3 \div 5) \times 10^5$
- V variabile per variare J
- $L = (2 \div 2.5)D$ per non avere l'influenza del carro dinamometrico
- $D \geq 0,20 \div 0,25$ m
- $N = \sim 15$ giri/s
- $Rn = \frac{C_{0,7R}}{v} \sqrt{V^2 + (0,7D\pi n)^2}$



Calcolo CFD



Effetto scala

metodo ITTC 78

$$K_{T_s} = K_{T_m} + \Delta K_T$$

$$K_{Q_s} = K_{Q_m} - \Delta K_Q$$

con:

$$\Delta K_T = 0.3 \Delta C_D \left(\frac{P}{D}\right) \left(\frac{cZ}{D}\right)$$

$$\Delta K_Q = 0.25 \Delta C_D \left(\frac{cZ}{D}\right)$$

dove:

$$\Delta C_D = 2 \left(1 + \frac{2t_m}{c}\right) \left[\frac{0.044}{Rn_x^{1/6}} - \frac{5}{Rn_x^{2/3}} - \left(1.89 + \log \frac{c}{k_r}\right)^{-2.5} \right]$$

Rapporto spessore corda
a 0,75 R

Rn modello a 0.75 R

rugosità della pala
 $k_r \approx 30 \times 10^{-6}$



Effetto scala

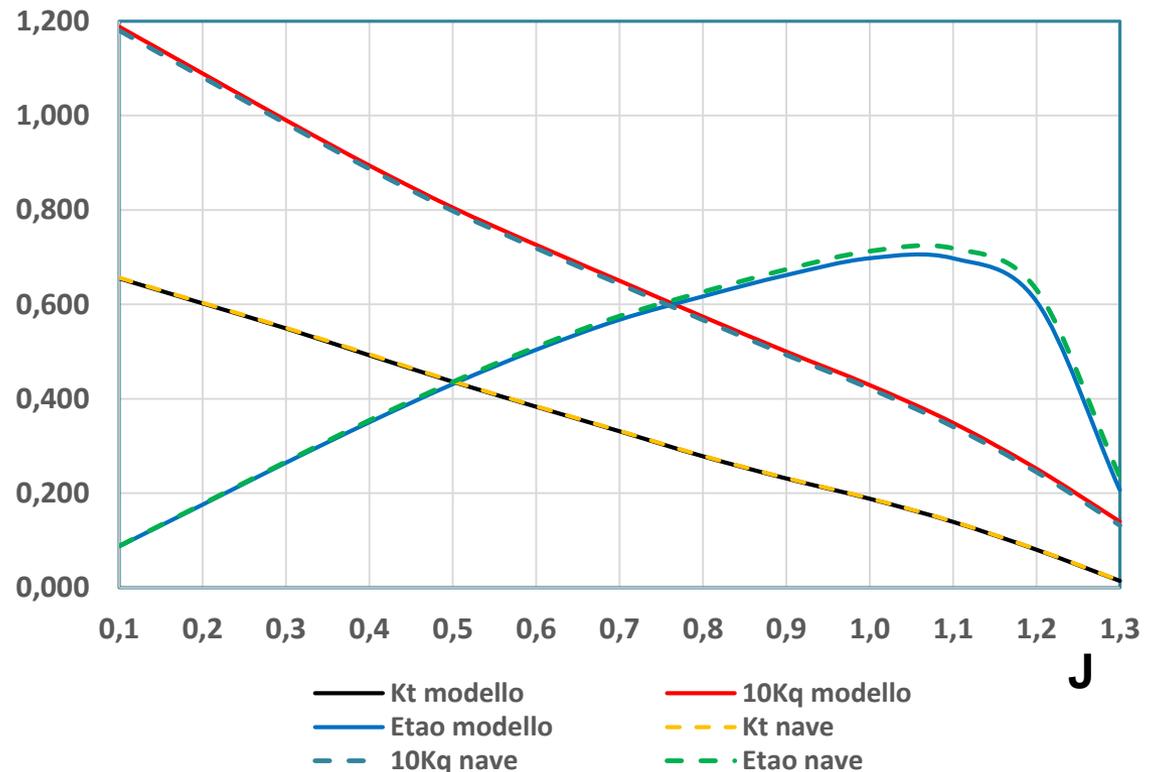
Esempio con ITTC 78

($D_{nave} = 4,9 \text{ m}$, $D_{modello} = 0,194 \text{ m}$)

Effetto scala

Variazione percentuale tra valori nave e modello

J	KT	10 KQ	η_0
0,1	0,15	-0,67	0,83
0,2	0,17	-0,73	0,91
0,3	0,18	-0,71	0,90
0,4	0,41	-0,78	1,20
0,5	0,23	-0,87	1,11
0,6	0,26	-0,96	1,24
0,7	0,30	-1,08	1,39
0,8	0,36	-1,22	1,60
0,9	0,43	-1,40	1,86
1,0	0,53	-1,63	2,20
1,1	0,72	-2,29	3,08
1,2	1,25	-2,78	4,14



Influenza dei parametri geometrici

- Rapporto passo/diametro

- A_e/A_0

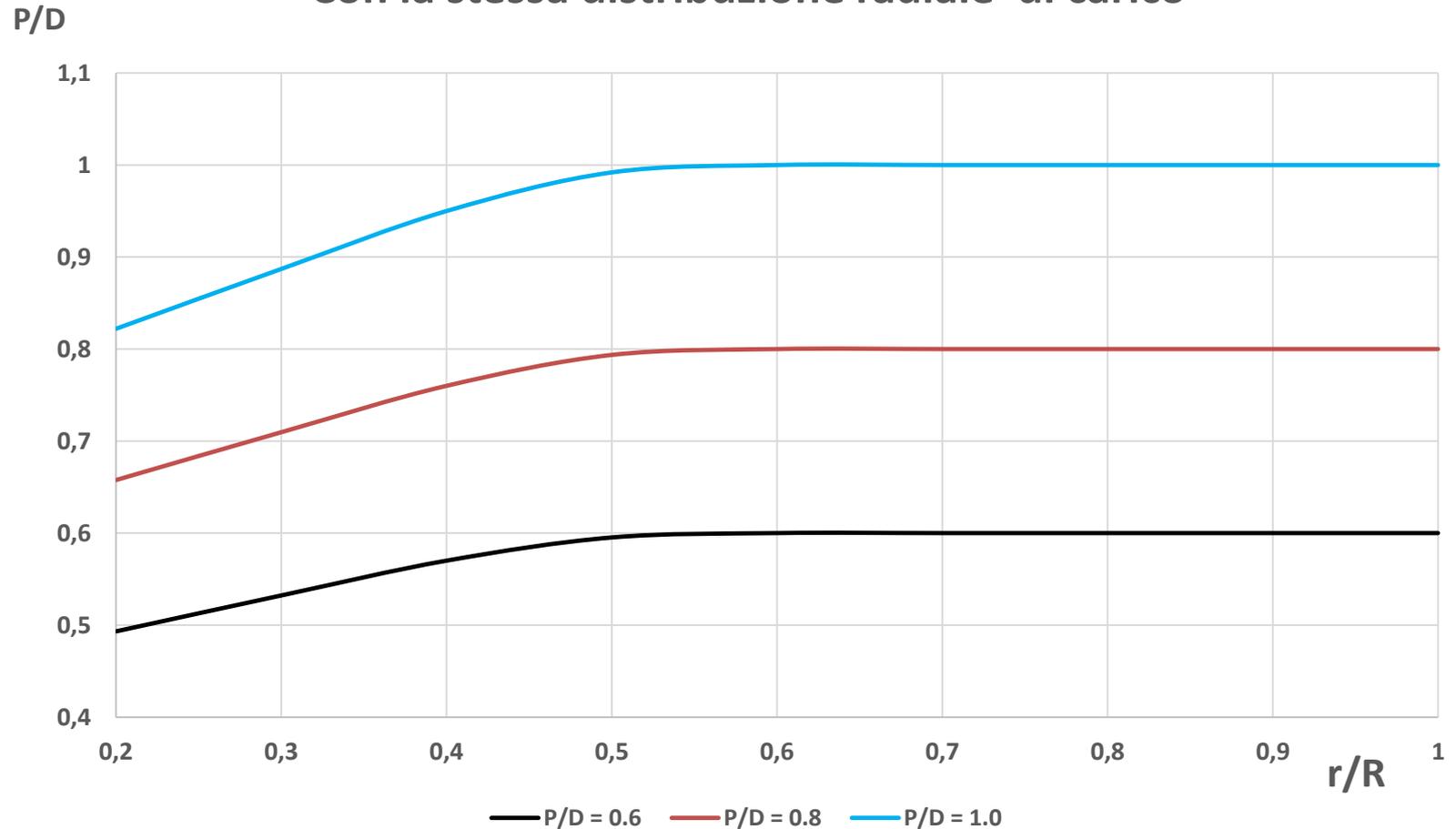
- Numero delle pale

Il rendimento diminuisce all'aumentare del numero delle pale

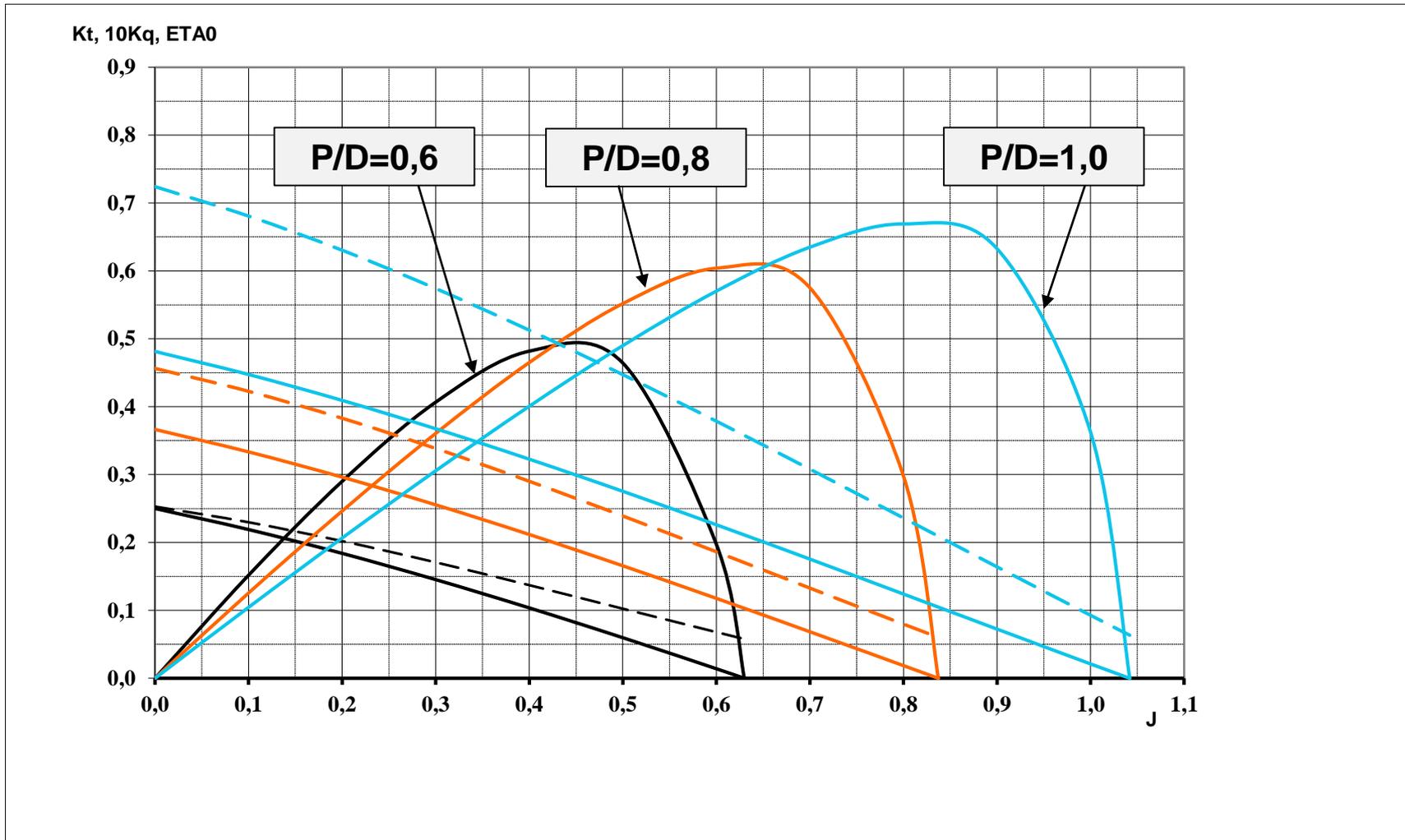


Variazione di passo

Con la stessa distribuzione radiale di carico

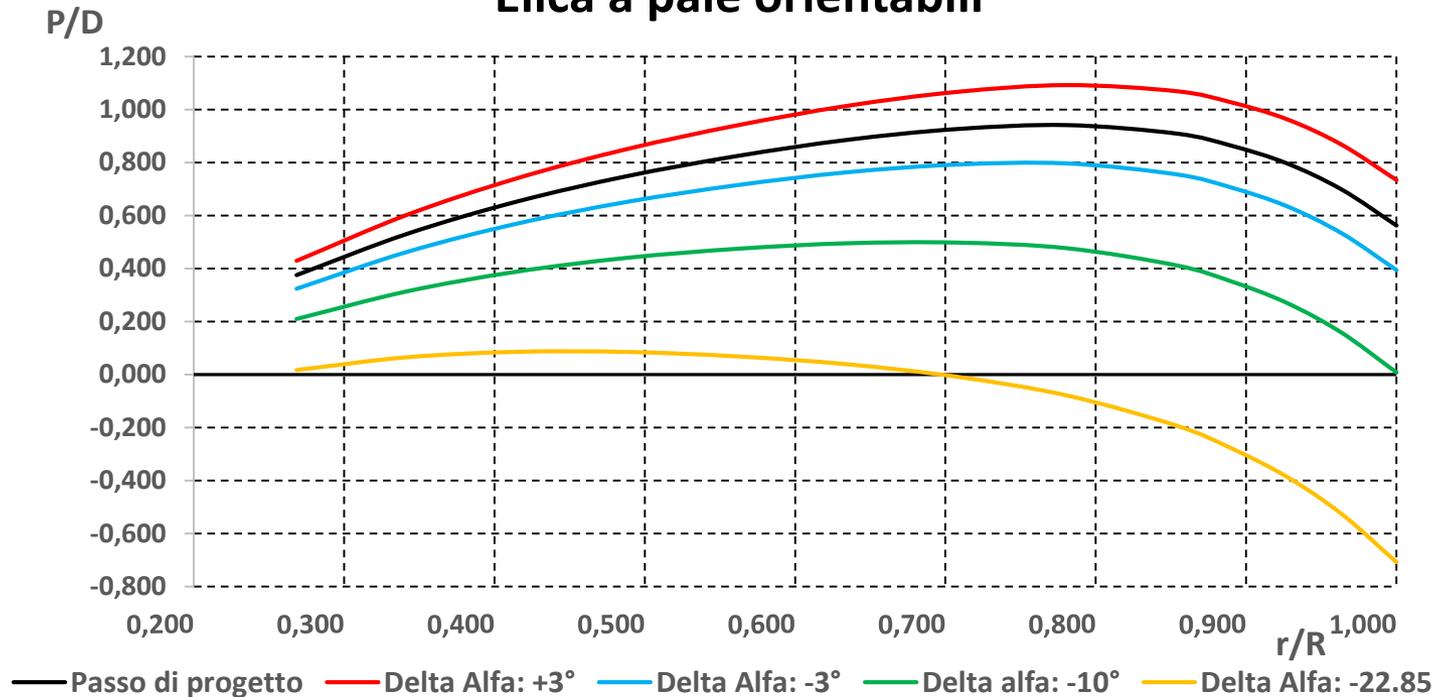


Effetto P/D



Variazione di passo

Elica a pale orientabili



$$P/D = \pi \times \text{tg}(\alpha + \Delta\alpha)$$

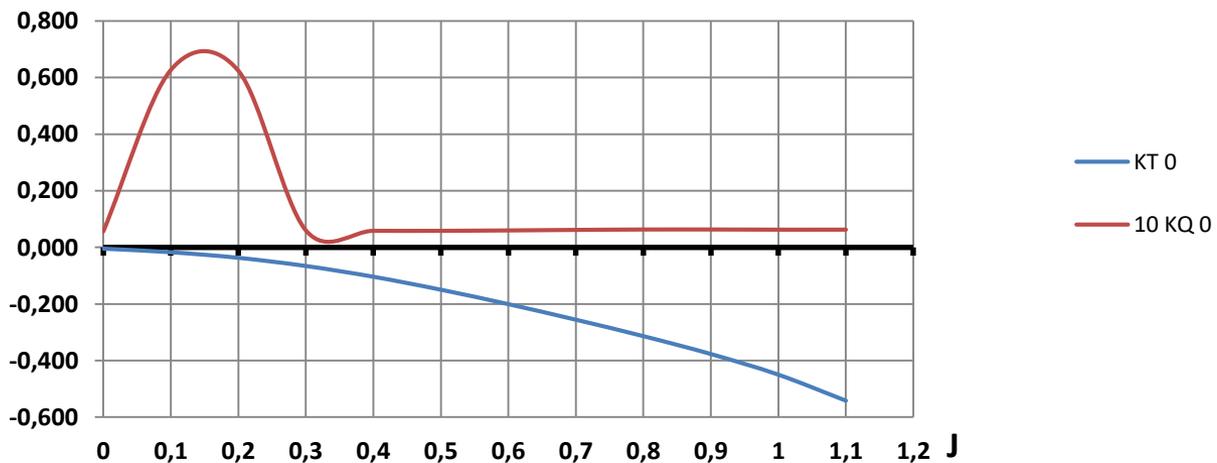
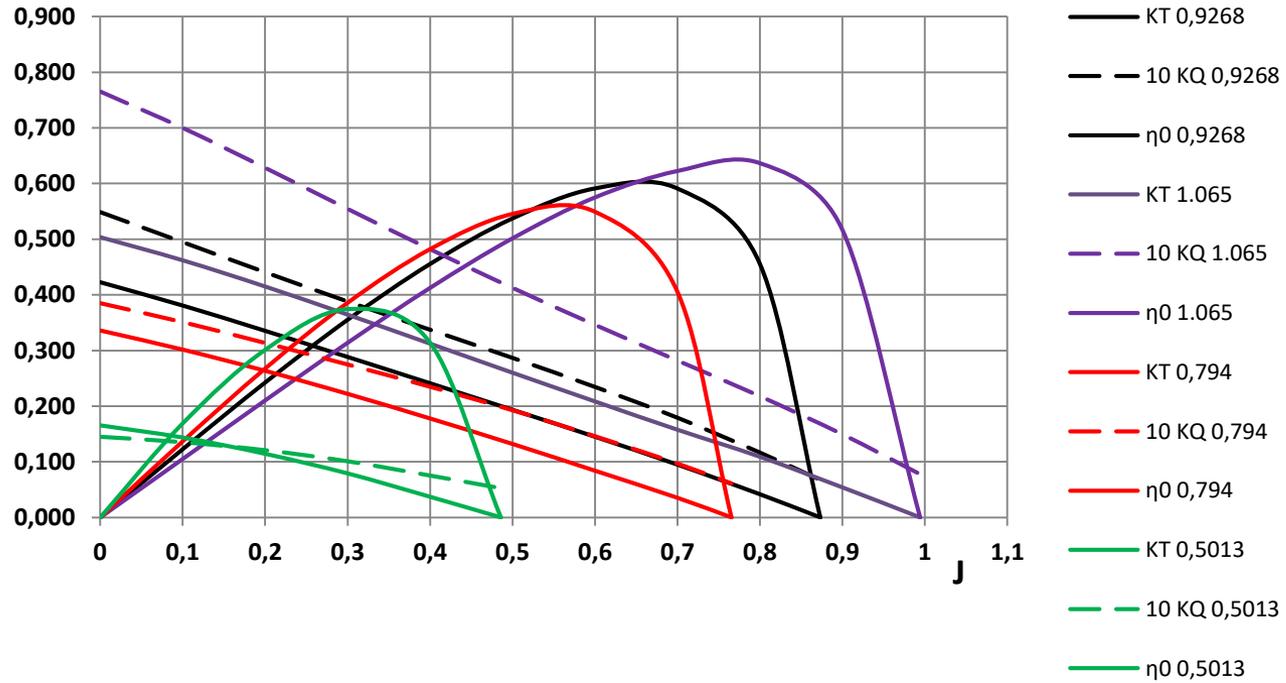
$$x = r/R$$

α : angolo di passo di progetto

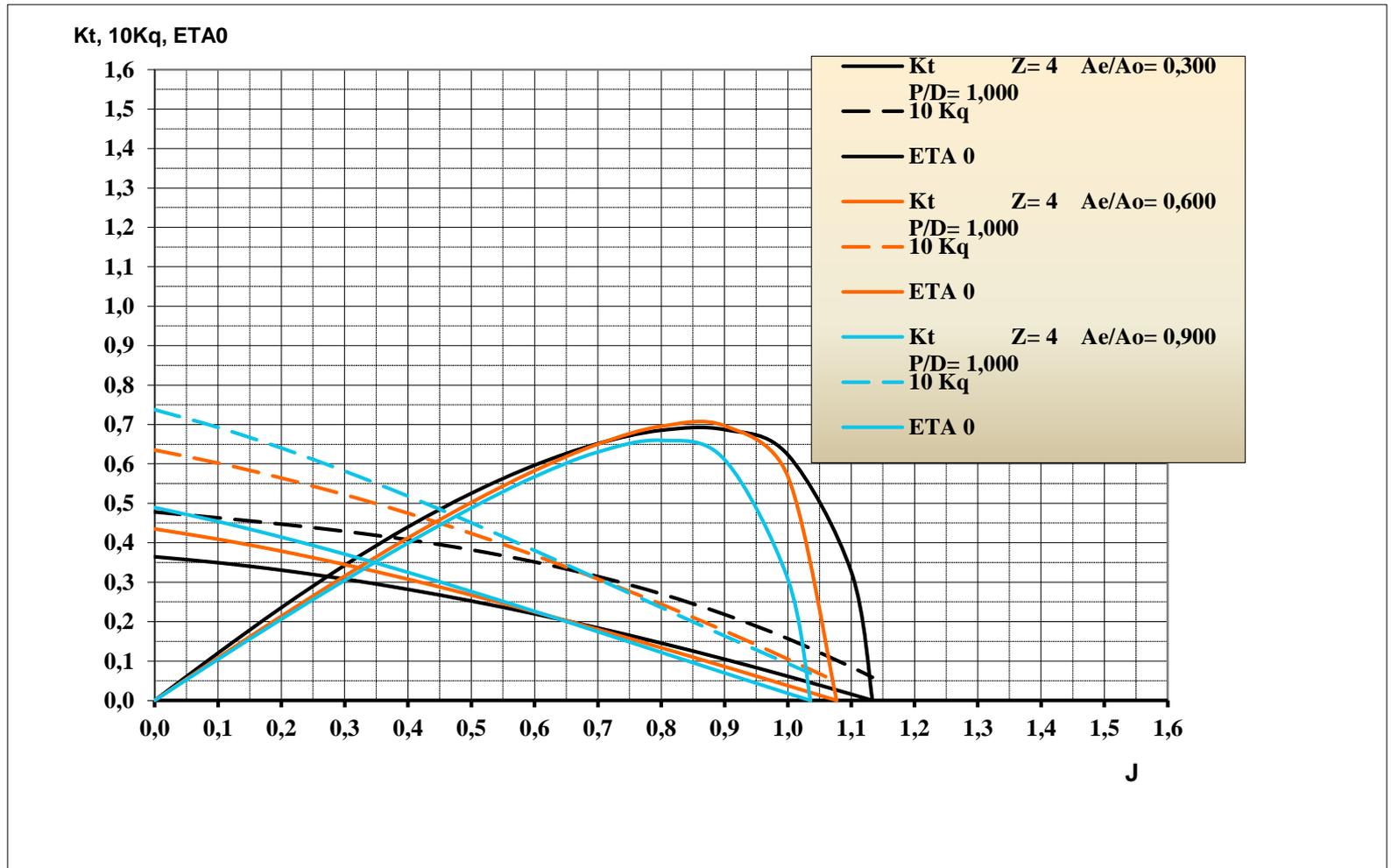
$\Delta\alpha$: rotazione angolare della pala



Effetto P/D



Effetto Ae/Ao



Serie Sistematiche

Insieme, coprono ogni intervallo idrodinamico di utilizzo

Serie	A_E/A_0	P/D	Z	σ_0
B-Wageningen	0.30 ÷ 1.05	0.40 ÷ 1.40	2,3,4,5,6,7	—
Ma o Lindgren	0.75 ÷ 1.20	0.75 ÷ 1.20	3,5	—
Gawn	0.20 ÷ 1.10	0.40 ÷ 2.00	3	—
Newton-Rader	0.48 ÷ 0.95	1.04 ÷ 2.08	3	5.50 ÷ 0.25
KCA o Gawn-Burrill	0.51 ÷ 1.18	0.60 ÷ 2.00	3	6.30 ÷ 0.5
SK	0.65 ÷ 1.10	1.00 ÷ 2.20	3	1.30 ÷ 0.30
KSRC	0.80 ÷ 1.40	1.10 ÷ 1.55	5	2.00 ÷ 0.40
Rolla	0.80	0.90 ÷ 1.60	4	2.50 ÷ 0.20



Serie B - Wageningen

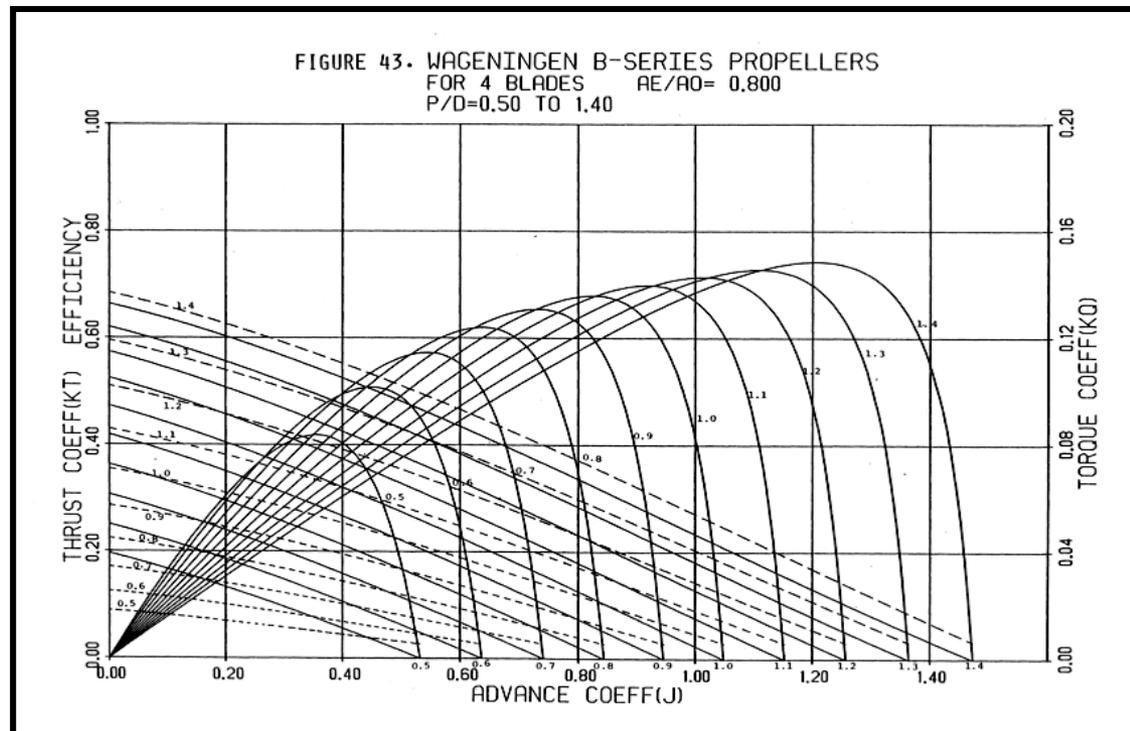
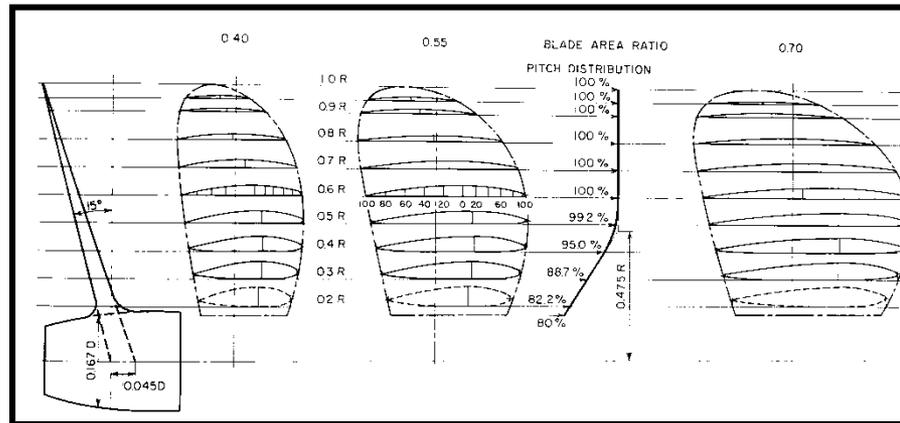
A_E/A_0	P/D	Z	σ_0
0.30 ÷ 1.05	0.40 ÷ 1.40	2,3,4,5,6,7	—

- La più utilizzata (grande estensione dei parametri geometrici)
- Calcolo K_T e K_Q con coefficienti da analisi di regressione (van Lammeren et al., 1969)

$$K_T = \sum_{i=1}^{37} C_i J^{s_i} \left(\frac{P}{D}\right)^{t_i} \left(\frac{A_E}{A_0}\right)^{u_i} Z^{v_i}$$
$$K_Q = \sum_{j=1}^{49} C_j J^{s_j} \left(\frac{P}{D}\right)^{t_j} \left(\frac{A_E}{A_0}\right)^{u_j} Z^{v_j}$$



Serie B - Wageningen



Serie Gawn

A_E/A_0	P/D	Z	σ_0
0.20 ÷ 1.10	0.40 ÷ 2.00	3	—

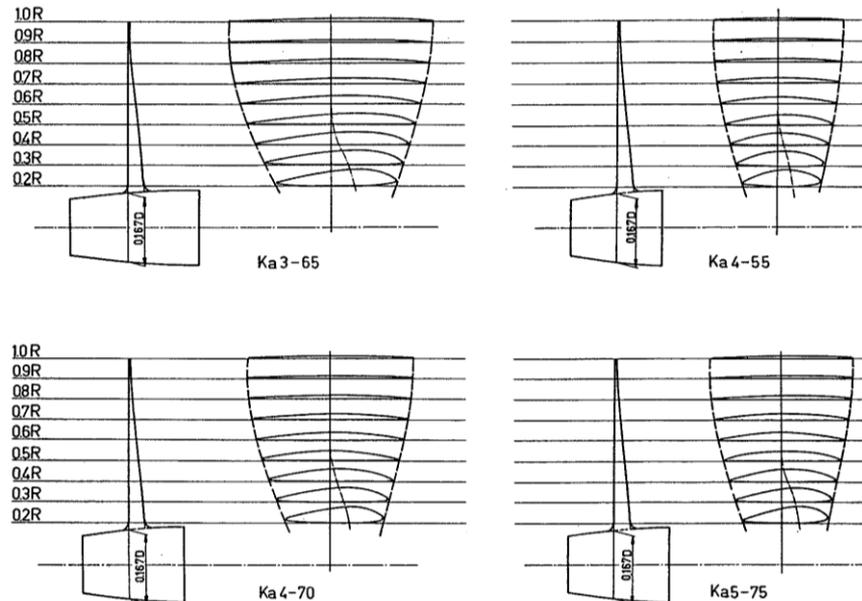
- Gawn, 1952
- Equazioni di regressione (Blount e Hubble, 1981) il cui utilizzo va contenuto entro l'intervallo $P/D = 0.8 \div 1.4$
- 3 pale con profilo ellittico
- Ancora utilizzata nella progettazione iniziale di
 - navi semidislocanti
 - grandi imbarcazioni veloci
- Risultati affidabili per $A_E/A_0 > 0.65$



Serie KA (eliche intubate)

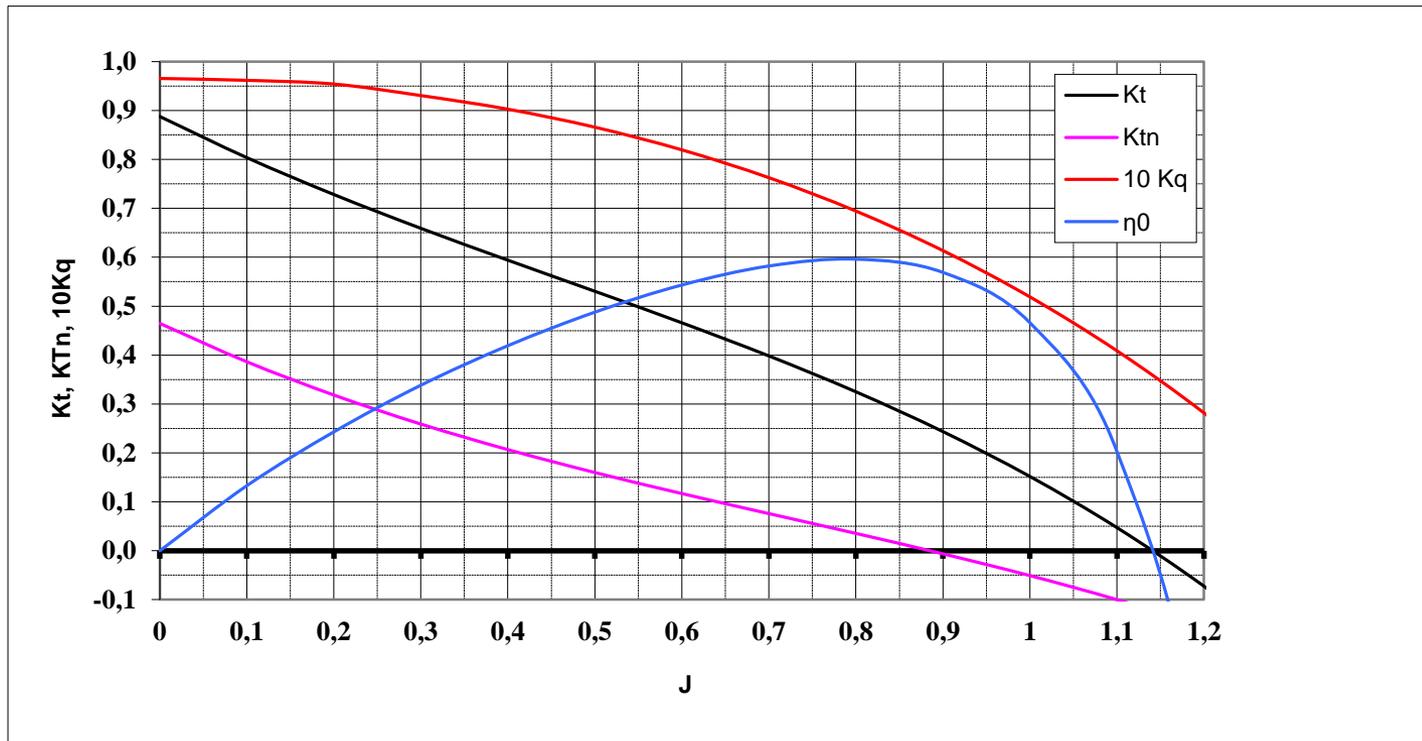
A_E/A_0	P/D	Z	σ_0
0.55 ÷ 1.00	1.04 ÷ 2.08	3 – 4 – 5	

- Mantello accelerante 19a
- Passo radialmente costante
- Mantelli: $L/D = 0.50 \div 1.00$



Serie KA (eliche intubate)

KA 5-75 - $P/D = 1.4$



Diagrammi di Progetto

- I diagrammi KT - KQ - J delle serie sistematiche poco si prestano a livello progettuale per scegliere il diametro ed il numero di giri ottimali dell'elica
- I diagrammi dell'elica isolata sono solitamente elaborati per ottenere diagrammi di progetto
- Permettono di individuare i parametri principali dell'elica nella fase preliminare del progetto (D, RPM, P/D) con pochi calcoli ed eseguire un'analisi parametrica
- Il progetto va successivamente affinato applicando la teoria vorticale
- Diagrammi Taylor elaborati da Troost sui dati della serie B di Wageningen



Diagrammi Taylor

$$B_p - \delta$$

Approccio del macchinista: Noti P_D, N, V_A calcolare $D, P/D, \eta_0$

Si definiscono i parametri B_p e δ :

$$B_p = \frac{N\sqrt{P}}{\sqrt{V_A^5}}$$

$$\delta = \frac{ND}{V_A} = \frac{101.33}{J}$$

D: diametro in piedi

N: numero di giri al minuto

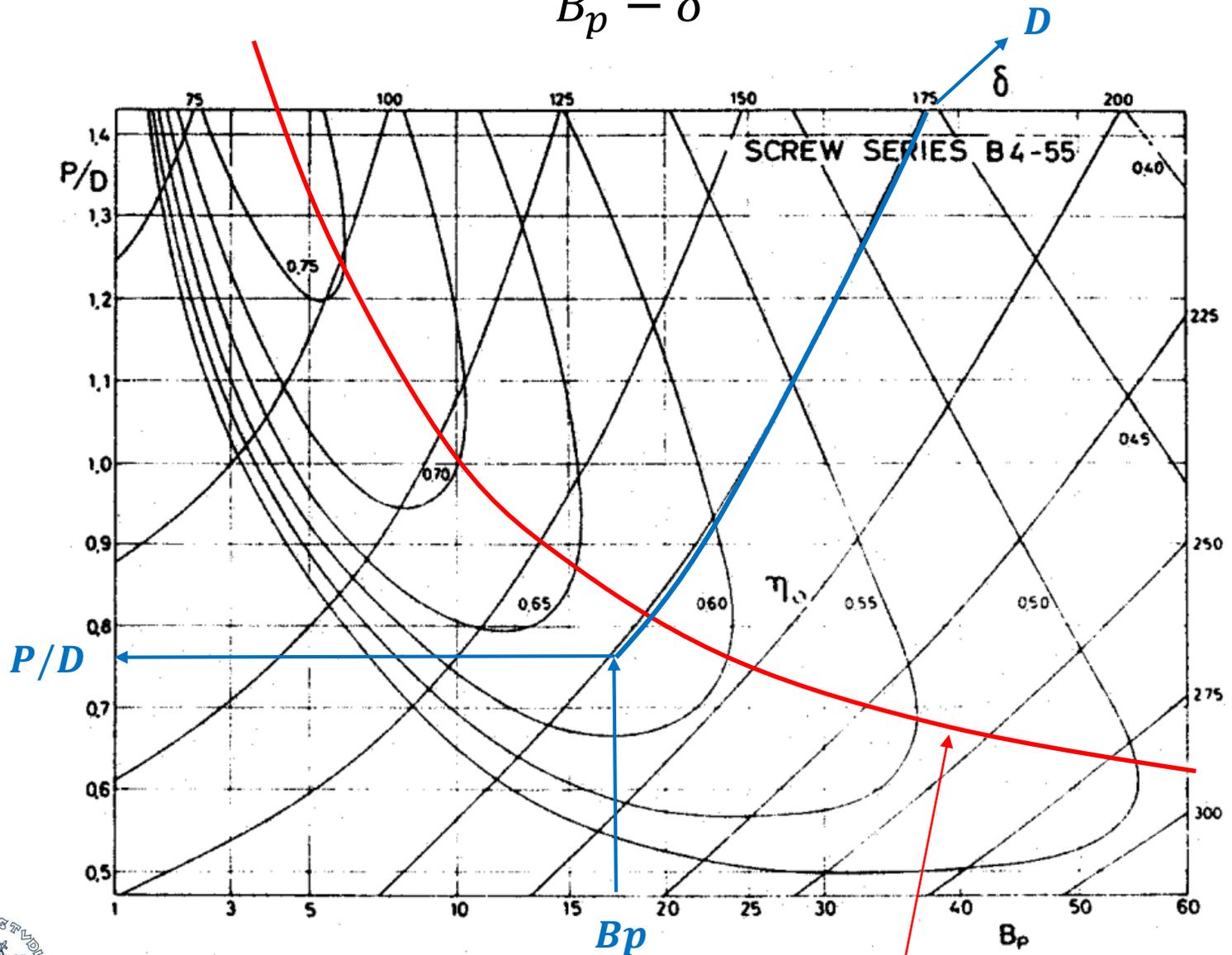
P: potenza in cavalli inglesi

V_A : velocità d'avanzo in nodi



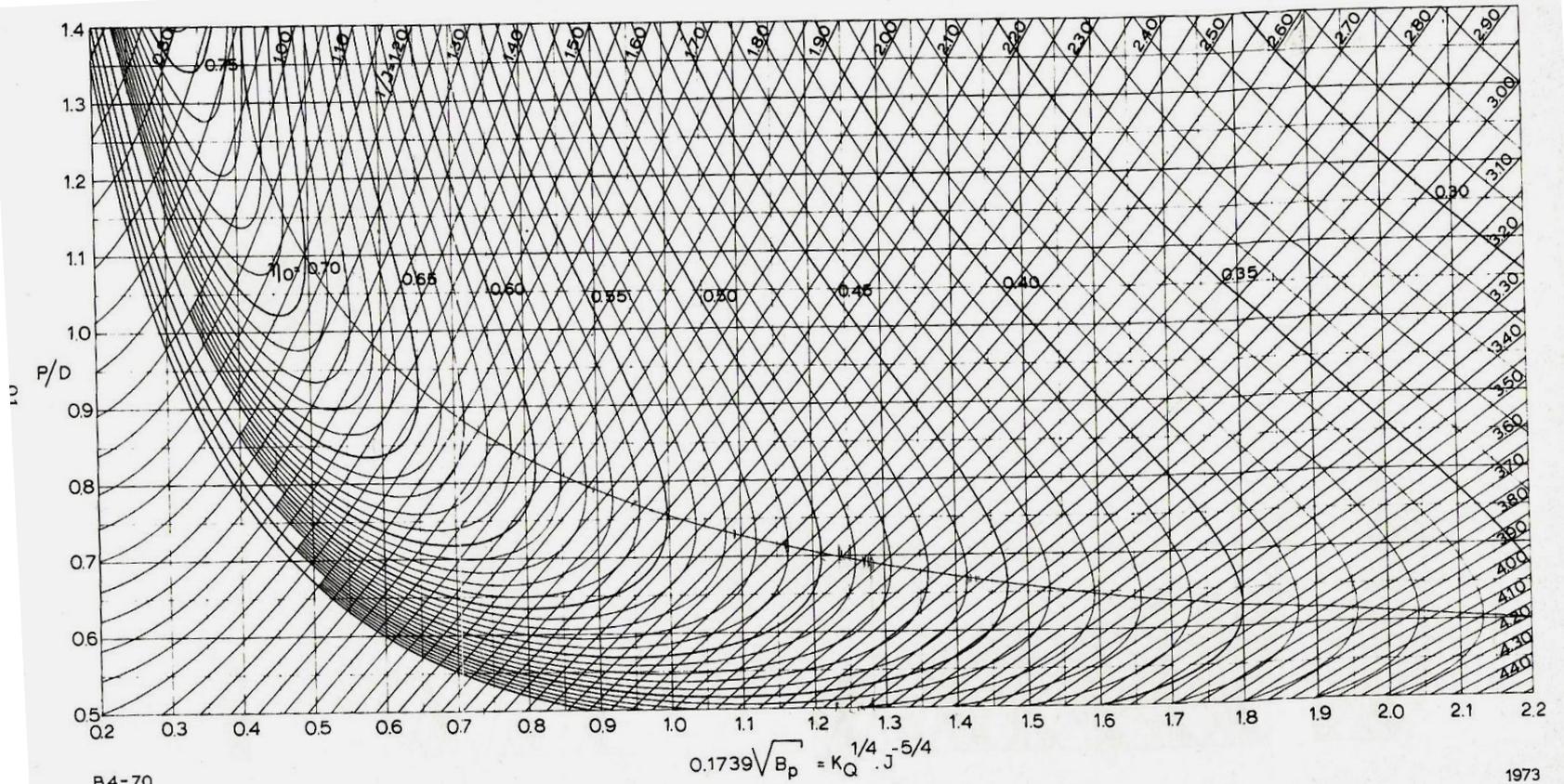
Diagrammi Taylor

$$B_p - \delta$$



Diagrammi Taylor

$$B_p - \delta$$



Diagrammi Taylor

$$B_u - \delta$$

Approccio del carenista: Noti T, N, V_A calcolare $D, P/D, \eta_0$

$$B_u = \frac{N\sqrt{P_T}}{\sqrt{V_A^5}} = C \frac{N\sqrt{T}}{V_A^2}$$

$P_T = C \cdot V_A \cdot T$ con C dipendente dalle unità di misura adottate per redigere i diagrammi



Le Quattro Fasi di Funzionamento

L'elica a passo fisso ha quattro modi di funzionamento definiti dall'angolo di avanzo

$$\tan \beta = \frac{V_A}{0.7\pi n D}$$

Quadrante	Angolo d'avanzo	Coefficiente d'avanzo	Avanzamento della carena	Rotazione dell'elica
I	$0^\circ < \beta \leq 90^\circ$	$J > 0$	$V_A > 0$	$n > 0$
II	$90^\circ < \beta \leq 180^\circ$	$J < 0$	$V_A > 0$	$n < 0$
III	$180^\circ < \beta \leq 270^\circ$	$J > 0$	$V_A < 0$	$n < 0$
IV	$270^\circ < \beta \leq 360^\circ$	$J < 0$	$V_A < 0$	$n > 0$

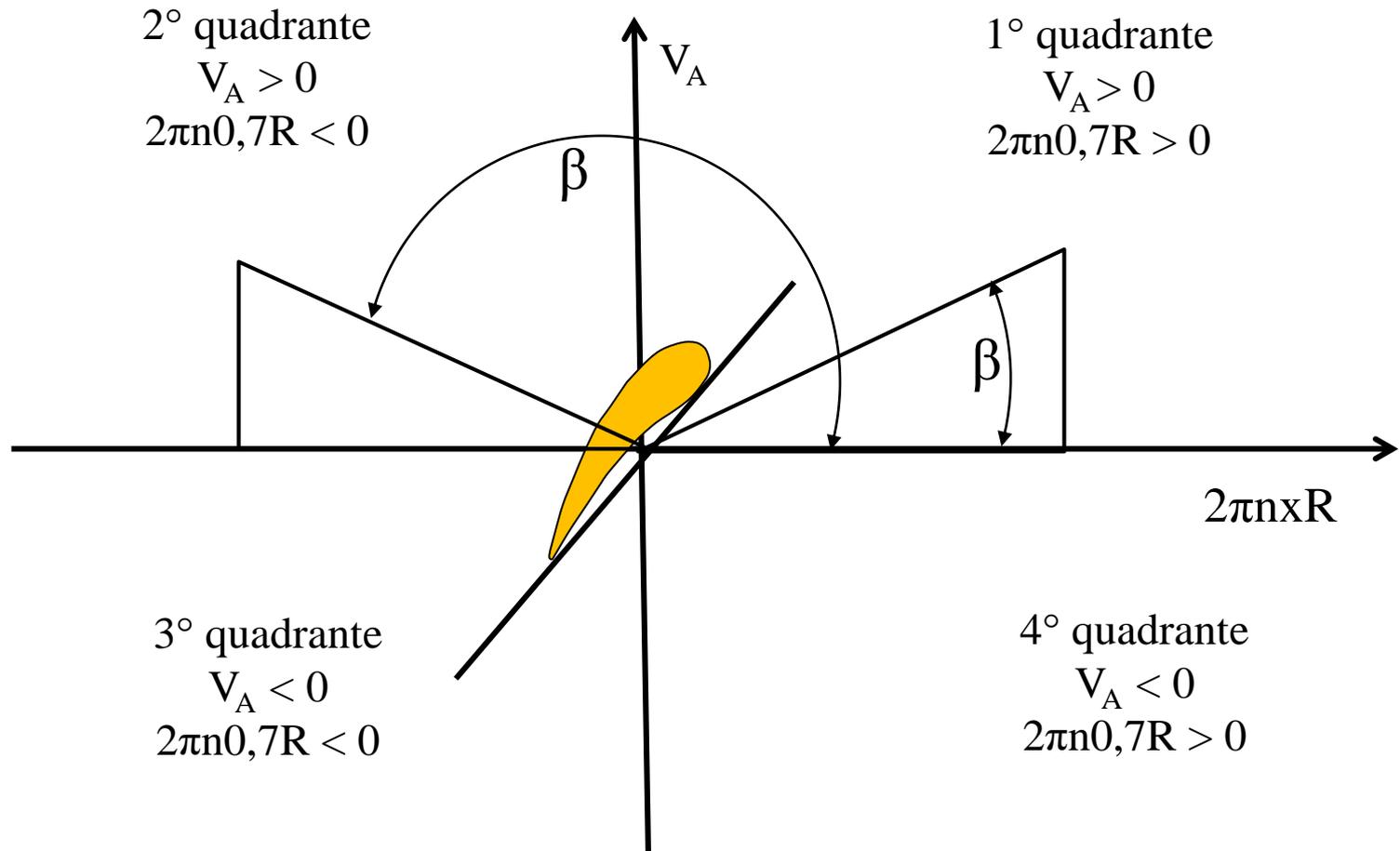


I quattro quadranti

- E' essenziale conoscere le prestazioni dell'elica nei quattro quadranti per valutare le condizioni di «off design» e le fasi di accelerazione e decelerazione della nave
 - Prove su modello costose
 - Disponibili risultati di prove eseguite da varie vasche su serie sistematiche di eliche
1. 1° quadrante: l'elica ruota nel verso della marcia avanti e la carena avanza in marcia avanti
 2. 2° quadrante: l'elica ruota nel verso della marcia indietro e la carena avanza in avanti
 3. 3° quadrante: l'elica ruota nel verso della marcia indietro e la carena va in marcia indietro
 4. 4° quadrante: l'elica ruota nel verso della marcia avanti e la carena va in marcia indietro
 - $\beta = 0$: tiro a punto fisso avanti
 - $\beta = 180^\circ$ tiro a punto fisso indietro
 - $\beta = 90^\circ$ o 270° : l'elica non ruota e la nave avanza avanti o indietro



I quattro quadranti



Rappresentazione dei modi di Lavoro

Diversi modi di rappresentare i coefficienti adimensionali

- K_T e K_Q in funzione di J (non utilizzabile per $n=0$)
- C_T e C_Q in funzione di $1/J$

$$C_T = \frac{8Kt}{\pi J^2} \qquad C_Q = \frac{8KQ}{\pi J^3}$$

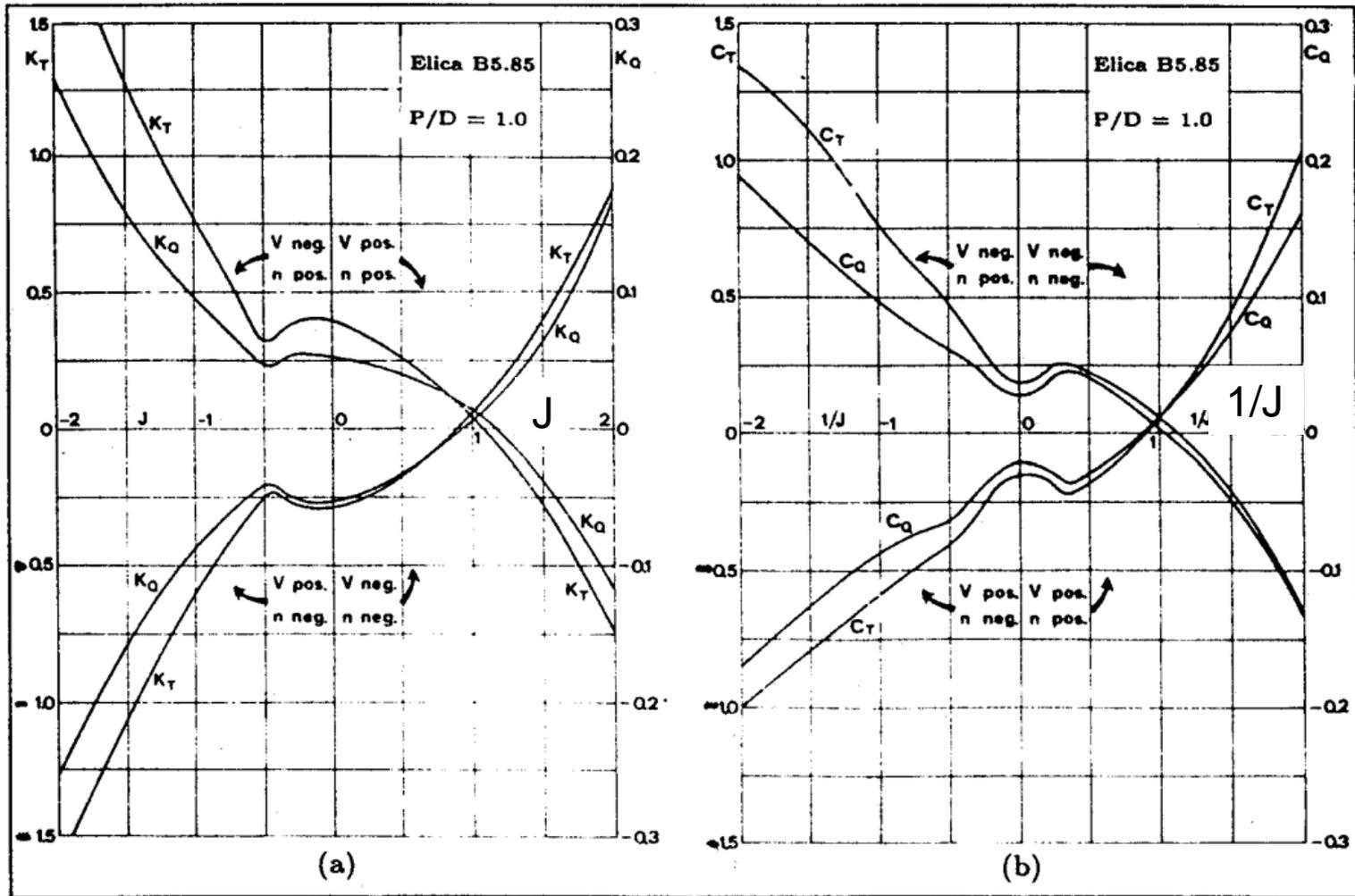
- C_T^* e C_Q^* in funzione di β (per tutti i modi di funzionamento)

$$C_T^* = \frac{8}{\pi} \cdot \frac{T}{\rho[V_A^2 + (0.7\pi nD)^2]D^2}$$
$$C_Q^* = \frac{8}{\pi} \cdot \frac{Q}{\rho[V_A^2 + (0.7\pi nD)^2]D^3}$$

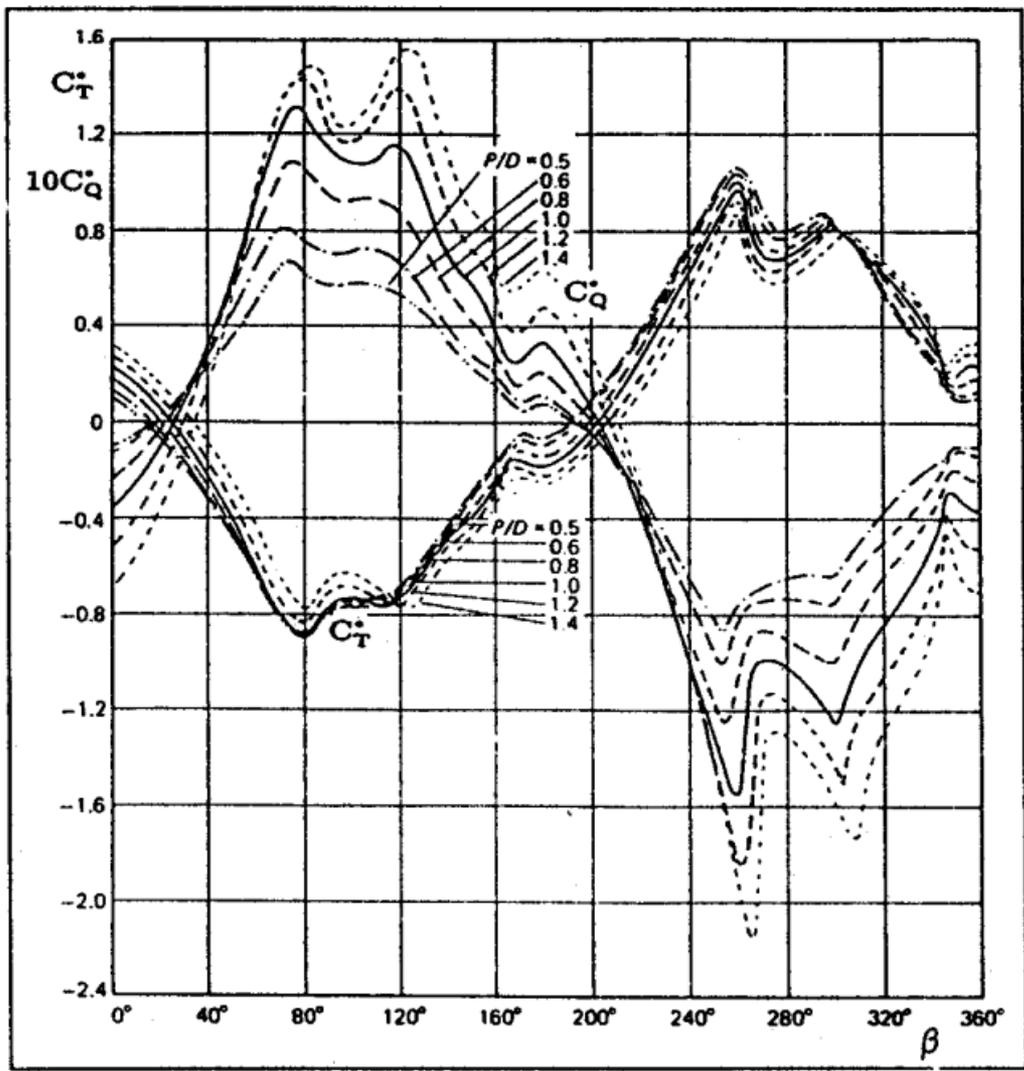


Rappresentazione dei modi di Lavoro

K_T, K_Q vs. J e $1/J$ (Serie B Wageningen)



C_T^* , C_Q^* vs. β (Serie B Wageningen)



Rappresentazione dei modi di Lavoro

- Le curve possono essere espresse in serie di Fourier (Van Lammeren et al., 1969)

$$C_T^* = \sum_{k=0}^{20} [A_{kT} \cos(k\beta) + B_{kT} \sin(k\beta)]$$
$$C_Q^* = \sum_{k=0}^{20} [A_{kQ} \cos(k\beta) + B_{kQ} \sin(k\beta)]$$

- Effetti dei parametri geometrici
 - A_E/A_0 per $40^\circ < \beta \leq 140^\circ$ e $230^\circ < \beta \leq 340^\circ$
 - P/D per ogni valore di β
 - Z nessun effetto



Rappresentazione dei modi di Lavoro

Eliche Intubate (serie KA 4.70 Wageningen)

- Rappresentazione in serie di Fourier (Oosterveld, 1973)
- Comprende anche il coefficiente di carico di spinta del mantello

$$C_{T_d}^* = \frac{8}{\pi} \cdot \frac{T_d}{\rho [V_A^2 + (0.7\pi nD)^2] D^2}$$

- $C_{T_d}^*$ è insensibile a P/D tranne che nell'intervallo $-20^\circ < \beta \leq 20^\circ$



Utilizzo dei diagrammi di elica isolata

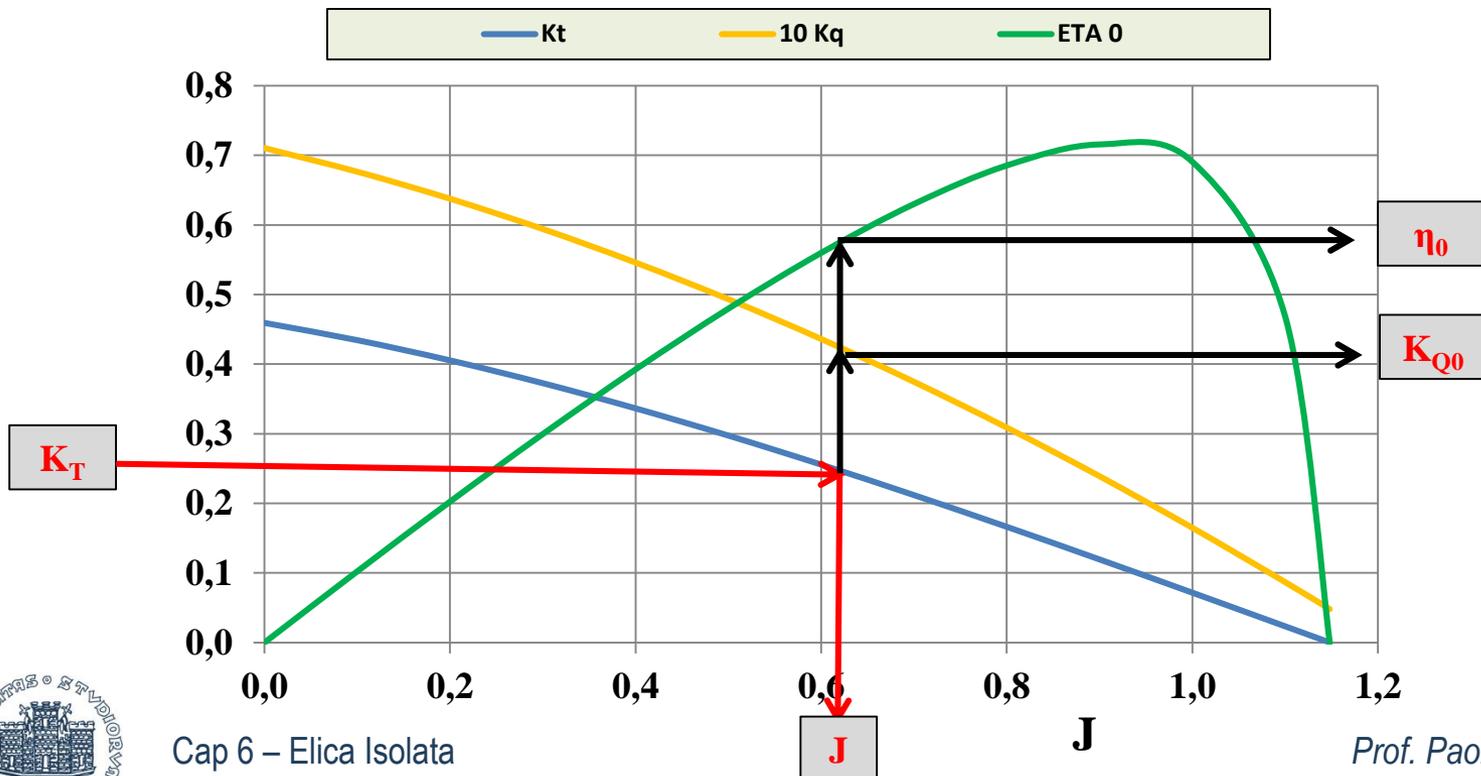
- Determinare i coefficienti propulsivi (analisi della propulsione)
- Calcolo delle prestazioni per un'elica qualsiasi
- Calcolo in condizioni di sovraccarico
- Calcolo delle prestazioni per vari passi (eliche a pale orientabili)
- Combinata passo giri
- Bollard pull



Analisi della propulsione

Noti K_T e K_Q dalla prova di autopropulsione

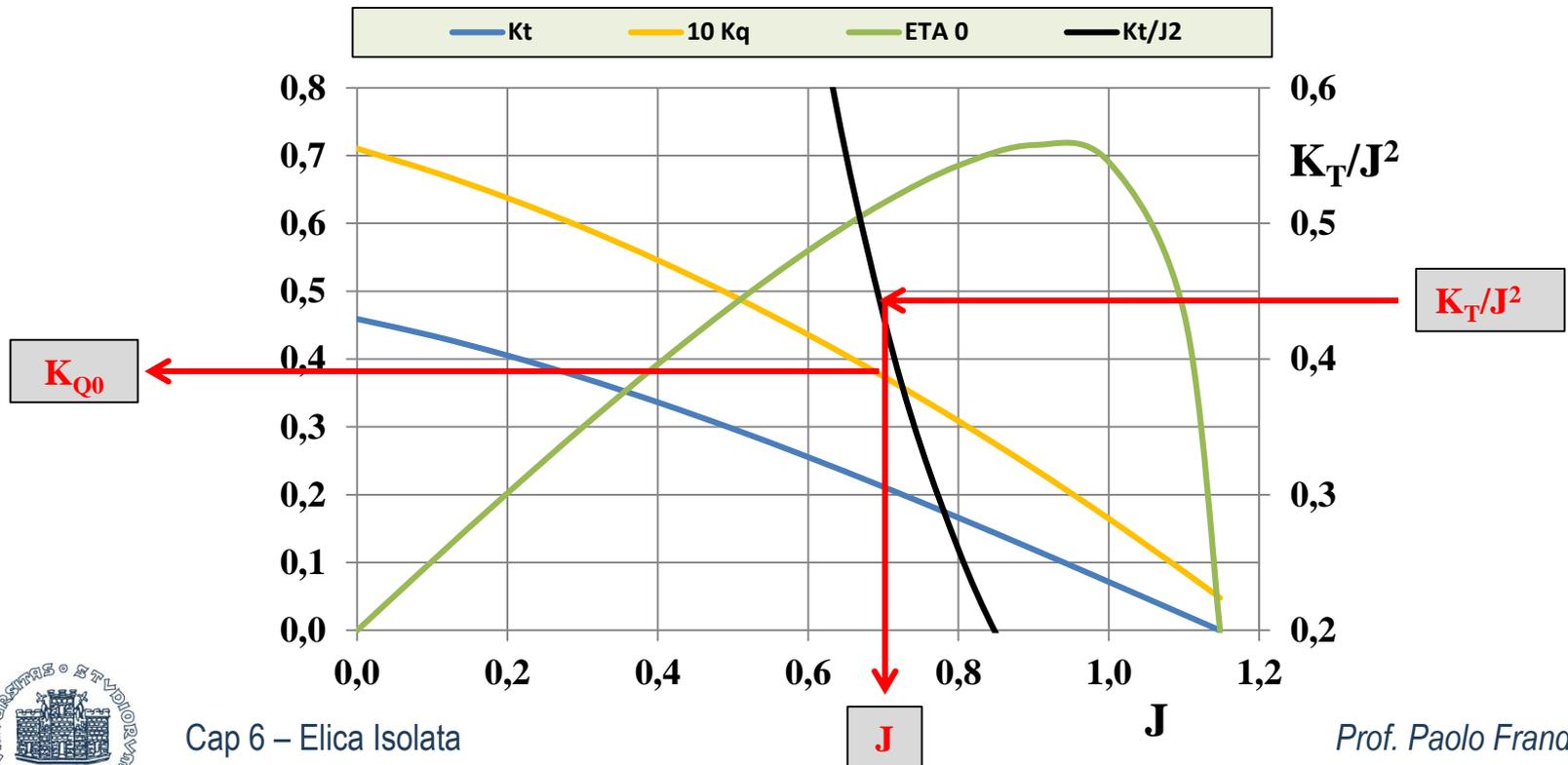
- Dal diagramma si determina J , K_{Q0} e η_0
- Si calcola: $(1-w_{\text{eff}}) = (J \cdot N \cdot D) / V$
- Si calcola: $\eta_R = K_{Q0} / K_Q$



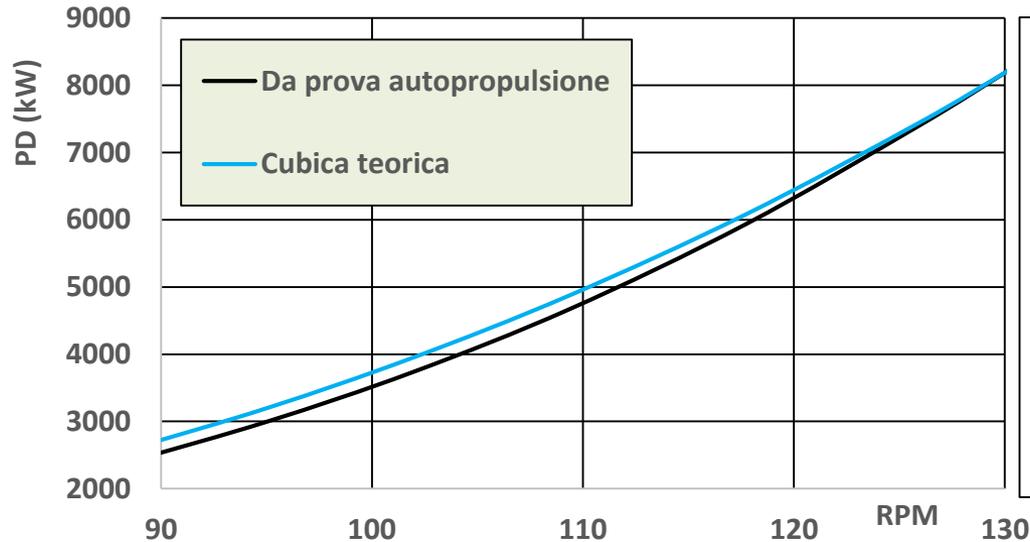
Calcolo delle prestazioni

Nota la resistenza R ed i coefficienti propulsivi $(1-t)$ $(1-w)_{\text{eff}}$ η_R

- Si calcola $T=R/(1-t)$ e $K_T/J^2 = T/(\rho * D^4 * (V*(1-w)_{\text{eff}})^2)$
- Dal diagramma si determina J e K_{Q0}
- Si calcola il numero di giri: $RPM = (V*(1-w)_{\text{eff}})/(D*J)$
- Si calcola la potenza all'elica: $P_D = K_{Q0} * 2\pi * (\rho*D^5*RPM^3) / \eta_R$



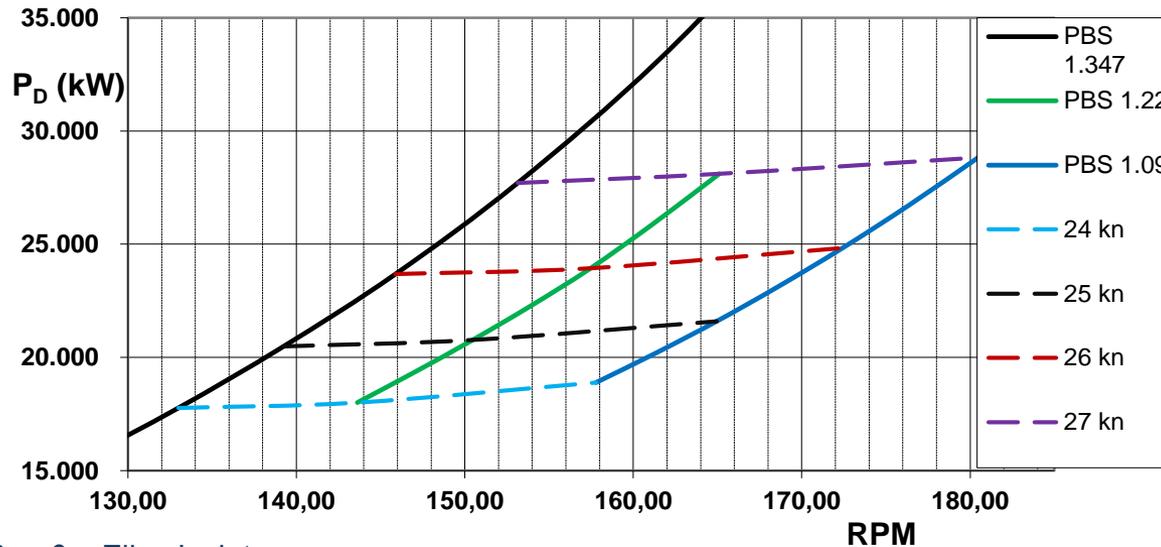
La cubica dell'elica



$$PD = K_{Q0} 2\pi (\rho * D^5 * RPM^3) / \eta_R$$

La potenza all'elica è proporzionale al cubo del numero di giri

$$P_2/P_1 = (RPM_2/RPM_1)^3$$

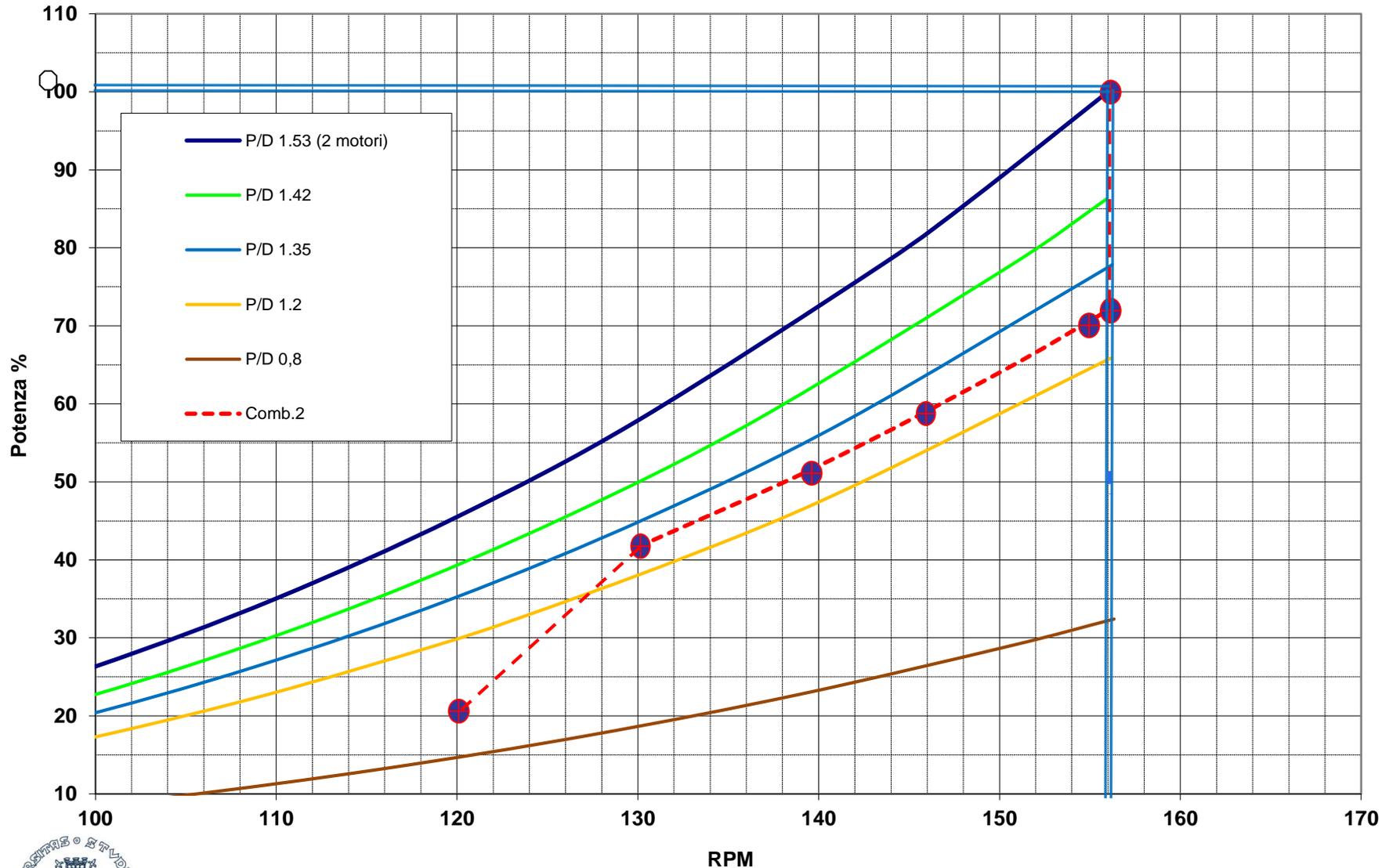


La combinata passo - giri

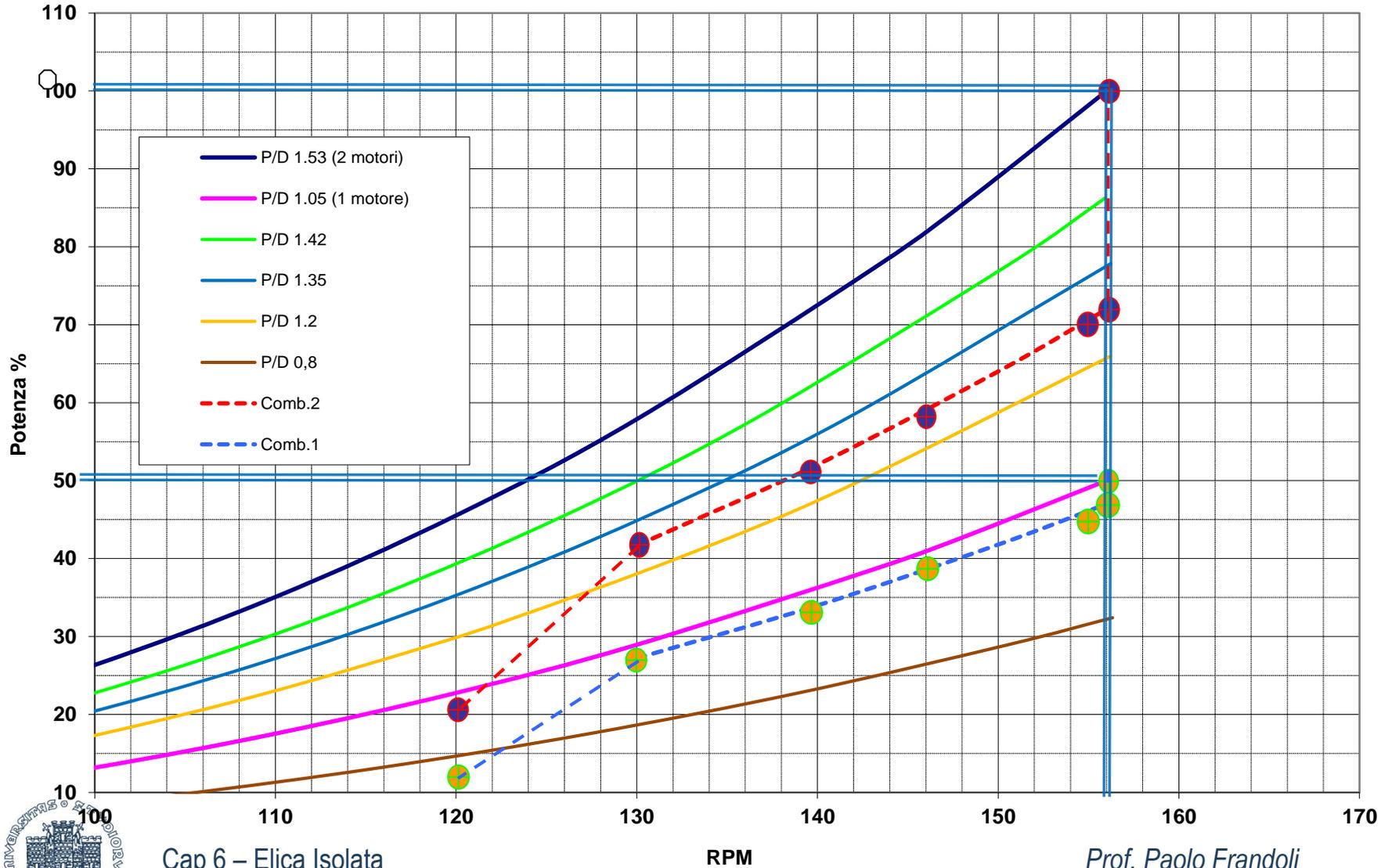
- L'elica a pale fisse opera secondo un'unica cubica; tutti i punti di funzionamento si trovano sulla medesima cubica
- Per l'elica a pale orientabili
 - Si possono avere tante cubiche quanti sono i possibili settaggi del passo
 - Variando il passo, il punto di funzionamento può essere posizionato arbitrariamente all'interno della zona ammissibile di funzionamento del motore
 - La curva di funzionamento non è una cubica univoca, ma un diagramma denominato “combinato passo giri”
 - La curva combinata è definita come l'insieme dei punti di funzionamento dell'elica individuati sul diagramma di funzionamento del motore



La combinata passo - giri



La combinata passo - giri



Tiro a Punto Fisso

Il termine ***bollard pull*** (**BP** – tiro a punto fisso) ha assunto tre diversi significati; é importante progettualmente e commercialmente specificare a quale ci si riferisce:

- ***bollard pull rating***: misura teorica
- ***bollard pull thrust***: spinta effettiva sviluppata dal propulsore
- ***bollard tow-pull***: spinta netta di tiro

Bollard Pull Rating

- É la **spinta teorica**, ottenibile a velocità d'avanzo nulla ed ai massimi giri del motore, usata per mettere a confronto la capacità di tiro dei rimorchiatori
- Questa spinta **non può essere raggiunta** operativamente per due ragioni:
 - le eliche accelerano il fluido, per cui non vedono mai l'acqua ferma
 - i motori non raggiungono mai i giri massimi alla velocità di rimorchio, in quanto in tiro le eliche sono sovraccaricate essendo il passo generalmente dimensionato per una velocità maggiore di quella di rimorchio
- Il calcolo della spinta del «bollard pull rating» si esegue utilizzando il coefficiente di spinta K_T ad avanzo nullo al numero di giri previsto



Tiro a Punto Fisso

Bollard Pull Thrust

Per calcolare questa grandezza occorre utilizzare:

- la **reale velocità del fluido**: si assume una velocità nominale quasi nulla e/o la velocità reale in rimorchio (2÷4 nodi)
- le **stime dei coefficienti d'interazione carena-propulsore** (frazione di scia e fattore di deduzione di spinta): occorre disporre dei **coefficienti propulsivi a velocità nulla ed a velocità fino a 5-6 nodi**, per cui si deve ricorrere a prove di autopropulsione con il **metodo inglese**, soprattutto se il veicolo marino deve operare in acque basse e/o con carico di spinta elevato
- il **vero numero di giri del motore** in condizioni di equilibrio, il che richiede un processo iterativo per individuare l'equilibrio tra i momenti torcenti dell'elica e del motore

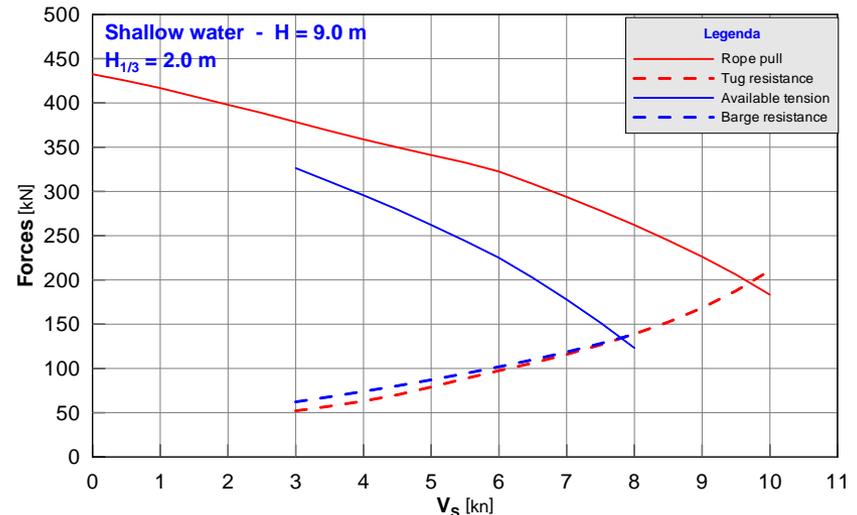
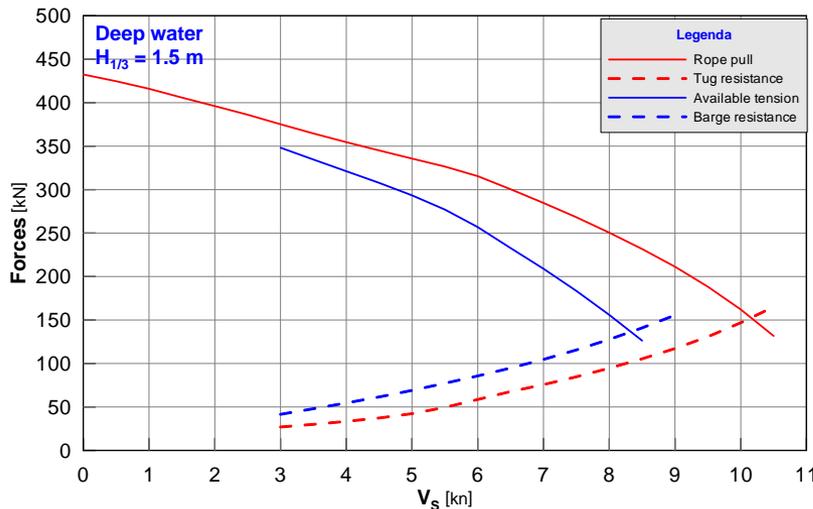
Va ribadito che la spinta nella condizione di tiro a punto fisso é la spinta sviluppata fruibile, ossia la spinta dell'elica isolata effettiva, ridotta per tenere conto del fattore di deduzione di spinta



Tiro a Punto Fisso

Bollard Tow-Pull

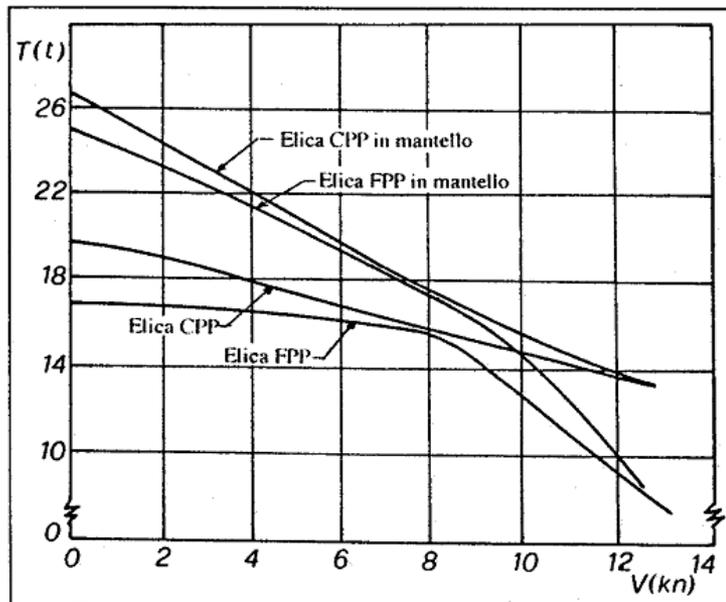
- Per calcolare il **tiro in rimorchio** di una nave che rimorchi una chiatta o un'altra nave, occorre tenere conto che, a velocità non nulla, una certa percentuale della spinta deve essere utilizzata per fare avanzare la nave
- Per determinare la **spinta netta T_{net}** si deve sottrarre la resistenza di carena dalla «rope pull», ottenendo la **capacità di tiro**
- Quando le due curve (**available tension** e **barge resistance**) si intersecano, si individua la **velocità massima ottenibile** dal rimorchiatore



Tiro a Punto Fisso

Valori del Tiro

I calcoli e le misure sperimentali hanno confermato che il tiro a punto fisso di una **elica intubata** può crescere fino al 30% rispetto ad un'**elica libera** equivalente.



Valori nominali ottenibili per progetti/operazioni efficienti di BP

- **marcia avanti**

- eliche non-intubate 130 N/kW
- eliche intubate 170 N/kW

- **marcia indietro**

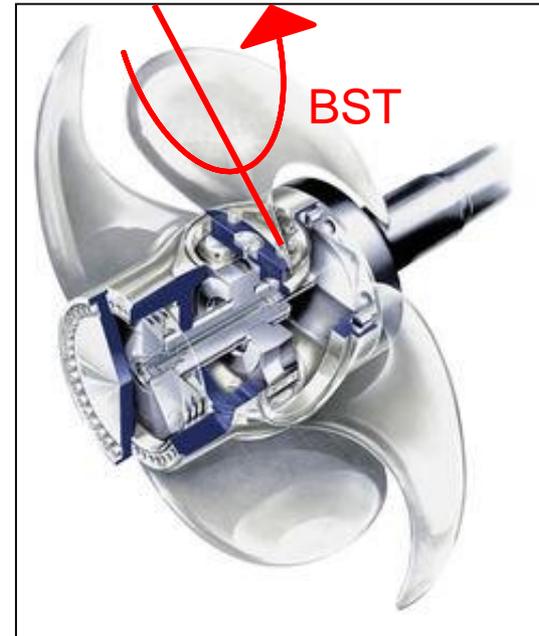
- eliche non-intubate 100-125 N/kW
- eliche intubate 125-135 N/kW

Blade Spindle Torque (BST)

- Momento torcente attorno all'asse di rotazione della pala
- Essenziale per il dimensionamento meccanico ed idraulico del sistema di controllo. Composto da tre fattori:

$$Q_S(J, \theta, \dot{\theta}, n) = Q_{SH}(J, \theta) + Q_{SC}(n) + Q_{SF}(J, \dot{\theta})$$

- Q_{SH} - componente idrodinamica
- Q_{SC} - componente centrifuga per la distribuzione di massa della pala
- Q_{SF} - componente di attrito



Spindle Torque (CPP)

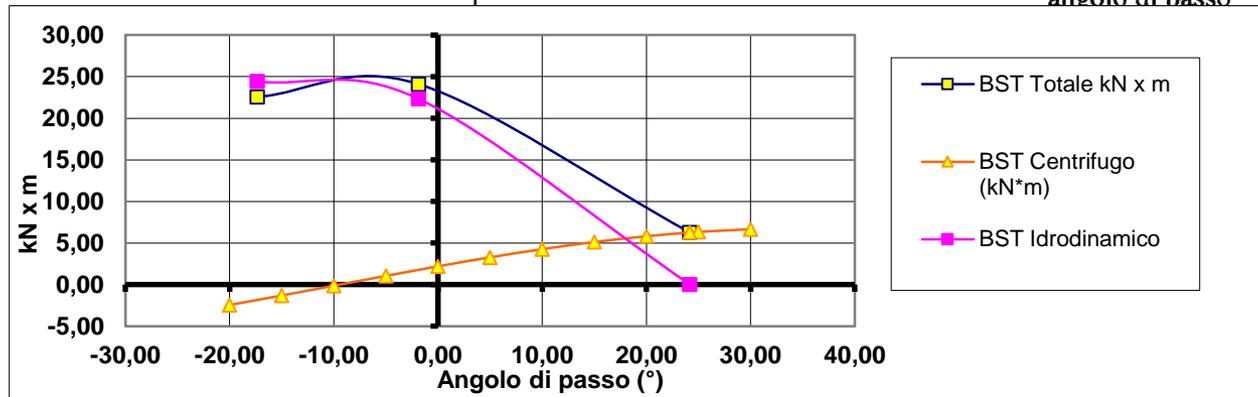
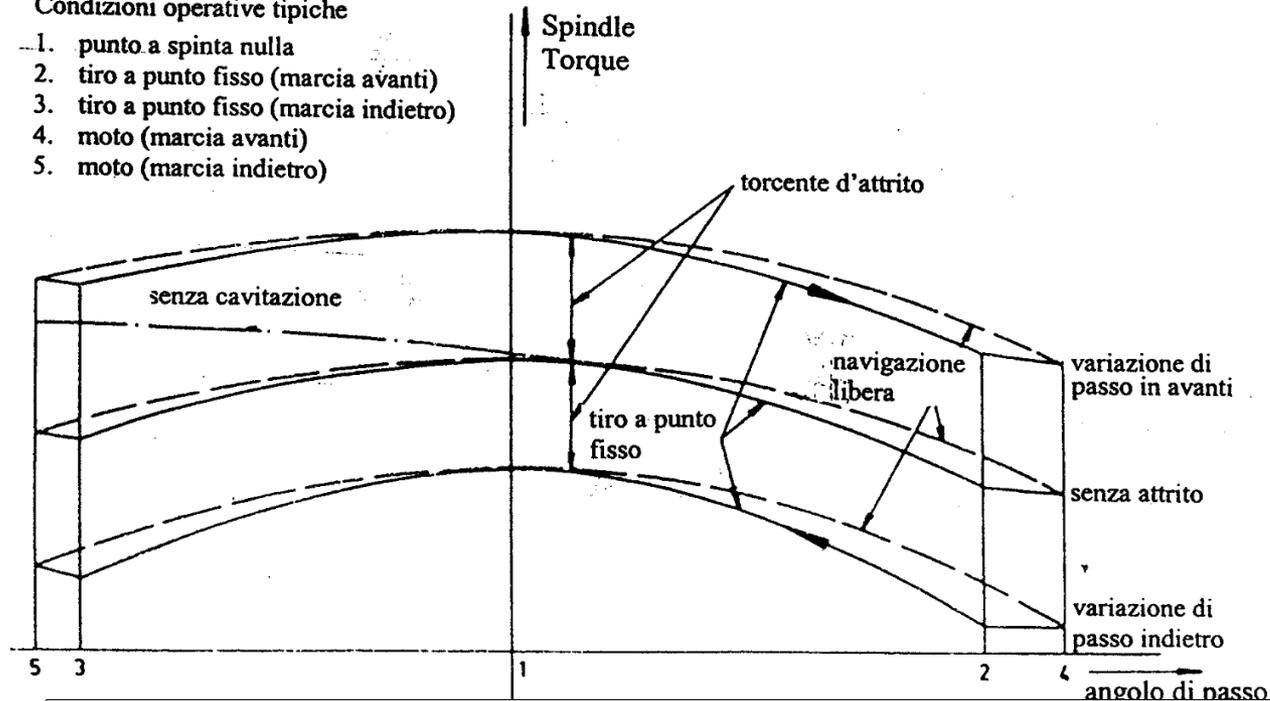
- Dipende da:
 - Angolo di passo
 - Coefficiente d'avanzo
 - Numero di giri
 - Forma della pala (skew e rake)
- Nella maggior parte dei casi presenta il valore massimo ai bassi angoli di passo
- Difficile calcolare la componente idrodinamica (passo off design e presenza cavitazione)
- Le misure al vero sono fondamentali per calibrare la metodologia di calcolo



Spindle Torque (CPP)

Condizioni operative tipiche

1. punto a spinta nulla
2. tiro a punto fisso (marcia avanti)
3. tiro a punto fisso (marcia indietro)
4. moto (marcia avanti)
5. moto (marcia indietro)



Spindle Torque (CPP)

