



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE

Corso di
Propulsione

Progetto dell'elica

Prof. Paolo Frandoli

AA 2022-2023

Il processo di progettazione

- Il progetto dell'elica è un processo decisionale che si sviluppa in varie fasi governate da criteri diversi, spesso contrastanti
- Massimizzare il rendimento è in antitesi con la minimizzazione dei carichi eccitanti
- Si ricorre ad un processo iterativo per ottenere la migliore soluzione di compromesso



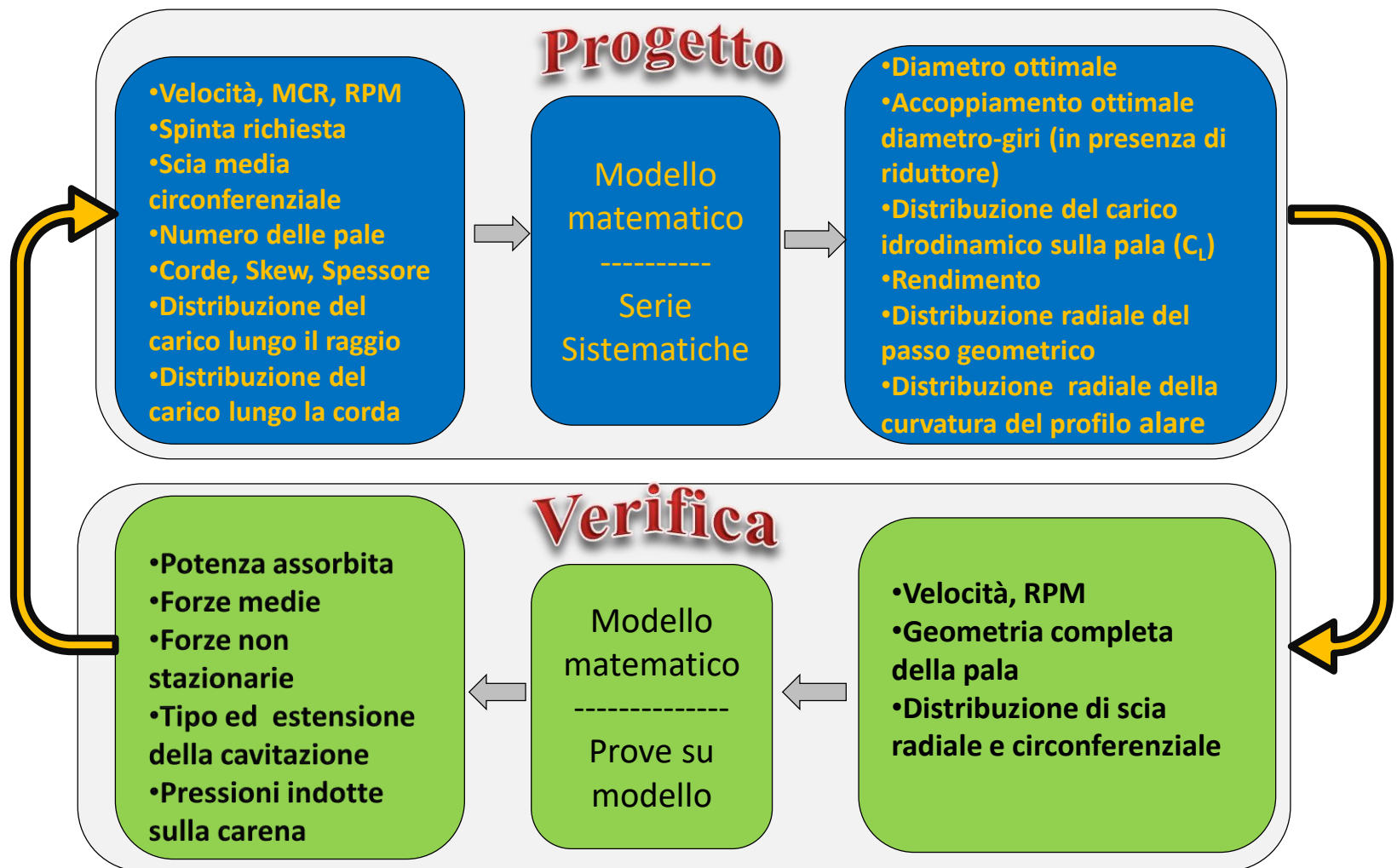
Il processo di progettazione

Le principali fasi del processo di progettazione

- Esame dei dati contrattuali
- Scelta della velocità di progetto
- Caratteristiche principali di primo tentativo derivati da progetti simili di cui si conoscono le prestazioni: numero pale, corde, skew, spessori
- Scelta diametro e giri di progetto
- Calcolo del passo geometrico e curvatura del profilo con la teoria della superficie portante. Distribuzione di carico ottimale come scelta iniziale per conoscere il rendimento massimo raggiungibile
- Calcolo dell'estensione della cavitazione e delle pressioni indotte sullo scafo
- Modifica della distribuzione di carico e della geometria della pala in base ai calcoli
- Verifica della propulsione, cavitazione e pressioni indotte con prove su modello
- Eventuale modifica del progetto in base ai risultati delle prove sperimentali
- Verifica strutturale
- Elaborazione del disegno definitivo



Il processo di progettazione



Documenti di riferimento

Dati contrattuali (specifica nave e contratto)

- Norme di classe
- Norme di sicurezza
- Norme particolari (Ice Class, Confort Class, ecc.)
- Tipo di motore di propulsione e sue caratteristiche (MCR/RPM)
- Tipo di elica e materiale
- Presenza di riduttore
- Presenza di alternatore asse
- Profilo operativo



Documenti di riferimento

Dati contrattuali (specifica nave e contratto)

- Potenza contrattuale, solitamente tre alternative:
 - MCR (solo in casi particolari)
 - Potenza di servizio (80 ÷ 90% MCR)
 - Potenza di servizio dedotta del sea margin (convenzionalmente 15%)
- Velocità contrattuale: in corrispondenza alla potenza contrattuale in condizioni ideali di prove mare (trial condition)
- Dislocamento contrattuale ed immersione corrispondente (in alternativa portata lorda contrattuale)
- Valori massimi di pressioni indotte, vibrazioni e rumore (generalmente applicati su un ampio range di potenza, spesso fino a 90 ÷ 100% MCR)
- Prove su modello



Documenti di riferimento

Dati tecnici

- Piano di costruzione e profilo di poppa
- Distanza linea d'asse da L.C.
- Immersione a poppa nelle condizioni di carico previste dal profilo operativo
- Prove di autopropulsione eseguite con elica di stock (elica disponibile presso il laboratorio idrodinamico il cui diametro e passo si avvicinino per quanto possibile al progetto finale):
 - Curva potenza - velocità
 - Curva potenza - giri
 - Coefficienti propulsivi $\{(1-w)_{\text{eff}}, (1-t), \eta_R, \eta_0\}$
- Diagramma di elica isolata e caratteristiche geometriche dell'elica di stock
- Rilievo di scia nominale (perlomeno assiale)
 - Distribuzione sul disco dell'elica
 - Scia media circonferenziale
 - Scia media nominale $(1-w)_n$



Accoppiamento elica - motore

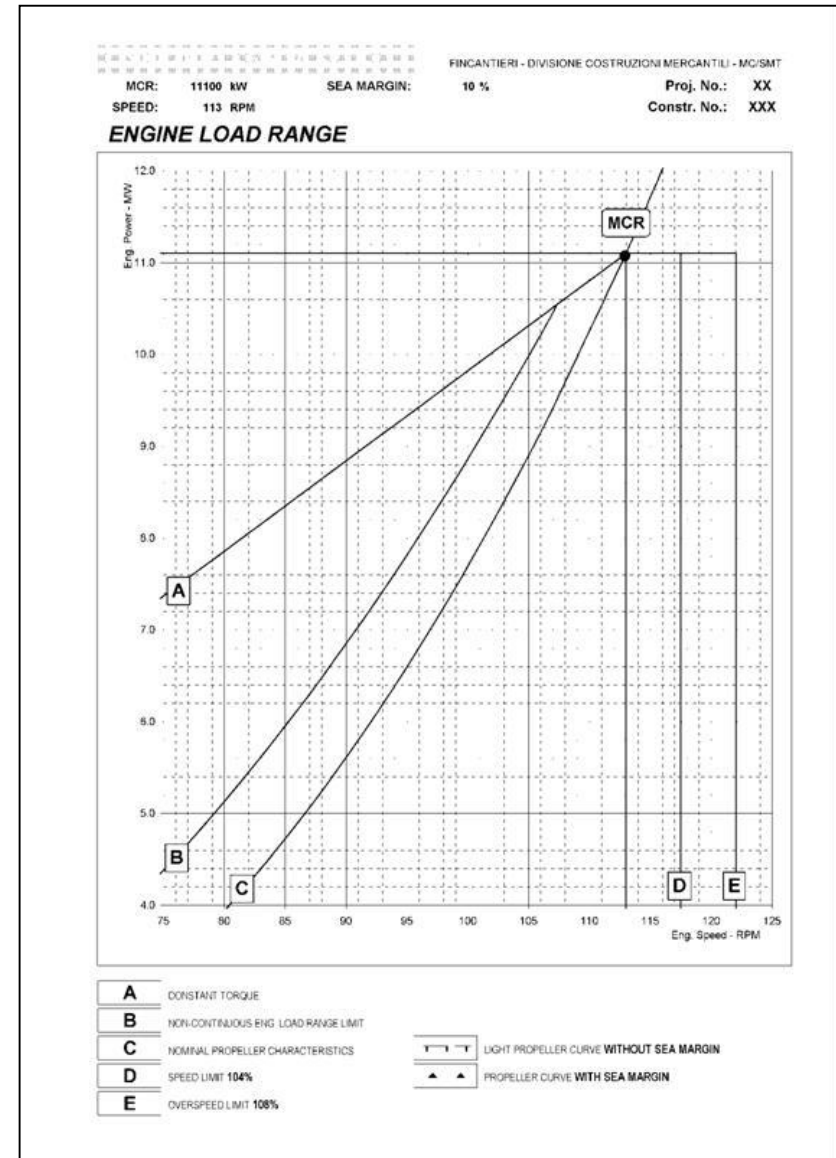
- Il progetto dell'elica deve garantire che la legge di assorbimento della potenza in funzione del numero di giri (cubica o combinata passo – giri) si posizioni all'interno della zona di funzionamento ammissibile del motore di propulsione
- Casi più comuni:
 - Motore diesel 2 tempi
 - Motore diesel 4 tempi
 - Motore elettrico



Accoppiamento elica - motore

Motore diesel 2 tempi

- RPM nominali: 100 ÷ 120
- B: limite per servizio non continuo
- C: limite per servizio continuo
- D: sovra giri 4%
- E: sovra giri 8%
- Campo tra C e D: funzionamento ottimale



Accoppiamento elica - motore

Motore diesel 2 tempi

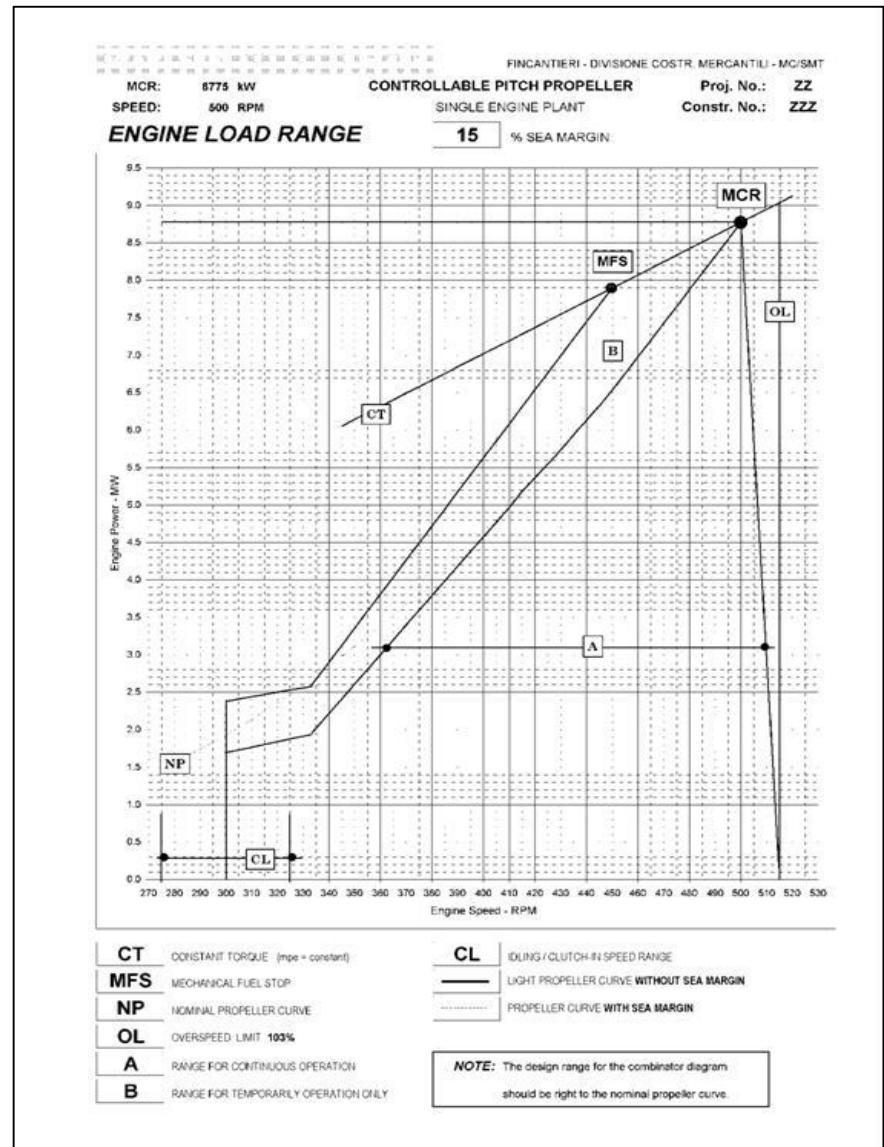
- Nella zona a sinistra della curva B il motore entra in sovraccarico termico. La macchina non è in grado di fornire la coppia richiesta senza surriscaldarsi. Il funzionamento non è ammesso
- Il funzionamento entro i limiti definiti dalle curve B e C è ammesso per brevi periodi a causa di sovraccarichi temporanei
- Sulla curva C vengono posizionati gli allarmi di sovraccarico. A sinistra di questa curva il funzionamento non è permesso in servizio continuativo e gli automatismi intervengono per ridurre la potenza e ritornare entro i limiti di funzionamento ammessi
- La zona compresa tra le rette D ed E è la zona dei sovra giri dove il motore va in sovraccarico meccanico. E' ammesso un sovra giri di circa l'8 % per le prove al banco e per le prove mare
- Campo tra la curva C e la retta D: funzionamento ottimale per il servizio continuativo dove deve essere posizionata la legge di funzionamento dell'elica
- In condizioni di servizio la cubica dell'elica si sposta progressivamente verso sinistra rispetto alle condizioni ottimali di prova mare (mare calmo e carena pulita), a causa del sovraccarico dovuto alla sporcizia sulla carena e delle condizioni meteomarine. In fase di progetto bisogna tenere debitamente conto di questo fatto per evitare che in servizio l'elica provochi un sovraccarico termico del motore



Accoppiamento elica - motore

Motore diesel 4 tempi

- RPM nominali: ~ 500
- RPM di sostentamento: ~ 60% nominali
- A: ammesso per servizio continuo
- B: ammesso per servizio temporaneo
- OL: sovra giri, max. $2 \div 3$ % a MCR



Accoppiamento elica - motore

Motore diesel 4 tempi

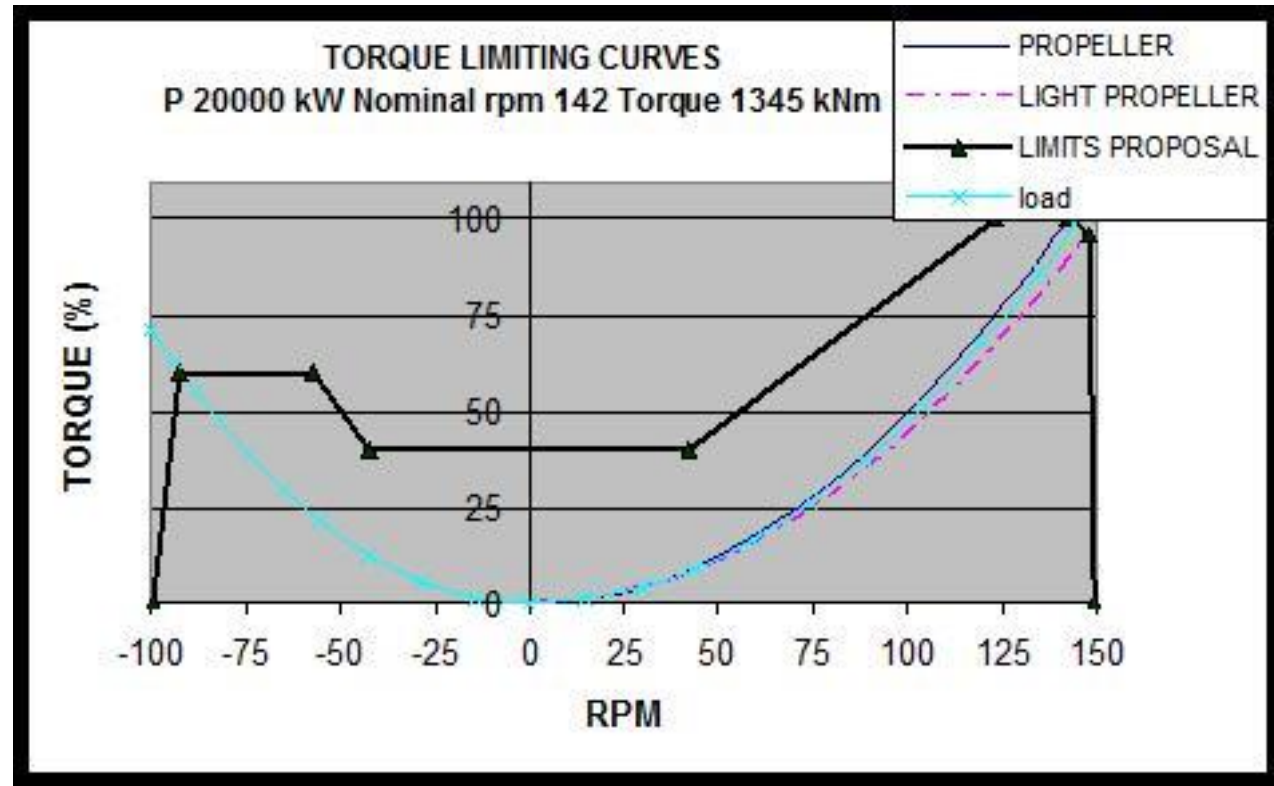
- Va mantenuto ad un regime di rotazione minimo (giri di sostentamento), generalmente superiore al 60 % dei giri nominali
- Non si accoppia con eliche a pale fisse. Alle basse potenze il motore scenderebbe sotto i giri minimi di sostentamento per seguire la legge cubica dell'elica
- Necessario l'utilizzo di eliche a pale orientabili. Il cambio di passo consente al motore di funzionare a potenze molto basse ad un numero di giri superiore a quello minimo
- Campo A: ammesso per servizio continuo
- Campo B: ammesso solo per periodi temporanei
- OL: limite del sovra giri con sovraccarico meccanico
- IL motore a 4 tempi ha giri più elevati di un 2 tempi. Le maggiori forze d'inerzia delle masse rotanti limitano il sovra giri al $2\div 3$ % dei giri nominali



Accoppiamento elica - motore

Motore elettrico

- Ampio campo di funzionamento
- Giri di progetto elica: 102 % giri nominali motore
- Elevati momenti torcenti



Accoppiamento elica - motore

Motore elettrico

- Campo di funzionamento più ampio di un motore diesel. Può erogare la massima coppia ad un numero di giri ridotto anche a marcia indietro ed un momento considerevole a motore fermo
- Nelle condizioni ideali di prove mare i giri dell'elica al 100% MCR sono circa il 102% dei giri nominali del motore. In condizioni di servizio i giri coincidono con quelli nominali
- Può essere accoppiato sia ad un'elica a pale orientabili che a pale fisse. Quest'ultima scelta è più economica
- Elica a pale fisse
 - L'inversione del moto è molto rapida a seguito degli elevati momenti disponibili su un ampio campo di giri
 - Manovre di marcia indietro e di arresto efficaci
 - L'inversione del moto modifica sensibilmente la distribuzione del carico sulle pale
 - Aumento delle sollecitazioni nella zona del bordo d'uscita soprattutto in presenza di elevati skew
 - Il calcolo strutturale e la scelta della forma della pala rivestono particolare importanza



Scelta del punto di progetto

- Punto di progetto dell'elica:
 - Definito da velocità, potenza, giri e dislocamento in corrispondenza ai quali si esegue il calcolo idrodinamico della pala
- Dalle prove di autopropulsione con la carena definitiva e con l'elica di stock in condizioni ideali di prove mare (trial condition) si ricava, in funzione della velocità:
 - Spinta T
 - Potenza all'elica P_D
 - Scia media effettiva $(1-w)_{\text{eff}}$
- Condizioni "off design":
 - Dipendono dal profilo operativo
 - Importante conoscere le prestazioni
 - Possono influenzare qualche parametro della geometria
- Velocità e potenza di progetto si scelgono in base ai valori contrattuali di considerando anche i limiti di vibrazioni e rumore

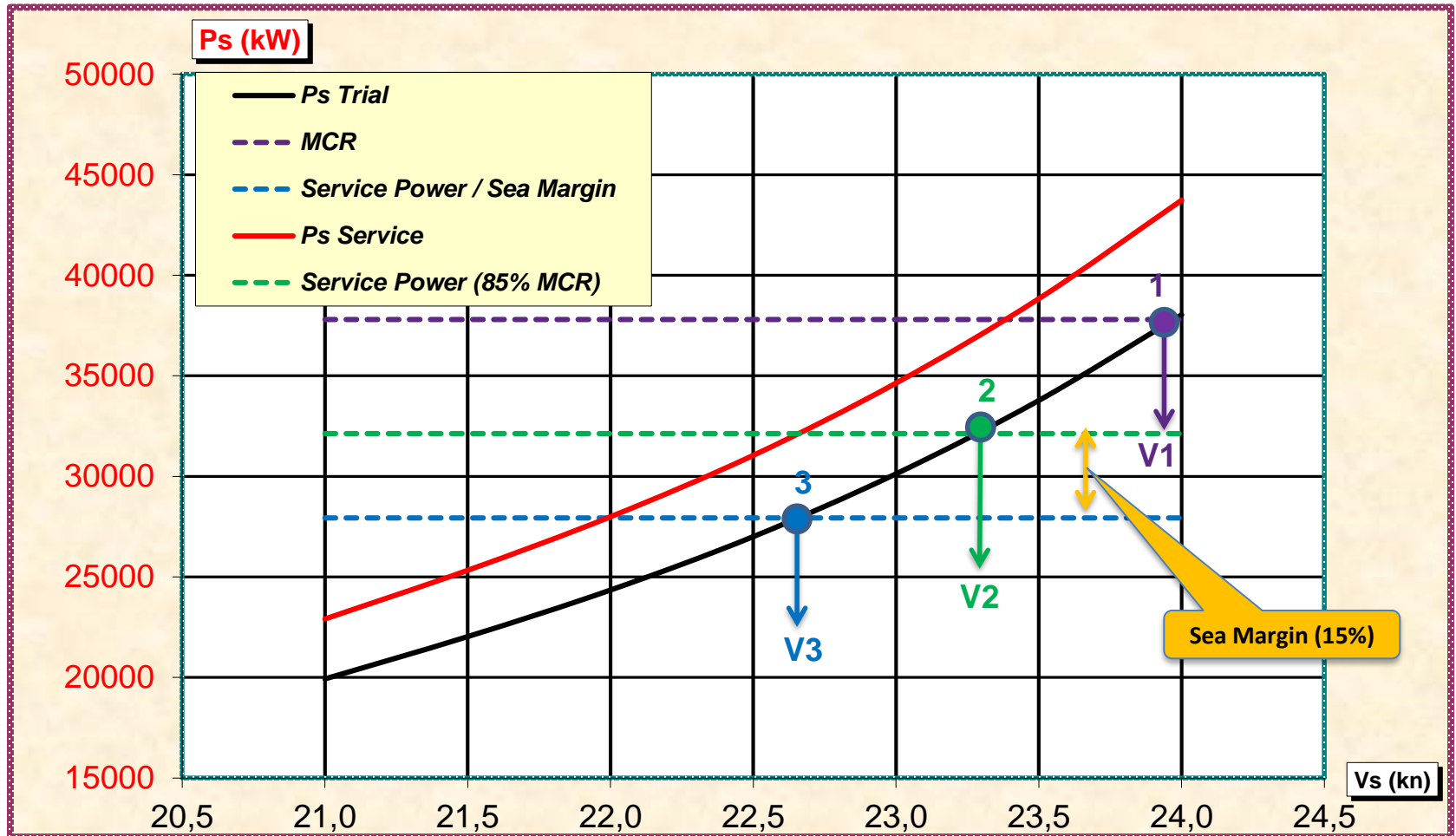


Scelta del punto di progetto

- In generale si considerano tre alternative
 1. Punto 1: MCR, in trial condition e velocità corrispondente. Solitamente utilizzato nel caso di navi militari
 2. Punto 2: Potenza di servizio in trial condition e velocità corrispondente Generalmente adottato per navi mercantili. Nel caso i limiti di vibrazioni e rumore si riferiscano ad una potenza superiore a quella di servizio è consigliabile che il punto 1 sia di riferimento nella scelta di A_E/A_0 , skew, distribuzione di carico
 3. Punto 3: Velocità di servizio in trial condition e potenza corrispondente. In questa condizione la potenza è il 60 ÷ 70% MCR e l'elica potrebbe essere inadeguata ad assorbire MCR a giri compatibili con il motore e con livelli accettabili di vibrazioni e rumore. Poiché solitamente i limiti di vibrazioni e rumore si riferiscono ad una potenza di almeno 80% MCR è consigliabile che il punto 1 sia di riferimento nella scelta di A_E/A_0 , skew, distribuzione di carico



Scelta del punto di progetto



Linee guida

Diametro e Numero di Giri di Progetto

- Limiti nella scelta del diametro
 - L'elica non deve sporgere dalla linea di costruzione
 - Mantenere adeguato clearance tra elica e carena ($25 \div 28$ % del diametro)
- Limiti nella scelta dei giri di progetto
 - La curva di funzionamento deve stare entro il campo di funzionamento ammesso del motore
- Per la scelta ottimale diametro/giri si distinguono tre casi: motore diesel a 2 tempi, motore diesel a 4 tempi, motore elettrico



Linee guida

Diametro e Numero di Giri di Progetto

Motore diesel a 2 tempi

- I giri nominali sono bassi ($100 \div 120$ RPM) e consentono l'accoppiamento diretto con un'elica a pale fisse
- La scelta dei giri di progetto è obbligata dal motore
- Al 100 % MCR i giri previsti in mare devono essere il 105 ÷ 106% dei giri nominali motore per non sovraccaricare il motore in condizioni di servizio
 - In condizioni di sovraccarico l'elica assorbe la stessa potenza ad un numero di giri inferiore rispetto alla condizione ideale (trial condition): la cubica si sposta verso sinistra e si avvicina al limite di funzionamento del motore
 - Diminuzione dei giri: $-(1,5 \div 2,5 \%)$ per sovraccarico fino al $20 \div 30\%$
 - I giri previsti in mare a parità di potenza sono più alti di quelli estrapolati al vero
 - Valore medio statistico del passaggio vasca mare sui giri a pari potenza: $+(2 \div 3\%)$

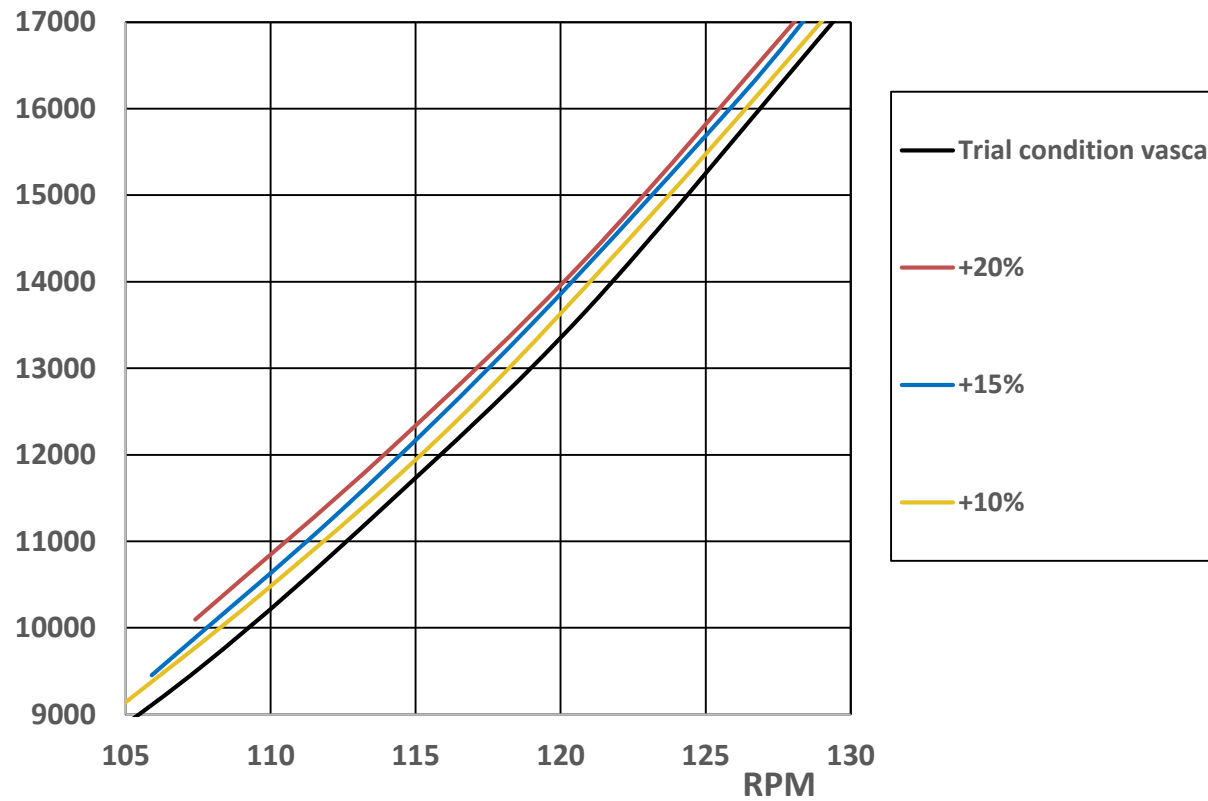


Linee guida

Diametro e Numero di Giri di Progetto

Motore diesel a 2 tempi

PD (Kw) Curva potenza-giri al variare del carico sull'elica

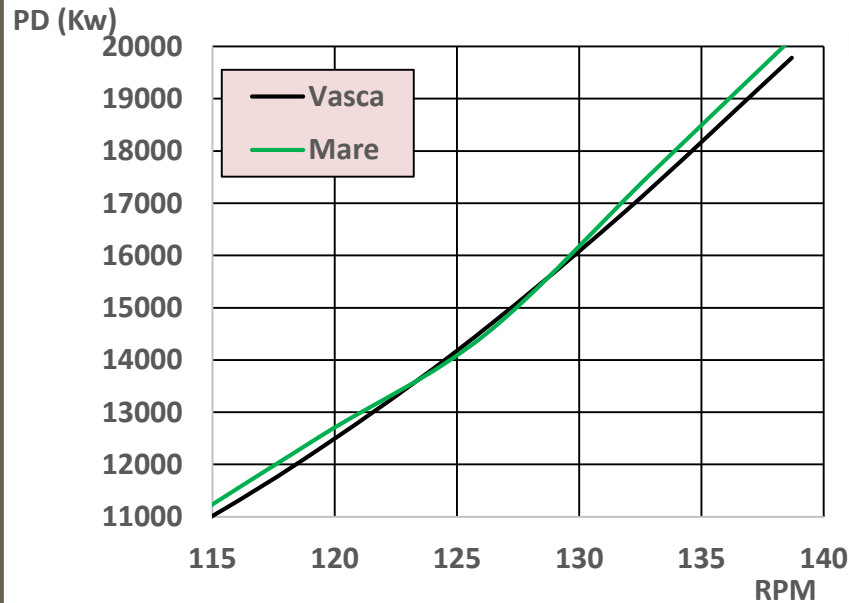


Linee guida

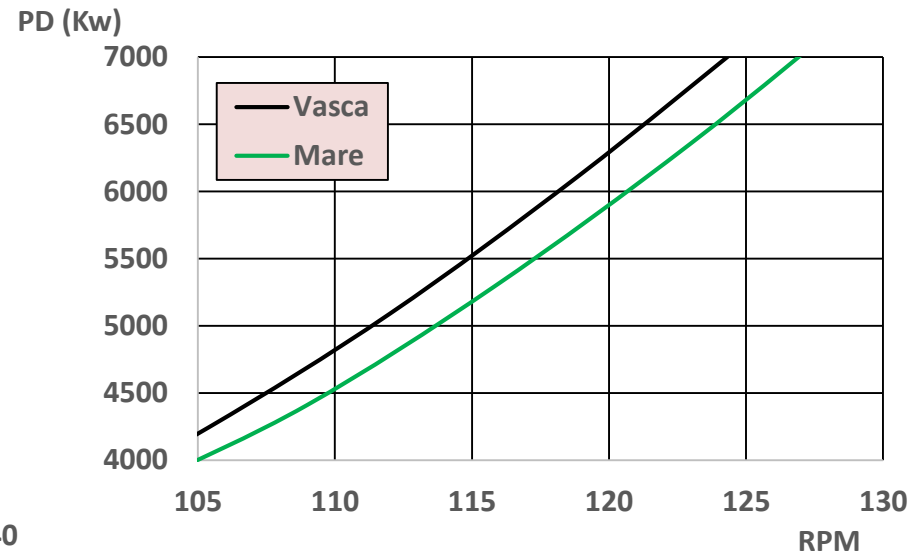
Diametro e Numero di Giri di Progetto

Motore diesel a 2 tempi

Passaggio vasca-mare nave bielica
trial condition



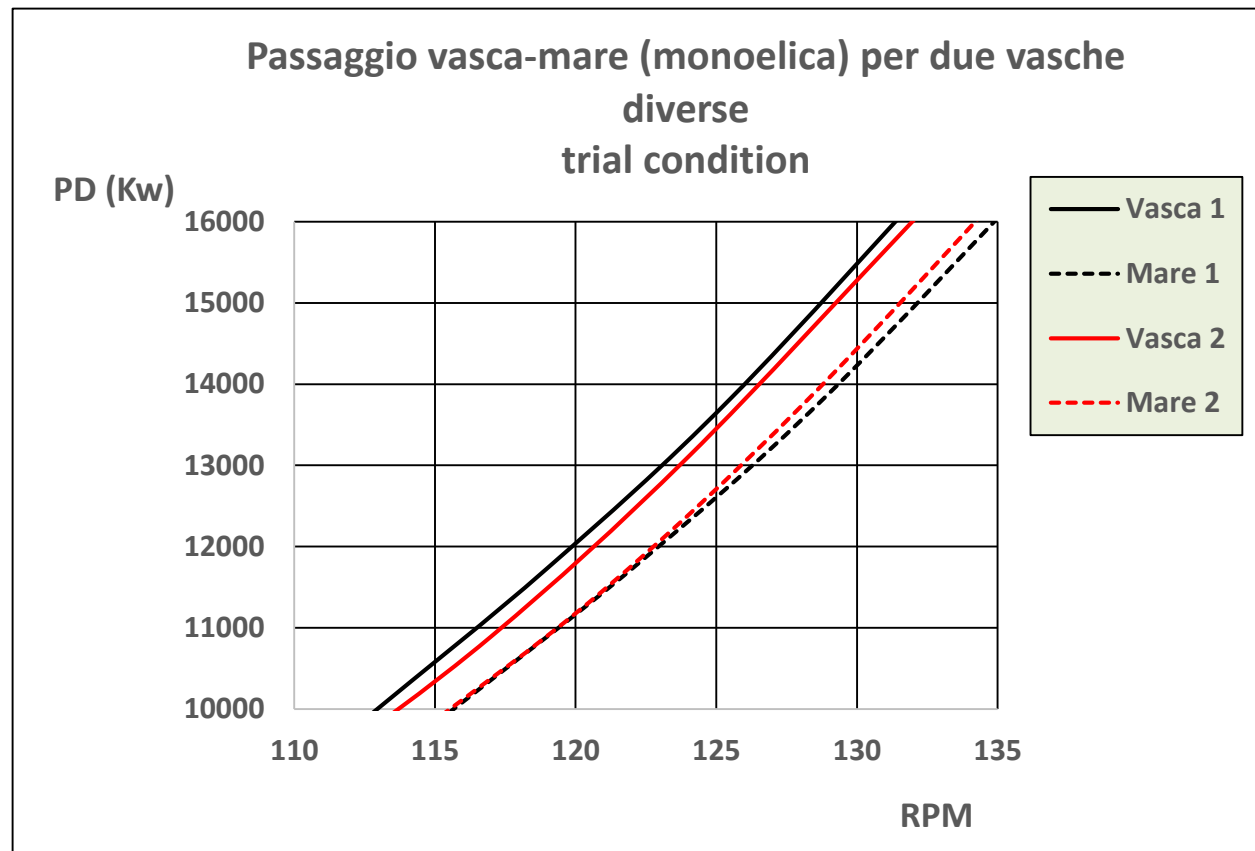
Passaggio vasca-mare nave monoelica
trial condition



Linee guida

Diametro e Numero di Giri di Progetto

Motore diesel a 2 tempi



Linee guida

Diametro e Numero di Giri di Progetto

Motore diesel a 2 tempi

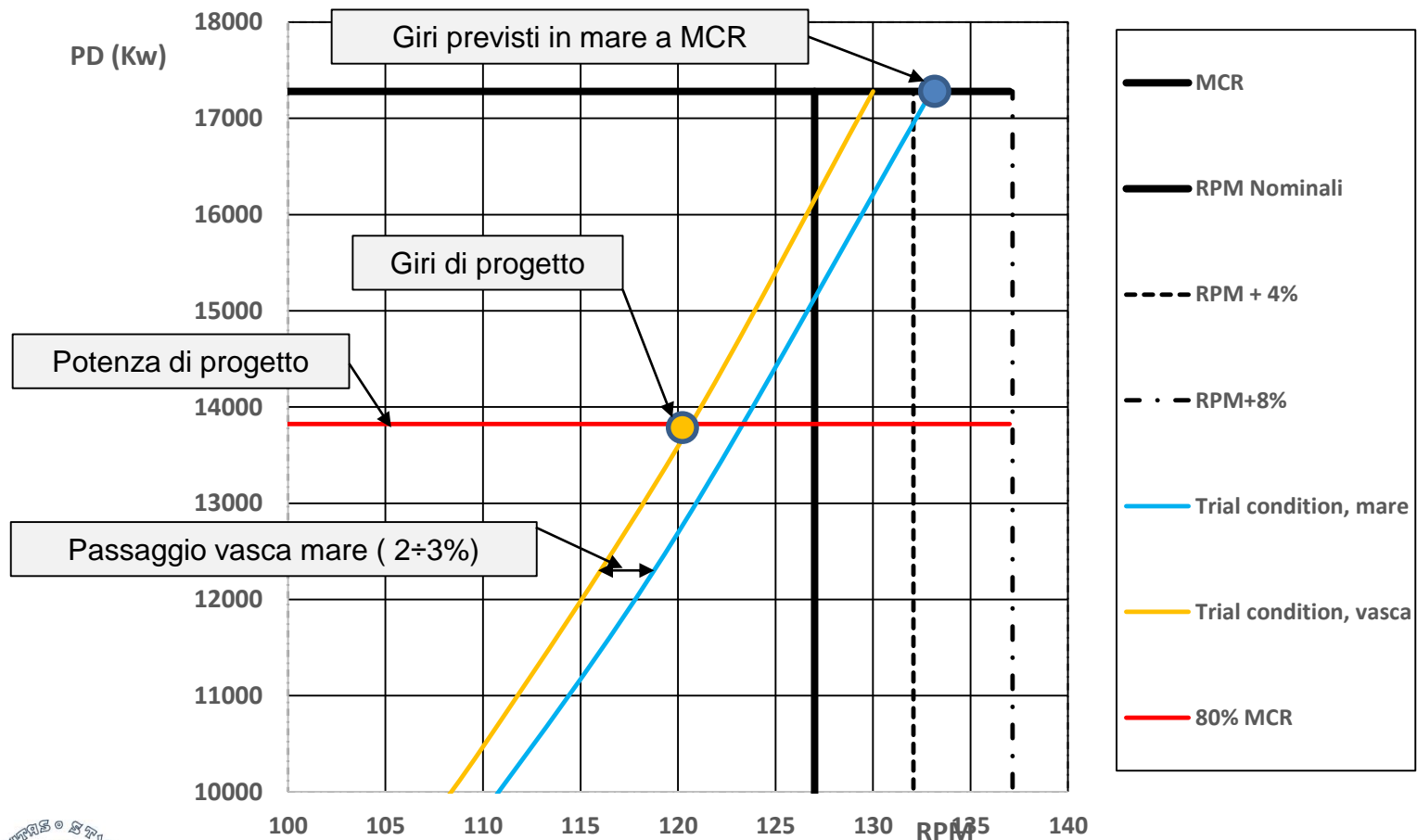
- Determinazione dei giri di progetto (trial condition):
 - Tracciare la cubica prevista in mare dal punto MCR - $(1,05 \div 1,06) * RPM_{\text{nominali}}$
 - A partire dalla cubica prevista in mare tracciare la cubica prevista in vasca utilizzando il passaggio vasca - mare
 - I giri di progetto sono l'intersezione tra la cubica vasca e la potenza di progetto



Linee guida

Diametro e Numero di Giri di Progetto

Motore diesel a 2 tempi



Linee guida

Diametro e Numero di Giri di Progetto

Motore diesel a 2 tempi

- Noti potenza, giri, velocità e scia media effettiva si valutano i valori preliminari di diametro ottimale, passo e rendimento utilizzando i diagrammi delle serie sistematiche (diagrammi B_p e B_u della serie B di Wageningen)
- Il diametro così determinato, rappresenta un ottimo punto di riferimento per verificare se le forme di carena e la sistemazione delle appendici sono tali da garantire il necessario clearance
- Il diametro ottimale finale va definito in una fase successiva utilizzando la teoria della linea portante nel momento in cui sono definiti alcuni parametri quali numero delle pale, area espansa, ecc.



Linee guida

Diametro e Numero di Giri di Progetto Motore diesel a 4 tempi

- I giri nominali sono elevati (~500 RPM): necessaria la presenza di un riduttore
- Il numero di giri dell'elica non è un dato prefissato, ma una variabile progettuale
- Va scelto in base al progetto idrodinamico tenendo conto sia degli aspetti propulsivi che di quelli cavitativi
- Determinato il numero dei giri dell'elica si può ricavare il rapporto di riduzione
- Si utilizza la serie B.Series di Wageningen per variare sistematicamente il numero di giri ricavando il corrispondente valore del diametro ottimale e del rendimento



Linee guida

Diametro e Numero di Giri di Progetto

Motore diesel a 4 tempi

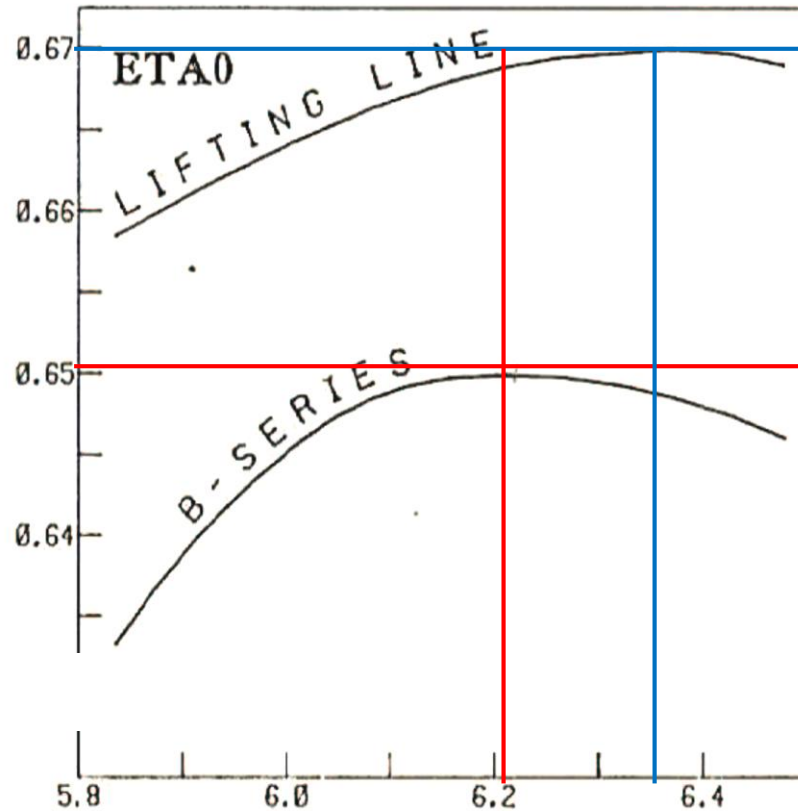
- Si traccia un diagramma che riporta, in funzione dei giri, il diametro ed il rendimento ottimale. In corrispondenza al massimo della curva di rendimento si scelgono in via preliminare i giri di progetto ed il diametro
- La curva del rendimento è piuttosto piatta in un ampio range di giri
- Lievi variazioni del diametro e dei giri non producono sensibili variazioni del rendimento
- La scelta preliminare del diametro e dei giri deve essere affinata nelle fasi successive del progetto con un calcolo a linea portante
- Determinati gli altri parametri geometrici si verifica che il rendimento, la cavitazione e le pressioni indotte sulla carena soddisfino i requisiti progettuali



Linee guida

Diametro e Numero di Giri di Progetto

Motore diesel a 4 tempi



81



Linee guida

Diametro e Numero di Giri di Progetto

Motore diesel a 4 tempi

- La riduzione del numero di giri è favorevole nei riguardi della cavitazione poiché incrementa σ , ma conseguentemente è necessario aumentare il diametro o il passo. Si diminuisce così il contributo cavitante alla pressione indotta, mentre si aumenta quello non cavitante
- La riduzione di giri risulta efficace quando il contributo cavitativo risulti predominante su quello non cavitativo
- Aumentando il diametro bisogna verificare che la riduzione del clearance non sia tale da incrementare la pressione indotta
- E' opportuno che la velocità periferica della pala sia inferiore a circa 44 m/s



Linee guida

Diametro e Numero di Giri di Progetto

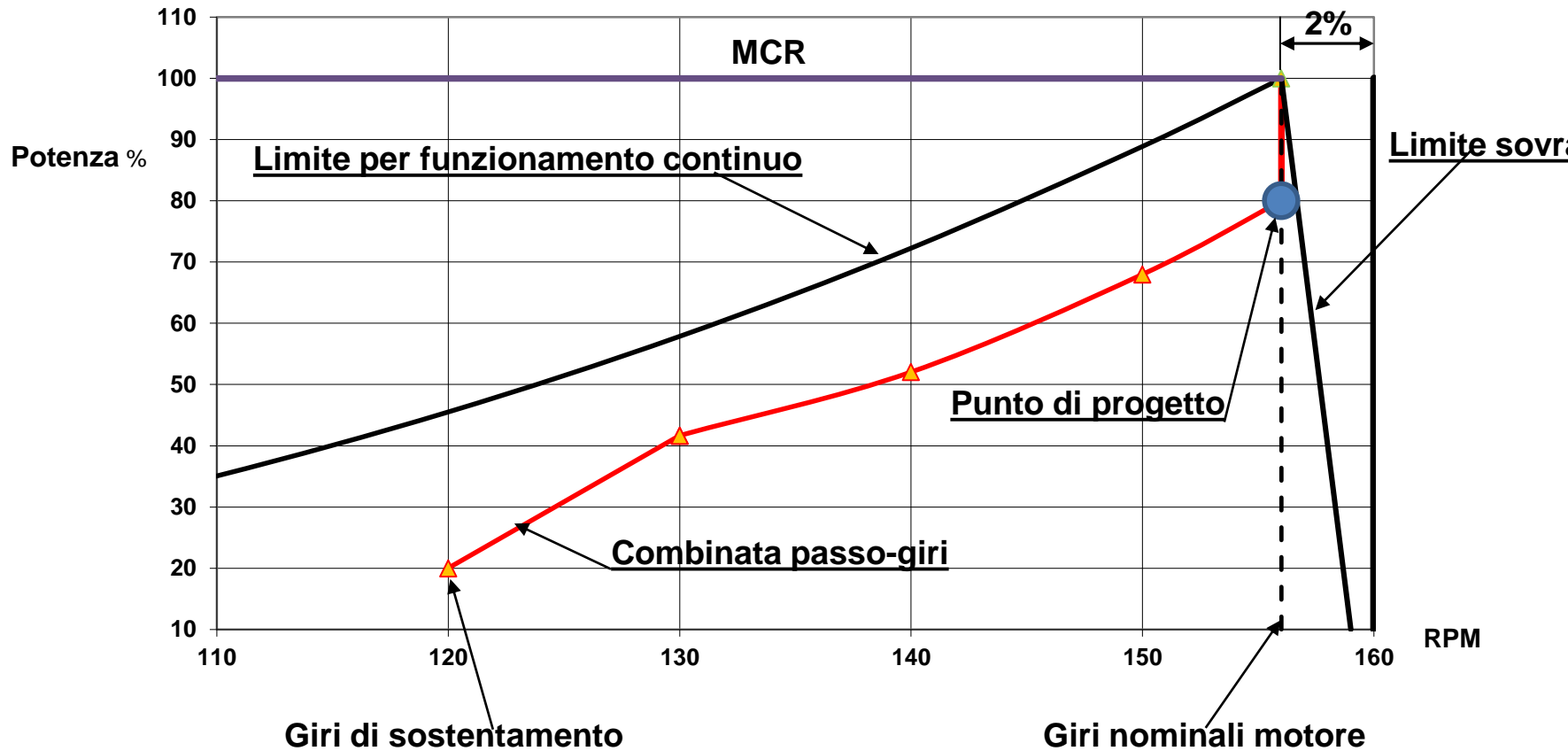
Motore diesel a 4 tempi

- Solitamente i giri di progetto dell'elica previsti in mare corrispondono al 100% dei giri nominali motore ed all' 80 ÷ 85% MCR
- Si può quindi ricavare il rapporto di riduzione:
 - $\rho = \text{giri nominali motore} / \text{giri di progetto elica}$
- Nel diagramma combinato il passaggio dal punto di progetto al 100% MCR avviene secondo una linea verticale a giri fissi



Linee guida

Diametro e Numero di Giri di Progetto Motore diesel a 4 tempi



Linee guida

Diametro e Numero di Giri di Progetto

Motore elettrico

- Il numero di giri nominale non è un parametro fisso, ma può essere concordato con il fornitore entro certi limiti
- In questo caso sia il diametro che i giri di progetto dell'elica sono variabili progettuali e possono essere stabiliti analogamente ad un motore diesel a 4 tempi
 - Elica a pale orientabili: si traccia la cubica per il punto di progetto e su questa curva si determina il valore dei giri nominali del motore al 100% MCR
 - Elica a pale fisse: si procede come nel caso precedente, ma il valore dei giri nominali motore al 100% MCR va ridotto di circa il 2% per tenere conto del sovraccarico dell'elica in condizioni di servizio. Alle prove mare i giri elica sono più alti del 2% rispetto ai nominali motore, mentre in servizio i due valori coincidono



Linee guida

Numero delle pale

- Il numero di pale è condizionato dalle vibrazioni generate dall'elica in scia non uniforme ed al tipo di motore
- Determina le frequenze e le ampiezze delle forze e dei momenti periodici generati dall'elica che non devono entrare in risonanza con le frequenze naturali dello scafo, della linea d'asse e del motore per evitare eccessivi livelli di rumore e vibrazioni
- Opportuno eseguire calcoli preliminari delle frequenze naturali della struttura, della linea d'asse e del motore per avere indicazioni sulla scelta più opportuna
- Accoppiamento tra motori a 4 ed 8 cilindri con eliche 4 pale oppure motori a 5 cilindri con eliche a 5 pale possono creare risonanze poiché la frequenza del motore e quella dell'elica hanno armoniche comuni



Linee guida

Numero delle pale

- L'analisi armonica della scia può dare utili indicazioni sul numero di pale da adottare per evitare eccessive fluttuazioni della spinta, del momento torcente e delle bearing forces
- L'aumento del numero di pale diminuisce leggermente il diametro ottimale ed il rendimento
- Elica a pale fisse: 4 pale per general cargo, cisterne, bulk, portacontenitori. 5 pale per navi refrigerate, portacontenitori con elevate potenze installate, navi passeggeri. 6 pale per navi passeggeri con elevati standard di confort e silenziosità
- Elica a pale orientabili: 4 pale. L'adozione di 5 pale, seppure realizzabile, implica complicazioni costruttive e maggiori costi, difficoltà meccaniche per la costruzione del mozzo e problemi progettuali per lo studio della radice di pala (interferenza nella rotazione)



Linee guida

Verso di rotazione (navi bielica)

- Si definisce rotazione “interna o sopra convergente” quando l’elica destra ruota in senso antiorario e quella sinistra in senso orario, viste da poppa. Nel caso opposto la rotazione si definisce “esterna o sopra divergente”
- Per la scelta del verso di rotazione è essenziale l’analisi della scia tangenziale
- Se il verso di rotazione è opposto a quello della rotazione naturale della scia le componenti tangenziali si sommano alla velocità di rotazione, aumentando le fluttuazioni dell’angolo d’attacco (cosiddetto “effetto controelica”)
- Ciò comporta un incremento del rendimento propulsivo rispetto al verso di rotazione opposto, ma un peggioramento del comportamento cavitativo
- La fase di collasso delle bolle cavitanti dà sempre pressioni indotte superiori rispetto alla fase di crescita
- Il senso di rotazione deve essere tale che i gradienti di scia incontrati dalla pala siano meno bruschi nella fase di uscita piuttosto che in quella di entrata
- È buona norma scegliere il verso di rotazione in base al comportamento sia propulsivo che cavitativo determinato da calcoli comparativi o prove su modello



Linee guida

Area espansa (A_E/A_0)

- La valutazione si basa su criteri cavitativi perché l'elica non inneschi una cavitazione dannosa per gli aspetti vibratorii ed erosivi
- Formule o diagrammi di tipo statistico, progetti simili per un assumere un valore di primo tentativo
- Criterio di Burril (vedi cap.Cavitazione): basato su esperienze al tunnel di cavitazione su varie tipologie di eliche.
 - Consente di valutare l'area espansa per evitare cavitazione a bolle e contenere quella laminare sul dorso
 - Elaborato su eliche prive di skew, non adatto per le moderne tipologie di eliche. Può portare a valori elevati di A_E
- Formula di Keller (vedi cap.Cavitazione): sviluppato per eliche con skew inferiore a 25°
- Fornisce valide indicazioni anche per eliche con skew superiori



Linee guida

Area espansa (A_E/A_0)

- Formula di Keller (vedi cap. Cavitazione): sviluppato per eliche con skew inferiore a 25°
- Fornisce valide indicazioni anche per eliche con skew superiori
- Per eliche a pale orientabili
 - Il valore va corretto per la differenza del diametro del mozzo tra elica a pale fisse ed orientabili. Solitamente assunto pari al 5 %
 - A_e/A_0 non deve superare il valore di circa 0.75 per consentire la rotazione delle pale tra la posizione di marcia avanti a quella di marcia indietro. Per la sicura rotazione senza interferenze, è necessario che i bordi di ingresso e di uscita di pale adiacenti distino almeno $25 \div 30$ mm



Linee guida

Distribuzione delle corde

- Il carico idrodinamico è distribuito radialmente in funzione della distribuzione del passo. Ad ogni striscia infinitesima di area $C \cdot dr$ (C : corda, dr : raggio infinitesimo) è associato un carico infinitesimo dL che può essere espresso in funzione del coefficiente di portanza C_L :

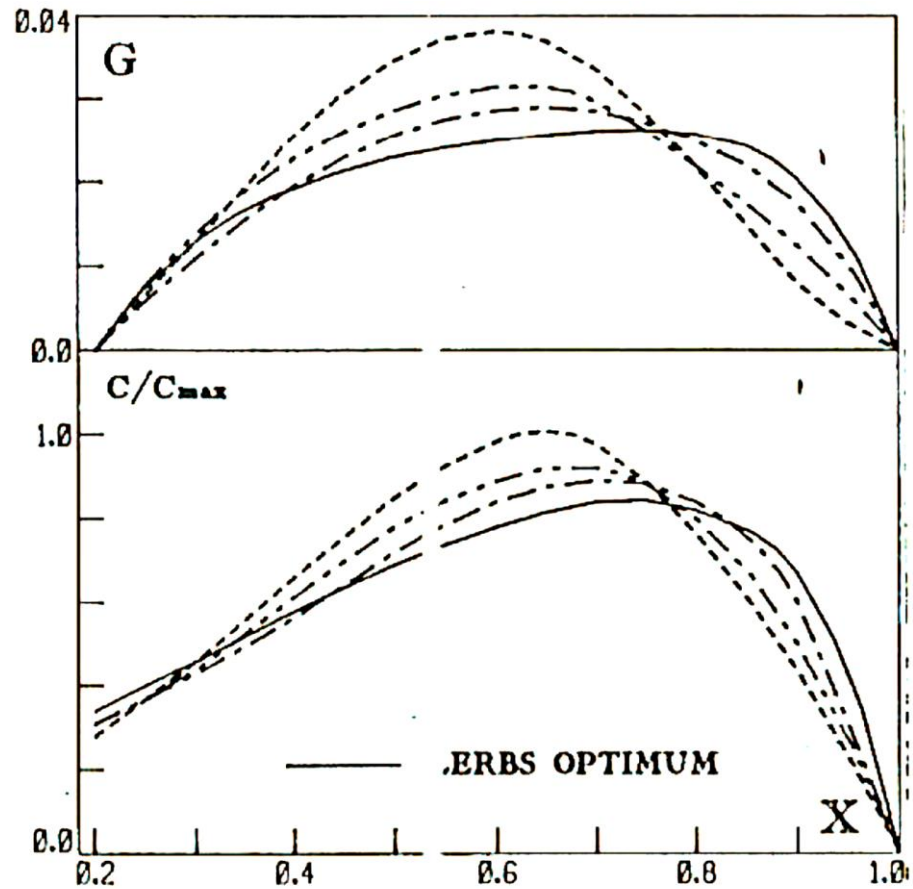
$$dL(r) = C_L(r) \cdot (\rho/2 C(r) dr V_r^2)$$

- La distribuzione delle lunghezze di corda è direttamente correlata a quella del carico
- Presenta solitamente il valore massimo al raggio dove il carico è massimo. Le dimensioni del mozzo limitano le lunghezze nei primi raggi della pala, soprattutto nel caso di pale orientabili
- La scelta della distribuzione delle corde parte da un primo tentativo che rispetti l'area espansa preliminare. Va perfezionata in base a successive verifiche di rendimento, cavitazione e robustezza



Linee guida

Distribuzione delle corde



Linee guida

Distribuzione delle corde

- Dal punto di vista cavitativo è opportuno adottare corde lunghe per ottenere bassi valori di C_L e quindi modesti angoli d'incidenza e di curvatura del profilo con conseguente limitazione del volume di cavitazione, ma con una diminuzione di rendimento
- La robustezza della sezione dipende dal momento d'inerzia, proporzionale al prodotto $C \cdot t^2$
- All'aumentare di C lo spessore t il rapporto t/C diminuiscono. Valori bassi di t/C favoriscono il rendimento, ma sono più suscettibili a cavitare in presenza di forti fluttuazioni dell'angolo d'attacco
- La determinazione delle corde è un processo iterativo dove gli aspetti legati al rendimento ed alla cavitazione vanno attentamente valutati



Linee guida

Distribuzione dello skew

- La distribuzione dello skew, assieme a quella delle corde, determina la forma della pala
- Lo skew è uno dei mezzi più efficaci per ridurre l'estensione della cavitazione e le forze eccitanti (bearing forces e pressioni indotte) generate dall'elica
- Con lo skew le sezioni di pala entrano nel picco di scia gradualmente per cui i carichi ai vari raggi risultano sfasati
- In una pala simmetrica tutte le sezioni entrano nel picco di scia contemporaneamente generando carichi in fase tra loro
- La gradualità è dovuta allo “sweep” cioè la forma molto arcuata del profilo del bordo d'ingresso della pala creato dalla combinazione della distribuzione delle corde e quella dello skew



Linee guida

Distribuzione dello skew

- L'effetto dello skew sulla riduzione delle pressioni indotte è concentrato sui valori della prima armonica in quanto agisce sul carico non cavitante e sulla cavitazione laminare
- Non ha effetti sul vortice d'estremità, causa prevalente dei contributi alle armoniche superiori
- Per la scelta della distribuzione dello skew, espresso in gradi, si può fare riferimento ai seguenti valori

r/R	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	1.0
FERRY	-5.5	-8	-8.5	-7	-2.5	6	17.5	25	32
CARGO	-7.5	-9	-8.5	-6.5	-2.5	2.5	8.5	11.5	15
CPP PASS.	3.5	-10	-15.5	-14.5	-7.5	3.5	18	26	34
FPP PASS.	-7.5	-8	-6.5	-4.5	-0.5	4.5	11.5	16	23



Linee guida

Distribuzione dello skew

- L'adozione dello skew comporta problemi strutturali da considerare attentamente nella scelta del massimo angolo
- Le sollecitazioni più elevate, solitamente concentrate alla radice per pale simmetriche, sono presenti anche a raggi più alti ($0.5 \div 0.7R$) sul bordo di uscita il quale deve essere opportunamente avviato per evitare spigoli e discontinuità che potrebbero agire come punti di concentrazione di sollecitazioni ed innesco di rottura



Linee guida

Distribuzione dello skew

- I registri di classifica impongono calcoli diretti ad elementi finiti per eliche con angoli di skew superiori a 50° . Per angoli inferiori si può ricorrere alle sole formulazioni dei registri
- E' preferibile contenere l'angolo di skew entro 50° per evitare spessori eccessivi. Consigliabile un calcolo ad elementi finiti

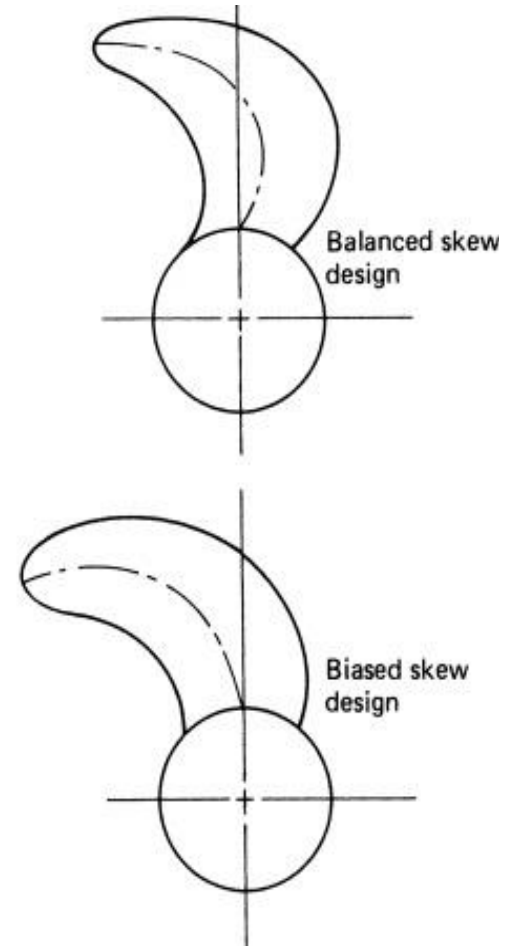
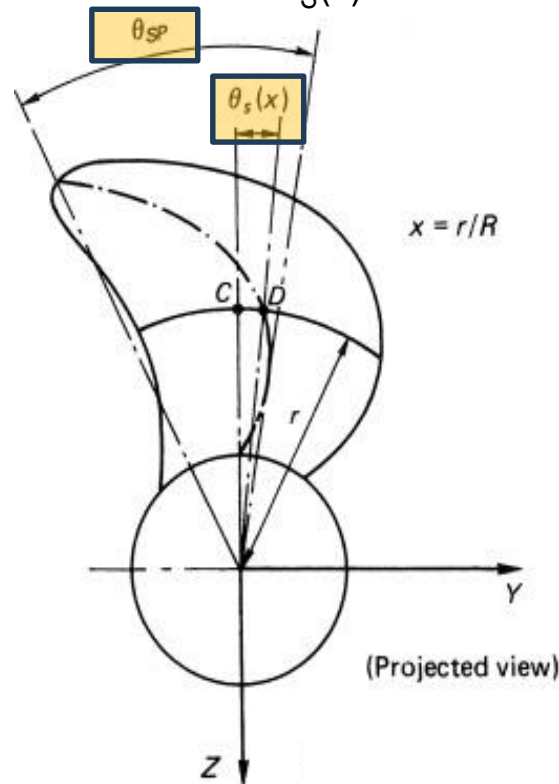


Linee guida

Distribuzione dello skew

I registri definiscono solitamente lo skew con l'angolo θ_{SP} (skew totale)

$\theta_s(x)$: Skew alla sezione di raggio r



Linee guida

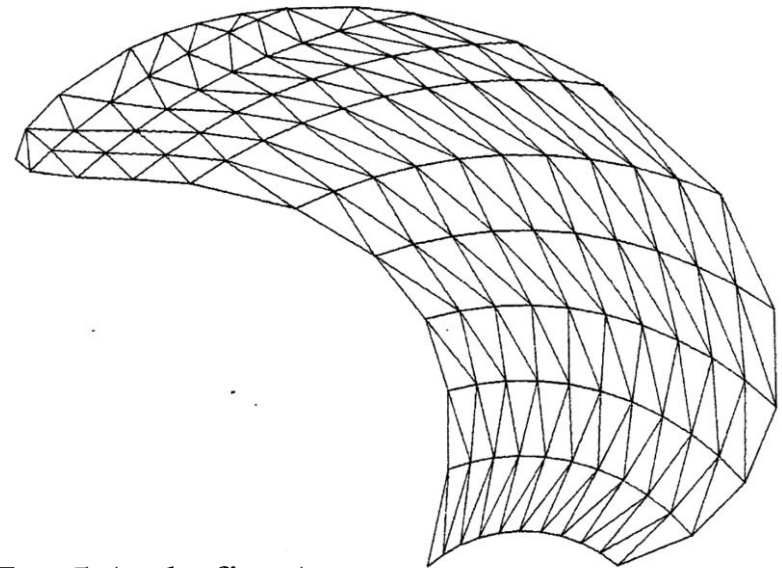
Distribuzione dello skew

r/R	Load case 1		Load case 2		Load case 3	
	CD	CL	CD	CL	CD	CL
.2	.0144	.156	.0090	.100	.0086	.043
.3	.0256	.409	.0106	.218	.0116	.241
.4	.0294	.593	.0103	.296	.0106	.308
.5	.0242	.501	.0099	.250	.0089	.200
.6	.0205	.422	.0098	.228	.0086	.153
.7	.0180	.359	.0091	.184	.0085	.134
.8	.0259	.360	.0090	.145	.0085	.105
.9	.0179	.221	.0089	.101	.0086	.059
.95	.0132	.154	.0087	.076	.0090	.027
Blade Thrust (kg)	23300		13300		7470	
θ° *	6°		78°		252°	

TABLE 1

*) θ° angular blade position;
 $\theta^\circ = 0$ in upright position, positive clockwise

Calcolo ad elementi finiti



$Z = 5$ (pale fisse)

$A_E/A_0 = 0,723$

Skew all'estremità: 38°

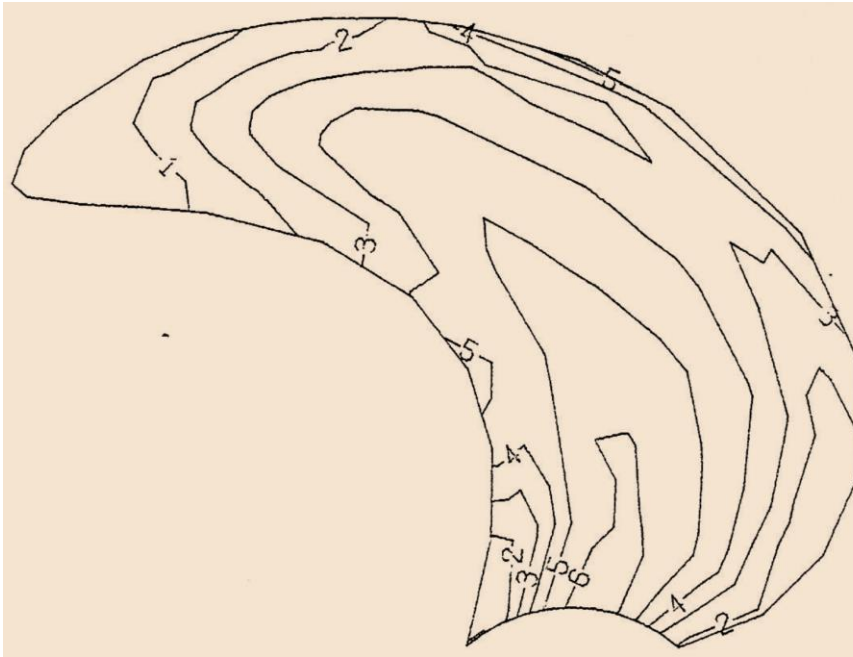
Skew a $0,4 R$: -16°

Skew totale: 54°

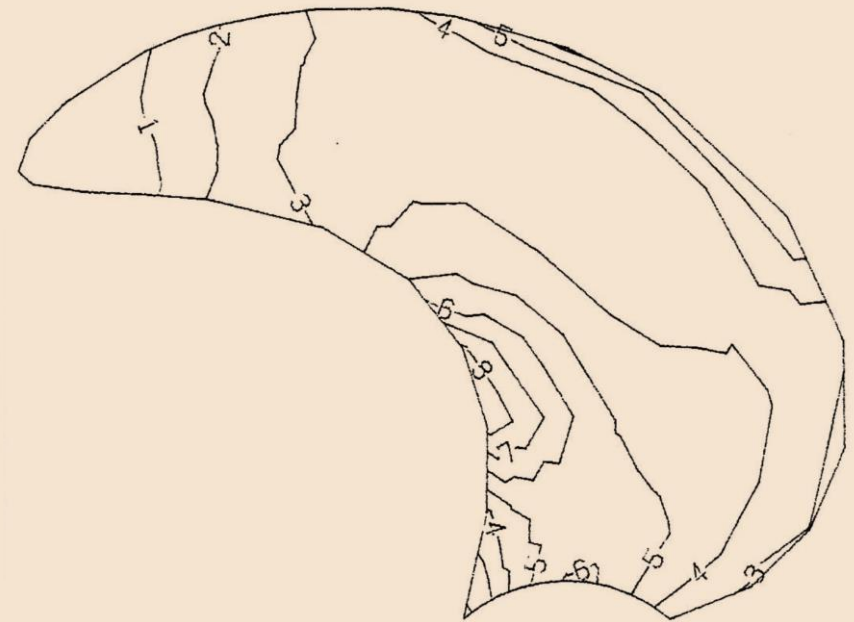


Linee guida

Distribuzione dello skew



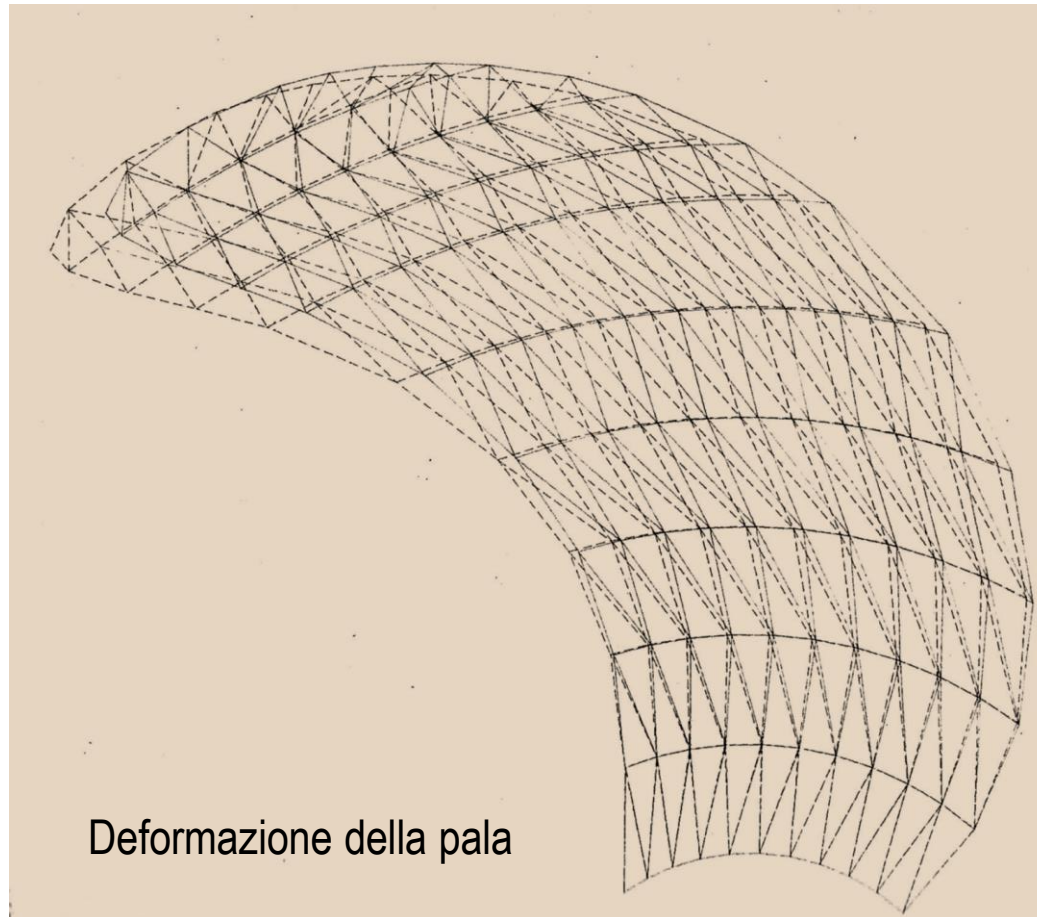
Carico massimo dorso

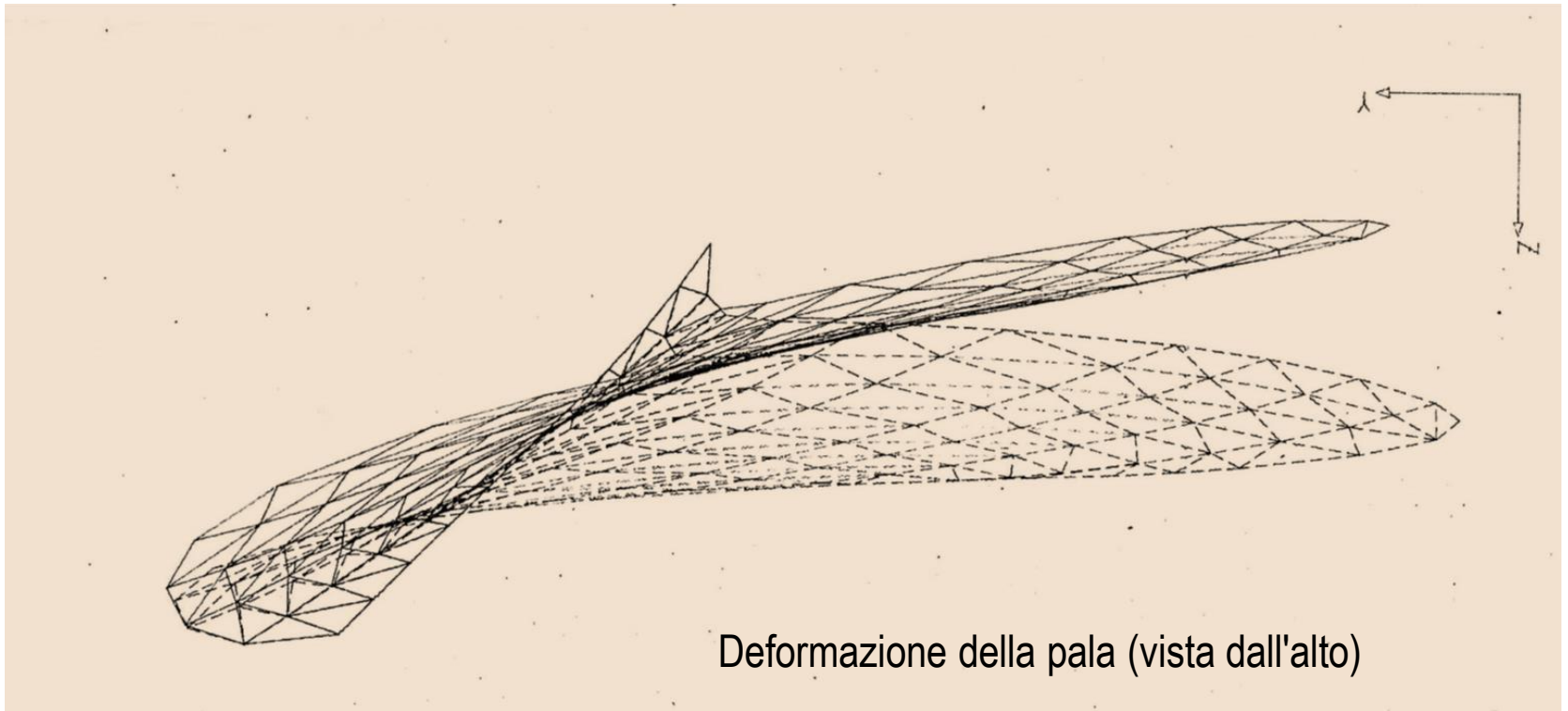


Carico massimo faccia

Linee guida

Distribuzione dello skew





Deformazione della pala (vista dall'alto)

Linee guida

Distribuzione dello skew

- FPP: il bordo d'uscita nelle manovre di retromarcia ed arresto forzato (crash stop) diventa bordo d'ingresso con conseguenti forti sollecitazioni, seppur transitorie, concentrate sul bordo d'uscita e superiori a quelle di marcia avanti. Lo skew va limitato a $20^{\circ} \div 25^{\circ}$ soprattutto con motore elettrico
- CPP: skew massimo $30^{\circ} \div 35^{\circ}$. La distribuzione di skew deve bilanciare la distribuzione della superficie della pala rispetto all'asse di rotazione in modo da limitare lo spindle torque e le conseguenti forze sul meccanismo del comando del passo
- La determinazione dello skew è basata su calcoli (cavitazione, pressioni indotte, sollecitazioni) e prove su modello
- Il processo è iterativo dove gli aspetti legati alla cavitazione ed alla robustezza vanno attentamente valutati

• Non si riscontrano effetti negativi sul rendimento



Linee guida

Distribuzione del rake

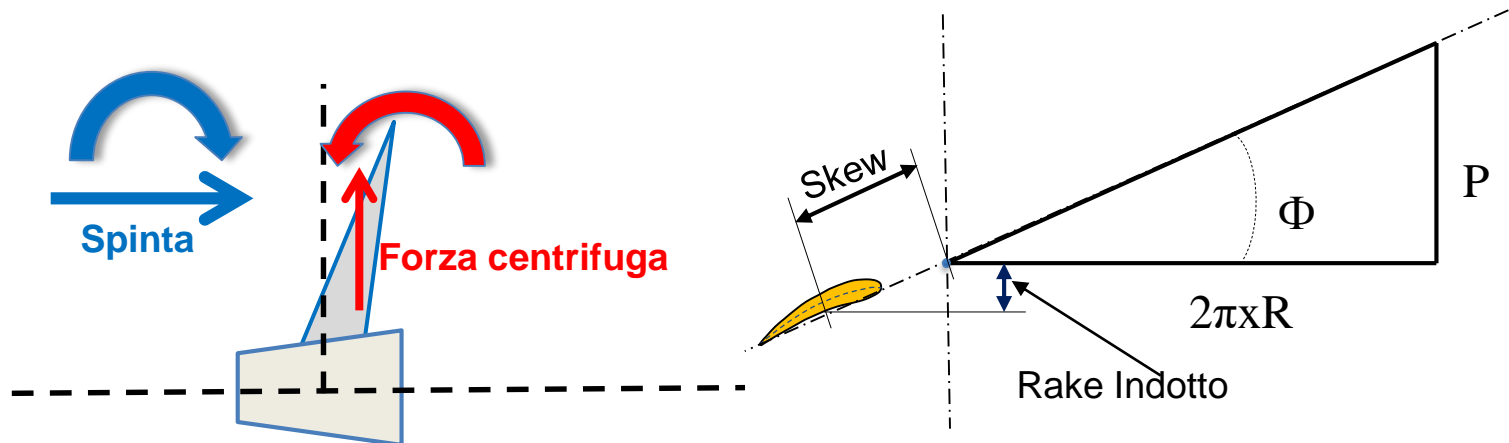
- E' importante nel calcolo strutturale della pala
- Non influenza le prestazioni idrodinamiche, rendimento e cavitazione
- In una pala simmetrica il rake è lineare verso prora: il momento flettente generato dalla forza centrifuga controbilancia parzialmente quello della spinta. Le tensioni alla radice della pala sono inferiori a quelle del caso di rake nullo o verso poppa
- La distanza tra la pala ed il profilo di poppa (nave monoelica), bracci portaelica (nave bielica) diminuisce. Necessità di verificare i limiti suggeriti dai registri di classifica



Linee guida

Distribuzione del rake

- Nel caso di una pala con skew lo spostamento di una sezione lungo la linea del passo crea uno spostamento longitudinale, detto “rake indotto”
- La punta della pala si sposta verso poppa, generando un incremento delle sollecitazioni particolarmente pericoloso nelle manovre di arresto forzato o di marcia indietro nel caso di eliche a pale fisse con elevato skew
- In questo caso la distribuzione del rake va accuratamente valutata, assieme a quella dello skew, con calcoli strutturali ad elementi finiti



Linee guida

Distribuzione degli spessori

- La scelta iniziale degli spessori si basa sui regolamenti dei registri di classifica
- Si può utilizzare il metodo di Conolly (Vedi cap. "Robustezza dell'elica")
- È necessaria una verifica con il metodo ad elementi finiti per la definizione finale degli spessori e della forma della pala
- Si considerano tre configurazioni in marcia avanti (Ahead Condition) corrispondenti alle condizioni di carico massimo, minimo e medio lungo il giro
- Il calcolo va eseguito anche per la condizione di arresto forzato (Crash Stop), e per la marcia indietro (Astern Condition). Si assume una scia uniforme con $(1-w)_{\text{eff}} = 1$
- I calcoli strutturali vanno eseguiti sempre al 100% MCR, al 100% dei giri nominali ed alla massima velocità. Le condizioni di stress più gravose si riscontrano durante le condizioni di crash stop e marcia indietro



Linee guida

Distribuzione degli spessori

- E' opportuno che per eliche a pale fisse le tensioni in marcia avanti non superino il valore di 40 N/mm^2 sul bordo di uscita, mentre alla radice possono arrivare fino a 65 N/mm^2
- In marcia indietro sul bordo di uscita non è prudente superare i 70 N/mm^2 per eliche a pale fisse, mentre per eliche a pale orientabili tale limite può arrivare a 80 N/mm^2
- Nel caso di eliche a pale fisse è necessario evitare punti di concentrazioni locali di tensioni e con rapidi gradienti adottando un'opportuna forma del bordo d'uscita
- Le tensioni devono essere distribuite quanto più uniformemente possibile lungo il profilo della pala ed è opportuno evitare la formazione di linee naturali di inflessione come può verificarsi nella zona esterna della pala con elevato skew senza un'opportuna compensazione con il rake



Linee guida

Distribuzione degli spessori

- Nella scelta degli spessori bisogna considerare anche gli aspetti idrodinamici, dipendenti dal rapporto tra spessore e corda (t/C)
- Profili spessi ($t/C: 0.10 \div 0.25$)
 - Il range in cui può variare l'angolo d'attacco senza innescare cavitazione laminare è piuttosto ampio ($5^\circ \div 8^\circ$)
 - Le variazioni di carico lungo il giro dovute alla scia possono essere assorbite senza conseguenze negative in relazione alle forze eccitanti indotte
 - Sono più suscettibili ad innescare cavitazione a bolle ed hanno un effetto negativo sul rendimento.
 - Nelle sezioni in corrispondenza della radice della pala è necessario limitare il rapporto t/C , agendo anche sulla lunghezza della corda C , per evitare che la cavitazione produca fenomeni erosivi particolarmente pericolosi in una zona con elevate sollecitazioni



Linee guida

Distribuzione degli spessori

- Profili sottili ($t/C: 0.080 \div 0.015$)
 - Il range in cui può variare l'angolo d'attacco senza innescare cavitazione laminare è molto basso ($1^\circ \div 2^\circ$)
 - Suscettibili a cavitare anche in presenza di una scia non particolarmente disomogenea
 - Margine più elevato nei riguardi della cavitazione a bolle ed effetto positivo sul rendimento
 - Nella zona esterna della pala può essere necessario incrementare t/C rispetto al minimo richiesto dal calcolo strutturale per aumentare il margine sulla cavitazione (bucket di cavitazione più ampio)
- Per eliche con classe ghiacci i registri richiedono spessori più elevati con conseguenti penalizzazioni sia in termini propulsivi che cavitativi. Inoltre le classi ghiacci più elevate impongono valori minimi anche ai bordi di entrata ed uscita per cui i profili ottimali normalmente utilizzati vengono sensibilmente modificati con diminuzioni di rendimento fino al 5%



Linee guida

Distribuzione del passo

- La distribuzione radiale del passo geometrico (P), e quella della curvatura del profilo (f), generano il carico idrodinamico sulla pala
- Il passo e la curvatura sono calcolati direttamente con la teoria della superficie portante che calcola anche il rendimento e la potenza assorbita



Linee guida

Distribuzione del passo

Input per il calcolo a superficie portante

- Velocità nave
- Spinta: da calcoli di previsione di potenza o prove di autopropulsione con elica di stock
- Scia media effettiva $(1-w)_{\text{eff}}$: stimata da navi simili o da prove di autopropulsione con elica di stock
- Distribuzione della scia media circonferenziale effettiva assiale e tangenziale: da prove su modello o calcoli CFD
- La scia media circonferenziale effettiva è quella nominale corretta nel rapporto $(1-w)_{\text{eff}} / (1-w)_n$



Linee guida

Distribuzione del passo

Input per il calcolo a superficie portante

- Diametro
- RPM
- Numero delle pale
- Distribuzione delle corde
- Distribuzione dello skew
- Distribuzione degli spessori
- Distribuzione radiale e circonferenziale del carico
- Percentuale di portanza da curvatura (0,85 ÷ 1,0)



Linee guida

Distribuzione radiale del carico

- La distribuzione radiale del carico può essere scelta arbitrariamente tramite un parametro adimensionale corrispondente alla percentuale di carico assegnato ad ogni sezione
- Passo e carico sono strettamente legati: se si aumenta il passo su una zona della pala anche il carico aumenta e viceversa
- Tra le infinite distribuzioni possibili si può individuare quella di massimo rendimento (distribuzione ottimale). Rappresenta un riferimento importante nello sviluppo del progetto
- A seconda della tipologia di elica e di nave, dei requisiti di efficienza e dei livelli ammissibili delle forze indotte si può assumere come ipotesi iniziale una distribuzione standard derivata dall'esperienza su navi simili la quale potrà essere ritoccata in base alle successive verifiche di cavitazione e rendimento



Linee guida

Distribuzione radiale del carico

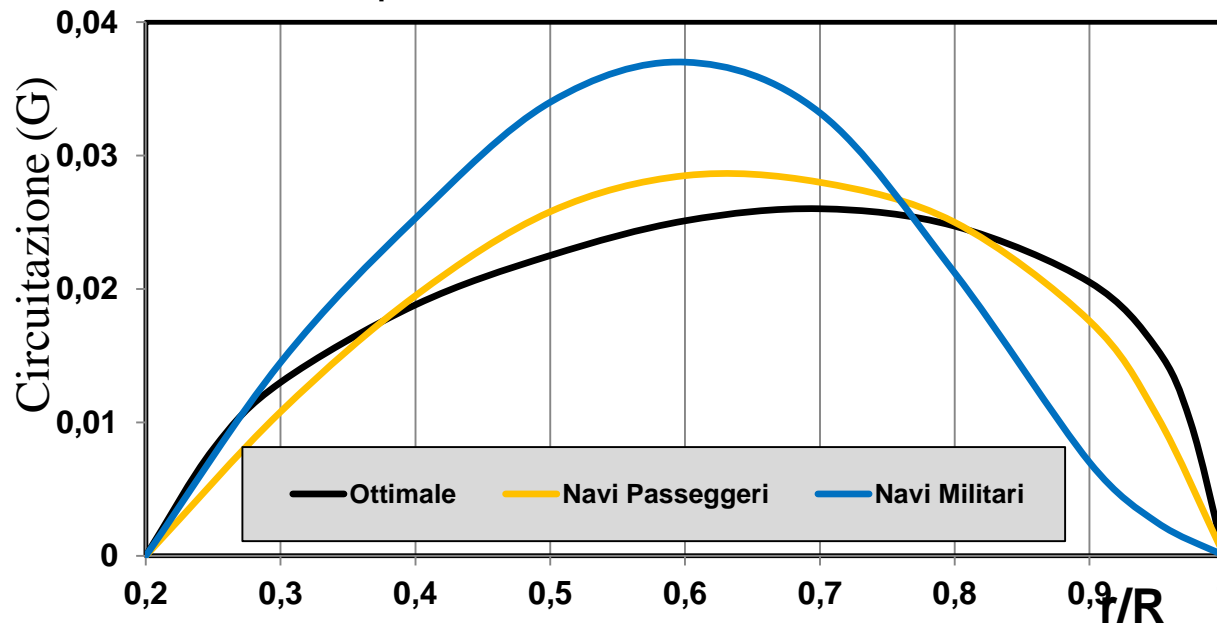
- La distribuzione ottimale produce un carico elevato all'estremità della pala dove l'indice di cavitazione è basso per il ridotto battente e l'elevata velocità periferica. Ciò può provocare un'elevata estensione della cavitazione ed un vortice d'estremità, fonte di rumore e di elevati valori delle armoniche superiori delle forze indotte con distribuzioni di energia lungo una banda molto ampia di frequenze e conseguenti pericoli di risonanza con frequenze naturali
- E' opportuno utilizzare distribuzioni scaricate all'estremità ed al mozzo per ottenere un buon compromesso tra efficienza e pressioni generate



Linee guida

Distribuzione radiale del carico

- Con riferimento alla distribuzione ottimale, per le navi da crociera si assume solitamente un carico più elevato nella zona centrale della pala ($0.45 \div 0.80 R$), ridotto di circa il 15% all'estremità e di circa il 5% al mozzo, mentre per le navi militari la riduzione da circa $0.75 R$ in poi è più consistente per ottenere la massima riduzione del vortice d'estremità e del rumore irradiato in acqua



Linee guida

Distribuzione circonferenziale del carico

- Il carico lungo la corda è determinato dal tipo di curvatura e dal rapporto f/C . Può essere scelto arbitrariamente
- In pratica si utilizza quasi sempre la linea media NACA $a=0.8$: un carico costante lungo il profilo fino all'80% della sua lunghezza dal bordo di ingresso che decresce linearmente fino al bordo d'uscita
- La linea media NACA $a=0.8$ è favorevole nei riguardi della cavitazione: contribuisce a limitare le variazioni di pressione al bordo d'ingresso create dalla fluttuazione dell'angolo d'attacco dovuto alla scia
- Con la teoria della superficie portante si calcola la distribuzione della curvatura e la freccia massima del profilo necessaria, assieme al passo, a creare il voluto carico totale ad ogni raggio



Linee guida

Distribuzione circonferenziale del carico

- Valori elevati di f/C possono provocare cavitazione sulla faccia, da evitare per quanto possibile
- È necessario limitare f/C entro valori di $0.015 \div 0.020$ bilanciando opportunamente la lunghezza della corda ed il carico
- Particolarmente importante ai raggi alti ($0.75R \div 0.95R$) dove il basso indice di cavitazione ed i profili sottili facilitano l'innesco della cavitazione



Produzione, tolleranze e controlli di qualità

- Alla fine del processo di progettazione il disegno definitivo dell'elica viene passato al produttore ed utilizzato per elaborare i documenti necessari alla costruzione, le cui fasi principali sono la fusione, la lavorazione meccanica delle pale e del mozzo, il controllo di qualità
- Il controllo di qualità è costituito da verifiche dimensionali da effettuare su passo, diametro, spessori, profili delle pale, sui bordi d'ingresso e di uscita e sulla finitura superficiale
- Il criterio di valutazione è la norma ISO 484/1 che definisce le misure da effettuare e le tolleranze ammesse per le varie classi di lavorazione contemplate dalla norma:
 - Casse S: precisione molto elevata
 - Classe 1: precisione elevata
 - Classe 2: precisione media
 - Classe 3: tolleranze ampie
- La norma ISO 484/1 definisce le tolleranze ammissibili per il bilanciamento dell'elica al fine di evitare pericolose forze eccentriche



Materiali

- L'ambiente marino è altamente aggressivo: provoca la corrosione dei materiali metallici a seguito di un fenomeno di natura elettrochimica che determina un'interazione chimico-fisica del materiale ed un degrado delle sue proprietà fisiche e meccaniche
- È necessario utilizzare materiali che resistano alla corrosione, quali il bronzo e l'acciaio inossidabile
- Il materiale quasi universalmente utilizzato è il bronzo al nickel-alluminio il quale, oltre a non essere attaccato dalla corrosione, ha ottime caratteristiche di resistenza meccanica
- In alternativa è utilizzabile l'acciaio inossidabile. L'impiego è limitato a navi con classe ghiacci poiché la resistenza meccanica e quella agli urti, essenziale in questo caso, è superiore al bronzo
- Ha una minore resistenza a fatica in ambiente corrosivo (corrosion fatigue) per cui sono necessari spessori maggiori rispetto al bronzo

