



Cavitazione

Indice di cavitazione

- Coefficienti di pressione sul dorso e sulla faccia del profilo

$$C_{p_d} = (p_d - p_0) / \rho/2 * V_0^2$$

$$C_{p_f} = (p_f - p_0) / \rho/2 * V_0^2$$

(Normalmente $C_{p_f} > 0$ e $C_{p_d} < 0$)

- Indice di cavitazione
 - Se $C_p < 0$ la pressione locale è minore di quella statica
 - Se raggiunge la tensione di vapore P_v si formano delle cavità di vapore o bolle di cavitazione. Il corrispondente valore (assoluto) del coefficiente di pressione è detto indice di cavitazione σ :

$$\sigma = (p_0 - p_v) / (\rho/2 * V_0^2)$$



Indice di cavitazione

Si può esprimere σ in varie forme a seconda dell'utilizzo. Per l'uso pratico si usa la seconda formulazione in quanto la componente preponderante di V_A è dovuta alla rotazione, proporzionale al diametro D ed alla velocità angolare ω

Definizione	Simbolo	Formulazione
Numero di cavitazione medio basato sulla corrente libera	σ_o	$\frac{p_o - p_v}{\frac{1}{2}\rho V_A^2}$
Numero di cavitazione locale basato sulla velocità di rotazione	σ_r	$\frac{p_o - p_v}{\frac{1}{2}\rho(xR\omega)^2}$
Numero di cavitazione basato sulla velocità media d'afflusso	σ_p	$\frac{p_o - p_v}{\frac{1}{2}\rho(V_A + u_a)^2}$
Numero di cavitazione locale basato sul vettore velocità	σ	$\frac{p_o - p_v}{\frac{1}{2}\rho[V_A^2 + (xR\omega)^2]}$
Numero di cavitazione progettuale basato sul coefficiente d'avanzo	σ_a	$\frac{\sigma}{(1-w)^2} \cdot \left[\frac{J^2}{J^2 + 4.84} \right]$
Numero di cavitazione locale basato sulla velocità d'interazione	σ_l	$\frac{p_o - p_v + \rho g(h - xR \cos \theta)}{\frac{1}{2}\rho \{ [V_A(x,\theta) + u_a(x,\theta)]^2 + [xR\omega - V_t(x,\theta) - u_t(x,\theta)]^2 \}}$



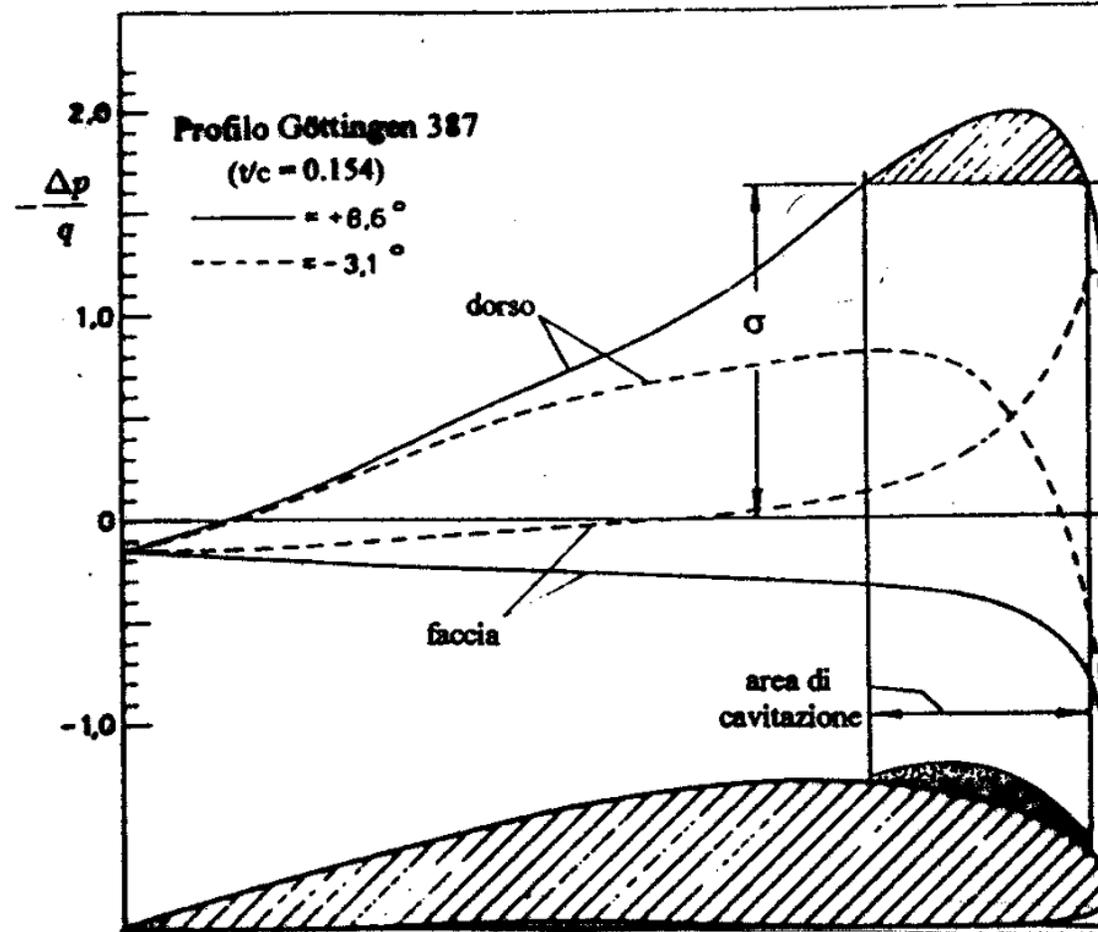
Il fenomeno fisico

- L'angolo d'attacco varia al variare della posizione angolare della pala creando valori molto bassi di C_{p_d} al bordo d'ingresso del profilo. Se $\sigma \leq |C_{p_d}|$ si formano delle cavità di vapore il cui volume aumenta per poi diminuire ed annullarsi quando la scia incontrata dalla pala fa aumentare la pressione
- E' un fenomeno non stazionario la cui pulsazione è legata alla distribuzione della scia. L'implosione (collasso) della cavità avviene violentemente e può provocare erosioni per azione meccanica sulla superficie della pala
- L'innesco della cavitazione è un fenomeno molto complesso. Dipende da:
 - Tensione di vapore,
 - Numero di Reynolds
 - Proprietà chimico-fisiche dell'acqua
 - Presenza di gas disciolti e impurità
 - Rugosità della pala
 - Dettagli geometrici del bordo d'ingresso del profilo
- Questi elementi possono innescare il fenomeno prima di raggiungere l'indice di cavitazione



Il fenomeno fisico

- Difficoltà nel simulare il fenomeno sia teoricamente che sperimentalmente
- La distribuzione di carico viene alterata dalla presenza di cavitazione

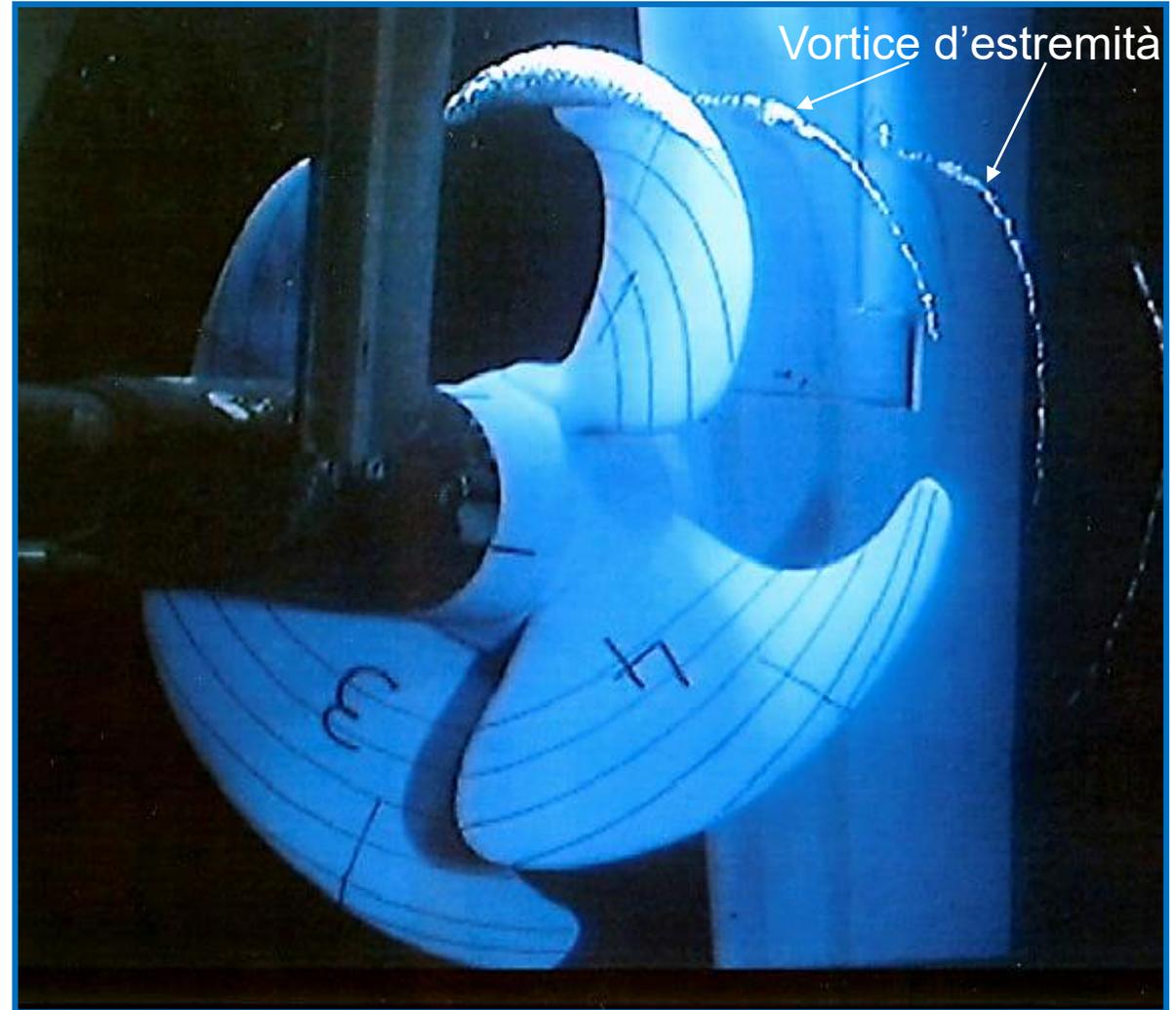
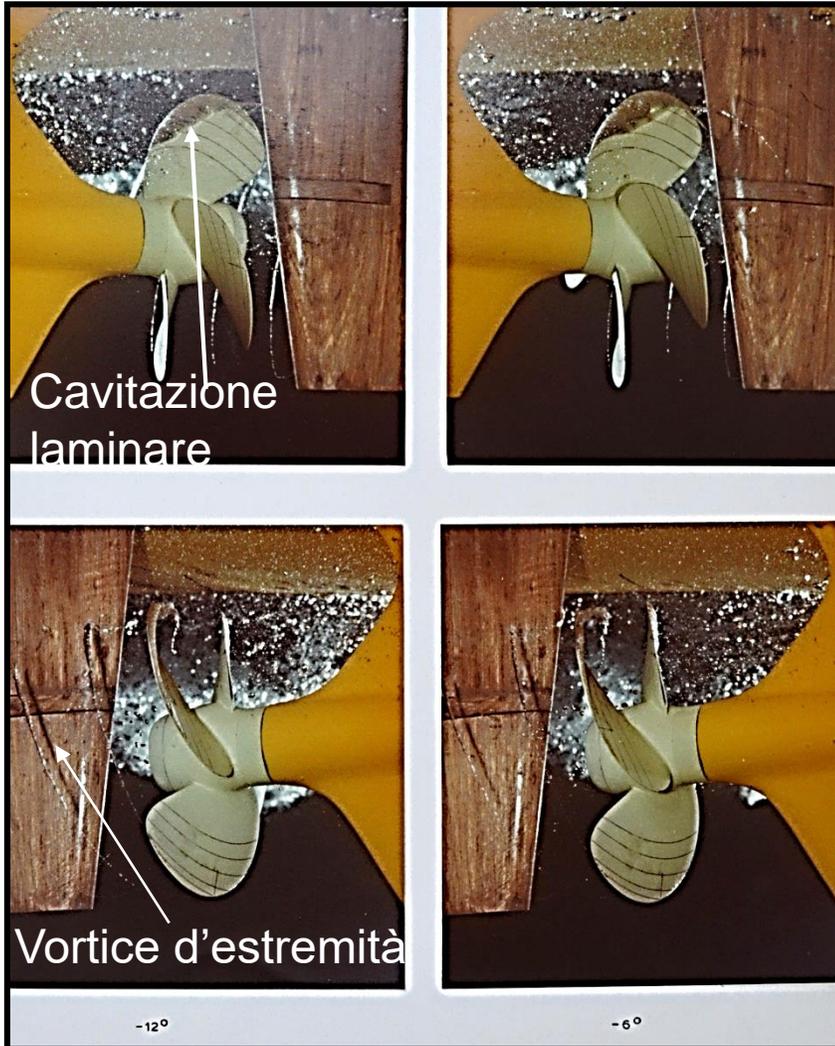


Tipi di cavitazione

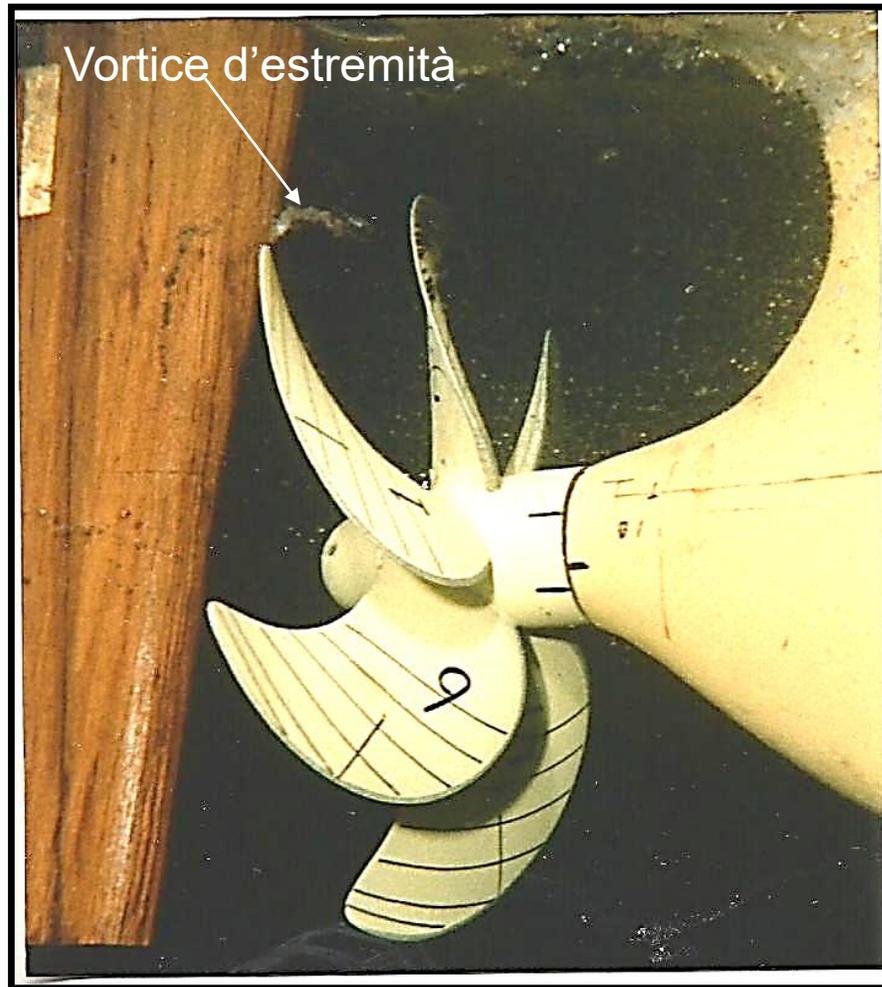
- Cavitazione laminare: la cavità si forma al bordo d'ingresso, può essere stabilmente attaccata alla pala, solitamente ha un volume relativamente piccolo e non presenta grossi problemi dal punto di vista erosivo
- Cavitazione a bolle: la cavità si presenta come una bolla o una serie di bolle di grande volume soprattutto in presenza di forti gradienti di pressione e di profili spessi, come ad esempio in prossimità della radice di pala. E' molto più erosiva della cavitazione laminare
- Cavitazione sulla faccia: può comparire sulla faccia della pala in presenza di scie molto tormentate nelle posizioni angolari in cui la velocità del flusso è più elevata, e gli angoli d'attacco sono molto piccoli o addirittura negativi, oppure nelle eliche a pale orientabili posizionate a bassi angoli di passo. È un tipo di cavitazione pericoloso dal punto di vista erosivo e sorgente di rumore
- Vortice d'estremità: sulla superficie della pala è presente un sistema vorticoso che si stacca dal bordo d'uscita. Quello che si stacca dalla punta della pala è particolarmente robusto e diviene visibile se la pressione interna scende sotto la tensione di vapore. E' una forma di cavitazione molto pericolosa in quanto può indurre forti erosioni sul timone ed è una delle più intense sorgenti di rumore



Tipi di cavitazione



Tipi di cavitazione



Stimolatori di turbolenza sul bordo d'ingresso

Prof. Paolo Frandoli



Erosione della pala



La pericolosità della cavitazione

- Nella trasformazione di energia operata dall'elica la cavitazione rappresenta un costo rilevante, dopo quello del combustibile:
 - potenziale erosione delle pale
 - vibrazioni dello scafo e rumore irradiato a bordo
- Per minimizzare il costo globale della trasformazione di energia il progettista segue 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 e della cavitazione; si deve ricorrere ad un processo iterativo per ottenere una soluzione di compromesso
- IL successo di una nave dipende dall'ottemperanza degli impegni contrattuali riguardanti il confort a bordo; il mancato raggiungimento di questo obiettivo comporta interventi pesanti sia a livello tecnico che economico che non sempre risultano pienamente risolutivi



Visualizzazione della cavitazione

Modelli matematici

- In fase di progetto è necessario conoscere il tipo e l'estensione della cavitazione per poterne valutare la pericolosità ed avere indicazioni sulle scelte progettuali per minimizzarne gli effetti
- Necessità di strumenti numerici prima di utilizzare costose prove sperimentali
- Data la complessità del fenomeno i modelli teorici assumono alcune ipotesi semplificative
- Esistono dedicati software che costituiscono uno strumento indispensabile nelle prime fasi del progetto
- Il progetto deve essere necessariamente verificato sperimentalmente con prove su modello



Visualizzazione della cavitazione

Prove su modello

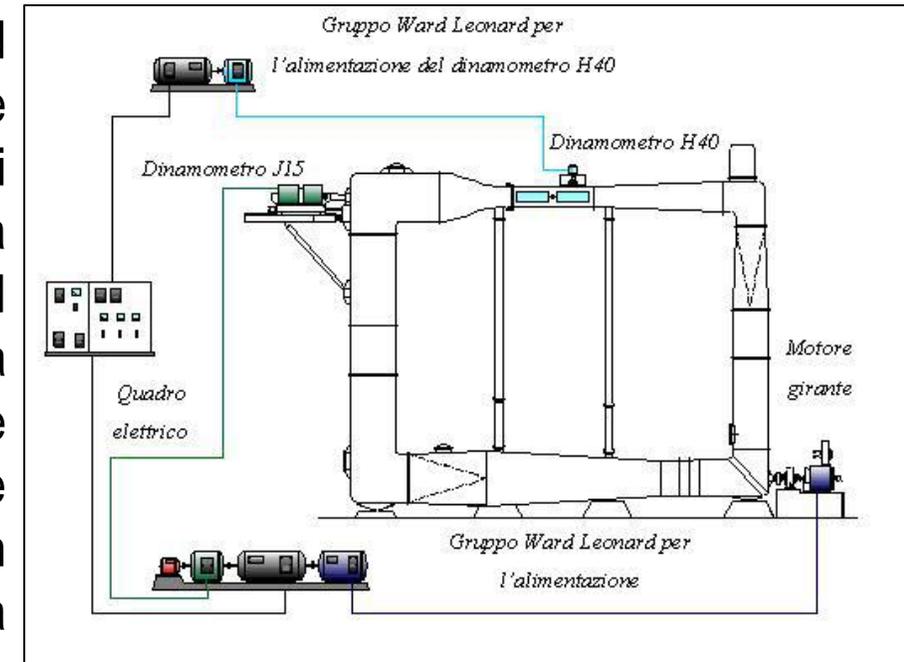
- La sperimentazione su modelli si effettua con l'identità di spinta (Stesso K_T)
- Similitudine: eguaglianza dell'indice di cavitazione ($\sigma = (p_0 - p_v) / \rho / 2 * (n * D)^2$), e del coefficiente d'avanzo ($J = V_A / n * D$)
- L'uguaglianza dell'indice di cavitazione si realizza quando la pressione statica p_0 sul modello è minore di quella atmosferica
- Necessità di particolari impianti sperimentali
- L'uguaglianza del numero di Reynolds ($Rn = V * L / \eta$) tra modello e nave non è realizzabile
- Non è possibile riprodurre correttamente i fenomeni viscosi. La cavitazione visualizzata sul modello è affetta da effetto scala, in particolare per il vortice d'estremità
- E' importante che Rn sia il più elevato possibile per minimizzarne l'effetto scala. Si utilizzano alcuni accorgimenti:
 - la velocità del flusso ed il numero di giri devono essere più elevati possibile ($n = 25 \div 30$ n/s)
 - il diametro del modello deve essere di almeno 25 cm
 - applicazione di una rugosità sul bordo d'ingresso delle pale per stimolare un flusso turbolento
 - creazione artificiale di nuclei di cavitazione



Prove su modello

Per realizzare una pressione inferiore a quella atmosferica, condizione necessaria a simulare i fenomeni cavitativi, è necessario disporre di particolari impianti, suddivisi in tre categorie:

- Tunnel di cavitazione: costituito da una condotta chiusa in cui l'acqua viene fatta circolare da una pompa con velocità attorno ai 10 m/s ed all'interno della quale la pressione può essere diminuita. La parte superiore della galleria è costituita dalla camera di prova, munita di finestre per l'osservazione dell'elica illuminata da una lampada stroboscopica che permette di "fermare" la rotazione del modello ed osservare lo sviluppo della cavitazione sulle pale. La sezione della camera di prova ha solitamente 1.2 ÷ 1.8 m di lato e nella maggior parte dei casi non consente di simulare la superficie libera. Il modello è solitamente isolato. Nel caso di navi monoelica si può usare un simulacro (dummy model) che riproduce le forme poppiere della carena allo scopo di simulare, per quanto possibile, la scia



Prove su modello

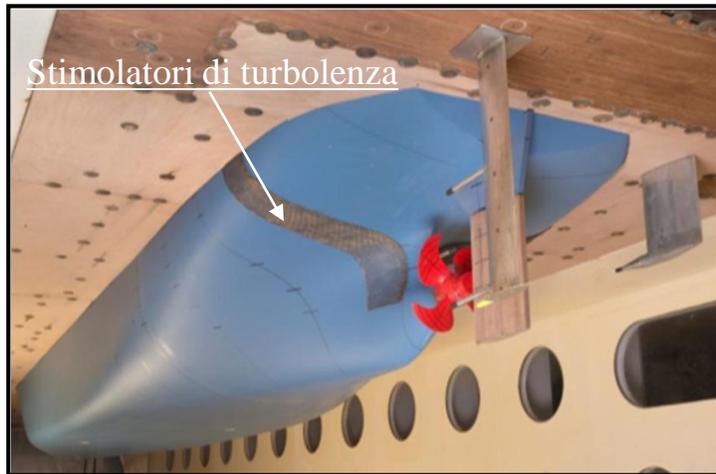
- Canale di circolazione: è un'evoluzione del tunnel di cavitazione. La camera di prova è di maggiori dimensioni (sezione trasversale fino a 6 m² e lunghezza fino a 11 m) e la velocità dell'acqua è superiore. Ciò permette di provare un modello completo della nave per realizzare un realistico campo di scia ed ottenere numeri di Reynolds più elevati. La superficie libera non è considerata, ma in alcuni casi la formazione ondosa viene riprodotta da un lamierino sagomato e sistemato attorno al modello della carena. Si riproduce solamente σ e J , ma non il numero di Froude
- Vasca depressurizzata: sono vasche rettilinee convenzionali per le tradizionali prove di rimorchio ed autopropulsione, ma racchiuse in un involucro stagno dal quale si può estrarre l'aria per ridurre la pressione interna. Consente di riprodurre non solo il coefficiente d'avanzo e l'indice di cavitazione, ma anche il numero di Froude, simulando così la formazione ondosa ed un flusso più realistico all'elica anche perché non influenzato dalle pareti della vasca, come invece avviene nelle gallerie di cavitazione



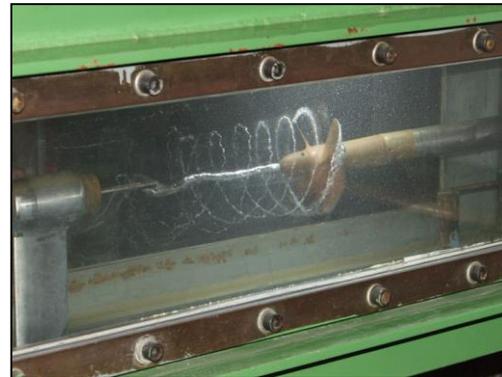
Impianti sperimentali



Canale di circolazione



Canale di circolazione, modello intero



Tunnel di cavitazione



Vasca depressurizzata



Prove su modello

- L' innesco della cavitazione non dipende solo dal raggiungimento della tensione di vapore, ma anche dalla presenza di impurità e gas disciolti (i nuclei di cavitazione) e dai **dettagli geometrici del bordo d'ingresso delle pale**. Ne consegue che la costruzione del modello dell'elica deve essere particolarmente accurato anche nei minimi dettagli: un modello costruito male può compromettere il risultato
- La simulazione del corretto **contenuto dei nuclei di cavitazione** è essenziale. In una galleria di cavitazione i meccanismi di formazione dei nuclei sono differenti che al vero in quanto sono governati dalle specifiche condizioni sperimentali. Le caratteristiche dei laboratori sperimentali si differenziano notevolmente quanto al contenuto di nuclei, anche per effetto della geometria dell'impianto. Ogni laboratorio deve verificare che la concentrazione dei nuclei durante la prova sia quella corretta per riprodurre l'innesco della cavitazione al vero. Il problema è estremamente complesso e solitamente il laboratorio si basa su leggi di similitudine elaborate da vari studiosi. Studi sperimentali hanno dimostrato che, con gli usuali rapporti di scala, la distribuzione dei nuclei necessaria per l'innesco della cavitazione su modello è molto diversa dalla corrispondente distribuzione al vero
- Gli effetti scala sulla scia e sulla cavitazione possono creare dei dubbi sul fatto che i risultati siano rappresentativi della realtà. Solamente **l'esperienza derivata da prove al vero** può dare al progettista la corretta chiave di lettura dei risultati sia teorici che sperimentali. In questo contesto le prove mare rappresentano l'indispensabile fase conclusiva del progetto rivolta a raccogliere tutte le informazioni necessarie per una continua messa a punto della metodologia di progettazione



Il controllo della cavitazione

- Il controllo della cavitazione è indispensabile per raggiungere gli obiettivi di progetto. Ciò significa fissare adeguatamente i parametri che influiscono su estensione e tipo di cavitazione
 - RPM
 - Verso di rotazione (navi bielica)
 - Numero delle pale
 - Diametro
 - Forma della pala (distribuzione delle corde e dello skew)
 - Area espansa
 - Tipo di profilo
 - Spessore e curvatura del profilo
 - Distribuzione di passo



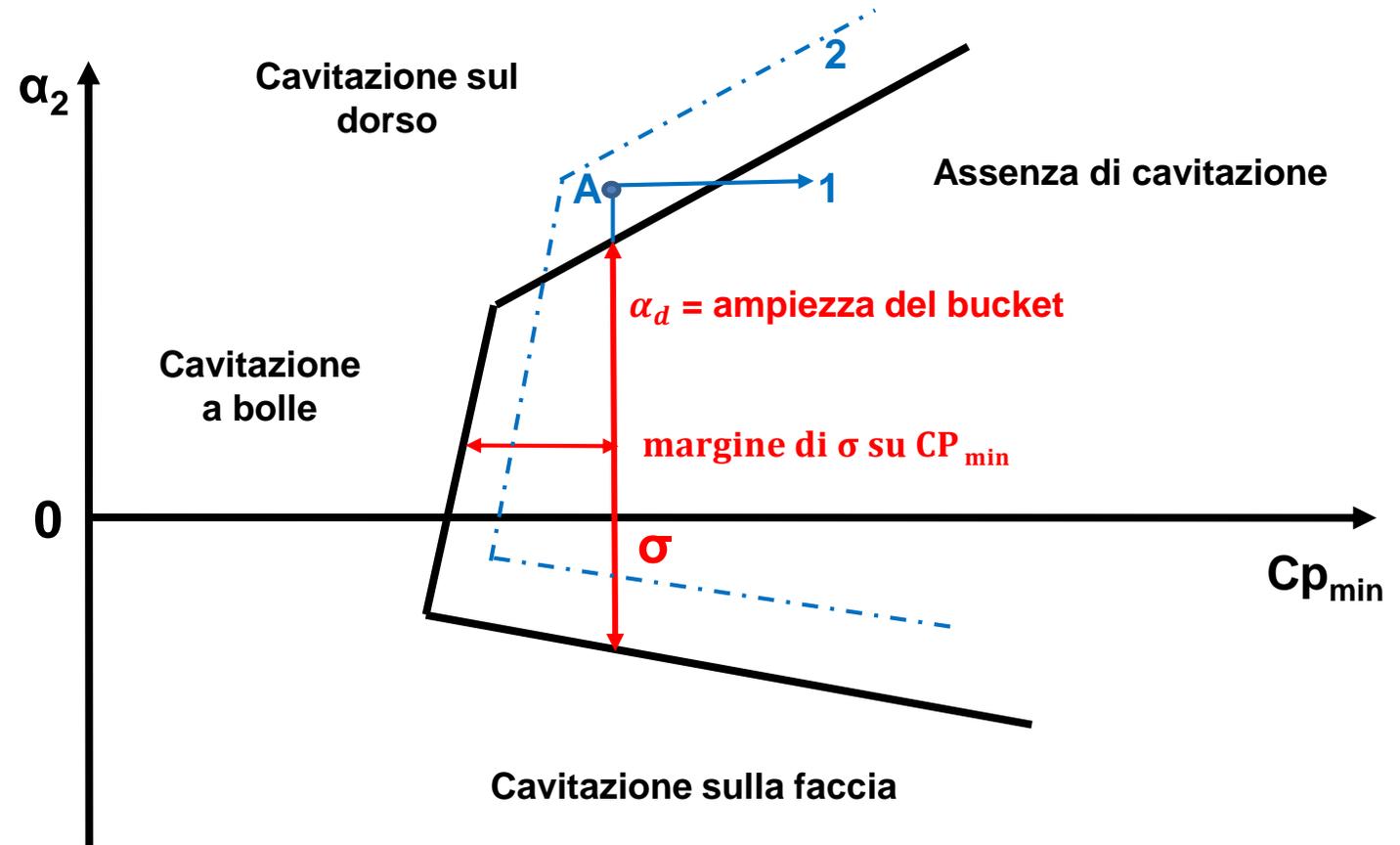
Diagrammi di Innesco della Cavitazione

- Le caratteristiche di cavitazione di un profilo bidimensionale sono determinate dalla pressione minima sulla faccia e sul dorso del profilo in funzione dell'angolo d'incidenza bidimensionale
- Tali caratteristiche sono riportate in un diagramma definito come involuppo della pressione minima, diagramma d'innescò della cavitazione, oppure bucket di cavitazione
- Strumento utile in fase di progetto per individuare i valori della distribuzione delle corde (C), degli spessori (t/C) e della curvatura (f/C) che abbiano il margine più ampio possibile rispetto al rischio di cavitazione. Esistono dedicati software (Brockett)
- Il diagramma dipende da t/C , da f/C e quindi dalla portanza del profilo. C_L è funzione di f/C
- Strumento utile da utilizzare nella prime fasi del progetto dell'elica come guida per individuare la strada da seguire
- Non fornisce indicazioni sull'estensione della cavitazione, ma solamente sul rischio che avvenga e sulle eventuali possibilità di ridurlo
- Vanno comunque usati dedicati software basati sulla teoria della superficie portante per analizzare i dettagli del comportamento cavitativo



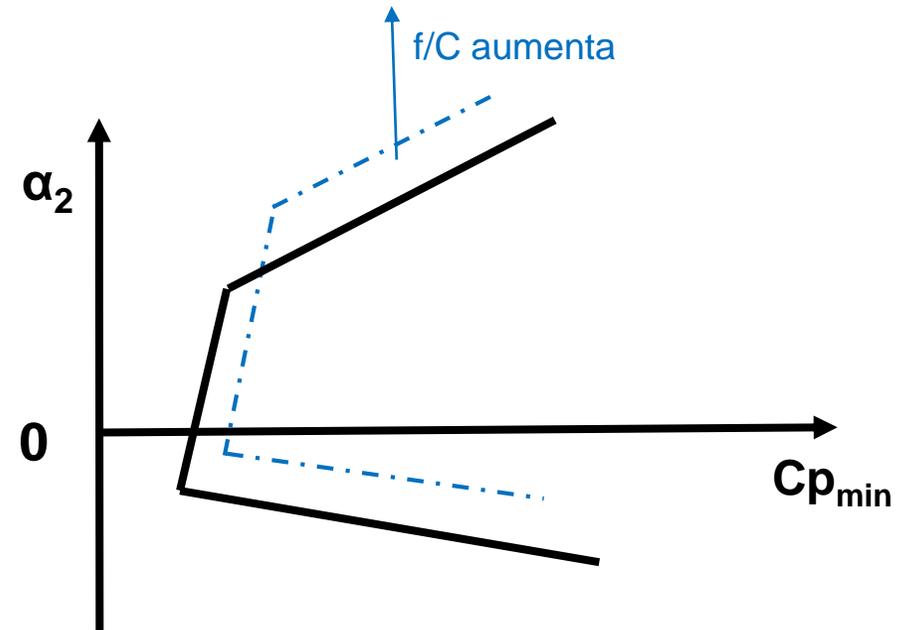
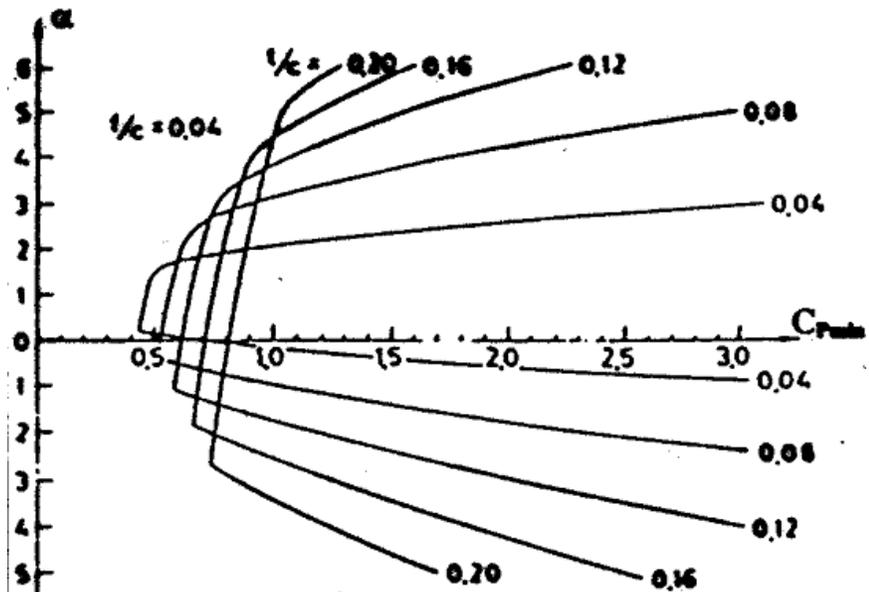
Diagrammi di Innesco della Cavitazione

- Se il punto di funzionamento rientra nel campo α_d non c'è rischio di cavitazione
- Se il punto di funzionamento è in A c'è rischio di cavitazione. Azioni possibili:
 1. Aumentare σ agendo sul diametro e/o sul numero di giri
 2. Modificare il bucket agendo su t/C , f/C , C



Diagrammi di Innesco della Cavitazione

Variazione del bucket con t/C e f/C



Diagrammi di Innesco della Cavitazione

Utilizzo del bucket nella prima fase del progetto dell'elica

- Fare una prima scelta della distribuzione di carico, delle corde e degli spessori
- Calcolo a linea portante (o superficie portante). Determinare per ogni sezione
 - C_L
 - f/C
 - β
 - β_i
- Calcolo del bucket per ogni sezione (funzione di t/C e f/C)



Diagrammi di Innesco della Cavitazione

Utilizzo del bucket nella prima fase del progetto dell'elica

- Calcolo della variazione di angolo d'attacco lungo il giro per ogni sezione secondo la seguente procedura semplificata:

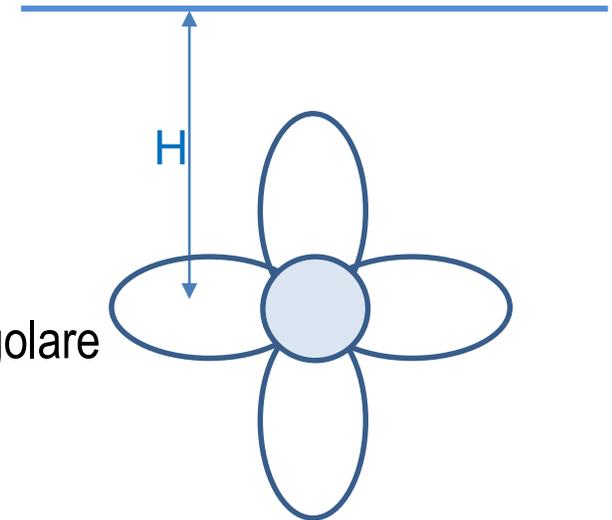
- $\beta_L = \arctan\left(\frac{V(1-wx)}{2\pi nr - V(1-wt)}\right)$ per ogni raggio e per ogni posizione angolare

- $\Delta\beta = \beta_L - \beta$

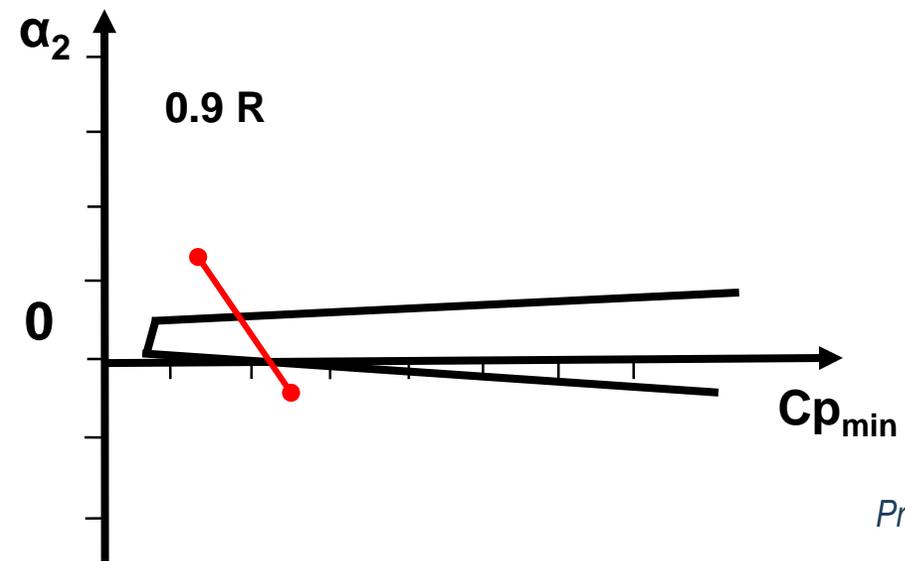
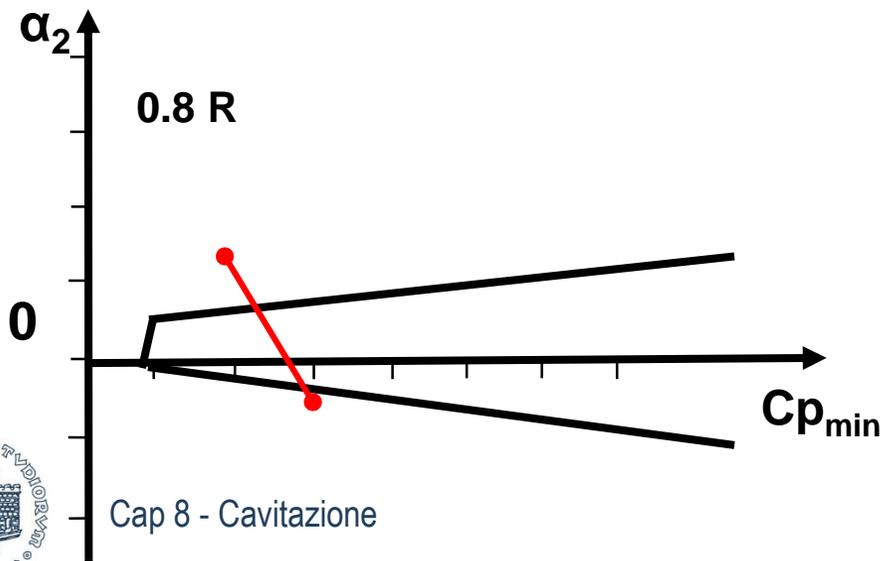
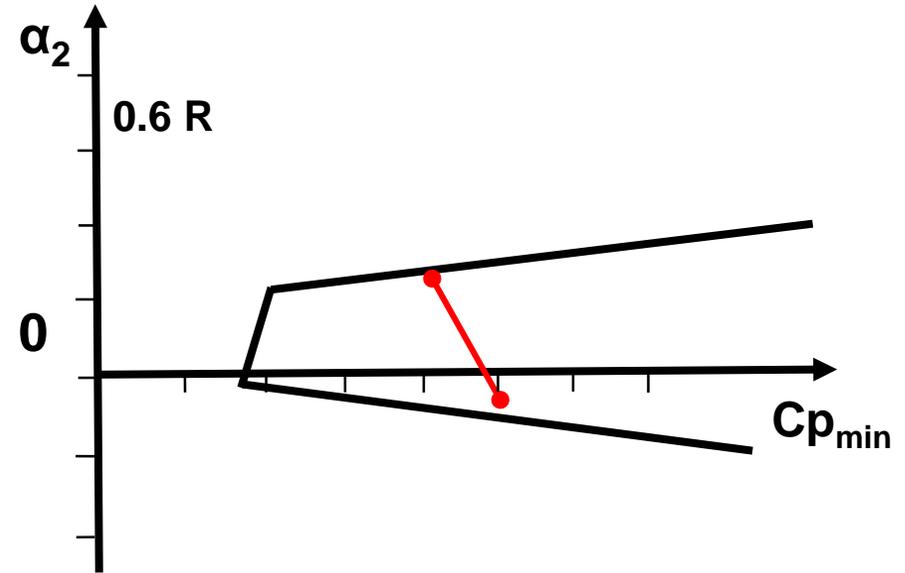
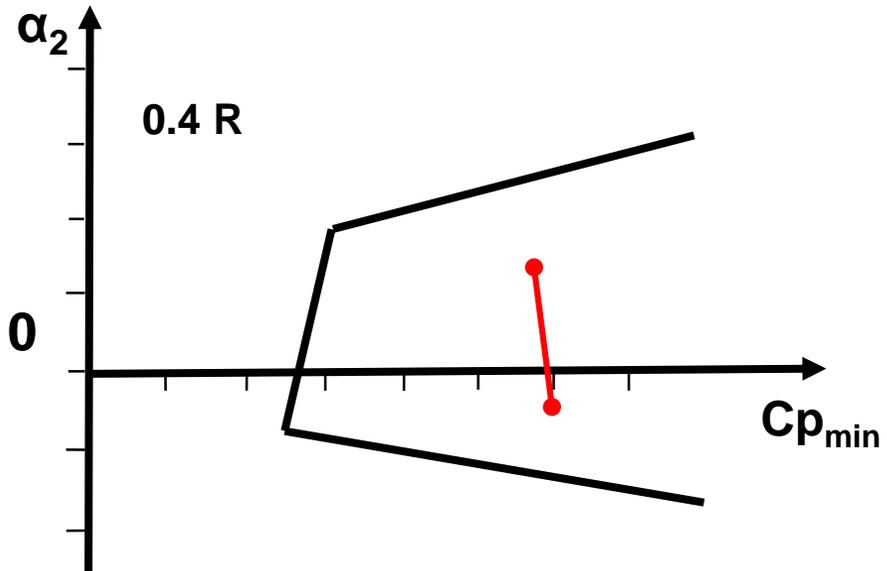
- $\Delta\alpha = \frac{\Delta\beta}{k_c + \frac{2\pi \tan(\beta_i - \beta)}{C_L}}$ dove $k_c = \frac{\left(\frac{f}{C}\right)_{3d}}{\left(\frac{f}{C}\right)_{2d}}$ *correzione della curvatura per effetto tridimensionale*

- Calcolare $\sigma = (p_0(H) - p_v) / \rho/2*(n*D)^2$ per ogni sezione e per ogni posizione angolare

- Individuare α_{\max} e α_{\min} per ogni sezione ed il corrispondente σ



Diagrammi di Innesco della Cavitazione



Criteri di cavitazione

Criteri semplici basati su prove sperimentali per valutare A_E/A_O di primo tentativo

Formula di Keller

$$A_e/A_0 = (1.3 + 0.3 \cdot Z) \cdot T / ((p_0 + \rho g h - p_v) \cdot D^2) + k$$

Z : numero delle pale

k=0.1 per navi bielica, k=0.2 per navi monoelica

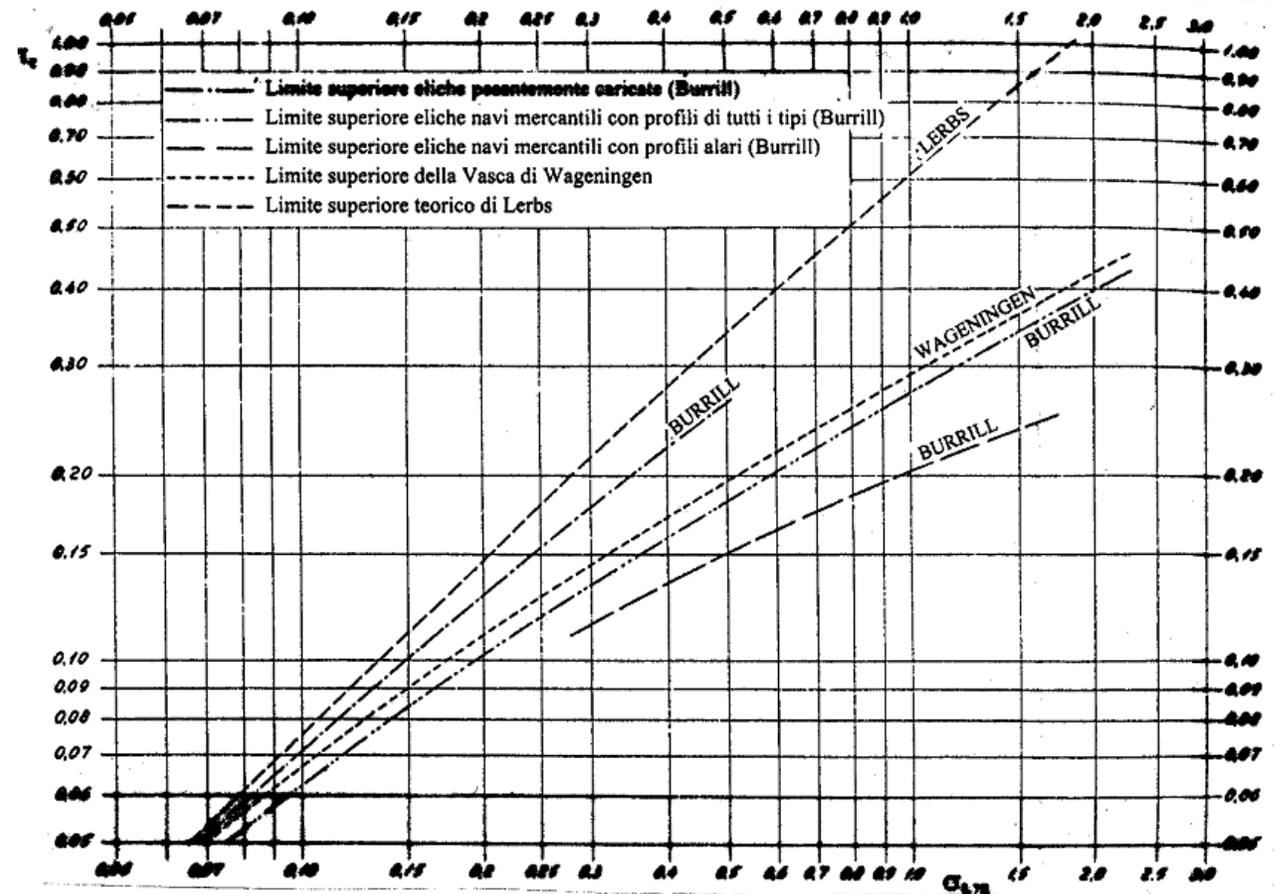
T: spinta al 100% MCR

p_0 : pressione atmosferica

p_v : tensione di vapore

h: battente statico sull'asse elica

Il termine $(p_0 - p_v)$ è solitamente assunto pari a 99.05 kpa



Criteri di cavitazione

Diagramma di Burril

- coefficiente di carico medio di spinta

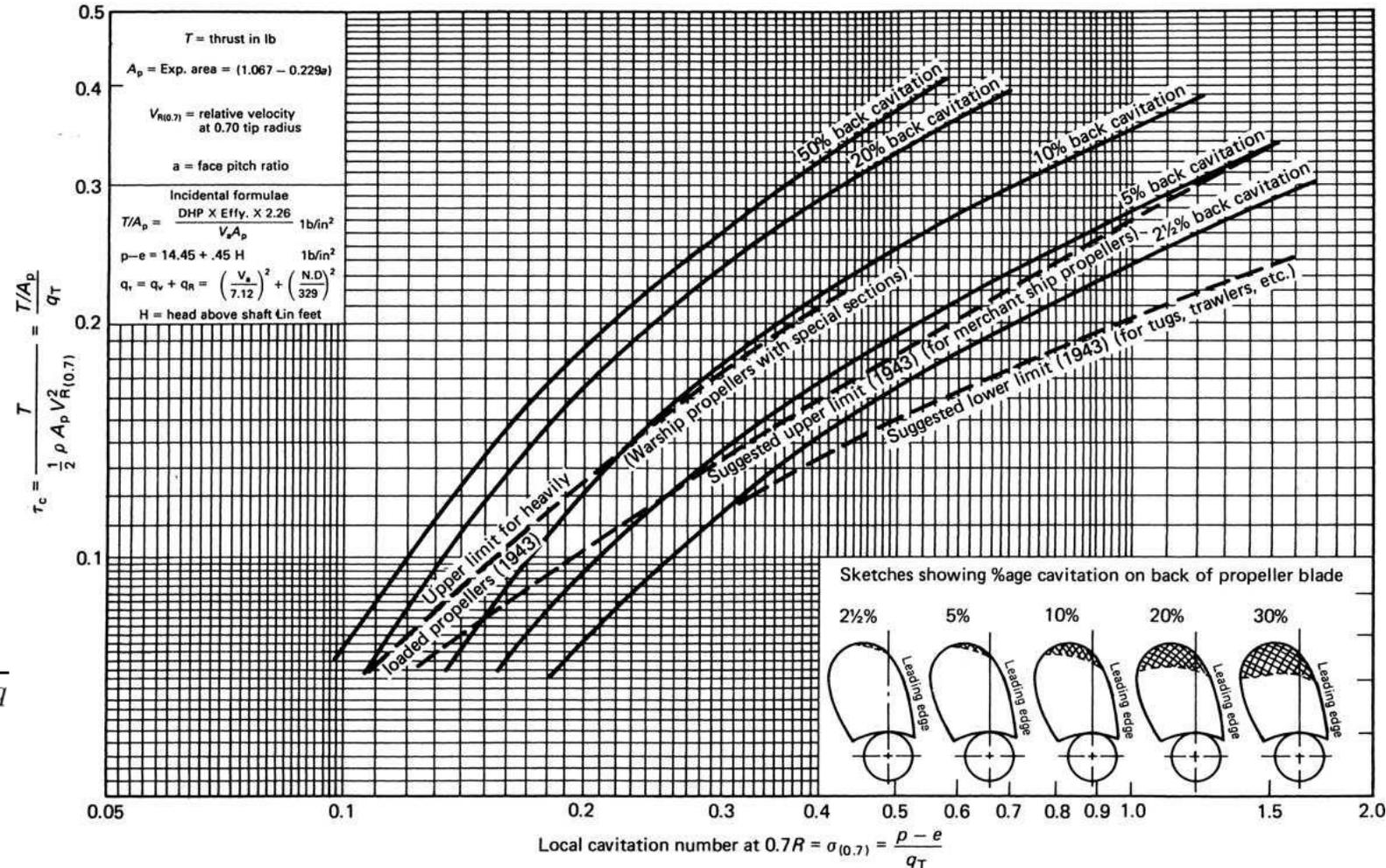
$$\tau_c = \frac{T/A_{Pmin}}{q_{0.7R}} = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A_{Pmin} V_{0.7R}^2}$$

- area proiettata minima

$$A_{Pmin} = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho\tau_c [V_A^2 + (0.7\pi nD)^2]}$$

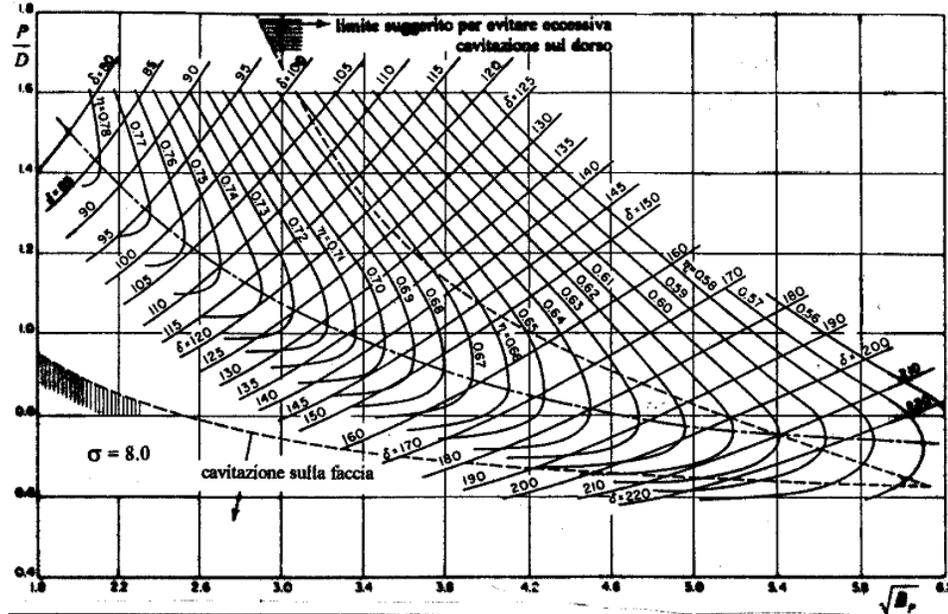
- area espansa minima

$$\left(\frac{A_E}{A_0}\right)_{min} = \frac{T}{A_0 (1.067 - 0.229 P/D)(0.3\sqrt{\sigma} - 0.03) \cdot q}$$

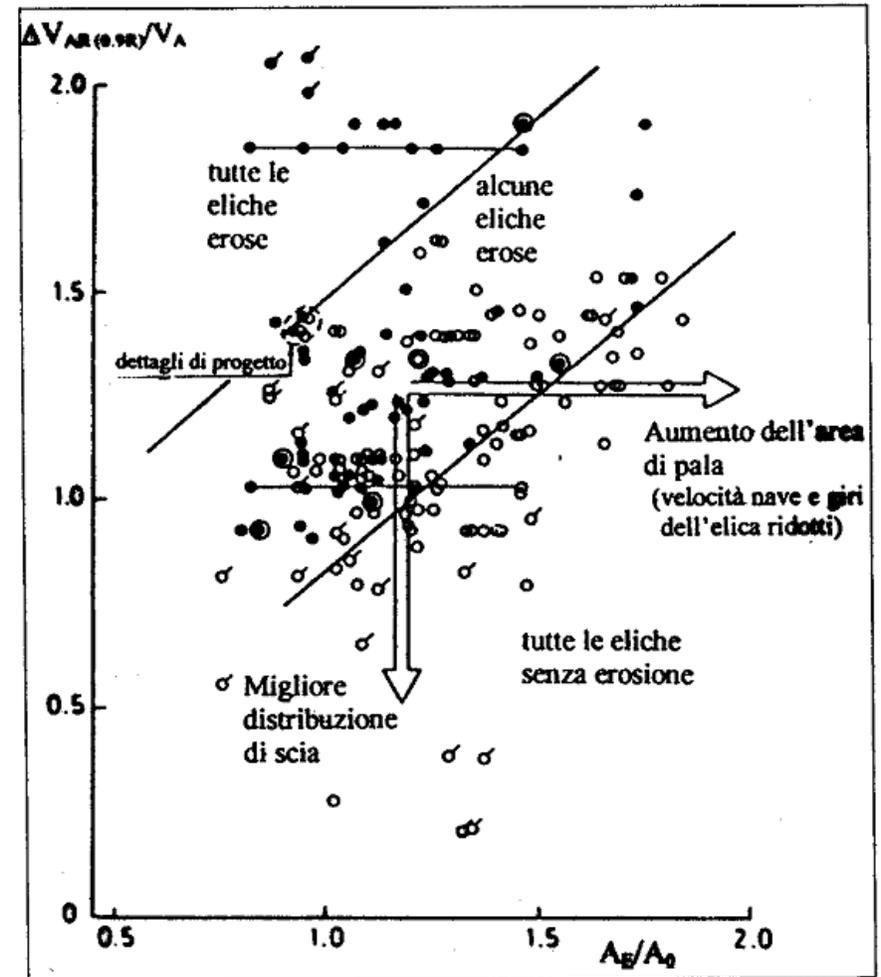


Criteri di Cavitazione

Diagramma B_p - δ in controllo di cavitazione – serie KCD



Criterio di erosione



Criterio per scafi semidislocanti e plananti – serie KCA

$$\tau_c = 0.494 \sigma_a^{0.88} \text{ con } 10\% \text{ cavitazione sul dorso}$$

$$K_T = 0.1937 \sigma_a^{0.88} \cdot \frac{A_D}{A_0} \cdot \left[1.067 - 0.229 \frac{P}{D} \right] \cdot (J^2 + 4.84)$$

$$\frac{A_D}{A_0} \geq \frac{K_T}{0.1937 \cdot [\sigma_a / (1 - w)^2]^{0.88}} \cdot \left[1.067 - 0.229 \frac{P}{D} \right] \cdot (J^2 + 4.84)^{0.12} \cdot J^{1.76}$$

