



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI DI TRIESTE

**Corso di  
Propulsione**

# **Interazione Elica-Carena**

Prof. Paolo Frandoli

AA 2022-2023

# Interazione Idrodinamica

## Componenti dell'interazione

- **Scia**: variazione del campo di velocità prodotto dalla carena
- **Deduzione di spinta**: - variazione del campo di velocità prodotto dall'elica;  
- la riduzione di pressione a poppa causa un *incremento della resistenza al moto* della nave  
- l'incremento normalizzato rispetto alla resistenza al rimorchio é detto *fattore di deduzione di spinta*
- **Rendimento relativo rotativo**

# Scia nominale

- La carena e le appendici generano, in corrispondenza al disco dell'elica, un campo di velocità non uniforme detto comunemente scia
- Causato da tre fenomeni:
  - Deformazione delle linee di corrente intorno alla carena (scia potenziale)
  - Crescita dello strato limite attorno alla carena da prora verso poppa dovuto alla viscosità del fluido (scia viscosa)
  - Influenza della formazione ondosa prodotta dalla carena
- La velocità  $V_w$  in ogni punto del disco elica si può scomporre in tre componenti vettoriali
- $V_w < V$

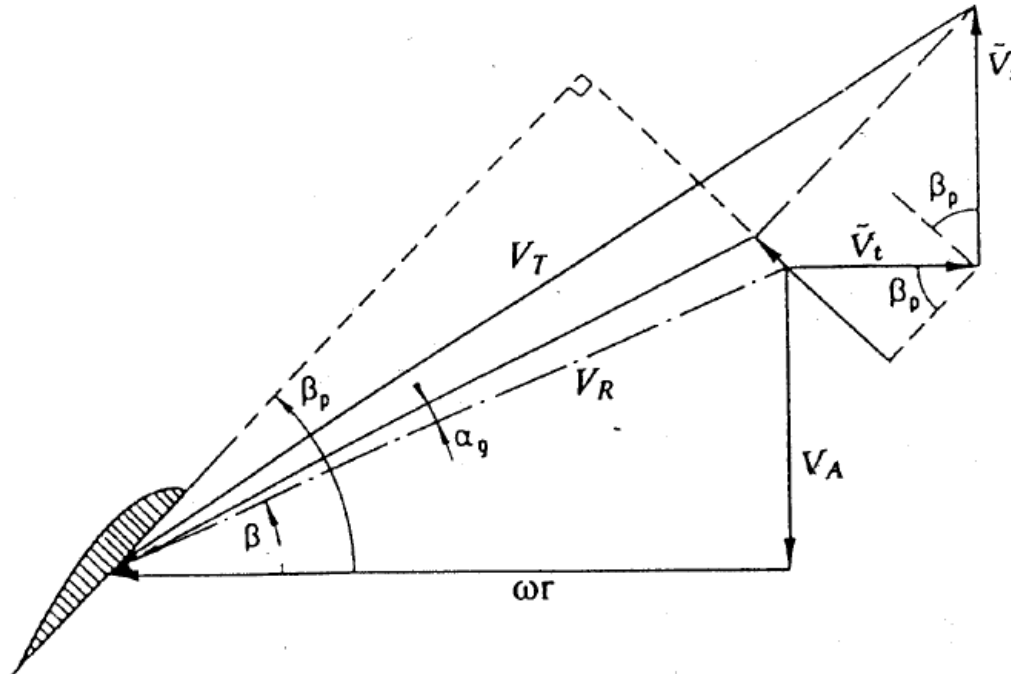
$$\vec{V}_w(r, \theta) = \vec{V}_x(r, \theta) + \vec{V}_t(r, \theta) + \vec{V}_r(r, \theta)$$

# Scia nominale

- **Scia assiale:** è la componente assiale della scia. Ha generalmente una distribuzione molto disomogenea nelle navi monoelica, mentre è più uniforme nelle bielica. Nel caso di monoelica è simmetrica rispetto ad un piano verticale passante per l'asse dell'elica (piano diametrale), mentre non lo è per una bielica.
- **Scia tangenziale:** rappresentata da un vettore che ne indica sia il modulo che la direzione. Come per la scia assiale è simmetrica per le navi monoelica mentre non lo è per le bielica.
- **Scia radiale:** la componente radiale è importante nello studio tridimensionale del flusso sulla superficie di pala. Ha effetti perturbativi sulla stabilità della cavitazione, ma non ha la rilevanza delle altre due componenti

# Scia nominale

- La variazione delle componenti assiale e tangenziale nella rotazione porta a fluttuazioni periodiche dell'angolo di attacco sul profilo della pala causando variazioni della distribuzione di carico e quindi la generazione di forze non stazionarie e fenomeni cavitativi
- Fenomeno più marcato nelle navi monoelica



# Modi di Rappresentazione della Scia

## Metodo delle frazioni di velocità

$$w_x = \frac{V_x}{V} \quad ; \quad w_t = \frac{V_t}{V} \quad ; \quad w_r = \frac{V_r}{V}$$

## Metodo delle frazioni di scia (Taylor)

E' la differenza tra la velocità della nave  $V$  e la velocità  $V_x$  del flusso che investe il disco-elica

$$w_x = \frac{V - V_x}{V} = 1 - \frac{V_x}{V} \quad ; \quad w_t = \frac{V - V_t}{V} = 1 - \frac{V_t}{V} \quad ; \quad w_r = \frac{V - V_r}{V} = 1 - \frac{V_r}{V}$$

$$V_x = (1-w_x)V \quad V_t = (1-w_t)V \quad V_r = (1-w_r)V$$

# Valori medi nominali della Scia

*Scia media circonferenziale, ad ogni raggio*

$$\bar{w}(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} w(r, \theta) d\theta = 1 - \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\bar{V}_x(r, \theta)}{V} d\theta$$

*Scia media volumetrica*

$$\bar{w} = \frac{\int_{r_h}^R \bar{w}(r) \cdot r dr}{\int_{r_h}^R r dr}$$

*Frazione media di scia volumetrica nominale*

$$(1 - w)_n = \frac{V_A}{V}$$

$V_A$ : Velocità d'avanzo

$V$ : Velocità nave

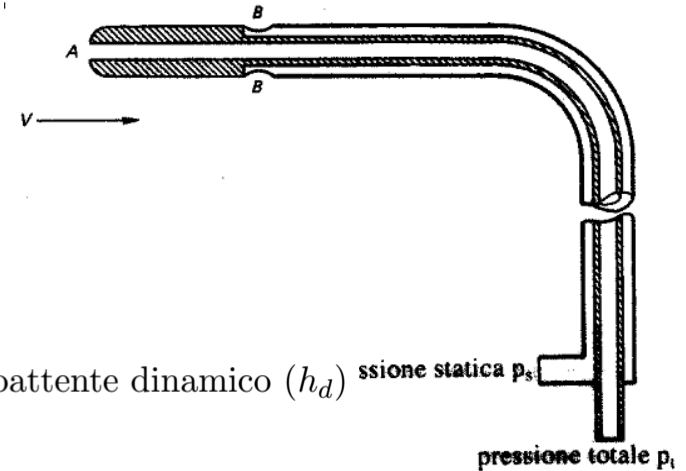
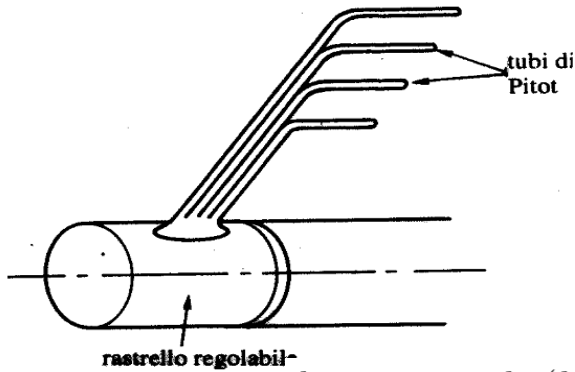
# Scia media effettiva

- Scia media volumetrica nominale  $(1-w)_n$ : definisce la velocità d'avanzo nominale dell'elica  $V_a = V^*(1-w)_n$  in flusso indisturbato
- Scia media effettiva  $(1-w)_{\text{eff}}$ : valore medio del campo di velocità modificato dal propulsore. Dipende dalle caratteristiche geometriche ed idrodinamiche dell'elica
- Il campo di velocità effettivo è determinabile con modelli matematici e prove sperimentali complessi e costosi. Generalmente non utilizzati nella pratica
- In pratica per il progetto dell'elica si utilizza:
  - Distribuzione di scia nominale, eventualmente corretta per effetto scala per monoelica
  - Scia media effettiva  $(1-w)_{\text{eff}}$  derivabile da prove di autopropulsione, analisi statistiche e da navi simili
  - Distribuzione radiale della scia media circonferenziale nominale corretta ad ogni posizione radiale nel rapporto  $(1-w)_{\text{eff}} / (1-w)_n$
- Rapporto  $(1-w)_{\text{eff}} / (1-w)_n$ :  $1,03 \div 1,05$
- Valori maggiori indicano un flusso instabile, distacco di vena, forte vorticosità, cioè una situazione critica nella zona di poppa che si verifica soprattutto su navi monoelica con forme di carena piene



# Determinazione del Campo di Scia

## Metodo sperimentale, Tubi di Pitot



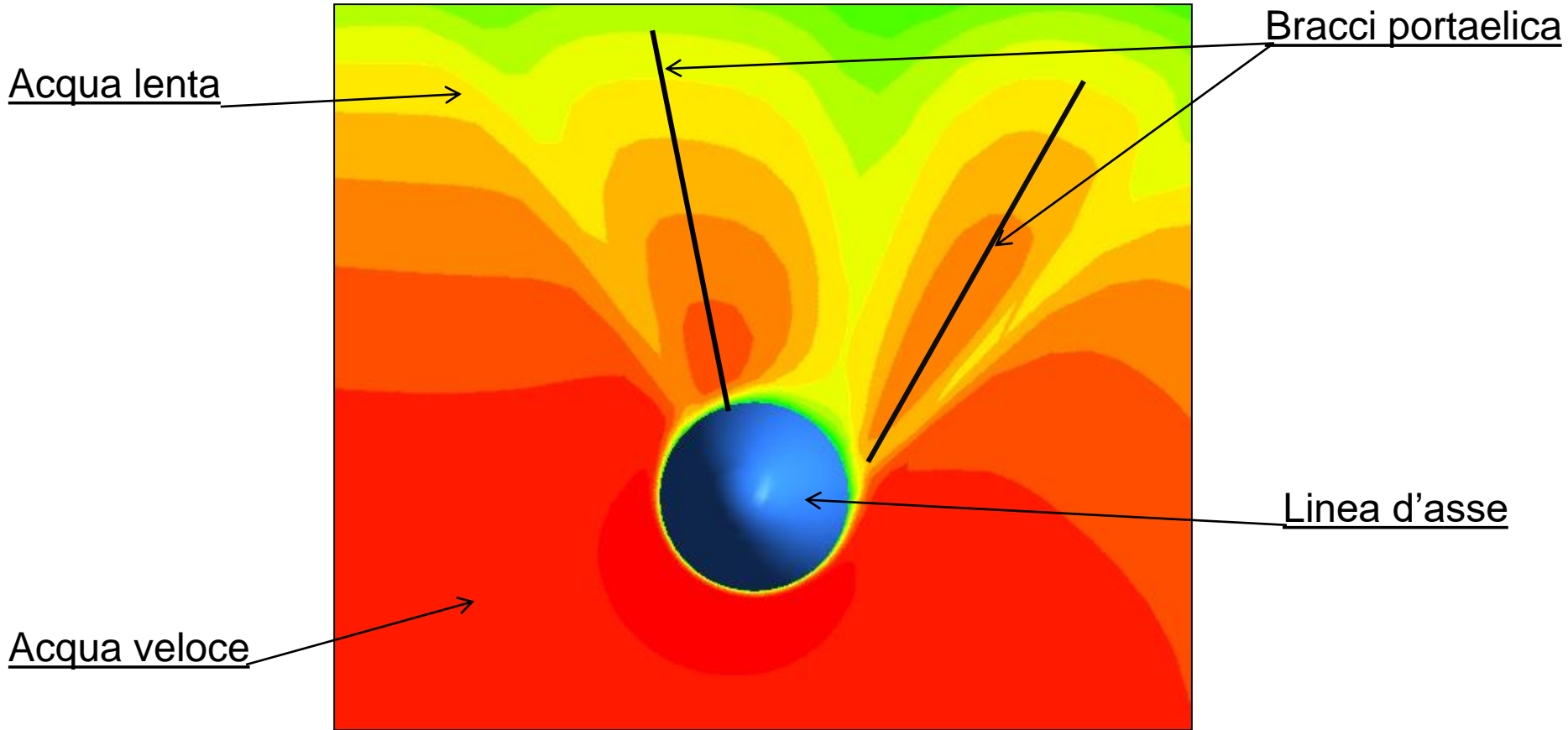
battente totale ( $h_t$ ) = battente statico ( $h_s$ ) + battente dinamico ( $h_d$ )

$$p_d = p_t - p_s$$

$$v = \frac{\sqrt{2(p_t - p_s)}}{\sqrt{\rho}}$$

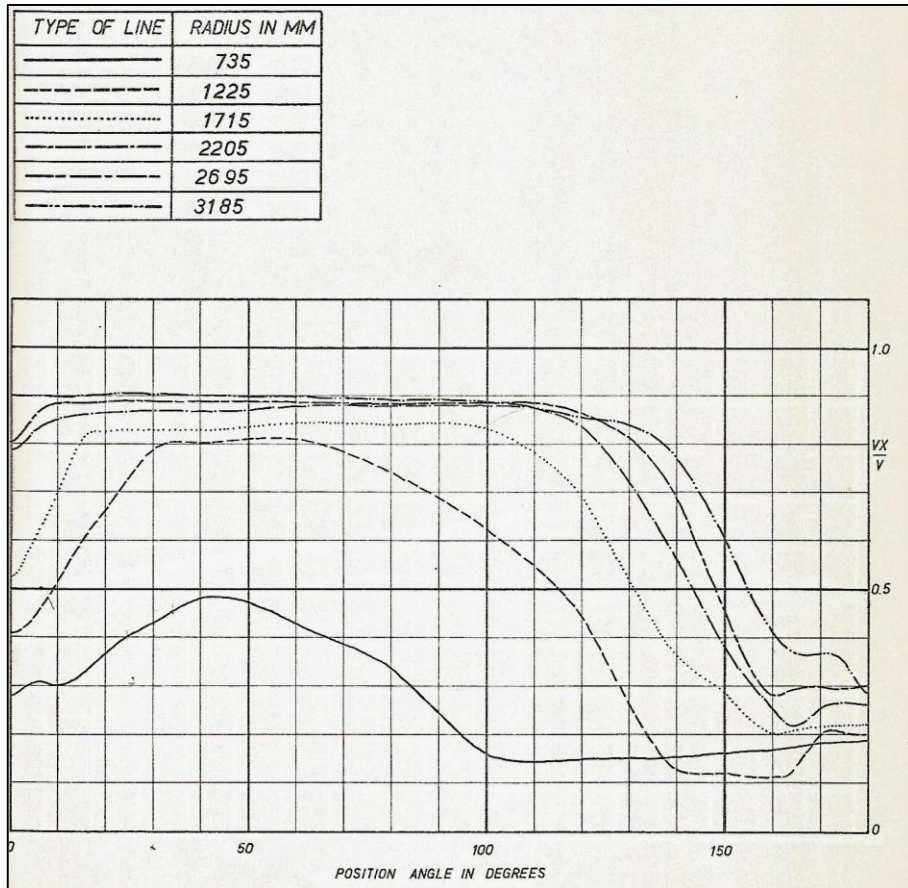
# Determinazione del Campo di Scia

CFD

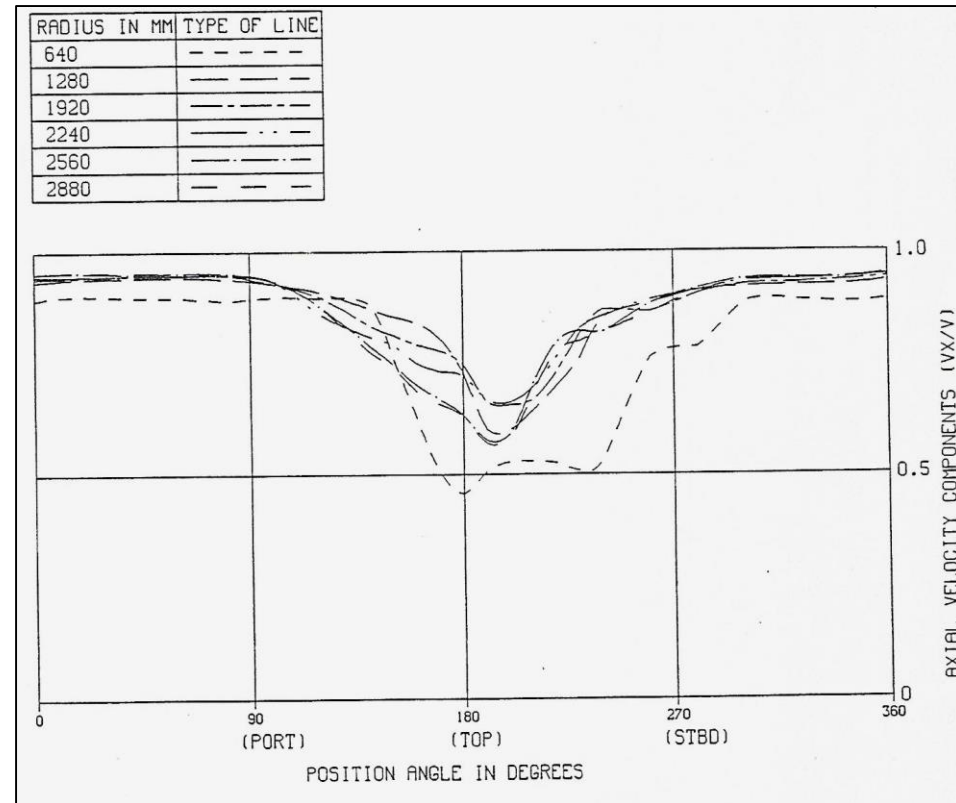


# Rappresentazione Grafica della Scia

## Distribuzione circonferenziale della scia

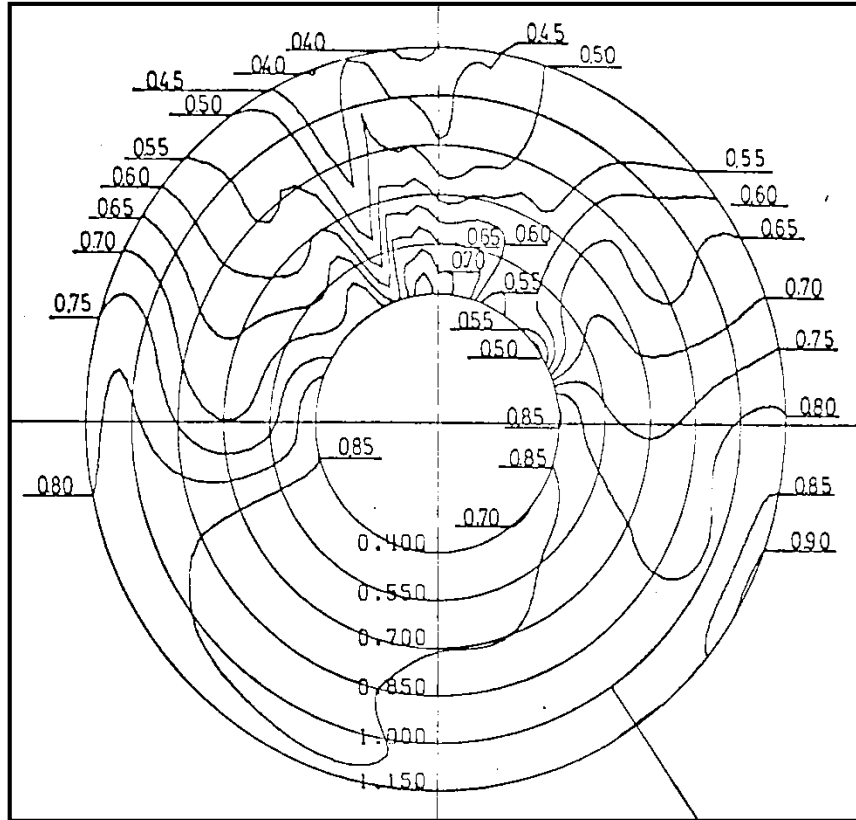


Scia assiale (monoelica)

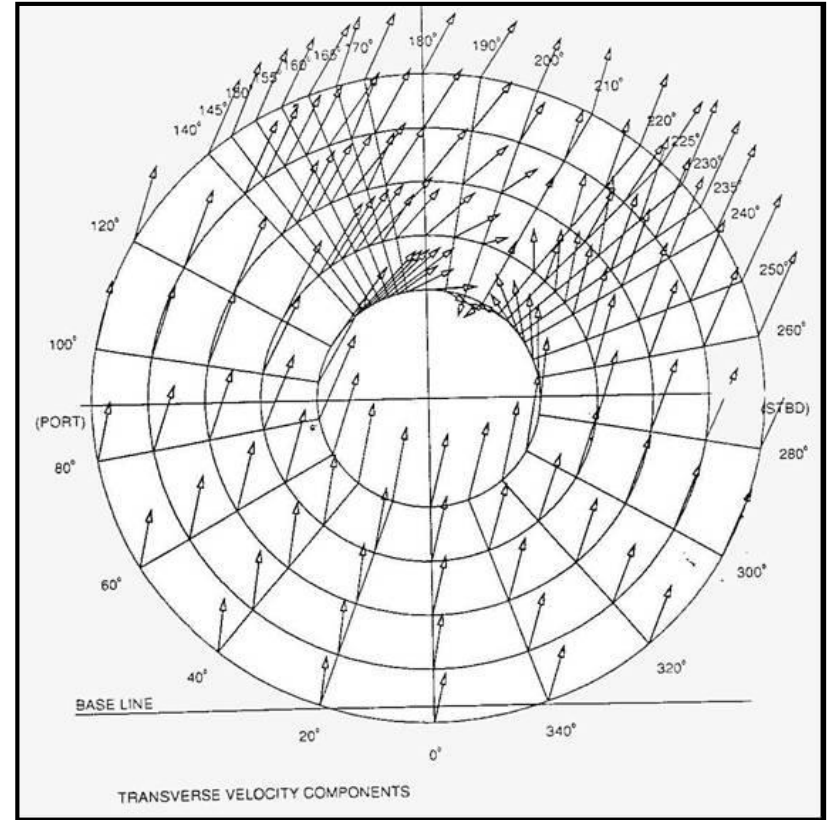


Scia assiale (bielica)

# Rappresentazione Grafica della Scia



Isoscia assiale (bielica)



Scia tangenziale (bielica)

# Analisi Armonica della Scia

Lo sviluppo in serie di Fourier per le tre componenti della frazione di velocità medie nel tempo fornisce, **ad ogni raggio  $r$** , il sistema di equazioni

$$\frac{V_x(r, \theta)}{V} = a_{ox} + \sum_{n=1}^{n_k} [a_{nx}(r) \cos n\theta + b_{nx}(r) \sin n\theta] = \sum_{n=1}^{n_k} c_{nx}(r) \sin [n\theta + \varphi_{nx}(r)]$$

$$\frac{V_t(r, \theta)}{V} = a_{ot} + \sum_{n=1}^{n_k} [a_{nt}(r) \cos n\theta + b_{nt}(r) \sin n\theta] = \sum_{n=1}^{n_k} c_{nt}(r) \sin [n\theta + \varphi_{nt}(r)]$$

$$\frac{V_r(r, \theta)}{V} = a_{or} + \sum_{n=1}^{n_k} [a_{nr}(r) \cos n\theta + b_{nr}(r) \sin n\theta] = \sum_{n=1}^{n_k} c_{nr}(r) \sin [n\theta + \varphi_{nr}(r)]$$

- $c_{nx}(r) = \sqrt{a_{nx}^2(r) + b_{nx}^2(r)}$      $c_{nt}(r) = \sqrt{a_{nt}^2(r) + b_{nt}^2(r)}$     ampiezze armoniche di ordine  $n$
- $\varphi_{nx}(r)$  e  $\varphi_{nt}(r)$     angoli di fase

# Analisi Armonica della Scia

- Le componenti armoniche  $C_n$  e le fasi  $\varphi_n$  hanno molta importanza nel progetto dell'elica
- L'armonica di ordine zero ( $C_0$ ) è il valore medio circonferenziale ad un certo raggio ed il suo integrale esteso dal raggio del mozzo a quello della pala è la velocità media di afflusso al disco elica (scia media volumetrica nominale  $(1-w)_n$ )

ORDER OF HARMONIC	RADII (IN MM FOR SHIP)							
	640		1280		1920		2240	
	AMPL.	PHASE	AMPL.	PHASE	AMPL.	PHASE	AMPL.	PHASE
0	.780	0	.870	0	.874	0	.872	0
1	.191	30	.108	22	.106	17	.112	9
2	.101	231	.065	215	.051	203	.053	190
3	.030	46	.041	65	.022	50	.017	28
4	.026	143	.026	269	.016	268	.012	271
5	.026	308	.018	107	.017	114	.013	101
6	.027	127	.010	304	.013	329	.006	299

NOTES: -HARMONIC FUNCTION IS DEFINED AS :  
 $V = V(0) + V(1)\cos(\theta - \phi(1)) + V(2)\cos(2\theta - \phi(2)) + \dots$   
 WITH:  $V(0)$  = CIRCUMFERENTIAL MEAN AXIAL VELOCITY  
 $V(I)$  = AMPLITUDE OF THE I-TH HARMONIC COMPONENT  
 $I$  = ORDER OF HARMONIC  
 $\theta$  = POSITION ANGLE IN CLOCKWISE DIRECTION FROM THE SIX O'CLOCK POSITION;  
 PORT CORRESPONDS TO 90 DEGREES.  
 $\phi(I)$  = PHASE ANGLE IN DEGREES  
 -AMPLITUDES ARE GIVEN AS A FRACTION OF THE SPEED.

# Stima della scia media nominale

- Il progetto dell'elica richiede la conoscenza della scia media nominale. Nelle prime fasi del progetto si possono utilizzare:
  - Data base aziendale
  - Esperienza del progettista
  - Metodi statistici sviluppati da laboratori idrodinamici e ricercatori
- Assunzioni da verificare con prove sperimentali
- Per valutare il campo di scia si utilizzano dati di navi simili se non si dispone di prove alla vasca

# Stima della scia media nominale

**Taylor (1933)**

*navi monoelica*

$$w = 1.7485 C_B^2 - 1.8612 C_B + 0.7272$$

*navi bielica*

$$w = 1.7642 C_B^2 - 1.4745 C_B + 0.2574$$

**Burrill (1943)**

*navi monoelica*

$$w = 0.285 - 0.417 C_B + 0.796 C_B^2$$

*navi bielica*

- con ringrossi a 10 gradi sull'orizzontale

$$w = 0.171 - 0.847 C_B + 1.341 C_B^2$$

- con ringrossi a 30 gradi sull'orizzontale

$$w = 0.052 - 0.648 C_B + 1.138 C_B^2$$



# Stima della scia media nominale

Schönherr (1949)

*navi monoelica*

$$w = 0.10 + 4.5 \frac{C_{PV} \cdot C_P \cdot (B/L)}{(7 - 6 C_{PV}) \cdot (2.8 - 1.8 C_P)} + \frac{1}{2} \left( \frac{h_p}{T} - \frac{D}{B} - k \psi \right)$$

$\Psi$  = angolo di 'rake' dell'elica [rad]

$k = 0.3$  per poppe a specchio

$k = 0.5 \div 0.6$  per poppe a incrociatore

*navi bielica*

- con ringrossi ed eliche che ruotano verso l'esterno

$$w = 2 C_B^5 (1 - C_B) + 0.2 \cos^2(1.5 \psi) - 0.02$$

- con ringrossi ed eliche che ruotano verso l'interno

$$w = 2 C_B^5 (1 - C_B) + 0.2 \cos^2(90 - 1.5 \psi) - 0.02$$

- con eliche sorrette da braccioli

$$w = 2 C_B^5 (1 - C_B) + 0.04$$

# Stima della scia media nominale

## MARIN

### Navi monoelica

$$w_m = \frac{0.177714 B^2}{L^2(1 - C_P)^2} - 0.577076 \frac{B}{L} + 0.404422 C_P + \frac{7.65122}{D_v^2} \quad \text{con} \quad D_v = \frac{D}{L(C_T - C_W)}$$

$$w_s = w_m - 7.65122 (C_{Tm} - C_{Ts}) \cdot (C_{Tm} + C_{Ts} - 2C_W) \cdot \frac{L^2}{D^2} \quad \text{Estrapolazione al vero (Holtrop)}$$

### Navi bielica

$$w_m = 0.4141383 C_P^2 - 0.2125848 C_P + \frac{5.768516}{D_n^2}$$

$$w_s = w_m - 5.76900 (C_{Tm} - C_{Ts}) \cdot (C_{Tm} + C_{Ts} - 2C_W) \cdot \frac{L^2}{D^2} \quad \text{Estrapolazione al vero (Holtrop)}$$

### Navi veloci monoelica

$$w_m = 0.3 C_B + 10 C_v C_B - 0.1$$

### Navi veloci bielica

$$w_m = 0.3095 C_B + 10 C_V C_B - 0.23 \frac{D}{\sqrt{BT}} \quad \text{con} \quad C_V = (1 + k)C_F + C_A$$

# Stima della scia media nominale

## BSRA (British Ship Research Association)

$$W = -0.0458 + 0.3745C_B^2 + 0.1590D_W - 0.8635Fn + 1.4773Fn^2 \quad \text{con} \quad D_W = \frac{B}{\nabla^{1/3}} \cdot \sqrt{\frac{\nabla^{1/3}}{D}}$$

## KSRC (Krylov State Research Centre)

$$W = [0.25 + 2.2(C_B - 0.5)^2] \cdot [0.94 + 1.8(0.8 - D/T)^2] \quad \text{Monoelica, } C_B > 0.6$$

$$W = \{0.17 + [(C_B/C_M^2) - 0.6]^2\} \cdot \{0.94 + 6[0.7 - (D/T)^2]\} \quad \text{Pescherecci, } C_B > 0.55$$

# Stima della scia media nominale

## DMI (FORCE Technology)

### Navi Monoelica

#### Harvald

$$w = w_1 + w_2 + w_3$$

$$w = \left[ 1.095 - 3.4 C_B + 3.3 C_B^2 \right] + \left[ \frac{0.5 C_B^2 (6.5 - L/B)}{L/B} \right] \quad 0.525 \leq C_B \leq 0.75$$

$$5.0 \leq L/B \leq 8.0$$

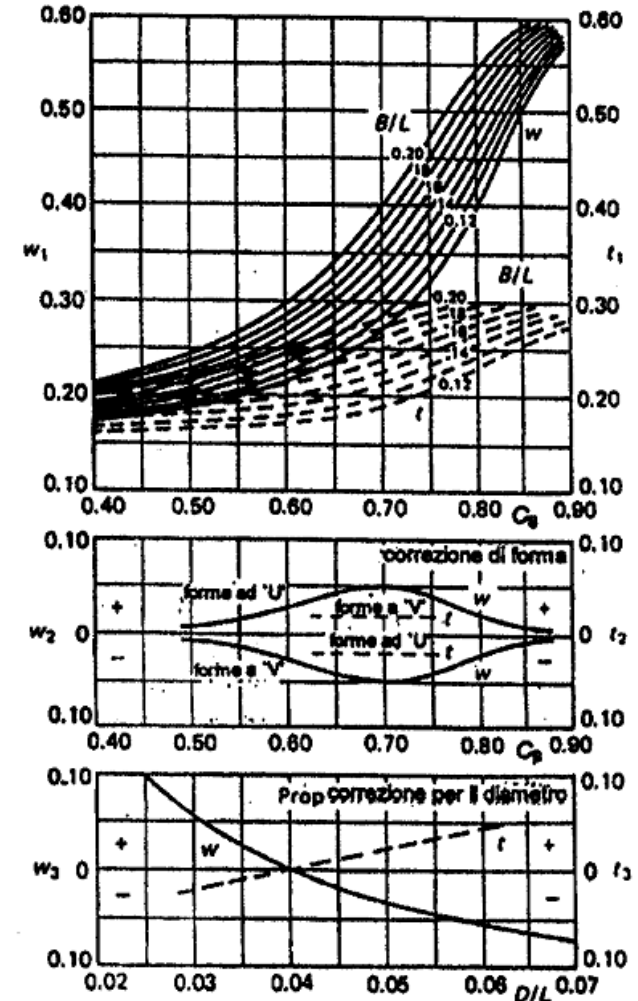
$$w = \sum_{i=1, j=1}^8 a_{i,j} C_B^i \left( \frac{B}{L} \right)^j \pm \sum_{k=1}^5 b_k C_B^k + \sum_{l=1}^4 c_l \left( \frac{D}{L} \right)^l$$

#### Kristensen

$$w_1 = 0.149 + 0.1 B/L + \frac{0.449 + 0.05/B/L}{1 + [585 - 5027/B/L + 11700(B/L)^2] \cdot (0.98 - C_B)^3}$$

$$w_2 = \frac{0.025 \cdot F_a}{1 + 100 (C_B - 0.7)^2} \quad w_3 = -0.18 + \frac{0.00756}{D/L + 0.002}$$

$i$	$j$	$a_{ij}$	$k$	$b_k$	$l$	$c_k$
0	0	-0.25561270E+01	0	-0.13033033E+02	0	0.59075583E+00
1	0	0.15080732E+02	1	0.11350812E+03	1	-0.33099666E+02
2	0	-0.27680372E+02	2	-0.38820110E+03	2	0.70200373E+03
3	0	0.16433867E+02	3	0.65072329E+03	3	-0.72595229E+04
0	1	0.17220405E+02	4	-0.53369306E+03	4	0.29089242E+05
1	2	-0.93048350E+02	5	0.17128503E+03		
2	1	0.16557534E+03				
3	1	-0.92065689E+02				

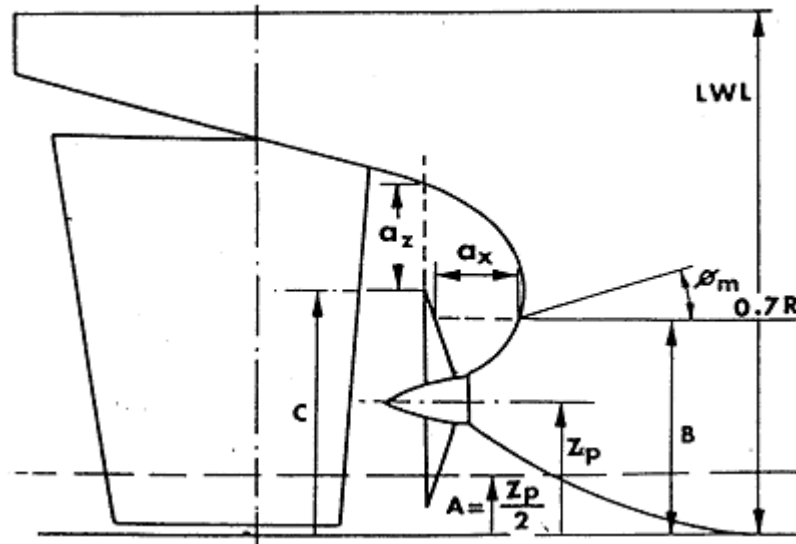


# Parametri Globali del Campo di Scia

- Descrivono il grado di non uniformità della scia assiale
- Elementi importanti per il progetto dell'elica
- BSRA ha sviluppato un metodo statistico per correlare i parametri con i principali elementi geometrici della carena per navi monoelica

# Parametri Globali del Campo di Scia

## BSRA – Navi Monoelica



*Scia media sul disco-elica*

$$(\bar{w})_{\text{disc}} = -0.21 + 2.44 (C_B)_{10B} - 0.68 (C_{WP})_{50L_{WL}} + 0.51 (C_M)_{50B} + 3.56 L_b$$

*Scia media circonferenziale a 0.7R*

$$(\bar{w})_{0.7R} = 0.64 + 9.08 (C_B)_{10z_p} - 5.24 (C_M)_{10B} - 1.35 D_b + 0.008 \phi_m - 0.51 (C_{WP})_{50L_{WL}}$$

*Scia media circonferenziale a 1.0R*

$$(\bar{w})_{1.0R} = 0.99 + 1.88 (C_M)_{10B} - 1.57 D_b + 0.008 \phi_m - 0.824 (C_{WP})_{50L_{WL}}$$

# Parametri Globali del Campo di Scia

*Scia massima circonferenziale a 1.0R*

$$(w_{max})_{1.0R} = 0.25 + 0.52 (C_P)_{50B} - 0.27 (C_{VP})_{10B} \cdot a_x + 0.13 \cdot \tau_{1.0} / \tau_{2.0}$$

*Variazione normalizzata di scia a 1.0R*

$$(\Delta w)_{1.0R} = 0.33 - 5.44 L_b - 5.05 (C_B)_{10A} + 8.62 (C_{WP})_{10B} - 2.62 (C_B)_{50B}$$

*Variazione massima di scia a 1.0R*

$$(\Delta w_{max})_{1.0R} = 0.33 + 1.32 (C_{WP})_{50LWL} - 1.06 (C_M)_{50LWL} + 23.26 \frac{\tau_{1.0} \cdot \phi_m \cdot (C_B)_{10C}}{Rn \cdot a_z}$$

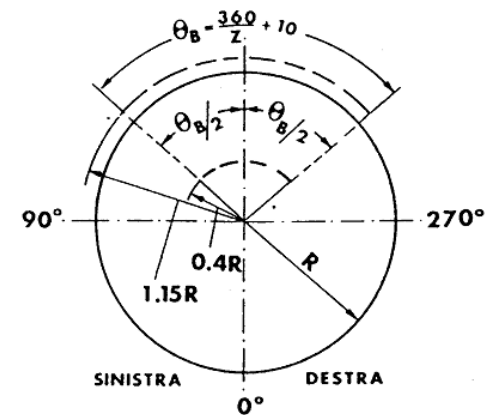
dove  $(\Delta w_{max})_{1.0R} = \frac{w_{max} - w_{min}}{(1 - \bar{w})_{1.0R}}$

*Scia massima nell'intervallo angolare  $\theta_B$*

$$w_{max} = 0.84 + 0.008 \phi_m - 0.46 (C_M)_{50B} + 0.13 \cdot \tau_{1.0} / \tau_{2.0}$$

*Variazione massima di scia sul disco-elica*

$$(\Delta w_{max})_{disc} = 0.3 + 1.43 D_b + (0.012 \cdot \tau_{1.0} \cdot \phi_m)$$



# Criteri di valutazione della scia

- Nelle prime fasi del progetto della nave è importante valutare la “qualità” della scia in relazione a possibili fenomeni vibratorii
- Esistono criteri sviluppati con analisi empirico-statistiche o teorico-sperimentali
- Servono come guida indicativa nella definizione delle forme poppiere della carena



# Criteri di valutazione della scia

## Criteri di Scia Massima

### Criterio Generale

$$w_{\max} < 1.7 \bar{w}_{0.7R}$$

### Criterio per Carene Fini

$$w_{\max} < 0.55 \quad \text{per } C_B < 0.60$$

### Criterio per Navi Cisterna e Bulk-Carriers

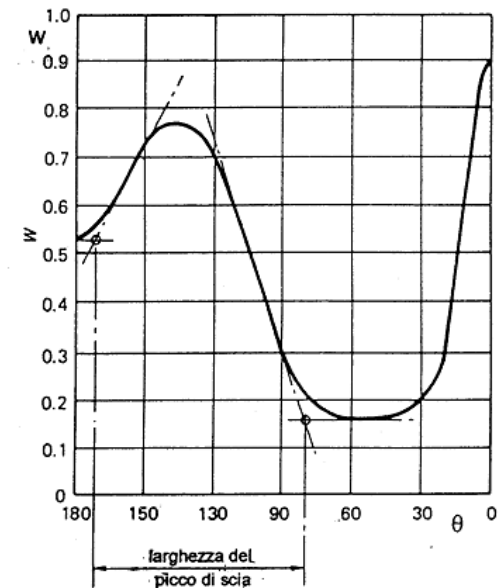
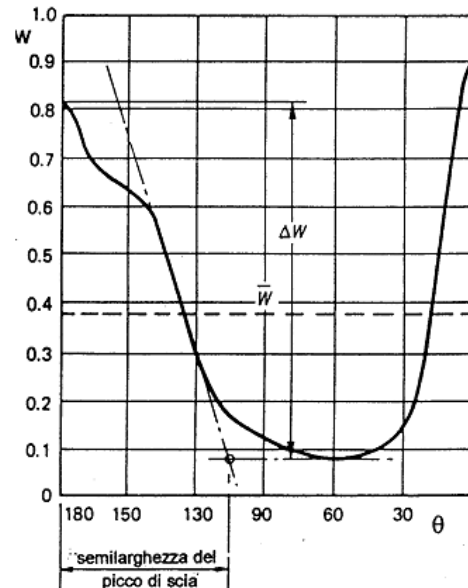
Il minore tra  $w_{\max} < 0.75$  e  $w_{\max} < C_B$

nell'intervallo angolare  $\theta_B = 10 + 360/Z$  da  $0.4R$  a  $1.15R$

## Criterio del Picco di Scia

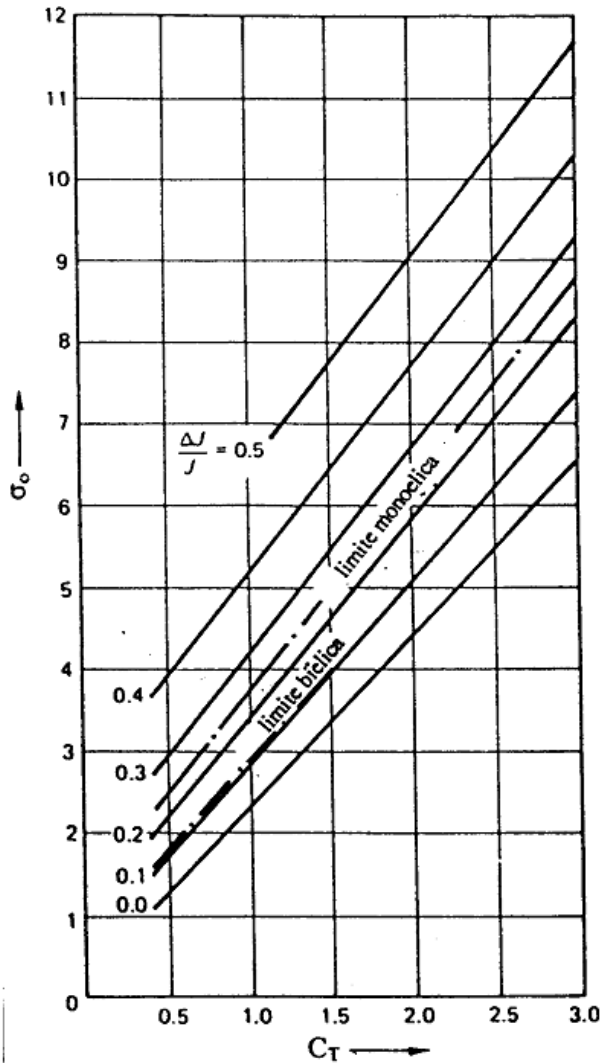
Serve a definire correttamente il numero di pale dell'elica dal punto di vista idrodinamico

- La distanza angolare tra le pale deve essere sempre maggiore della larghezza del picco di scia.
- Quando la larghezza del picco di scia é leggermente superiore alla distanza angolare tra le pale dell'elica, sono massime le pressioni indotte sulla carena da un'elica cavitante



# Criteri di valutazione della scia

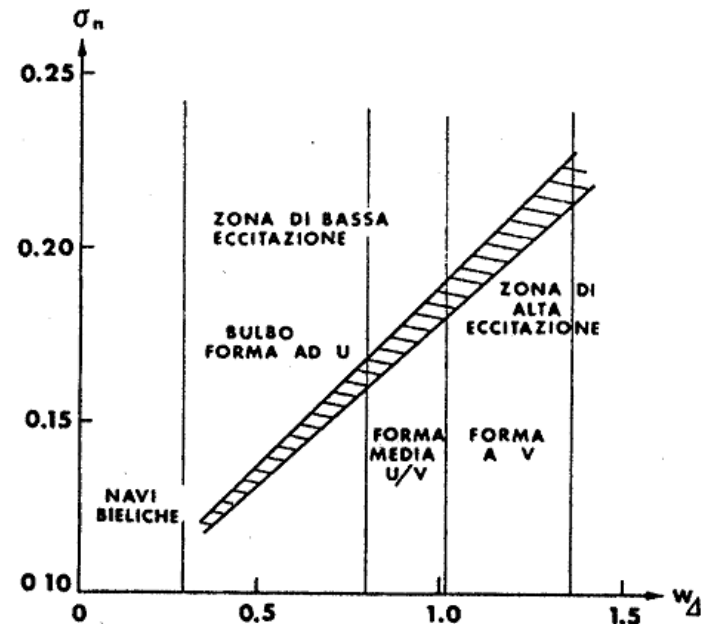
## Criterio di van Gunsteren e Pronk



## Criteri del BSRA

$$a) \quad \sigma_n = \frac{9.903 - D/2 - Z_p + T_A}{0.051 (\pi n D)^2}$$

$$w_{\Delta} = \left( \frac{\Delta w}{1 - \bar{w}} \right)_{\bar{x}=1.0} = \left( \frac{w_{\max} - w_{\min}}{1 - \bar{w}} \right)_{\bar{x}=1.0}$$



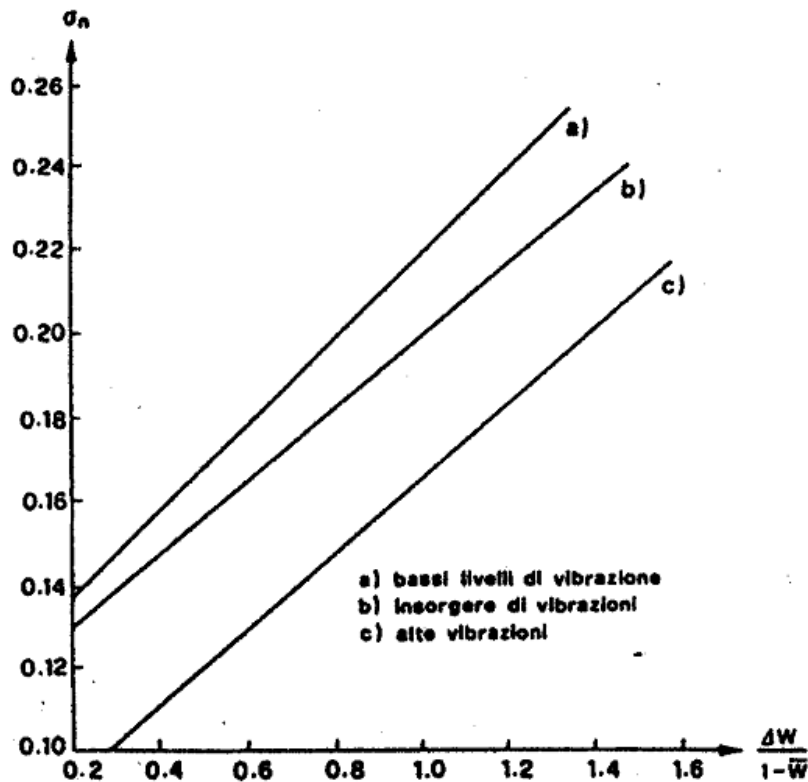
b) Nella zona tratteggiata, gradiente di scia

$$\frac{1}{\bar{r}} \left( \frac{dw/d\theta}{1 - w} \right) < 1.0$$

# Criteri di valutazione della scia

## Criterio di Ruthenford

$$\sigma_n = 9.009 + \frac{T_{\text{tip}}}{\frac{1}{2}\rho(\pi n D)^2}$$



## Linee guida per navi monoelica

- l'angolo  $\phi$  di uscita delle linee d'acqua dovrebbe essere sotto  $27^\circ$ - $30^\circ$  lungo tutta la spalla poppiera;
- la larghezza del dritto poppiere non dovrebbe superare il 3% del diametro dell'elica nella zona compresa tra  $0.2R$  e  $0.6R$  sopra la linea d'assi;
- l'angolo  $\tau$  della tangente alle sezioni poppiere estreme al livello della linea d'assi, dovrebbe variare tra  $27^\circ$  e  $30^\circ$  (forme da 'V' estremo a 'V' moderato).

# Effetto Scala sulla Scia

- Lo spessore dello strato limite sul modello è maggiore che al vero
- Il gradiente della velocità circonferenziale al vero è più elevato che sul modello
- Il campo di scia al vero risulta “contratto”, particolarmente su monoelica
- Conseguenze:
  - Le forze non stazionarie sono maggiori al vero
  - Necessità di correggere i valori modello per il progetto dell’elica
  - Correzioni della scia media volumetrica
  - Correzioni della distribuzione di scia

# Effetto scala sulla scia media volumetrica

## Approccio teorico

Si può partire dal valore sperimentale di scia, ottenuto dalla prova di autopropulsione sul modello, utilizzando la decomposizione classica

$$w = w_v + w_d + w_w = w_v + w_p$$

Poiché le prove sperimentali sono realizzate rispettando la costanza del numero di Froude nella legge di similitudine, si ha:

$$w_{ws} = w_{wm} \quad \text{e} \quad w_{ds} = w_{dm} \quad \implies \quad w_{ps} = w_{pm}$$

da cui si deriva teoricamente la scia media volumetrica al vero

$$w_s = (w_m - w_{vm} - w_{pm}) + (w_{vs} + w_{ps}) = w_m - (w_{vm} - w_{vs})$$

I valori di  $w_{vm}$  e  $w_{vs}$  possono essere ottenuti mediante le **equazioni dello strato limite** di una lastra piana; oppure

$$w_{vs} = w_{vm} \cdot \frac{C_{fs}}{C_{fm}}$$

Se si trascura  $w_{ws}$  per la sua scarsa entità, si ricava la scia media volumetrica nave come

$$w_s = (w_m - w_{dm}) \cdot \frac{C_{fs}}{C_{fm}} + w_{dm}$$

# Effetto scala sulla scia media volumetrica

## Metodo ITTC

A partire dalla relazione  $w_s = (w_m - w_{dm}) \cdot \frac{C_{fs}}{C_{fm}} + w_{dm}$  della scia media volumetrica e nella ipotesi che sia  $w_{dm} = t$ , l'ITTC ha ricavato

$$w_s = (w_m - t) \cdot \frac{C_{fs}}{C_{fm}} + t$$

In base a confronto tra questa formula e misure al vero, Bowden et Dawson derivarono

$$w_s^* = w_s + 0.04$$

dove  $w_s^*$  é il valore medio desunto dagli esperimenti al vero.

Assumendo per la scia di spostamento la relazione

$$w_{dm} = t + 0.04$$

la **formula finale dell'ITTC** diviene, con  $k$  fattore di forma

$$w_s = (t + 0.04) + (w_m - t - 0.04) \cdot \frac{(1+k)C_{fs} + \Delta C_f}{(1+k)C_{fm}}$$

Queta formula fornisce una stima ragionevole per navi dalle forme piene con eliche pesantemente caricate, mentre risulta inaccurata per navi dalle forme fini.

# Effetto scala sulla scia media volumetrica

## Metodo di van Manen-Lap

Suddivide la scia in una componente d'attrito  $w_f$  ed in una componente residua  $w_d$ ; risulta:

$$w_{f_s} = \tau_s \cdot w'_{f_s} \quad \text{con } \tau_s \text{ correzione per fattore di forma}$$

$$w_{d_s} = w_{d_m} = w_m - w_{f_m} = w_m - \tau_m \cdot w'_{f_m}$$

dove

$$\tau = \frac{C_f}{C'_f} = \frac{(1 - w_f) \cdot w_f}{(1 - w'_f) \cdot w'_f}$$

## Metodo di Taniguchi

$$\frac{1 - w_s}{1 - w_m} = a \left( \frac{C_{f_m}}{C_{f_s} + \Delta C_f} \right)^{1/3} \quad \text{con } a = 1.1$$

generalizzata dall'ITTC con  $a = 1.0$  e l'esponente  $1/3$  con  $1/n$ , dove  $n = \frac{1}{0.087B/T + 0.554 C_B - 0.497}$

## Metodo di Sudo

Formula per le **navi cisterna**

$$1 - w_s = (1 - w_m) \cdot \left[ (C_{BA})^2 \cdot \frac{B}{T} \right]^{0.415} \quad \text{con } C_{BA} \text{ coefficiente di blocco poppiere}$$

# Effetto scala sulla distribuzione della scia

- Metodo della contrazione dello strato limite del modello
- Metodi di Sasajima et Tanaka e di Raestad: si fondano sull'ipotesi che non esista alcuna rilevante separazione del flusso a poppa
- Il metodo della contrazione non é in grado di prevedere le grandi differenze tra le velocità di picco di una nave e del suo modello in scala



# Effetto scala sulla distribuzione della scia

## Distribuzione di Scia

### Metodo di Sasajima e Tanaka

Il metodo contrae linearmente verso il piano diametrale la sola componente di scia viscosa, punto per punto, come

$$w_{f_s} = w_{f_m} \frac{(1 - w_{p_s})}{(1 - w_{p_m})}$$

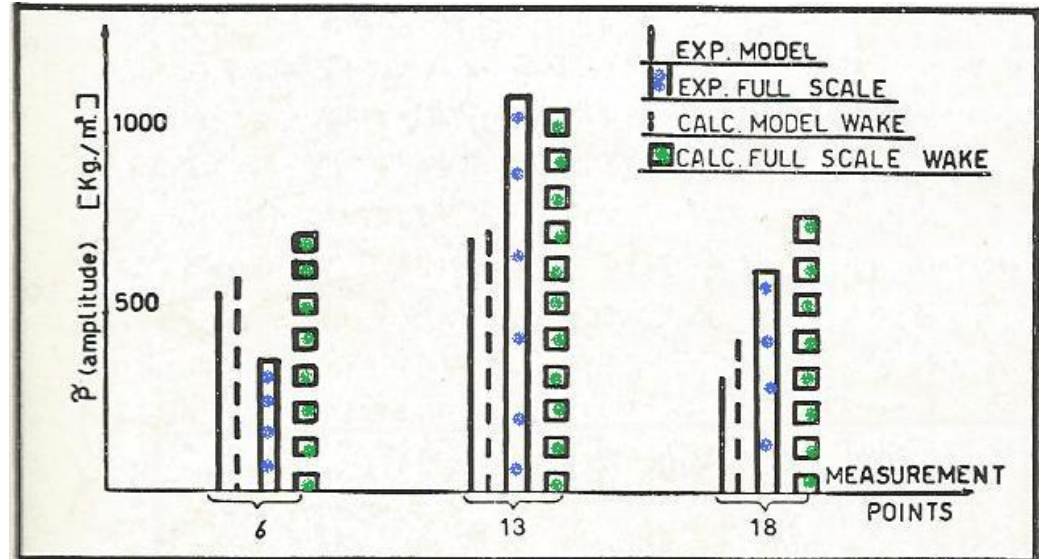
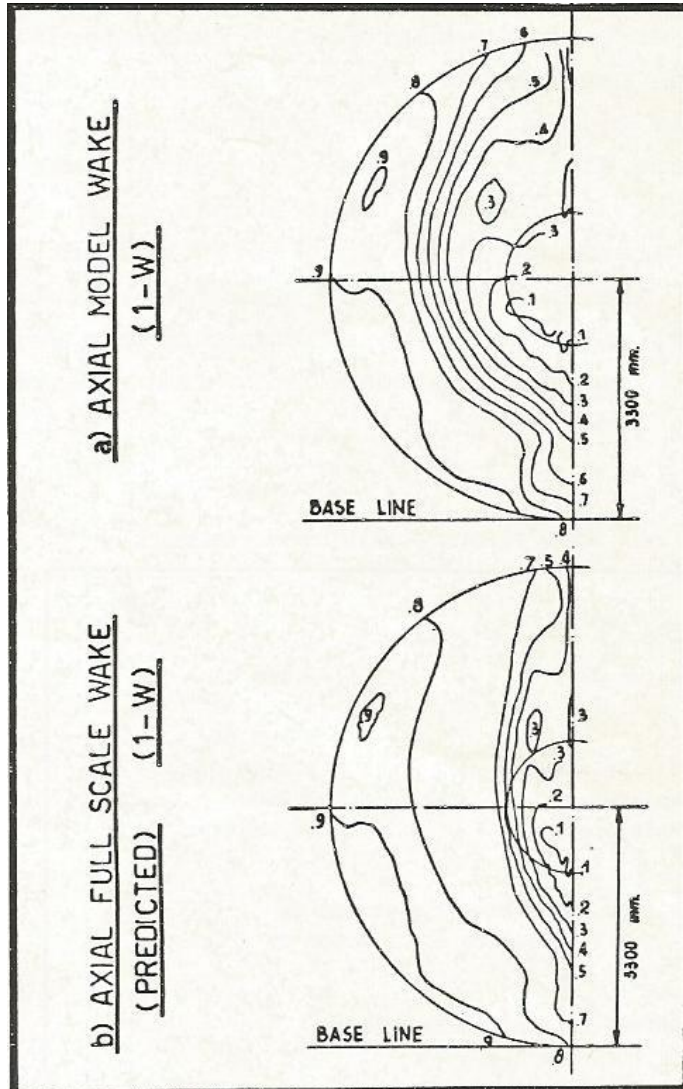
**Fattore di contrazione  $c$ :** rapporto fra lo spessore degli strati limite della nave e del modello, pari al rapporto tra i relativi coefficienti di resistenza di attrito:

$$\left(\frac{\delta}{L}\right)_s = c \cdot \left(\frac{\delta}{L}\right)_m = \left(\frac{\delta}{L}\right)_m \cdot \frac{C_{f_s} + \Delta C_f}{C_{f_m}}$$

$$c = \frac{\frac{0.075}{(\log Rn_s - 2)^2} + \Delta C_f}{\frac{0.075}{(\log Rn_m - 2)^2}}$$

$$\Delta C_f = \left[ 105 \cdot \left(\frac{k_s}{L}\right)^{1/3} \right] \cdot 10^{-3}$$

# Effetto scala sulla distribuzione della scia



**Pressioni indotte sulla volta di poppa con scia modello e scia al vero**

# Forme di Carena e Distribuzione di Scia

## Variabili Progettuali che Influenzano la Distribuzione di Scia

### Posizione Longitudinale del Centro di Carena

Per navi dalle forme piene o relativamente piene, la posizione di **LCB** é molto importante in relazione ai rapporti **L/B** e **B/T**, specialmente per quanto riguarda la distribuzione circonferenziale di scia e, quindi, le forze di eccitazione:

- Per  $5.5 < L/B < 6$  e  $2.5 < B/T < 3$ , il valore di  $C_B$  e la posizione di **LCB** possono determinare valori di scia elevati e inaccettabili, per cui deve essere:
  - **LCB** a circa  $L_{pp}/2$  per  $C_B \approx 0.70$ ;
  - **LCB** a circa  $0.03L$  a proravia di  $L_{pp}/2$  per  $C_B \approx 0.80$ .
- Tuttavia, anche quando il valore di  $C_B$  e la posizione di **LCB** rientrano in intervalli normali, valori non normali di **L/B** e/o di **B/T** possono produrre distribuzioni e valori medi anomali della scia
- Per  $C_B > 0.75$  e  $L/B < 5.5$ , **LCB** a piú di  $0.03L$  avanti a  $L_{pp}/2$  per migliorare la stabilitá di rotta.
- Per  $B/T > 3.5$  si hanno valori di scia elevati

# Forme di Carena e Distribuzione di Scia

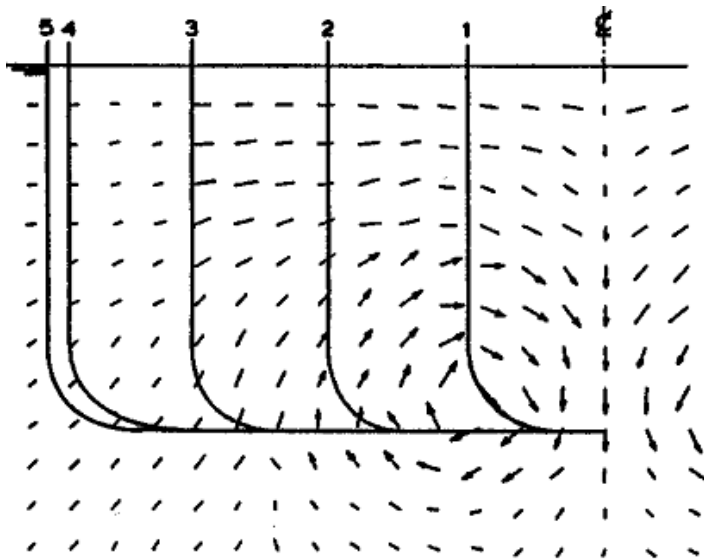
Per comprendere l'influenza delle forme di poppa di *navi monoelica* sul campo di flusso sul piano del disco-elica, occorre analizzare la relazione tra campo di scia e *forme di carena semplificate*, studiando inizialmente gli effetti di *forme estreme ad 'U' ed a 'V'*.

Per le *navi bielica*, particolare attenzione va prestata alle *appendici di sostegno delle linee d'assi*.

Per ridurre le forze di eccitazione sullo scafo poppiero prodotte dalle pressioni indotte da un'elica cavitante, occorre *correlare la scia alle forme di carena ed al carico dell'elica* fin dalle fasi iniziali del progetto.

## Scia e forme di poppa semplificate

### Poppa ad 'U'

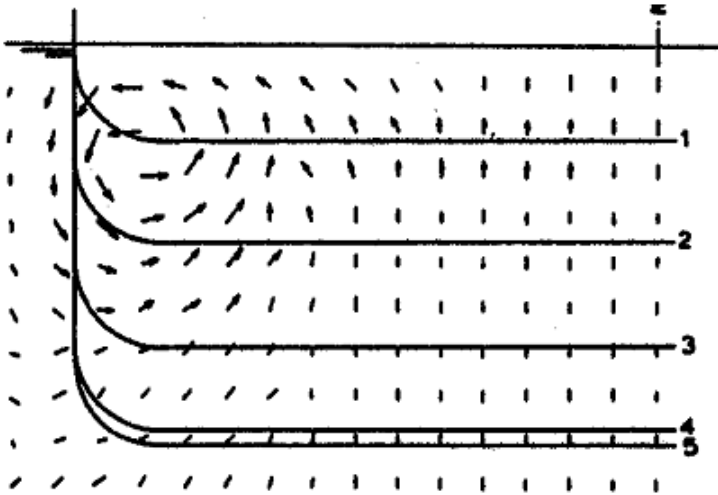


Su una forma di carena semplificata con *sezioni poppiere ad 'U' estremo*, il fluido è spinto lateralmente, per cui le velocità del flusso sono più elevate sulle murate che sul fondo.

Il flusso sale dal fondo sui fianchi della carena, formando un *vortice del ginocchio* che si muove longitudinalmente fino all'estrema poppa, ruotando in senso orario sulla murata a sinistra.

# Forme di Carena e Distribuzione di Scia

## Poppa 'Pram'

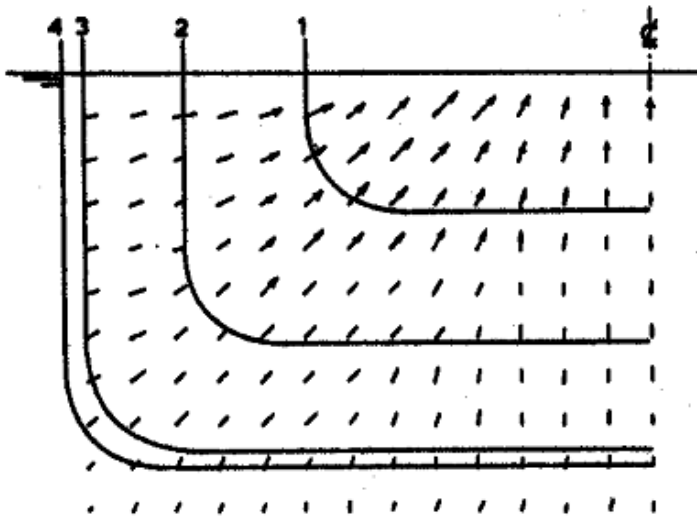


L'acqua é forzata verso il basso e si ha la pressione inferiore sul fondo.

Viene generato un vortice che ruota con verso antiorario sulla murata risalendo verso l'alto; il vortice si avvolge e si diffonde nella scia a poppavia (downstream).

Come per la poppa ad 'U', si genera una separazione del flusso con **formazione di vortici** che fanno aumentare la resistenza viscosa.

## Poppa ottimale semplificata



Il fenomeno della separazione puó essere ridotto considerevolmente combinando una carena ad 'U' con una carena 'pram'; in questo caso é minima la quantità di energia dispersa nella scia.

Se non avviene alcuna separazione, la scia é dovuta completamente alla distribuzione di velocità nello strato limite lungo la carena: si avrà **resistenza minima**.

La componente principale sarà la resistenza d'attrito, mentre la resistenza di forma sarà marginale.

# Forme di Carena e Distribuzione di Scia

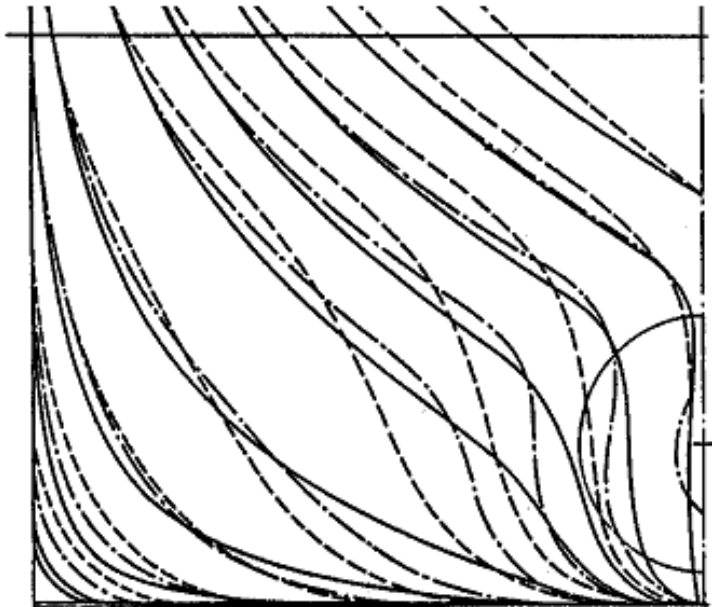
## Navi Monoelica

### *Variabili primarie della scia nominale:*

- forma delle sezioni trasversali,
- coefficiente di blocco,
- posizione longitudinale del centro di carena.

In generale, le sezioni a 'V' producono picchi di scia relativamente elevati intorno al piano diametrale.

### *Scelta tra diverse tipologie di poppa*



Le poppe a 'V' hanno caratteristiche di resistenza e di propulsione favorevoli, ma nelle navi dalle forme piene e molto larghe si presenta il pericolo di separazione del flusso davanti all'elica.

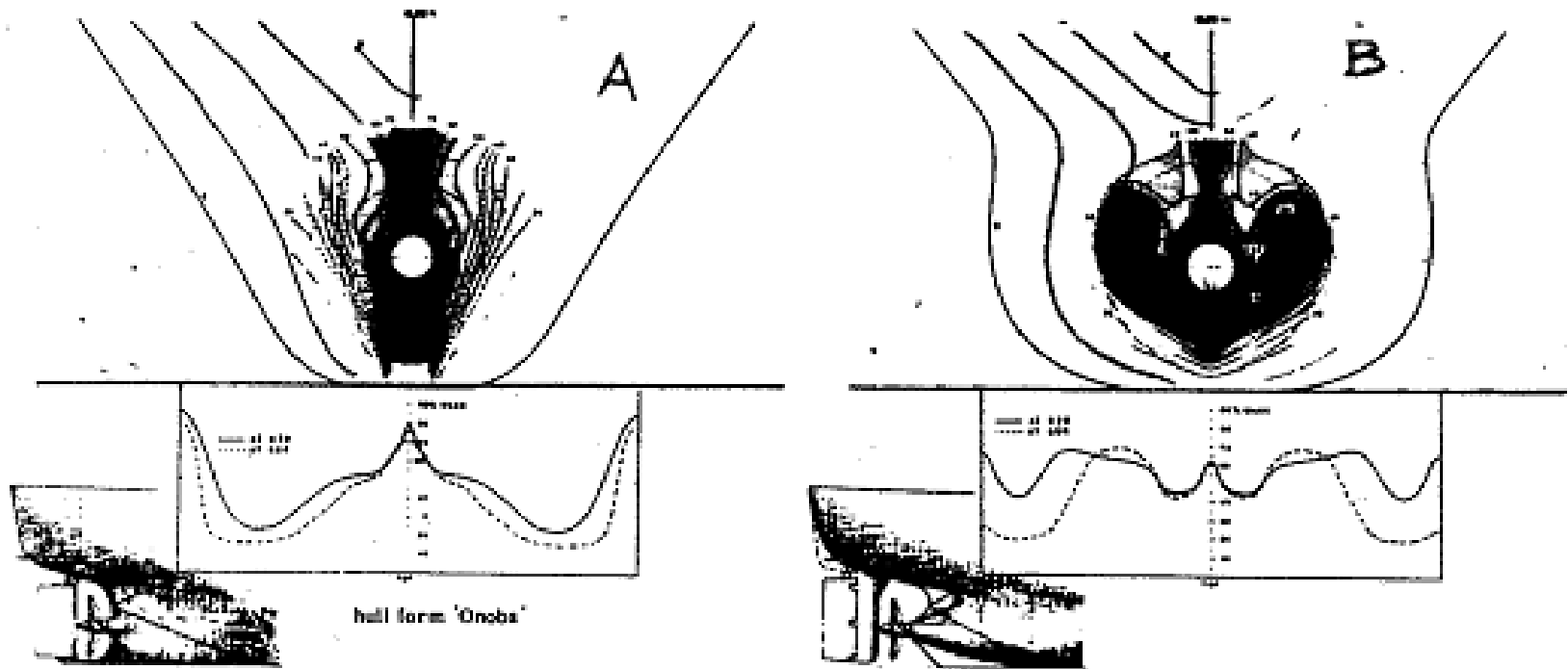
La distribuzione di scia é disomogenea con un elevato picco di scia con conseguenti vibrazioni indotte dall'elica.

Si deve cercare di omogeneizzare la distribuzione di scia, applicando forme di poppa ad 'U' o, meglio, inserendo un **bulbo poppiero**, anche se così cresce il valore della scia nominale di Taylor.

# Forme di Carena e Distribuzione di Scia

## Distribuzioni Circonferenziali di Scia

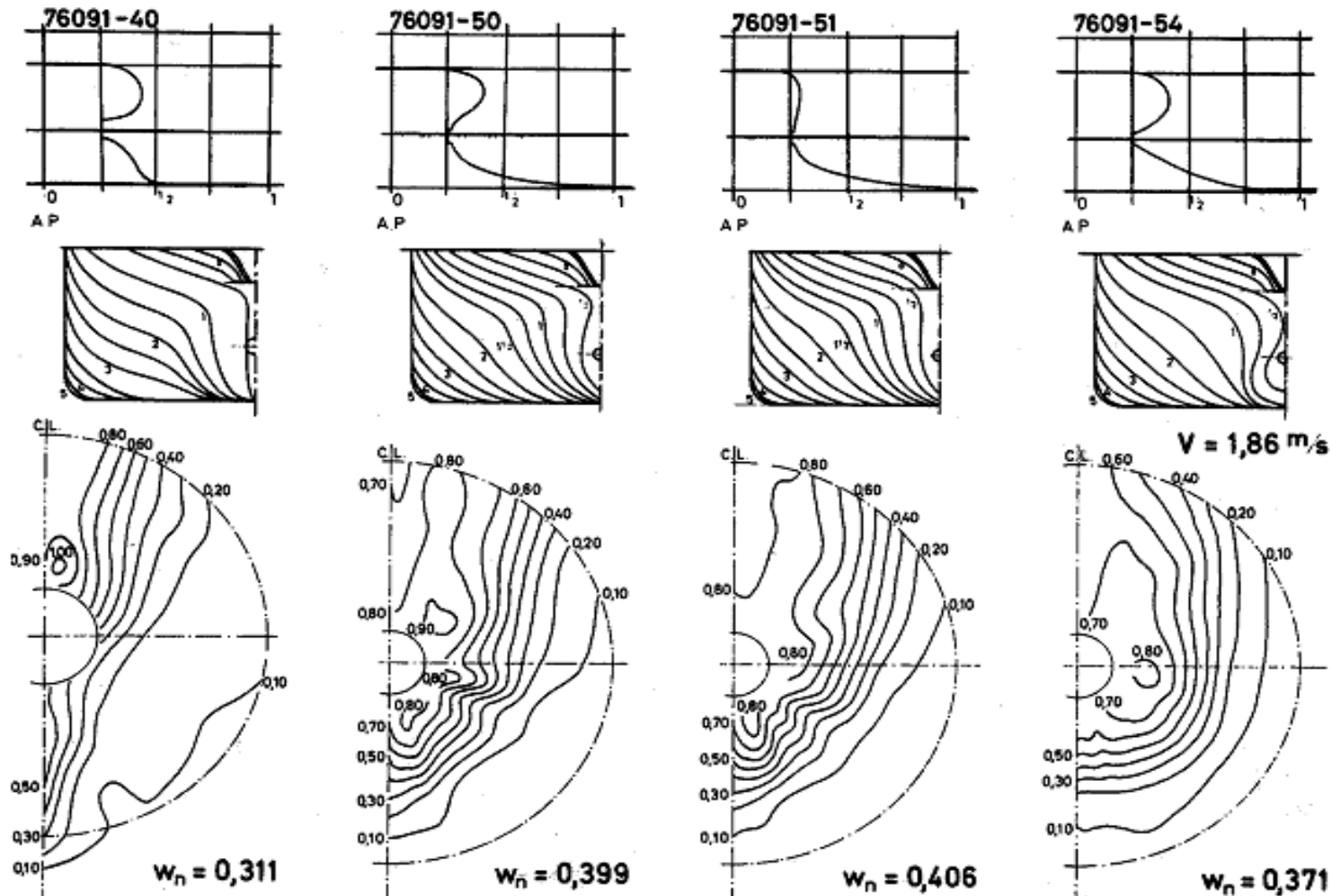
Nella nave `B' risulta attutito il picco di scia sull'apice del disco-elica e risulta minore la variazione tra i valori massimo e minimo della componente di scia assiale.



# Forme di Carena e Distribuzione di Scia

## Isoscie da Prove Standard su Modelli

La variante con bulbo poppiero ed una grande apertura al di sopra dell'albero portaelica presenta un campo di scia molto omogeneo.



$V = 1,86 \text{ m/s}$



# Forme di Carena e Distribuzione di Scia

## Navi Bielica

La scia assiale di una nave bielica é generata soprattutto dai ringrossi degli alberi portaelica e dai bracci portaelica (configurazione a “V” oppure a “L”)

La scia tangenziale è influenzata dall'angolo tra l'asse dell'albero e la sezione longitudinale che passa per lo stesso asse

I bracci a “V” rallentando maggiormente l’acqua con un aumento del coefficiente di scia e quindi un miglioramento propulsivo rispetto alla configurazione ad “L” (2÷3%). Il braccio a “V” produce però picchi di scia più pronunciati e quindi i carichi idrodinamici pulsanti generati dall’ elica sono più elevati

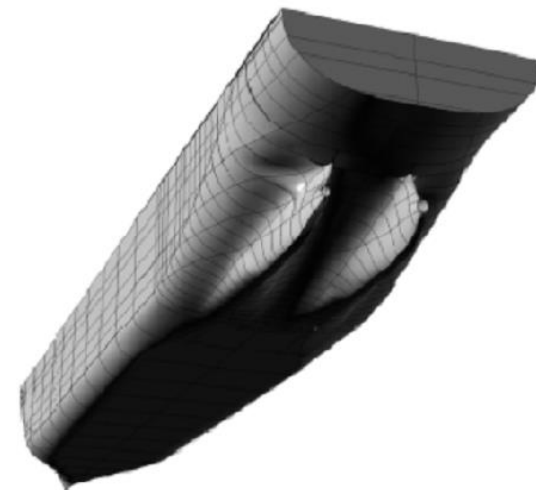
Bracci a “L”: è leggermente meno efficiente di quella a “V”, ma crea un campo di scia più omogeneo e carichi pulsanti inferiori

# Forme di Carena e Distribuzione di Scia

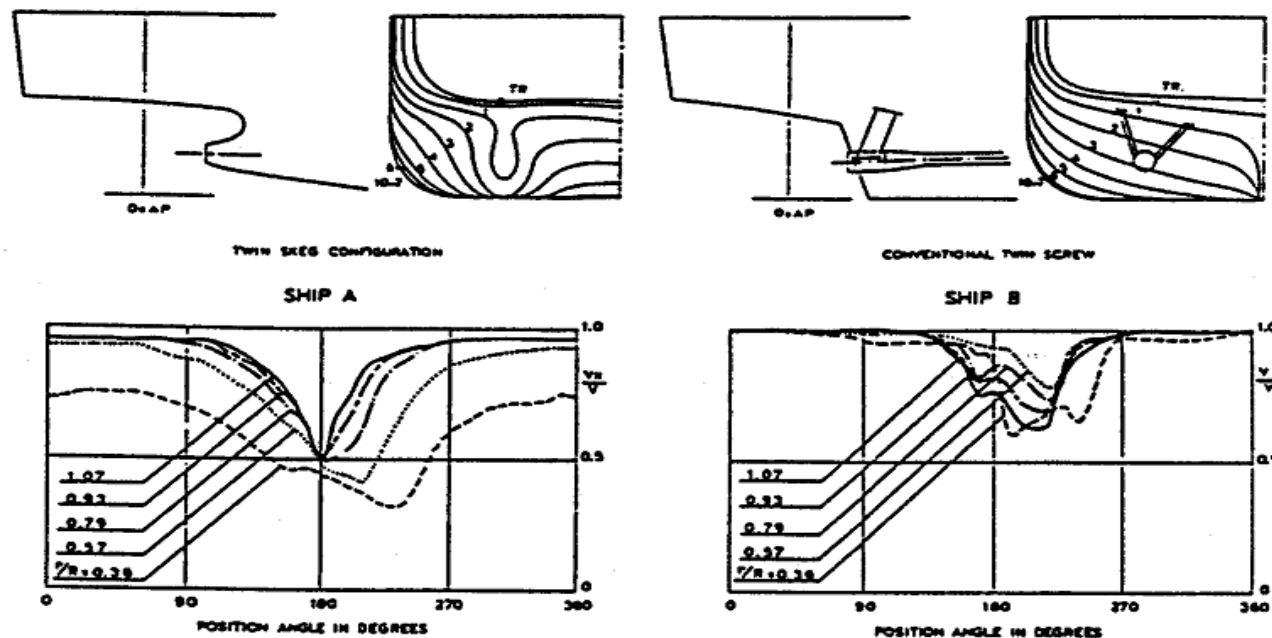
## Navi con Twin-Skegs

Queste poppe garantiscono maggiori valori di scia media, con un risparmio fino al 5-7% in potenza a parità di velocità.

La maggiore scia assiale rispetto a quella di una carena bielica convenzionale implica un rischio maggiore di avere grandi forze di eccitazione vibratoria.



*Confronto tra distribuzioni circolarziali di scia*



# Forme di Carena e Distribuzione di Scia

## Variabili Progettuali che Influenzano la Distribuzione di Scia

### LINEE GUIDA

#### Velocità

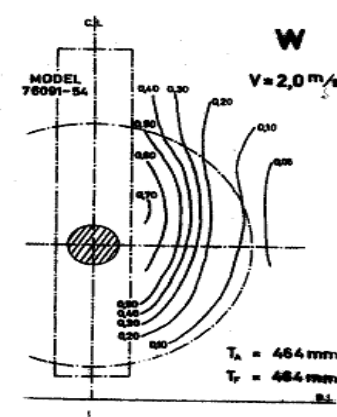
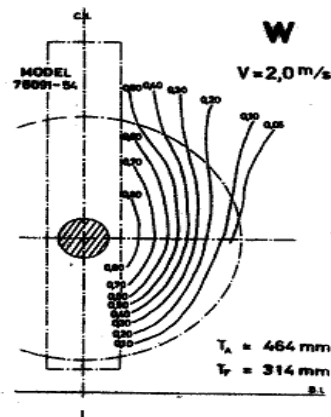
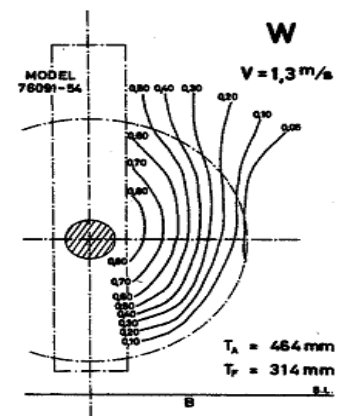
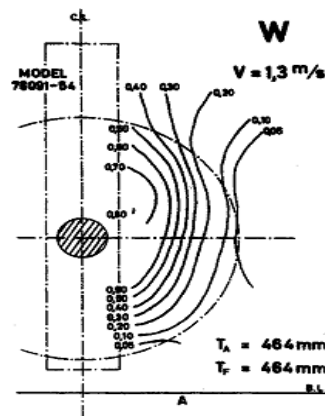
La velocità influenza poco la variazione di  $w$ , specie per le grandi navi con eliche di grande diametro.

Al variare della velocità nave, varia l'onda di poppa e, quindi, la frazione di scia d'onda.

La componente viscosa diminuisce al crescere della velocità.

La contrazione della scia al vero avviene quasi normalmente alle tracce delle isoscie.

Conclusioni analoghe valgono al variare dell'assetto.



# Forme di Carena e Distribuzione di Scia

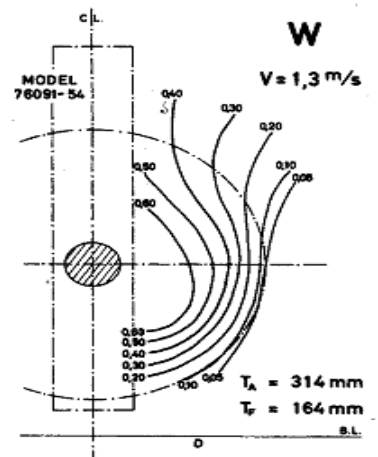
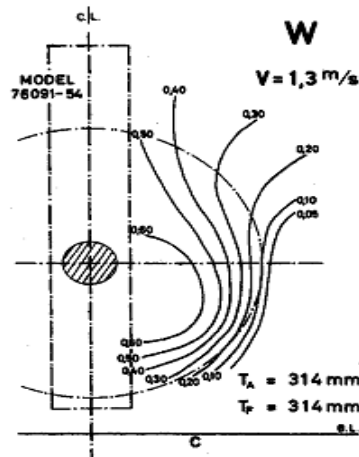
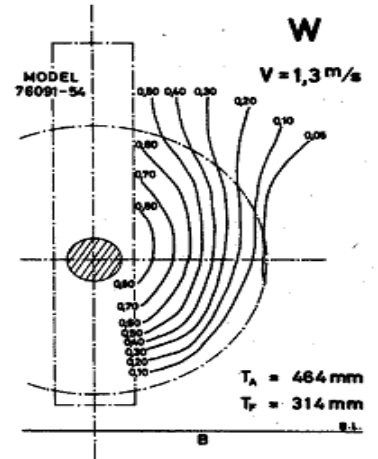
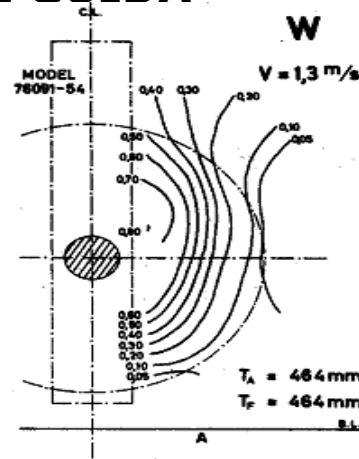
## Variabili Progettuali che Influenzano la Distribuzione di Scia

### Condizione di Carico

La distribuzione delle isoscie cambia alquanto al variare della condizione di carico.

Aumentando l'assetto poppiero, le isoscie si contraggono verso il piano diametrale.

### LINEE GUIDA



# Forme di Carena e Distribuzione di Scia

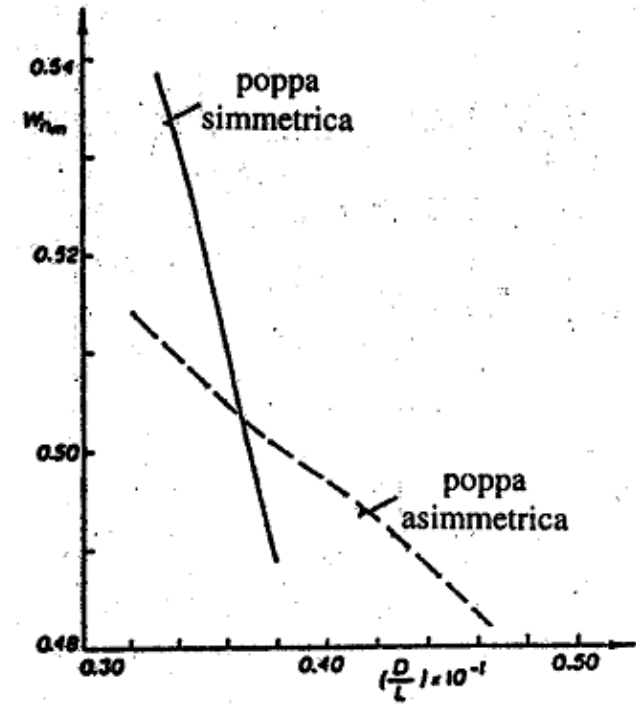
## Variabili Progettuali che Influenzano la Distribuzione di Scia

### Diametro dell'Elica

Il diametro dell'elica, o meglio il rapporto tra diametro dell'elica e lunghezza nave ha una grande influenza sulla frazione di scia assiale.

Gli esperimenti hanno dimostrato che lo spessore dello strato limite è quasi proporzionale alla lunghezza del modello, così che il rapporto  $D/L$  esprime in quale misura l'elica operi entro lo strato limite.

Sono riportati i risultati di una nave bulk-carrier, con poppa simmetrica e poppa asimmetrica.



# Forme di Carena e Distribuzione di Scia

## Variabili Progettuali che Influenzano la Distribuzione di Scia

### Rapporto Lunghezza-Larghezza

Al diminuire del rapporto tra lunghezza e larghezza della carena:

- cresce la frazione di scia potenziale;
- cresce lo spessore dello strato limite e, quindi, la frazione di scia viscosa

### Coefficiente di Blocco

É uno dei fattori che influenzano maggiormente la scia

La frazione di scia cresce non linearmente con il coefficiente di blocco

Tutti gli esperimenti e le analisi hanno mostrato che l'estrema poppa gioca il ruolo decisivo nella formazione del campo di scia

# Fattore di deduzione di spinta

- L'elica aumenta le velocità del flusso sulla superficie di carena a poppa riducendone il campo di pressione locale. La resistenza della nave aumenta rispetto a quella di rimorchio  $R$ . La spinta  $T$  deve essere maggiore di  $R$ :

$$T = R(1 + a_R)$$

$(1+a_R)$ : fattore di aumento di resistenza

- In alternativa si può considerare  $R$  come spinta effettiva dell'elica, ridotta rispetto alla spinta nominale dell'elica  $T$ . Si parla allora di deduzione di spinta

$$R = T(1 - t)$$

$(1-t)$ : fattore di deduzione di spinta

Sperimentalmente si ricava

$$t = \frac{T_m + F_d - R_c}{T_m}$$

dove

- $T_m$  è la spinta modello misurata nella prova di autopropulsione
- $R_c$  è la resistenza del modello dalla prova di rimorchio
- $F_d$  è la forza di correlazione che tiene conto del diverso coefficiente di viscosità tra modello e nave al vero
- Generalmente si assume che il valore ricavato da prove su modello sia lo stesso che al vero (ITTC 78)

# Fattore di Deduzione di Spinta

## Componenti del Fattore di Deduzione di Spinta

Il fattore di deduzione di spinta puó essere diviso in tre componenti

$$t = t_p + t_v + t_w$$

## Fattore di deduzione di spinta potenziale

In un fluido ideale dalla relazione  $R \cdot V = T \cdot V_A$  si ricava

$$1 - t_p = 1 - w_p \quad \Rightarrow \quad t_p = w_p$$

É stato verificato che il carico dell'elica e le forme di carena influenzano in misura del tutto marginale la relazione tra scia potenziale e deduzione di spinta potenziale

## Fattore di deduzione di spinta d'onda

Per forme di carena convenzionali e condizioni di carico normali la deduzione di spinta d'onda puó essere trascurata

## Fattore di deduzione di spinta viscoso

Sono molte e contraddittorie le teorie su questa componente.

Quello che é certo é che la parte del fattore di deduzione di spinta prodotta dalla **disomogeneitá circonferenziale** del campo di velocitá consiste principalmente del fattore di deduzione di spinta viscoso



# Stima del fattore di deduzione di spinta

## MARIN

### Navi monoelica

$$t = \frac{0.25014 (B/L)^{0.28956} (\sqrt{B \cdot T/D})^{0.2624}}{(1 - C_P + 0.0225 LCB)^{0.01762}} + 0.015 C_{st}$$

### Navi bielica

$$t = 0.325 C_B - 0.18885 D/\sqrt{B}$$

## DMI

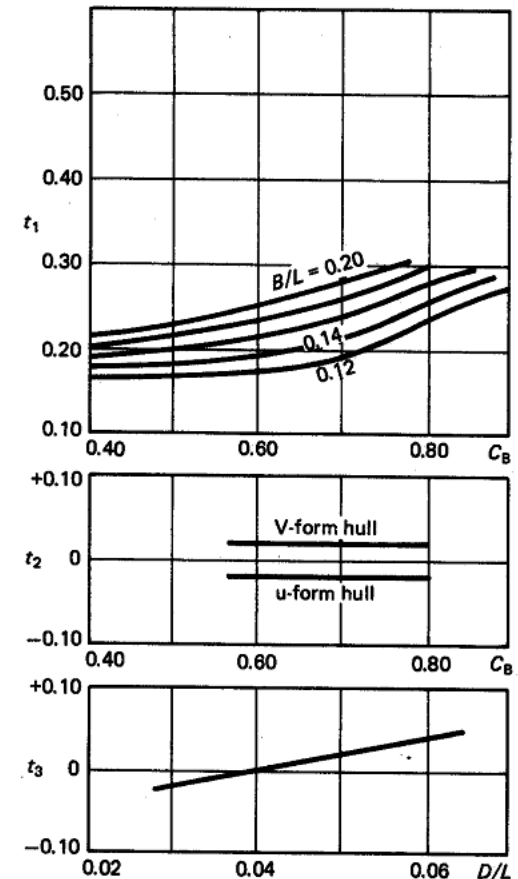
$$t = t_1 + t_2 + t_3$$

$$t_1 = 0.625 B/L + 0.08 + \frac{0.165 - 0.25 B/L}{(0.98 - C_B^2) \cdot [5.25 - 8060 B/L + 20300 (B/L)^2] + 1}$$

$$t_2 = -0.01 F_a$$

$$t_3 = 2 (D/L - 0.04)$$

$$t_{corrected} = 0.7 t_{Harvald} - 0.26 + 0.04 L/\nabla^{1/3}$$



# Stima del fattore di deduzione di spinta

## KSRC

$$t = 0.25w + 0.14 \quad \text{oppure} \quad t = 0.7w + 0.06$$

Su base sperimentale

$$t = \frac{t_0}{1 - J/(P^*/D)} \approx \frac{t_0}{1 - J/(P/D)}$$

dove

$t_0$      fattore di deduzione di spinta in bollard pull

$P/D$     passo geometrico al raggio  $r = 0.7R$

$P^*/D$    passo idrodinamico al raggio  $r = 0.7R$

## BSRA

$$t = -0.5352 - 1.6837C_B + 1.4935C_B^2 - 1.6625(LCB/L_{BP}) + 0.1705B/\nabla^{1/3} + 0.1504P/D$$

oppure

$$t = -0.2064 + 0.3246C_B^2 - 2.1504C_B(LCB/L_{BP}) + 0.6688D_t \quad \text{per} \quad 0.55 < C_B < 0.85 \quad \text{e} \quad 0.60 < P/D < 1.10$$

## Propulsione a Pod

$$t = 0.21593 + 0.099768C_B - 0.56056 \frac{D}{\sqrt{BT}}$$