



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE

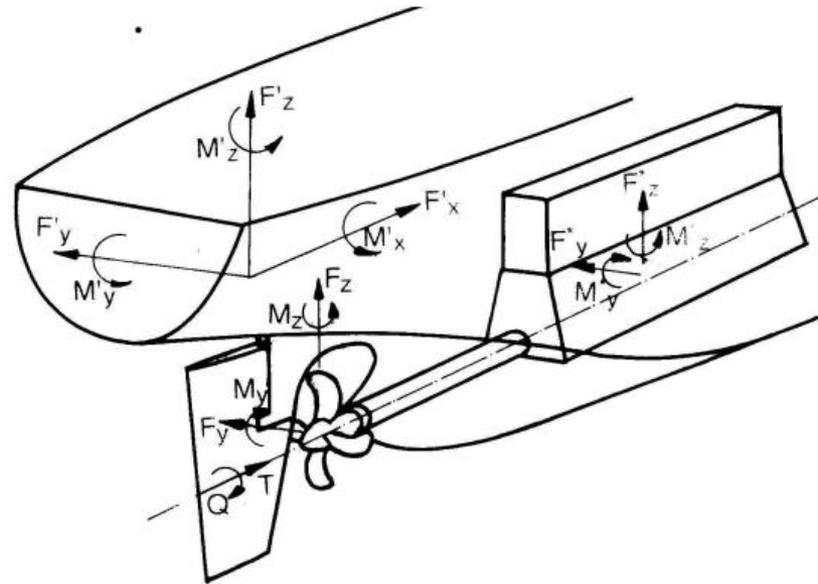
**Corso di
Propulsione Navale**

Forze Vibratorie Indotte dall'Elica

Vibrazioni delle navi

Sorgenti di vibrazioni

- Elica: dipendono dalla disomogeneità della scia
- Mare: a determinati angoli d'incontro induce vibrazioni ($f < 2Hz$)
- Macchinari: dipendenti dalle masse rotanti o oscillanti e dalle loro fondazioni. I motori vibrano con frequenze pari a N . Si abbattono usando fondazioni elastiche



Elica - Sorgente di Eccitazione

Forze che causano vibrazioni

- Forze e momenti sulla linea d'assi (bearing forces) trasmessi alla carena attraverso l'albero ed i cuscinetti:
 - forze e momenti verticali e trasversali
 - spinta e momento torcente
- Forze sulla superficie della carena (surface forces) associate al campo di velocità e pressione fluttuante indotto dall'elica



Bearing forces

- Nella scia non uniforme ogni pala genera un carico idrodinamico variabile lungo il giro con frequenza dipendente dal regime di rotazione ($\omega = n/60$, Hz) ed è scomponibile in 3 forze e 3 momenti lungo i 3 assi di riferimento x, y, z. Essendo funzioni periodiche sono sviluppabili in serie di Fourier:

$$F_{xpala} = \sum H_{(x)n} * \text{Sin}(n\omega t + \varepsilon_{(x)n})$$

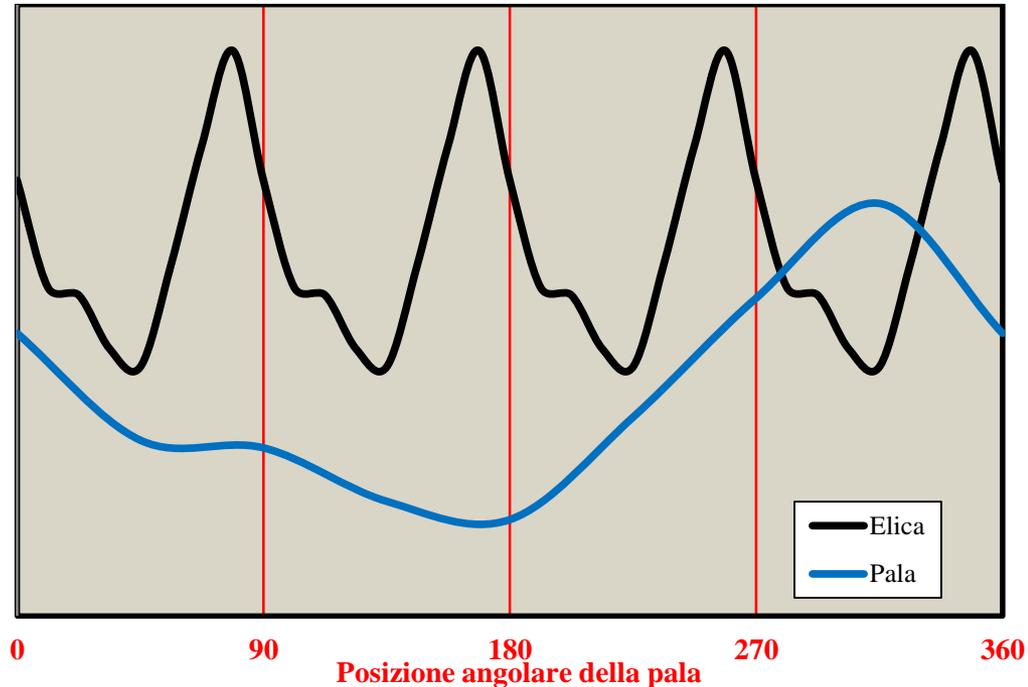
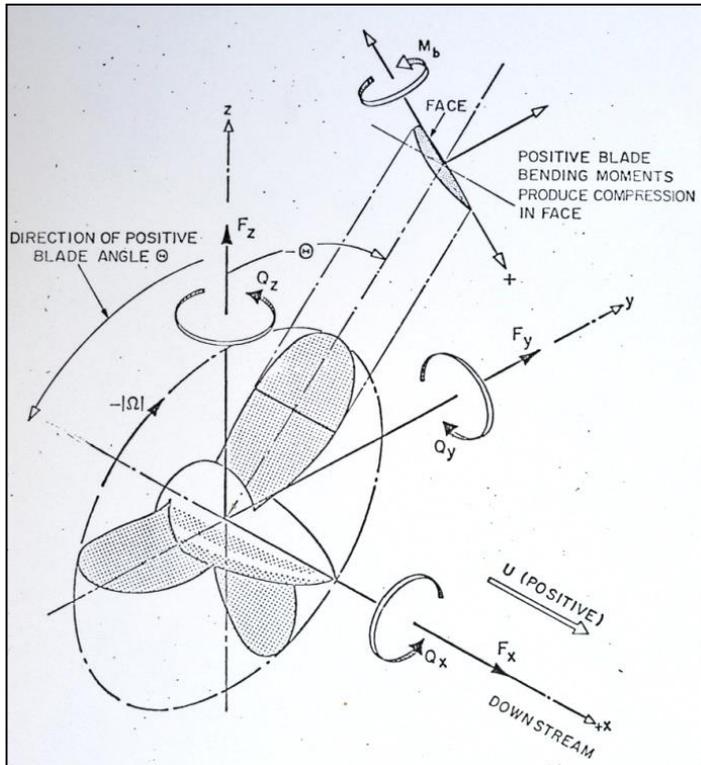
$$M_{xpala} = \sum L_{(x)n} * \text{Sin}(n\omega t + \xi_{(x)n})$$

con analoghe espressioni per le componenti lungo gli altri due assi

- Le componenti armoniche H_n e L_n sono in rapporto causa-effetto con le componenti armoniche C_n della scia in quanto $F_{x,y,z}$ e $M_{x,y,z}$ sono forze idrodinamiche e quindi direttamente proporzionali al quadrato della velocità incidente il profilo. Ne consegue che le fluttuazioni del carico di una pala dipendono da tutte le componenti armoniche della scia



Bearing forces



$$F(t)_{Pala} = \sum A_k \sin(k \frac{N}{60} t + \Phi_k)$$

$$F(t)_{Elica} = \sum A_k \sin(k \frac{Z \cdot N}{60} t + \Phi_k)$$



Bearing forces

- La somma vettoriale dei carichi di tutte le pale varia con frequenza dipendente dal numero di giri n e dal numero delle pale Z :

$$\omega = Z \cdot n / 60 \text{ (Hz), detta frequenza di pala}$$

(range: $5 \div 18$ Hz)

- Si scompone in tre forze e tre momenti sviluppabili in serie di Fourier:
 - F_x : spinta; creano vibrazioni assiali della linea d'asse
 - F_y, F_z : forze laterali; creano vibrazioni flessionali della linea d'asse
 - M_x : momento torcente; creano vibrazioni torsionali della linea d'asse
 - M_y, M_z : momenti laterali; creano vibrazioni flessionali della linea d'asse

Le forze ed i momenti laterali sono chiamati “bearing forces” in quanto agiscono sui cuscinetti (bearings) della linea d'asse

Si calcolano con buona approssimazione utilizzando la teoria della superficie portante non stazionaria



Correlazione tra scia e bearing forces

- Le armoniche che compaiono nello sviluppo della spinta (F_x) e della coppia (M_x) sono solamente quelle di ordine pari o multiplo del numero delle pale ($k*Z$)
- Le armoniche dello sviluppo delle forze ed i momenti laterali sono solo quelle di ordine $k*Z \pm 1$
- Per il rapporto causa-effetto tra le componenti armoniche C_n della scia e quelle dei carichi generati ne deriva che:
 - le armoniche di scia di ordine $k*Z$ influiscono sulle fluttuazioni di spinta e coppia
 - le armoniche di scia di ordine $k*Z \pm 1$ influiscono sulle fluttuazioni delle forze e dei momenti laterali
- Si intuisce quanto importante sia l'analisi armonica della scia e come essa possa essere una valida guida nella scelta del numero delle pale. Se, ad esempio, la scia ha una componente del 3° ordine molto elevata è sconsigliabile l'adozione di 4 pale nel caso lo scafo sia suscettibile a vibrazioni innescate da forze laterali

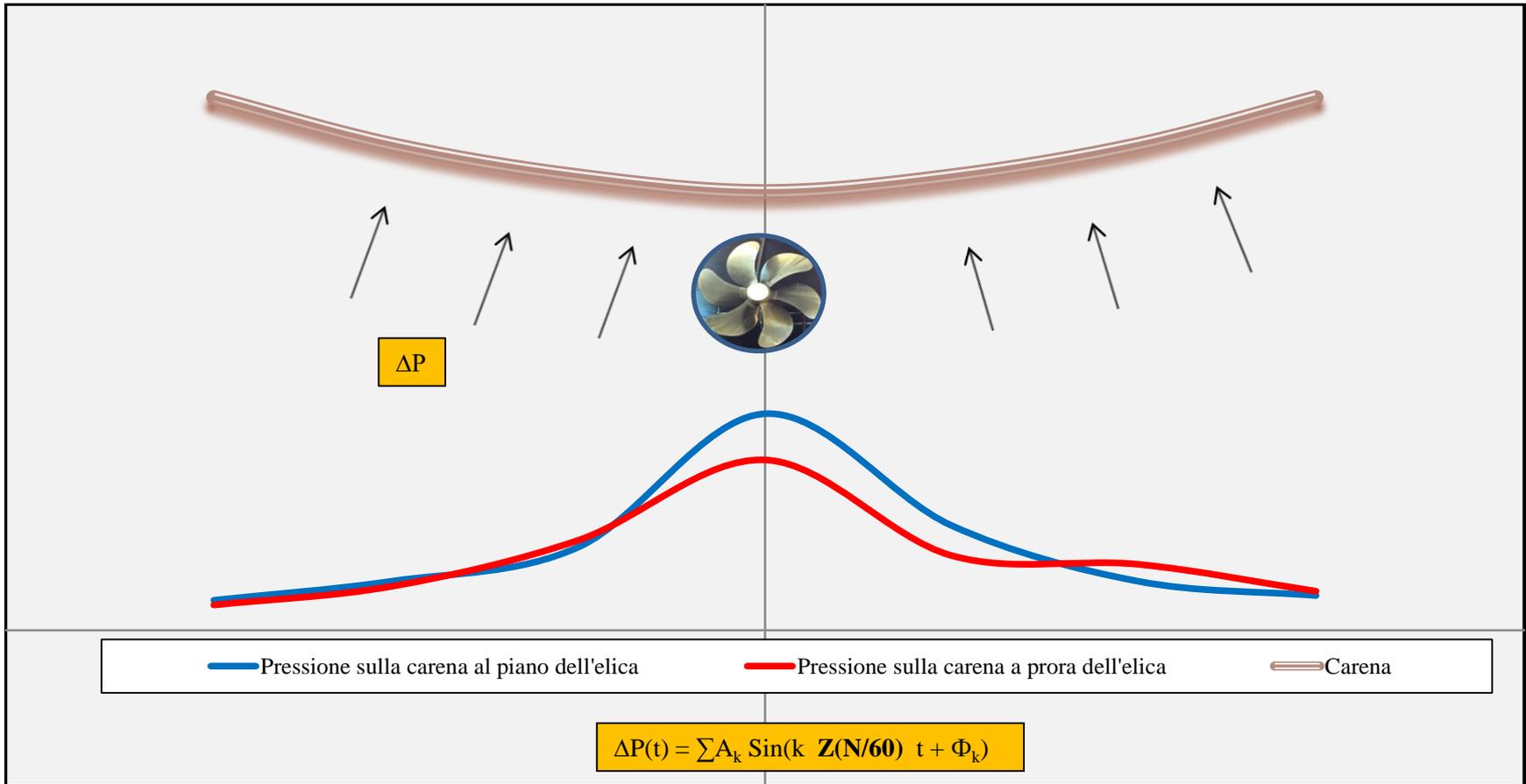


Pressione indotta sulla carena

- L'elica genera un campo di pressione non stazionario dovuto alla scia disuniforme. Si irradia nello spazio circostante ed è costituito da tre contributi:
 1. Carico idrodinamico sulle pale
 2. Cavitazione pulsante
 3. Variazione di carico dovuto alla cavitazione



Pressione indotta sulla carena



Pressione indotta sulla carena

Carico idrodinamico sulle pale

- La presenza di un carico idrodinamico solidale con le pale, e quindi ruotante con esse, è una perturbazione rispetto ad una situazione stazionaria
- Crea un'onda d'urto, cioè un campo di pressione variabile nel tempo con la frequenza di pala ($\text{RPM} \cdot Z / 60 \text{ Hz}$) ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente
- E' comunemente indicato come "contributo non cavitante"



Pressione indotta sulla carena

Cavitazione pulsante

- Indicato come “contributo cavitante”. Crea un campo di pressione pulsante con la frequenza di pala ed inversamente proporzionale alla distanza dalla sorgente
- E' maggiore del contributo non cavitante. Associato alla crescita ed al collasso delle bolle di cavitazione sulla superficie della pala
- Il contributo non dipende tanto dal volume cavitante quanto dalla rapidità delle sue variazioni cioè dall'accelerazione volumetrica che determina il carattere e l'intensità del campo di pressione
- La fase di crescita della bolla si presenta quando il bordo d'ingresso della pala entra nel picco di scia, cioè quando l'angolo d'attacco tende ad aumentare, mentre il collasso si verifica quando ne esce



Pressione indotta sulla carena

Cavitazione pulsante

- L'accelerazione volumetrica è più elevata nella fase di collasso che in quella di crescita, comportando un'onda d'urto più violenta
- Data la stretta correlazione tra scia e campo di pressione irradiato è essenziale che carena ed appendici siano ben progettate per ottenere una distribuzione di scia senza grossi picchi e con modesti gradienti
- Nel caso di navi bielica è preferibile scegliere il senso di rotazione dell'elica in modo che il gradiente sia più moderato nella fase di uscita che in quella di entrata



Pressione indotta sulla carena

Variazione di carico dovuto alla cavitazione

- E' incluso nel contributo cavitante ed è associato alla variazione di carico sulla pala conseguente alla presenza di bolle di cavitazione



Pressione indotta sulla carena

- L'onda d'urto creata dall'elica investe il fasciame esterno della nave in maniera tanto più violenta quanto più l'elica è vicina allo scafo. Si crea un campo di pressioni sulla volta di poppa, fonte di eccitazione per la struttura della nave
- La pressione P in ogni punto dello scafo è una funzione periodica con la frequenza di pala e come tale può essere sviluppata in serie di Fourier:

$$P(t) = A_0 + \sum A_k * \text{Sin}(k\omega t + \varphi_n) \quad k=1 \dots \infty$$

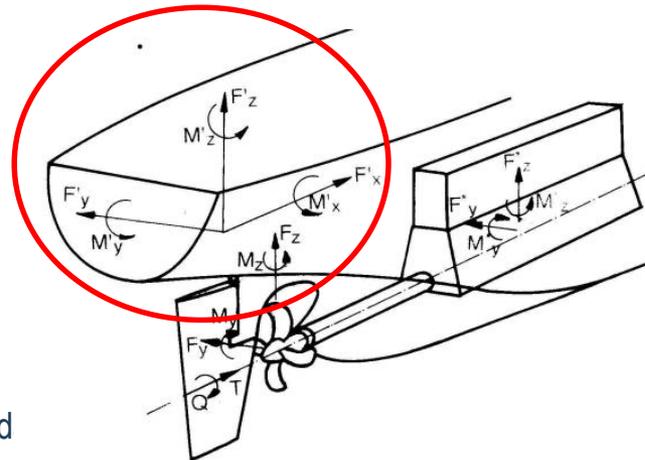
- La componente A_0 rappresenta il valore medio, di scarso interesse pratico, mentre le componenti A_1 , A_2 , ecc., dette rispettivamente 1^a armonica di pala, 2^a armonica di pala, ecc., caratterizzano la fluttuazione della pressione



Pressione e forza verticale indotte sulla carena

- L'integrazione delle pressioni sulla volta di poppa fornisce la forza totale agente sullo scafo. Si scompone lungo i 3 assi di riferimento (orizzontale, verticale, trasversale)
- La componente verticale $F_z(t)$ (forza verticale integrata) è la principale responsabile delle vibrazioni e del rumore irradiato a bordo
- E' funzione periodica con frequenza di pala e sviluppabile in serie di Fourier:

$$F_z(t) = B_0 + \sum B_k * \text{Sin}(k\omega t + \xi_n) \quad k=1 \dots \infty$$



Analisi armonica della pressione indotta

- L'analisi armonica della pressione e della forza integrata è particolarmente importante sia per il progetto dell'elica che per quello della struttura
- Se la pressione dipende dalla sola componente non cavitante il contenuto armonico si concentra prevalentemente sulla prima armonica di pala anche nel caso di presenza di cavitazione, purché limitata ed abbastanza stabile
- Quando il fenomeno cavitativo assume un aspetto esteso, instabile e fluttuante con volumi di cavitazione importanti, presenza di bolle e formazione di un intenso vortice d'estremità, le armoniche di ordine superiore cominciano a crescere
- Alti valori di armoniche di ordine superiore sono spesso accompagnati dalla presenza di frequenze "parassite" non corrispondenti a multipli dell'armonica di pala. Risultano pericolose in quanto distribuite su una vasta gamma di frequenze e quindi con maggior rischio di coincidere con le frequenze naturali della struttura



Analisi armonica della pressione indotta

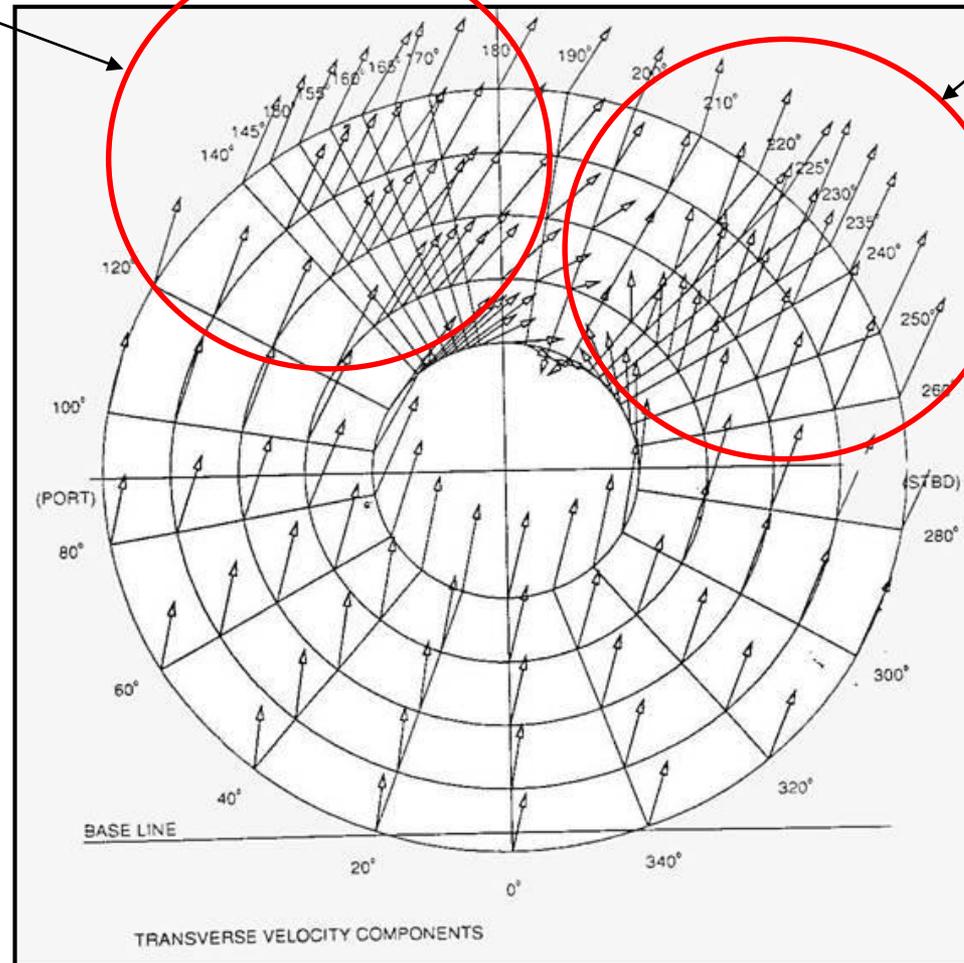
- Qualora le seconde e le terze armoniche assumano valori significativi è prudente eseguire un'analisi di frequenza in banda stretta della pressione (1Hz) per vedere quale sia il contributo delle frequenze intermedie
- Per navi bielica: se il campo di scia presenta componenti tangenziali non trascurabili si possono verificare elevati valori di seconda e terza armonica ed armoniche intermedie quando, a causa del verso di rotazione dell'elica, la scia tangenziale si somma alla velocità di rotazione, aumentando così l'angolo d'attacco (cosiddetto "effetto controelica"). Il fenomeno può essere limitato invertendo il senso di rotazione



Analisi armonica della pressione indotta

Componenti tangenziali elevate

Componenti tangenziali moderate



Determinazione delle pressioni e delle forze indotte

- In fase di progetto è necessario conoscere le pressioni indotte sulla carena e la forza verticale integrata per:
 - Utilizzare i dati come input nei calcoli delle vibrazioni dello scafo e del rumore irradiato a bordo
 - Verifica delle scelte progettuali dell'elica e della struttura
 - Verifica degli impegni contrattuali
- Strumenti
 - Nella fase preliminare del progetto: dati storici e di navi simili, formule statistiche elaborate da vasche navali, enti di ricerca e registri di classifica
 - Metodi teorici: teoria della superficie portante non stazionaria, metodo a pannelli. Affidabili per confrontare varie alternative progettuali
 - Prove su modello: sempre necessarie per la verifica finale. Riproduce il fenomeno fisico in modo più completo dei metodi teorici



Prove su modello

- La prova va condotta in canale di circolazione o vasca depressurizzata con un modello intero per realizzare le condizioni di flusso più realistiche possibile e per misurare adeguatamente la pressione indotta sullo scafo
- La misura si effettua con sensori di pressione sistemati sulla volta di poppa in numero adeguato ($15 \div 20$) per avere una mappatura completa su un'area sufficientemente estesa
- Se si vuole valutare il solo contributo dovuto alla cavitazione si esegue una prova a pressione atmosferica (indice di cavitazione elevato): si misura il contributo non cavitante che si confronta con quello totale relativo al corretto indice di cavitazione
- La misura di ogni sensore è sviluppata in serie di Fourier, solitamente fino alla 4^a armonica, ed anche in banda stretta (1 Hz) per individuare eventuali frequenze parassite pericolose sia dal punto di vista vibratorio che del rumore
- Le misure di ogni sensore vengono integrate sull'area racchiusa dai sensori stessi ottenendo così le tre componenti della forza che agisce sulla carena, anch'esse sviluppate in serie di Fourier



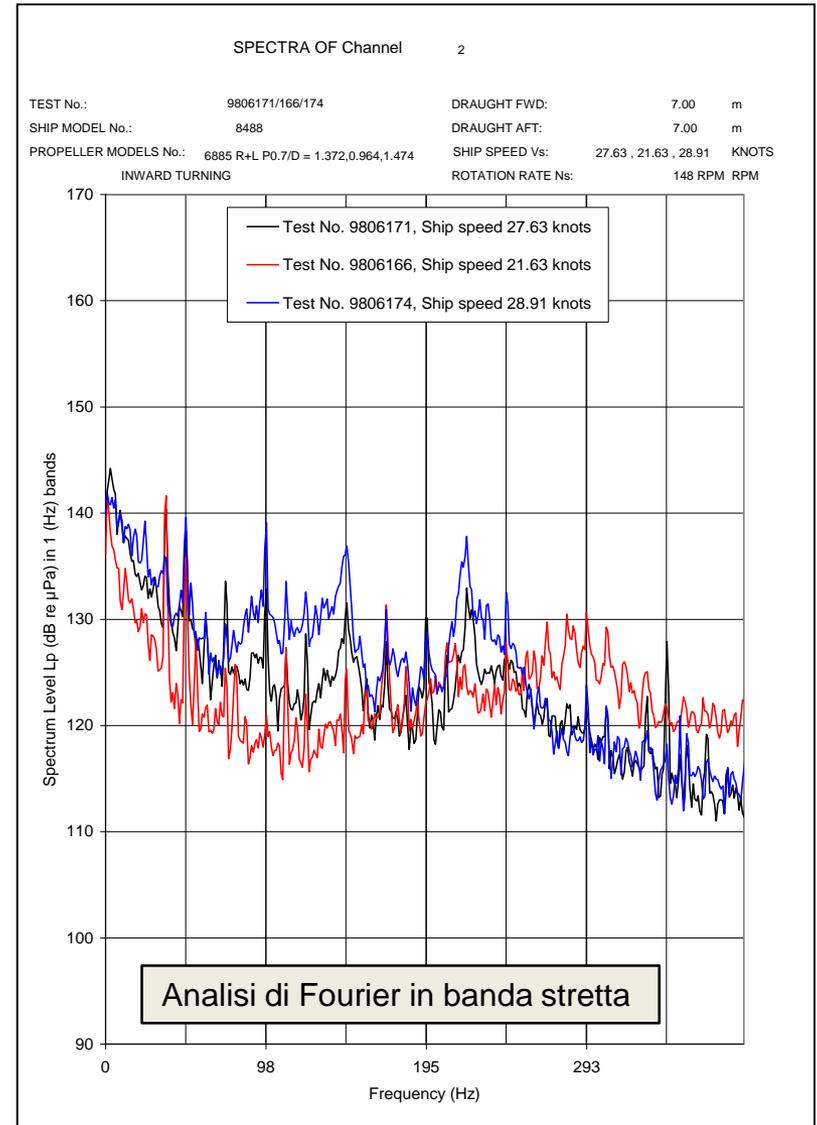
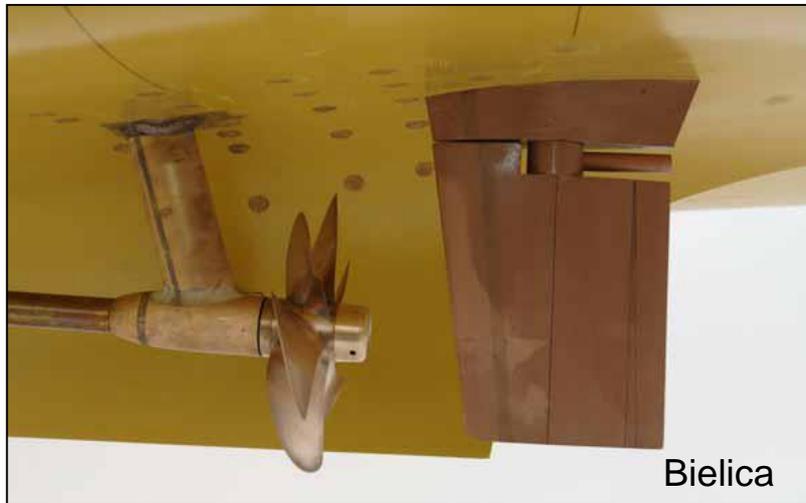
Prove su modello

Effetto scala

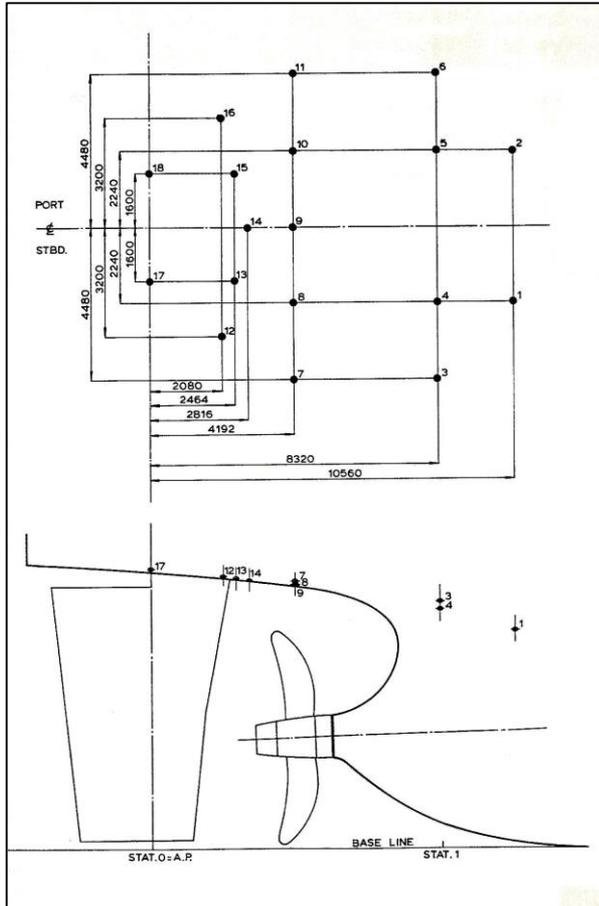
- Le prove di cavitazione sono molto sensibili all'effetto scala
- La visualizzazione della cavitazione e la valutazione delle forze eccitanti possono non essere sufficientemente realistiche
- La valutazione al vero di alcuni fenomeni, come il vortice d'estremità, non sono ancora pienamente soddisfacenti
- Fattori di correzione: derivano da rilievi al vero delle pressioni indotte e dello sviluppo della cavitazione con telecamere o finestre sistemate sulla volta di poppa
- Prove in mare: indispensabili per ottenere per un continuo aggiornamento della metodologia di progettazione e per accrescere il patrimonio tecnico aziendale



Prove su modello



Prove su modello



HARMONIC COMPONENTS OF PROPELLER INDUCED PRESSURE FLUCTUATIONS.
NOT CORRECTED FOR VIBRATIONS.

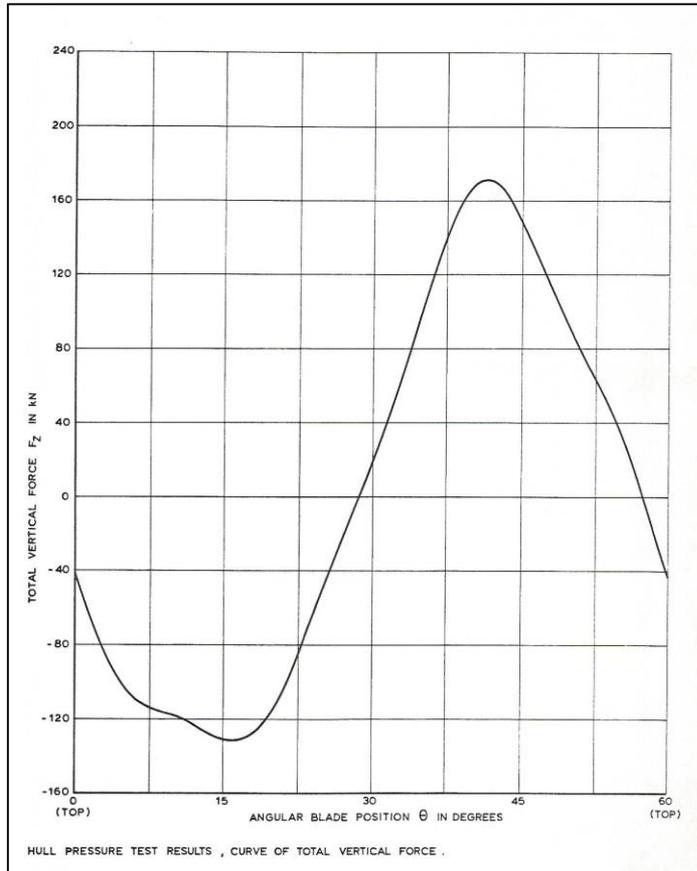
AMPL. IS GIVEN IN KPA FOR SHIP AND PHASE IN DEGREES.

PICK-UP NO.	1. HARMONICS		2. HARMONICS		3. HARMONICS		4. HARMONICS	
	AMPL.	PHASE	AMPL.	PHASE	AMPL.	PHASE	AMPL.	PHASE
1	.38	155	.04	-123	.08	-131	.12	91
2	.64	179	.01	170	.13	96	.02	79
3	.49	167	.09	-96	.05	-72	.10	158
4	.75	174	.10	-65	.08	-91	.17	131
5	.95	-175	.07	-38	.11	80	.02	39
6	.60	-167	.04	-35	.07	152	.04	-18
7	.83	-173	.19	-47	.08	-25	.21	-131
8	1.93	-168	.30	-32	.15	-40	.51	-144
9	5.35	-165	.68	-141	.05	-14	.03	27
10	2.06	-159	.33	21	.18	131	.12	169
11	.92	-154	.15	-7	.13	115	.02	67
12	1.14	-164	.29	-26	.08	-14	.39	-115
13	2.16	-162	.46	-14	.10	-20	.60	-141
14	3.62	-150	.85	16	.33	136	.51	-150
15	2.35	-143	.61	29	.34	142	.24	-179
16	1.25	-144	.26	20	.18	153	.10	170
17	1.02	-179	.34	-67	.03	-50	.28	147
18	1.12	-164	.27	-39	.15	86	.09	62

Analisi armonica delle pressioni indotte



Prove su modello



HARMONIC COMPONENTS OF PROPELLER-INDUCED HYDRODYNAMIC FORCES ON THE HULL (FULL SIZE VALUES). NOT CORRECTED FOR VIBRATIONS

COMPONENT	1. HARMONICS		2. HARMONICS		3. HARMONICS		4. HARMONICS	
	AMPL.	PHASE	AMPL.	PHASE	AMPL.	PHASE	AMPL.	PHASE
FX	27.3	-169	2.2	-69	.5	101	1.1	178
FY	2.4	66	.7	-94	1.1	-73	.7	-176
FZ	145.6	-166	16.2	-43	3.4	107	9.1	-171
MX	40.4	-103	16.3	72	23.8	124	22.9	29
MY	106.9	-14	25.0	22	2.2	91	11.9	-126
MZ	13.8	60	3.7	-102	6.9	-76	4.3	168

AMPLITUDES OF FX, FY, FZ IN KN.
AMPLITUDES OF MX, MY, MZ IN KN. M
PHASE ANGLES IN DEGREES

FX = LONGITUDINAL FORCE, POSITIVE IN FORWARD DIRECTION
FY = TRANSVERSE FORCE, POSITIVE IN PORT DIRECTION
FZ = VERTICAL FORCE, POSITIVE IN UPWARD DIRECTION

MX = LONGITUDINAL MOMENT(VECTOR), POSITIVE IN FORWARD DIRECTION
MY = TRANSVERSE MOMENT(VECTOR), POSITIVE IN PORT DIRECTION
MZ = VERTICAL MOMENT(VECTOR), POSITIVE IN UPWARD DIRECTION

CENTRE OF COORDINATE SYSTEM 4.1 M FROM STAT. 0
.0 M FROM CL SHIP
7.7 M FROM BASE LINE

(SEE ALSO THE COORDINATE SYSTEM ON PAGE A2.8).

Analisi armonica delle forze integrate



Criteri progettuali

- Varie vasche navali e registri di classifica hanno sviluppato alcuni criteri pratici derivati da analisi di regressione di misure di pressione e vibrazioni al vero
- Utilizzabili per la determinazione del livello massimo ammissibile della pressione indotta
- Permettono di individuare nelle fasi preliminari eventuali criticità
- Vanno considerati come semplici linee guida nelle fasi iniziali del progetto della nave (carena, elica, struttura scafo)



Criteri progettuali

Forza verticale equivalente

- Forza equivalente F_{eq} : indicatore di rischio correlato con la quantità di energia trasmessa dall'elica alla carena. Indica la pericolosità della forza eccitante
- Valuta il rischio in base al valore di F_z e delle componenti armoniche F_i
- Attribuisce maggior peso e potenziale pericolo alle armoniche di ordine superiore con frequenze solitamente più prossime alle frequenze naturali della struttura dello scafo
- Criterio di accettabilità: $F_{eq} < R$

$$F_{eq} = (\sum (i \cdot F_i^2))^{0.5} \quad i = 1, \dots, 4$$

$$R = (k \cdot \Delta / 1000) \cdot (0.75 + 75 / L_{pp})$$

- F_i in kN
- k : 3 per navi traghetto e passeggeri
- Δ : Dislocamento in tonnellate
- L_{pp} : Lunghezza tra le perpendicolari in m



Criteri progettuali

- **Criterio HSVA**

$$K = 2P/(nD)^2 < 0:04$$

2P ampiezza doppia di pressione [kPa]

n numero di giri dell'elica [rps]

D diametro dell'elica [m]

- **Criterio di Holden**

Derivato da analisi di regressione di misure al vero per le ampiezze di pressione massime ammissibili in un punto della poppa davanti alla punta della pala nella posizione delle ore 12 dell'orologio

$$P_{cb} = 60400/(f_c(B/2 + 1)) (T_A/D)^{1,5} \quad (\text{Pa})$$

f_c frequenza di pala [Hz]

B larghezza della linea d'acqua a poppa [m]

T_A immersione a poppa [m]

D altezza di costruzione [m]



Criteri progettuali

- Navi da crociera e traghetti (valori della 1^a armonica)
 - Pressione massima: $1.2 \div 1.5$ kPa
 - Componente verticale della forza integrata: $30 \div 50$ kN
- Navi da carico monoelica, soprattutto portacontainer veloci caratterizzati da una carena sottile ed una distribuzione di scia con elevati gradienti
 - Pressione massima: $4 \div 7$ kPa
 - Componente verticale della forza integrata: $100 \div 150$ kN



Criteri progettuali

Il Clearance

- La distanza tra il disco dell'elica e la carena (clearance) è importante dato che la pressione indotta diminuisce all'allontanarsi dalla sorgente
- Varie formulazioni suggerite dai registri di classifica (L.R. e DnV)
- Riferimento per una nave passeggeri: $27 \div 28\%$ del diametro dell'elica
- La determinazione del clearance va fatta valutando il diametro ottimale dell'elica e successivamente progettando le forme delle sezioni poppiere della carena per garantire i valori ottimali della distanza tra pala e scafo
- La scelta del clearance non deve essere fatta a scapito di una riduzione del diametro ottimale dell'elica. Ciò comporta una diminuzione dell'area disco ed un aumento del carico specifico ($C_T = T/(\rho/2 A_0 V_a^2)$) con conseguente incremento del volume di cavitazione e delle pressioni indotte
- L' aumento della distanza elica-carena realizzato in questo modo annulla i benefici in quanto comporta un peggior comportamento cavitativo

