



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE

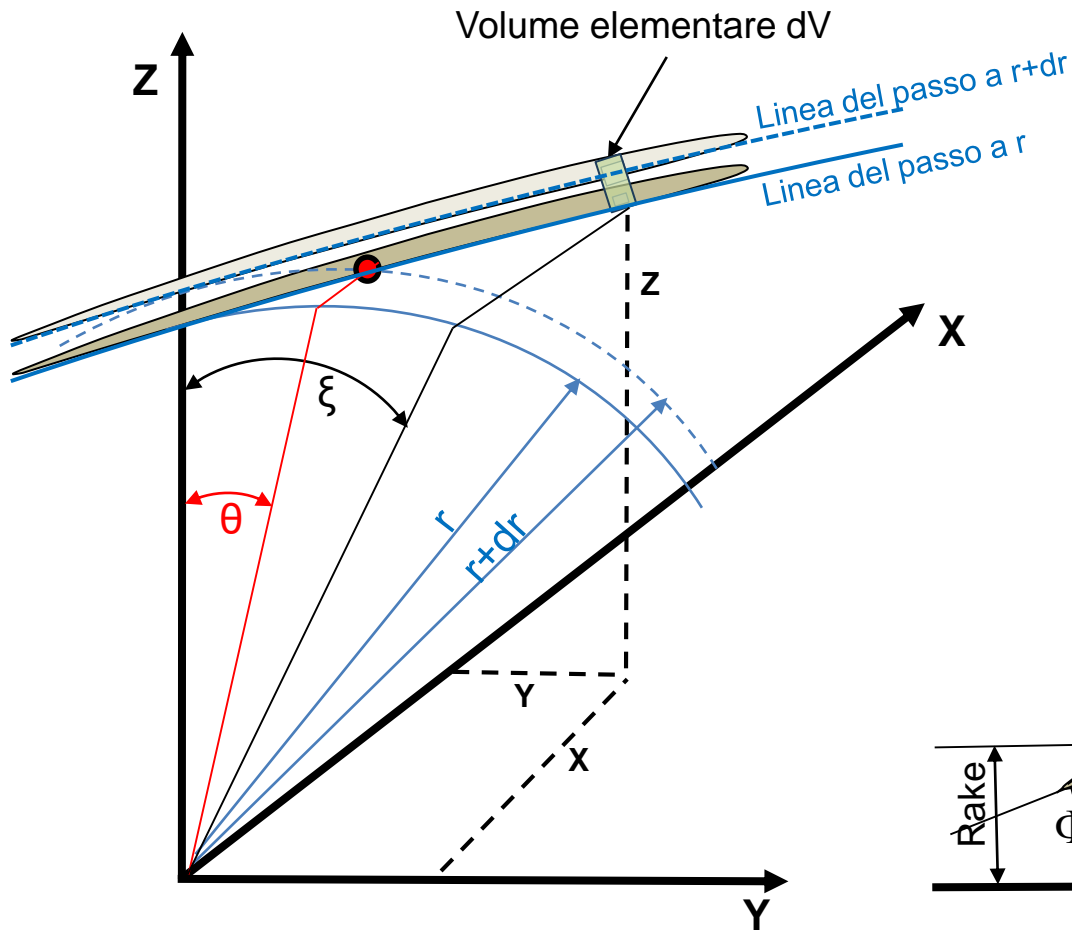
Corso di
Propulsione

Robustezza delle Eliche

Prof. Paolo Frandoli

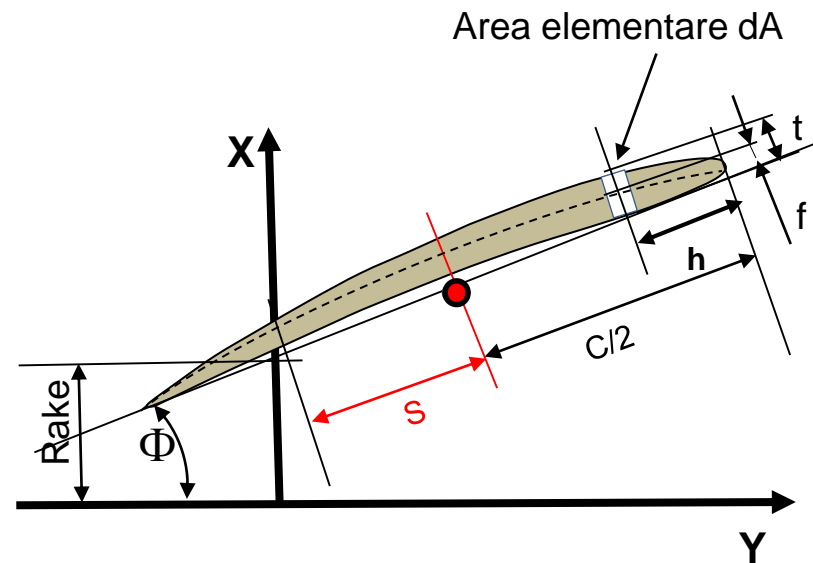
AA 2022-2023

Proprietà meccaniche della pala



Area elementare: $dA = t dh$

Volume elementare: $dV = dA dr$



$$\theta = (S \cos \Phi) / 2\pi x R$$



Proprietà meccaniche della pala

$$\xi = -\theta + \frac{\left(\frac{C}{2} - h\right) \cos(\phi)}{r}$$

$$X = \xi r \tan(\phi) - \text{Rake} + f \cos(\phi)$$

$$Y = r \sin(\xi) - f \sin(\phi)$$

$$Z = r \cos\left(\xi - \frac{f \sin(\phi)}{r}\right)$$

Nota: angoli in radianti

T.E.															L.E.		
1	0,95	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,45	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,013	0	h/C		
0,02	0,2358	0,4196	0,6998	0,8782	0,9725	1,0000	0,4970	0,9757	0,9029	0,7772	0,5760	0,4182	0,2152	0,0640		Profilo NACA 16	
0,02	0,8160	0,2108	0,4988	0,7574	0,9330	0,9942	1,0000	0,9906	0,9272	0,8002	0,5834	0,4174	0,2282	0,0742	t/t _{max}	Profilo NACA 66	
0,067	0,2286	0,3754	0,6220	0,8070	0,9306	0,9924	1,0000	0,9904	0,9346	0,8000	0,5814	0,4132	0,2088	0,0600		Profilo NACA 66 mod.	
0	0,1713	0,3586	0,7027	0,8892	0,9786	1,0000	0,9881	0,9615	0,8635	0,6993	0,4482	0,2712	0,0907	0,0000	f/f _{max}	Linea media NACA a=0,8	

Coefficiente di finezza del profilo

NACA 16: 0,732

NACA 66 e 66mod: 0,83



Proprietà meccaniche della pala

- $A(r) = \int_0^C t(h)dh$ *Area del profilo*
- $V = \int_{R_h}^R A(r)dr$ *Volume della pala*
- $S_X = \int_{R_h}^R \int_0^C X(h,r) * t(h,r)dhdr$ *Mom. Statico rispetto piano ZY*
- $S_Y = \int_{R_h}^R \int_0^C Y(h,r) * t(h,r)dhdr$ *Mom. Statico rispetto piano ZX*
- $S_Z = \int_{R_h}^R \int_0^C Z(h,r) * t(h,r)dhdr$ *Mom. Statico rispetto piano XY*

- $X_G = \frac{S_X}{V}$
 - $Y_G = \frac{S_Y}{V}$
 - $Z_G = \frac{S_Z}{V}$
- Coordinate del baricentro della pala*



Proprietà meccaniche della pala

- *Momento polare rispetto asse di rotazione X (solo pala)*

$$I_{Pb0} = \int_{R_h}^R \int_0^C (Y^2(h, r) + Z^2(h, r)) * t(h, r) dh dr$$

- *Momento polare dell'acqua trascinata (formula empirica)*

$$I_{Ptr} = \frac{\pi R^5}{1,05 + 9,6((Ae/A_0)/Z)^2} \int_{R_h}^R \left(\frac{C(r)}{D} \sin\phi(x) x \right)^2$$

- *Momento polare totale di massa delle pale:* $I_{Pb} = Z \gamma (I_{Pb0} + I_{Ptr})$

- *Momento centrifugo X - Y*

$$I_{XY} = \int_{R_h}^R \int_0^C (X(h, r) * Y(h, r)) * t(h, r) dh dr$$



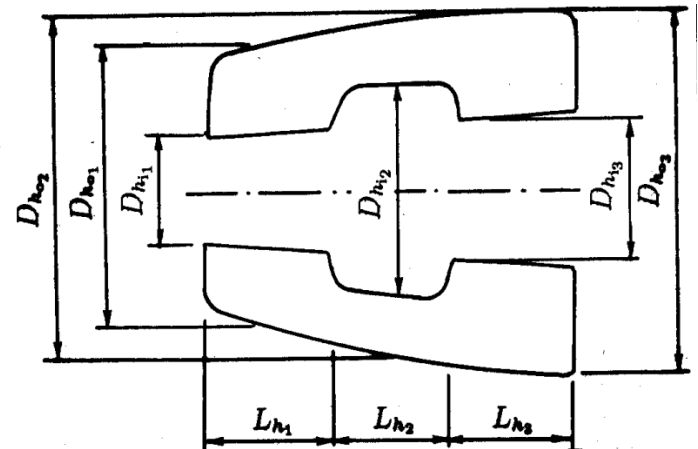
Proprietà meccaniche della pala

- *Peso della pala: $W = \gamma V$*
 - *Pale fisse: aggiungere i raccordi con mozzo*
 - *Pale orientabili: aggiungere la flangia di accoppiamento con il mozzo*

- *Peso del mozzo (eliche a pale fisse)*

Si suddivide il mozzo in n elementi anulari .Il peso è dato dall'espressione

$$W_{\text{Mozzo}} = \frac{\pi\gamma}{4} \sum_{j=1}^n L_{h_j} (D_{h_{oj}}^2 - D_{h_{ij}}^2)$$

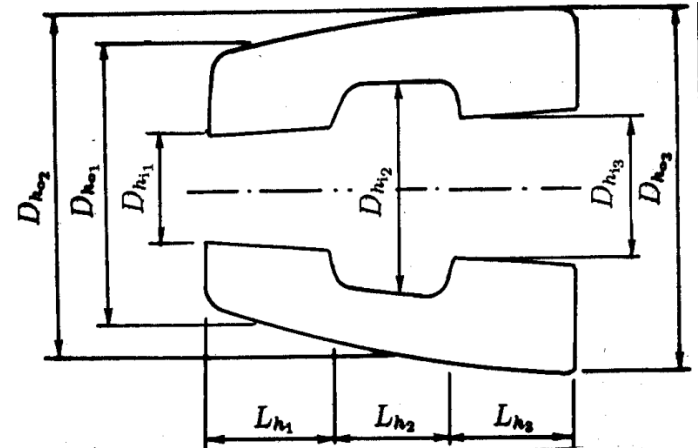


- *Peso mozzo: 30 ÷ 40 % peso elica (pale fisse)*
- *Peso mozzo: 45 ÷ 55 % peso elica (pale orientabili)*

Proprietà meccaniche della pala

- *Momento polare di massa del mozzo*

$$I_{P_{Mozzo}} = \frac{\pi \gamma}{32} \sum_{j=1}^n L_{h_j} (D_{h_{oj}}^4 - D_{h_{ij}}^4)$$



- *Momento polare di massa dell'elica*

$$I_{PElica} = I_{Pb} + I_{PMozzo}$$

- *Momento dinamico*

$$GD^2 = 4g I_{PElica}$$

- *G: peso totale elica*
- *D=2 ρ*
- *ρ: raggio di girazione*



Proprietà meccaniche della pala

Formule empiriche

Schönherr

$$W_{\text{pala}} = 1.982 \cdot \gamma \cdot \frac{t_0}{D} \cdot \frac{A_D}{A_0} \cdot R^3 \quad (\text{kg})$$

$$I_{P_{\text{pala}}} = 0.2745 \cdot W_{\text{pala}} \cdot R^2$$

- γ : peso specifico del materiale in kg/m^3
- t_0 : spessore teorico della pala sull'asse di rotazione

Keller

$$W_{\text{pala}} = 0.309 \cdot \gamma \cdot D^2 \cdot \frac{A_D}{A_0} \cdot t_{0.2R}$$

$$W_{\text{mozzo}} = \gamma \cdot \frac{\pi D_h^2}{4} \cdot \frac{L_{\text{mozzo}}}{48}$$

$$I_{P_{\text{pala}}} = \frac{0.085}{4g} \cdot \gamma \cdot D^4 \cdot \frac{A_D}{A_0} \cdot t_{0.2R}$$

$$I_{P_{\text{mozzo}}} = \text{calcolo diretto o maggiorazione del 2.5\%}$$

Coordinata radiale del baricentro della pala

$$r_G = r_x + 0,32 (R - r_x) \quad r_G: \text{coordinata della parte di pala tra } r_x \text{ e } R$$



Carico Idrodinamico

Forze per pala

$$\text{Forza assiale} \quad F_{T_x} = \int_{r_x}^R dF_{T_x} dr = \frac{1}{2} \rho \int_{r_x}^R C_L \cdot C \cdot V_R^2 \cdot \frac{\cos(\beta_i + \gamma)}{\cos \gamma} dr$$

$$\text{Forza trasversale} \quad F_{Q_x} = \int_{r_x}^R dF_{Q_x} dr = \frac{1}{2} \rho \int_{r_x}^R C_D \cdot C \cdot V_R^2 \cdot \frac{\sin(\beta_i + \gamma)}{\cos \gamma} dr$$

Punti di applicazione

$$r_{F_{T_x}} = \frac{\int_{r_x}^R dF_{T_x} \cdot r dr}{\int_{r_x}^R dF_{T_x} dr}$$

$$r_{F_{Q_x}} = \frac{\int_{r_x}^R dF_{Q_x} \cdot r dr}{\int_{r_x}^R dF_{Q_x} dr}$$

Momenti flettenti (Generalmente non si considerano forze di taglio e torsionali)

$$M_{BF_{T_x}} = F_{T_x} \cdot (r_{F_{T_x}} - r_x)$$

$$M_{BF_{Q_x}} = F_{Q_x} \cdot (r_{F_{Q_x}} - r_x)$$



Standardizzazione del Carico Idrodinamico

Distribuzioni standard da applicare in assenza di dati precisi sulla distribuzione radiale della spinta e del momento torcente

$$M_{BF_T} = f_{F_T}(r_x) \cdot F_{Tx}$$

$$M_{BF_Q} = f_{F_Q}(r_x) \cdot F_{Qx}$$

I coefficienti f_{F_T} e f_{F_Q} sono funzioni di r_x , fornite in forma tabulare per:

- eliche a passo radialmente costante in flusso omogeneo
- eliche a passo radialmente costante in flusso disomogeneo
- eliche a passo variabile in flusso disomogeneo

Posizioni radiali	Campo di scia omogeneo Passo costante		Campo di scia variabile Passo costante		Campo di scia variabile Passo variabile	
	f_{F_T}	f_{F_Q}	f_{F_T}	f_{F_Q}	f_{F_T}	f_{F_Q}
0.2	0.4810	0.4230	0.4440	0.3780	0.4640	0.4060
0.3	0.3840	0.3260	0.3480	0.2830	0.3640	0.3090
0.4	0.2910	0.2380	0.2570	0.2020	0.2730	0.2230
0.5	0.2050	0.1640	0.1760	0.1360	0.1910	0.1490
0.6	0.1300	0.1030	0.1080	0.0830	0.1200	0.0899
0.7	0.0700	0.0555	0.0575	0.0440	0.0644	0.0464
0.8	0.0300	0.0235	0.0225	0.0175	0.0254	0.0182
0.9	0.0080	0.0060	0.0040	0.0030	0.0048	0.0032
r_{F_Q}		0.623R		0.578R		0.606R



Carico Meccanico

- Per ogni sezione al raggio r il carico meccanico è funzione della massa della pala tra il raggio r ed il raggio dell'elica R . Si compone di
 - Forza centrifuga
 - Momento flettente centrifugo
 - Momento torcente centrifugo
- Il carico centrifugo genera inoltre un momento torcente rispetto agli assi Y e Z. Il momento rispetto Z contribuisce allo spindle torque
- Esistono metodi di calcolo (Romson e Taylor) per eliche di forma semplice e quasi simmetriche. Quello di Keyser & Arnoldus (1959) è applicato per tensioni centrifughe delle eliche della Serie-B di Wageningen
- La componente meccanica è generalmente inferiore a quella idrodinamica, ma assume valori importanti soprattutto per eliche con elevato skew

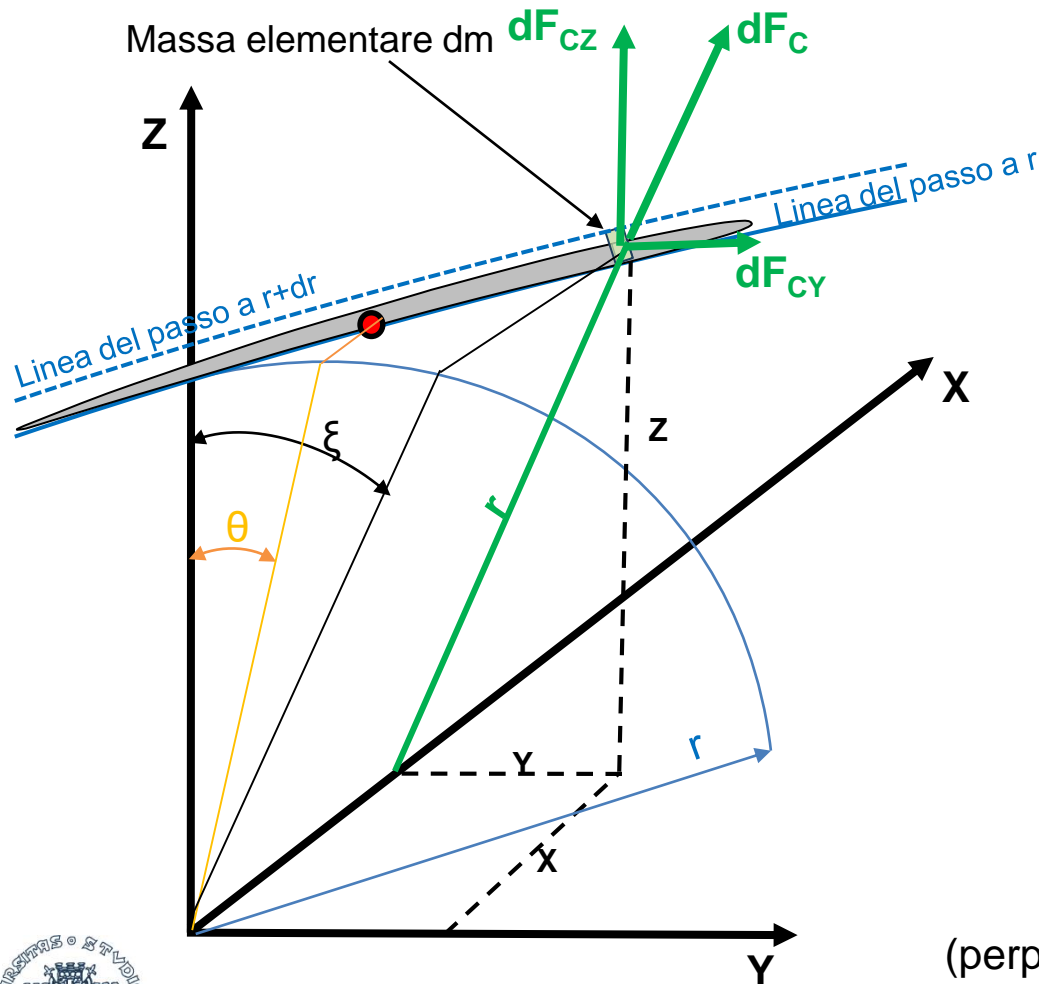


Forza centrifuga elementare

Area elementare: $dA = t \, dh$

Volume elementare: $dV = dA \, dr$

Massa elementare: $dm = \gamma \, dV \, dr$



$$dF_C = dm \, \Omega^2 \, r$$

$$dF_{Cx} = 0$$

$$dF_{Cy} = dm \, \Omega^2 \, Y$$

$$dF_{Cz} = dm \, \Omega^2 \, Z$$

oppure

$$dF_{Cy} = dF_C \sin \xi$$

(tangente al profilo alare)

$$dF_{Cz} = dF_C \cos \xi$$

(perpendicolare al piano del profilo alare)



Forza centrifuga

Forza centrifuga relativa a tutta la pala

$$F_C = \gamma \Omega^2 \int_{R_h}^R \int_0^C r * t(h, r) dh dr = \gamma \Omega^2 * V * r_G :$$

- V : volume della pala
- r_G : coordinata radiale del baricentro della pala
- Perpendicolare all'asse di rotazione X

$$F_{CX} = 0$$

$$F_{CY} = \gamma \Omega^2 \int_{R_h}^R \int_0^C Y(h, r) * t(h, r) dh dr = \gamma \Omega^2 * S_Y$$

$$F_{CZ} = \gamma \Omega^2 \int_{R_h}^R \int_0^C Z(h, r) * t(h, r) dh dr = \gamma \Omega^2 * S_Z$$



Forza centrifuga

Momenti di tutta la pala rispetto ai tre assi

$$M_{CX} = 0$$

$$M_{CY} = F_{CZ} * X = \gamma \Omega^2 \int_{R_h}^R \int_0^C X(h, r) Z(h, r) * t(h, r) dh dr = \gamma \Omega^2 * I_{XZ}$$

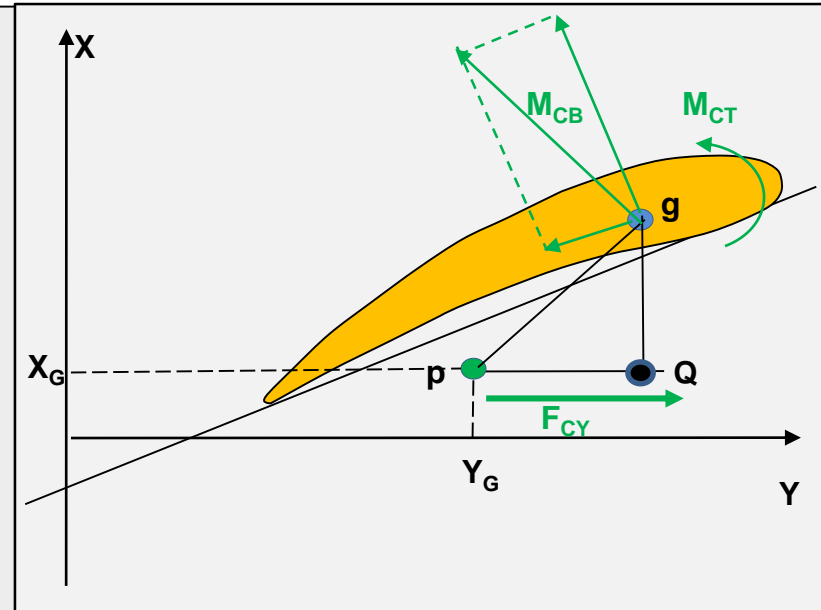
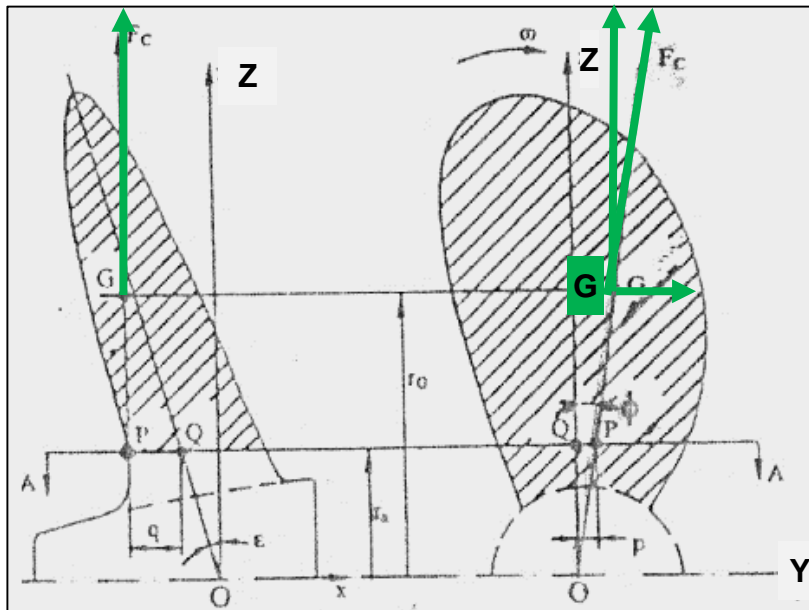
$$M_{CZ} = F_{CY} * X = \gamma \Omega^2 \int_{R_h}^R \int_0^C X(h, r) Y(h, r) * t(h, r) dh dr = \gamma \Omega^2 * I_{XY}$$

M_{CZ} : Contributo della forza centrifuga allo spindle torque



Forze e Momenti Prodotti dalla Forza Centrifuga

- Forza di trazione F_{CZ}
- Forza di taglio F_{CY}
- Momento flettente $M_{CB} = F_{CZ} \cdot \overline{Pg}$ (scomponibile in longitudinale e trasversale)
- Momento torcente $M_{CT} = F_{CY} \cdot \overline{Qg}$
- P: intersezione di F_c con il piano del profilo rettificato
- g: baricentro del profilo
- Φ : coordinata angolare del baricentro della porzione di pala tra r e R



Calcolo delle sollecitazioni

- La complessità geometrica della pala rende estremamente problematico calcolare con la dovuta accuratezza le tensioni risultanti dalle forze idrodinamiche e centrifughe
- Ragionevole accuratezza per i carichi in marcia avanti a velocità costante in acqua calma
- Difficile determinare il carico su un'elica in mare ondoso e durante le manovre di marcia indietro ed arresto forzato
- La variazione ciclica delle forze a seguito della disomogeneità della scia genera carichi dinamici e fenomeni di fatica
- Ipotesi semplificative hanno portato a regole pratiche, di natura statica, da parte degli organismi di controllo



Calcolo delle sollecitazioni

Metodologie di calcolo

- **Teoria della trave incastrata** (Taylor, 1933)
Sviluppi (Rösingh, 1937, Romson, 1952, Burrill, 1959; Schönherr, 1963, Carlton, 1984)
- **Teoria delle pareti sottili** (Conolly 1961)
Sviluppi (Cohen, 1971, Atkinson, 1973)
- **Metodo agli elementi finiti**
Metodologia di calcolo largamente utilizzata in particolare per eliche con elevato skew e nelle condizioni di «off design» (marcia indietro, arresto forzato, ecc)



Metodo della Trave Incastrata

- La pala è assimilata ad una trave incastrata nel mozzo sottoposta a:
 - momento flettente generato dalle forze idrodinamiche
 - trazione e momento flettente generato dalle forze d'inerzia
 - si trascura il momento torcente
- Teoria della flessione semplice su sezioni cilindriche di pala che hanno facce piane e dorsi incurvati, con gli assi neutri scelti parallelamente e perpendicolarmente alla linea della corda della sezione espansa
- Fornisce risultati sufficientemente accurati per pale simmetriche e per valori moderati dell'area espansa (pala stretta)
- Inadeguato per pale con elevato skew e rake



Metodo della Trave Incastrata

Il metodo utilizza ipotesi semplificative

- La sezione nella quale la pala si romperebbe se sovraccaricata, approssimata mediante una sezione piana, ha le stesse proprietà geometriche della corrispondente sezione cilindrica con distanza radiale costante dall'asse di rotazione (si ipotizza che la sezione sia piana)
- I centri delle aree di tutte le sezioni cilindriche di pala si trovano su una retta che interseca l'asse di rotazione ed è normale a questo asse
- Gli assi principali d'inerzia della sezione cilindrica di pala coincidono con due assi perpendicolari, intersecantesi nel centroide della sezione, e dei quali uno è parallelo alla corda
- L'asse neutro è parallelo alla linea del passo
- La tensione massima di compressione sul dorso è maggiore della tensione massima di trazione sulla faccia



Metodo della Trave Incastrata

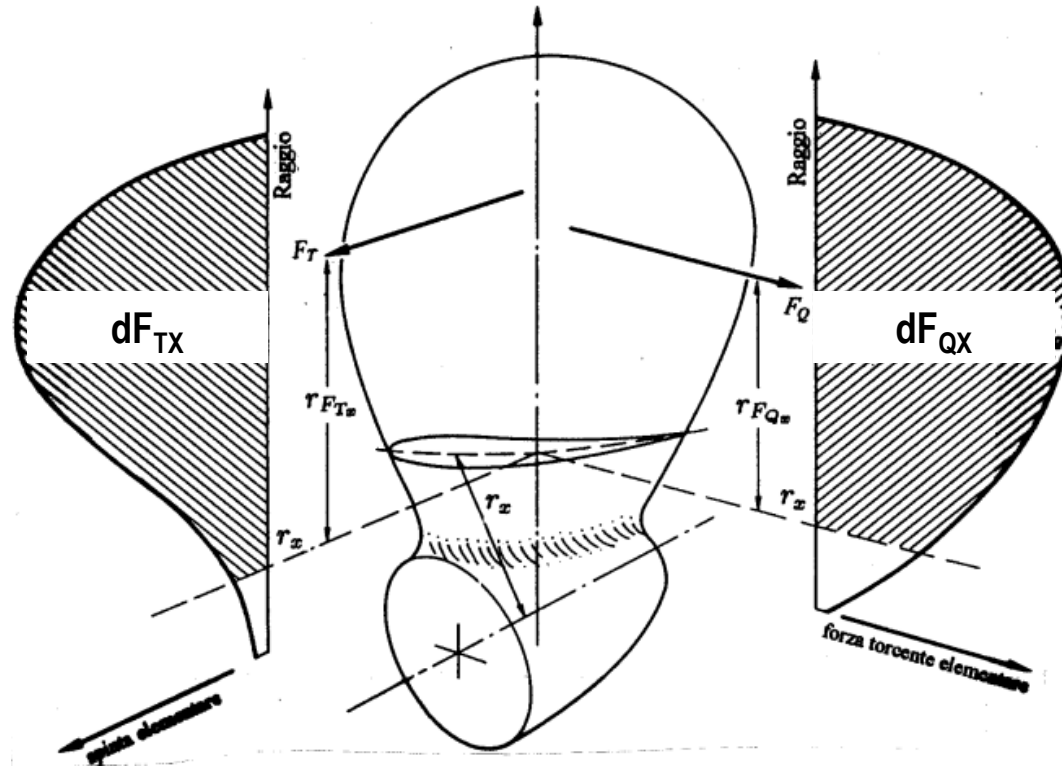
Tensione massima sulla sezione di pala alla radice

Momento flettente (idrodinamico + centrifugo) \rightarrow

$$\sigma = \frac{M_B}{W} + \frac{F_C}{A}$$

modulo di resistenza \rightarrow W \leftarrow Area della sezione

F_C \leftarrow forza centrifuga



Distribuzione radiale del carico idrodinamico



Metodo della Trave Incastrata

Tensioni sulla sezione della pala

$$\sigma = \sigma_{F_T} + \sigma_{F_Q} + \sigma_{CBM} + \sigma_{F_C} < \sigma_{amm}$$

- σ_{F_T} Dovuta al momento flettente generato dalla spinta F_{TX}
- σ_{F_Q} Dovuta al momento flettente generato dalla forza trasversale F_{QX}
- σ_{CBM} Dovuta al momento flettente centrifugo
- σ_{F_C} Dovuta alla forza centrifuga



Teoria della parete sottile

Metodo di Conolly

- Si ipotizza che la pala sia una parete elicoidale elastica di spessore variabile, fissata alla radice
- La soluzione approssimata proposta da Conolly per il calcolo delle tensioni considera un'elica di passo P radialmente costante di raggio R , senza 'skew' e senza 'rake', la cui superficie media fa parte di una superficie elicoidale
- Le equazioni che forniscono il momento flettente sono state trasformate in forme convenienti per il calcolo delle tensioni su qualunque elica

$$M_{BN} = \frac{RK}{Z} \left(A_1 \frac{2\pi R}{P} T + A_2 \frac{Q}{R} \right) = \sigma_r C t^2$$

$$M_{BT} = \frac{RK}{Z} \left(B_1 \frac{2\pi R}{P} T + B_2 \frac{Q}{R} \right) = \sigma_\theta C t^2$$

t: spessore massimo

C: corda del profilo

T: spinta dell'elica

Q: momento torcente

Z: numero delle pale



Teoria della parete sottile

Metodo di Conolly

- La massima sollecitazione di trazione dovuta alle forze centrifughe si può valutare con la seguente formula proposta da Conolly

$$\sigma_t = \frac{(NR)^2}{10^{10}} \left(C_1 + C_2 \frac{R \tan(\varepsilon)}{t} \cos\Phi \right)$$

N: giri al secondo

ε : angolo d'inclinazione della pala (rake lineare, positivo verso poppa)

R, t: espressi in pollici



Teoria della parete sottile

Metodo di Conolly

Valutazione del valore minimo del modulo di resistenza Ct^2

- Non si considera il momento M_{BT} in quanto trascurabile
- Si assume un valore della tensione massima ammissibile σ_{amm} per la sollecitazione a sola flessione

$$Ct^2 = \frac{M_{BN}}{\sigma_{amm}}$$

$$M_{BN} = \frac{RK}{Z} \left(A_1 \frac{2\pi R}{P} T + A_2 \frac{Q}{R} \right)$$



Teoria della parete sottile

Metodo di Conolly

SECTION SHAPE COEFFICIENT K

x	Segmental	Elliptic	Aerofoil
0.2	0.1203	0.0963	0.1070
0.3	0.1207	0.0970	0.1076
0.4	0.1007	0.0813	0.0900
0.5	0.0720	0.0586	0.0647
0.6	0.0437	0.0360	0.0395
0.7	0.0214	0.0180	0.0195
0.8	0.0075	0.0065	0.0070
0.9	0.0013	0.0013	0.0013
1.0	0	0	0

CENTRIFUGAL STRESS COEFFICIENTS

x	C ₁	C ₂
0.2	16.6	57.4
0.3	12.0	33.5
0.4	9.5	21.1
0.5	7.7	13.4
0.6	6.2	8.3
0.7	4.8	4.6
0.8	3.4	2.1
0.9	1.9	0.6
1.0	0	0



Teoria della parete sottile

Metodo di Conolly

FUNCTION A₂

α	x						
x	1	2	3	4	5	6	7
0.2	71.00	66.20	59.00	51.58	45.54	40.37	36.00
0.3	53.85	48.05	40.25	33.25	28.14	24.30	21.09
0.4	46.47	39.91	32.09	25.77	21.50	18.44	15.80
0.5	43.47	36.34	28.66	22.78	18.94	16.19	13.89
0.6	43.15	35.55	27.80	22.12	18.36	15.68	13.45
0.7	44.84	36.78	28.78	22.95	19.05	16.25	14.00
0.8	48.00	39.50	31.00	24.65	20.58	17.59	15.19
0.9	47.83	39.65	31.20	24.97	29.80	17.83	15.34
1.0	0	0	0	0	0	0	0

α	x						
x	1	2	3	4	5	6	7
0.2	2.62	2.56	2.30	2.01	1.76	1.55	1.37
0.3	3.06	3.29	3.17	2.91	2.64	2.36	2.14
0.4	3.66	4.14	4.02	3.65	3.27	2.92	2.60
0.5	4.43	5.08	4.86	4.34	3.82	3.36	2.98
0.6	5.37	6.15	5.73	5.01	4.36	3.81	3.36
0.7	6.57	7.38	6.72	5.75	4.98	4.34	3.81
0.8	8.08	8.82	7.83	6.59	5.68	4.93	4.33
0.9	9.17	9.89	8.65	7.20	6.22	5.40	4.70
1.0	3.22	4.85	4.59	3.96	3.44	2.99	2.64

B₁

FUNCTION A₁

α	x						
x	1	2	3	4	5	6	7
0.2	7.85	7.69	6.92	6.05	5.30	4.66	4.15
0.3	8.67	8.27	7.10	5.94	5.05	4.33	3.90
0.4	9.73	8.96	7.46	6.12	5.13	4.38	3.81
0.5	11.04	9.89	8.07	6.56	5.46	4.64	4.04
0.6	12.74	11.17	8.98	7.31	6.04	5.12	4.48
0.7	14.98	12.88	10.27	8.37	6.90	5.83	5.11
0.8	17.66	15.00	11.93	9.68	7.99	6.77	5.89
0.9	19.03	16.26	12.87	10.44	8.64	7.36	6.38
1.0	0	0	0	0	0	0	0

α	x						
x	1	2	3	4	5	6	7
0.2	23.65	22.05	19.63	17.27	15.18	13.51	12.00
0.3	19.20	19.72	18.91	17.38	15.84	14.33	12.96
0.4	18.03	19.96	19.50	17.70	16.07	14.48	12.89
0.5	18.34	21.08	20.29	18.12	16.18	14.40	12.78
0.6	19.58	22.63	21.30	18.72	16.47	14.54	12.80
0.7	21.58	24.64	22.64	19.53	17.03	14.99	13.12
0.8	24.16	27.03	24.32	20.64	17.94	15.71	13.70
0.9	25.64	28.51	25.30	21.35	18.41	16.08	14.01
1.0	10.45	15.60	14.80	12.82	11.20	9.84	8.62

B₂

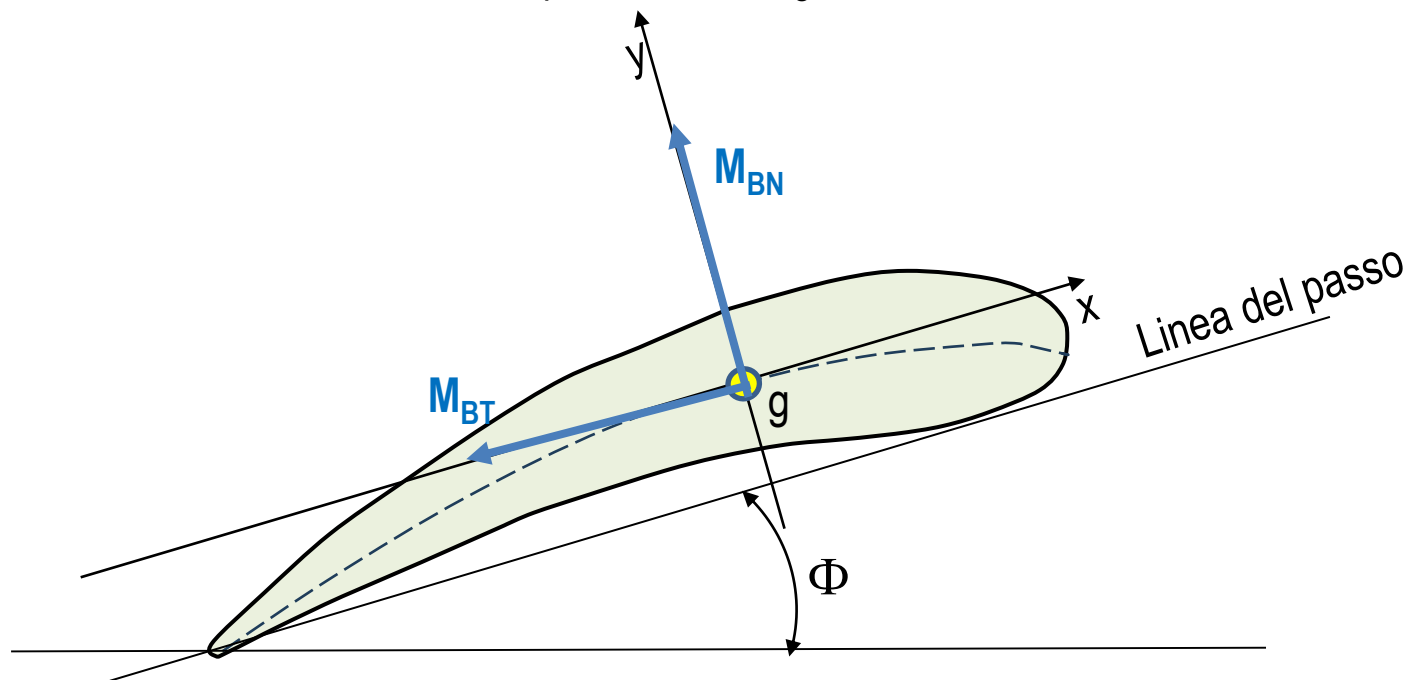
$$\alpha = 2\pi R/P$$



Modulo di Resistenza

Momento flettente totale

- $M_{BN} = (M_{BFT} \cos \Phi + M_{BFQ} \sin \Phi) + M_{CBN}$ normale alla linea del passo
 - $M_{BT} = (-M_{BFT} \sin \Phi + M_{BFQ} \cos \Phi) + M_{CBT}$ parallelo alla linea del passo
- Componente idrodinamica
Componente centrifuga



Modulo di Resistenza

- M_{BN} : è la componente più importante, genera le tensioni più elevate sulla faccia e dorso del profilo in corrispondenza al massimo spessore
- M_{BT} : ha un effetto marginale sulle tensioni sul punto di massimo spessore. Le tensioni più alte sono in corrispondenza dei bordi d'ingresso e di uscita
- M_{CBN} e M_{CBT} : sono trascurabili per pale simmetriche o con skew moderato
- Ai fini pratici per l'applicazione della teoria della trave incastrata di può assumere

$$M_B = M_{BFT} \cos \Phi + M_{BFQ} \sin \Phi$$

- Ipotesi trave incastrata: la pala si flette attorno all'asse neutro della sezione a $0.25R$
- L'asse neutro di una sezione è incurvato e coincidente con la linea mediana (Rösingh, 1944; Romsom, 1952)



Modulo di Resistenza

- Modulo di resistenza della sezione piana equivalente a quella cilindrica
 - In prima approssimazione (Rösingh, 1944):

$$W_e = \frac{1}{6t_m} \int_{-\frac{c}{2}}^{\frac{c}{2}} t^3(x) dx$$

- Coefficiente del modulo di resistenza

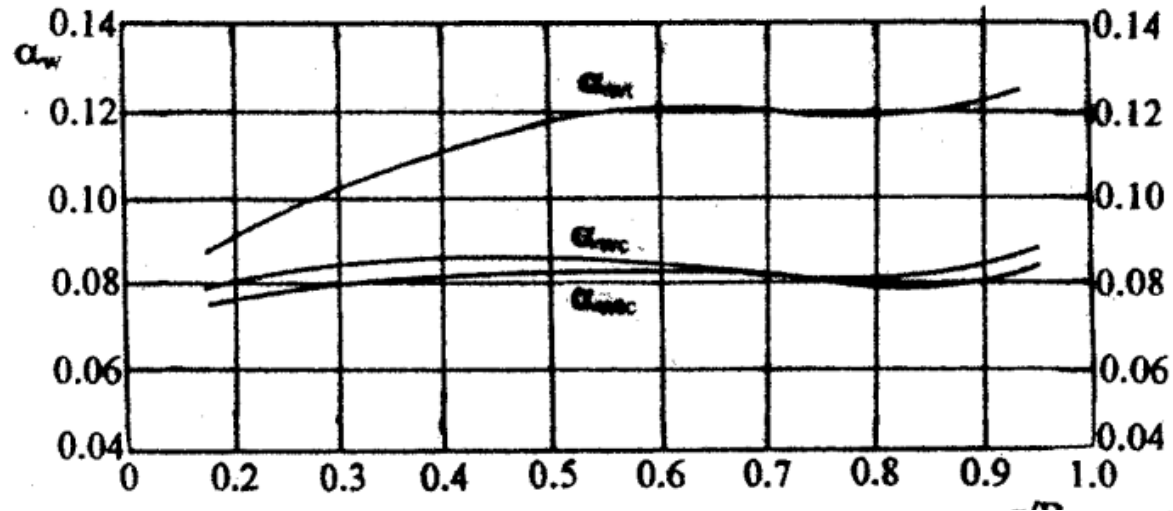
$$\alpha_w = W_e / (t_m^2 \cdot c)$$

- α_{w_c} relativo alla tensione massima di compressione con asse neutro rettilineo
- α_{w_t} relativo alla tensione massima di trazione con asse neutro rettilineo
- $\alpha_{w_{tc}}$ relativo alla tensione massima di trazione e compressione con asse neutro curvo



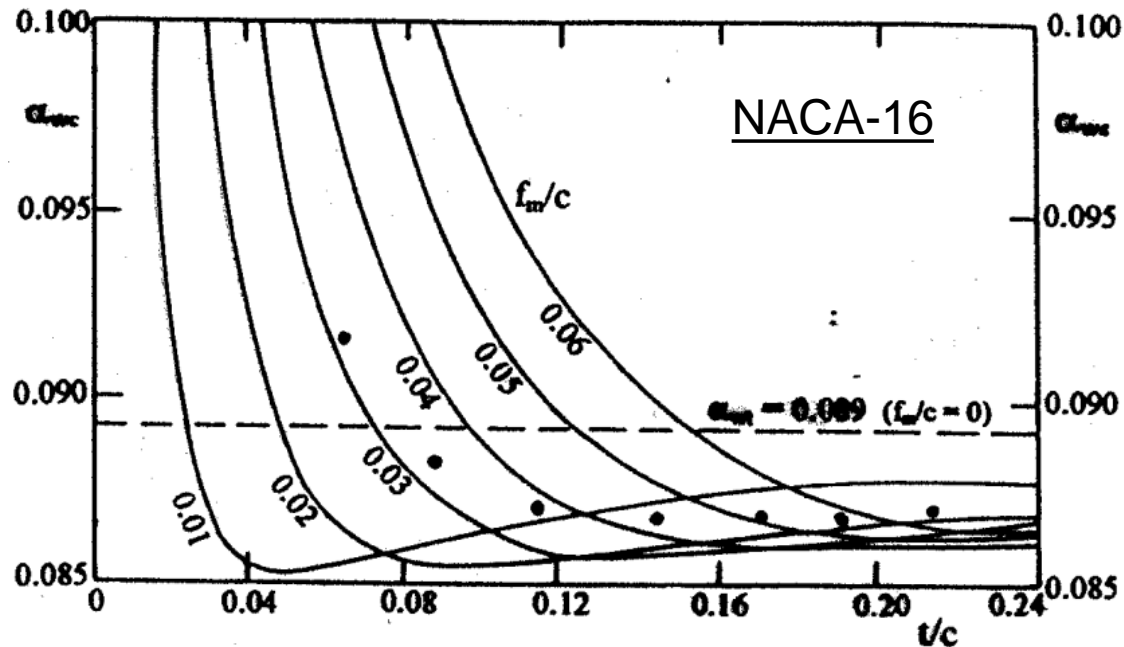
Coefficiente del modulo di resistenza

Profili Walchner



Profili Ogivali

$$\alpha_{w_c} = 0.075 \div 0.080$$



Tensioni di Trazione e Compressione

- Componenti del momento flettente (solo contributo idrodinamico):

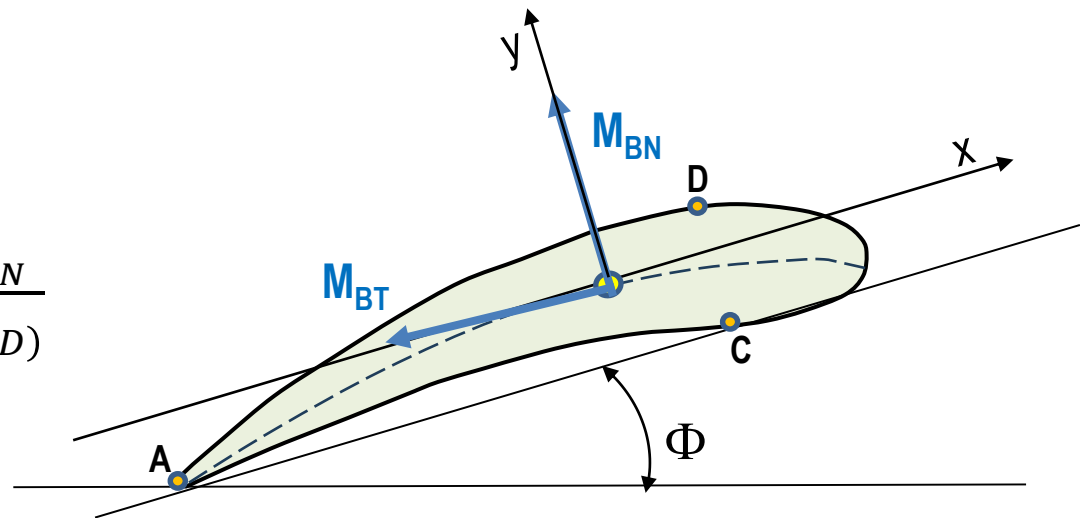
$$M_{B_N} = M_{B_{F_T}} \cos \Phi + M_{B_{F_Q}} \sin \Phi$$

$$M_{B_T} = -M_{B_{F_T}} \sin \Phi + M_{B_{F_Q}} \cos \Phi$$

- Le tensioni prodotte da M_{B_N} sono dominanti

$$\sigma_A = \frac{M_{B_N}}{W_{x(A)}} + \frac{M_{B_T}}{W_{y(A)}}$$

$$\sigma_C = \frac{M_{B_N}}{W_{x(C)}} \quad \sigma_D = \frac{M_{B_N}}{W_{x(D)}}$$



Tensioni a Fatica

- Le sollecitazioni non sono stazionarie, ma variano lungo il giro
- Essenziale eseguire l'analisi a fatica per il corretto dimensionamento strutturale
- Trave incastrata (metodo statico) non coglie tali fenomeni
- Rotture a fatica: nel punto di massima tensione (o in corrispondenza di imperfezioni superficiali)
- Principali forze responsabili
 - componenti radiali
 - tensioni di taglio
 - tensioni dinamiche e residue



Tensioni a Fatica – Registro Russo

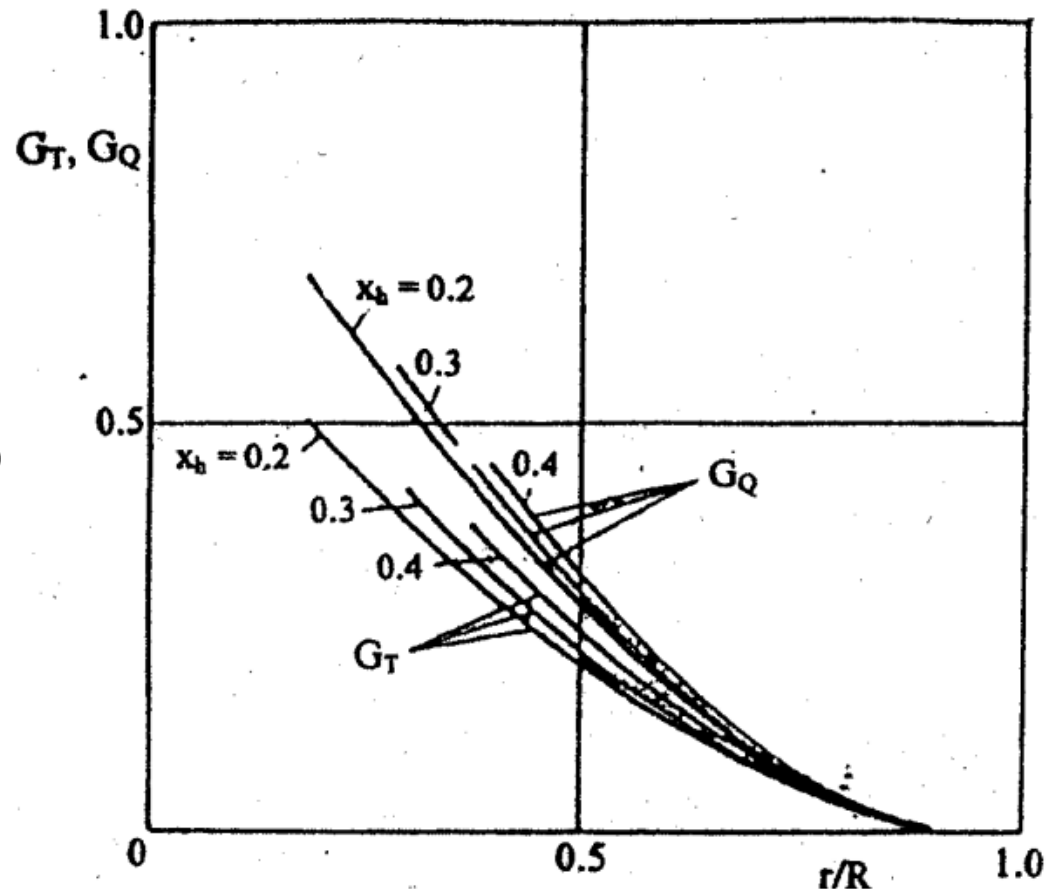
Calcolo delle tensioni medie

Noti K_T e K_Q si calcola la distribuzione radiale dei momenti tramite i coefficienti G_T e G_Q

Momenti flettenti

$$M_{BF_T} = \frac{K_T \cdot \rho n^2 D^4}{2Z} \cdot G_T(x_h, \bar{r})$$

$$M_{BF_Q} = \frac{K_Q \cdot \rho n^2 D^4}{2Z} \cdot G_Q(x_h, \bar{r})$$



Tensioni a Fatica – Registro Russo

- Il campo di scia disomogeneo provoca variazioni della spinta e del momento torcente valutabili con un calcolo non stazionario

$$\Delta K_T = \frac{1}{2} (K_{T_{max}} - K_{T_{min}}) \rightarrow \Delta M_{B_{FT}} = \frac{\Delta K_T \cdot \rho n^2 D^4}{2Z} \cdot G_T(x_h, \bar{r})$$
$$\Delta K_Q = \frac{1}{2} (K_{Q_{max}} - K_{Q_{min}}) \rightarrow \Delta M_{B_{FQ}} = \frac{\Delta K_Q \cdot \rho n^2 D^4}{2Z} \cdot G_Q(x_h, \bar{r})$$

- Tensione come somma di una componente costante σ_m ed una variabile σ_a

$$\sigma_m = \frac{M_{B_{FT}} \sin \Phi + M_{B_{FQ}} \cos \Phi}{W_x} + \frac{F_C}{A}$$
$$\sigma_a = \frac{\Delta M_{B_{FT}} \sin \Phi + \Delta M_{B_{FQ}} \cos \Phi}{W_x}$$



Tensioni a Fatica – Registro Russo

- Condizione statica

$$\sigma_m + \sigma_a < \frac{\sigma_t}{\nu_t}$$

Tensione ammissibile

Coefficiente di sicurezza

- Condizione robustezza nel ciclo

$$\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_m \sigma_a} < \frac{\sigma_f}{\nu_f}$$

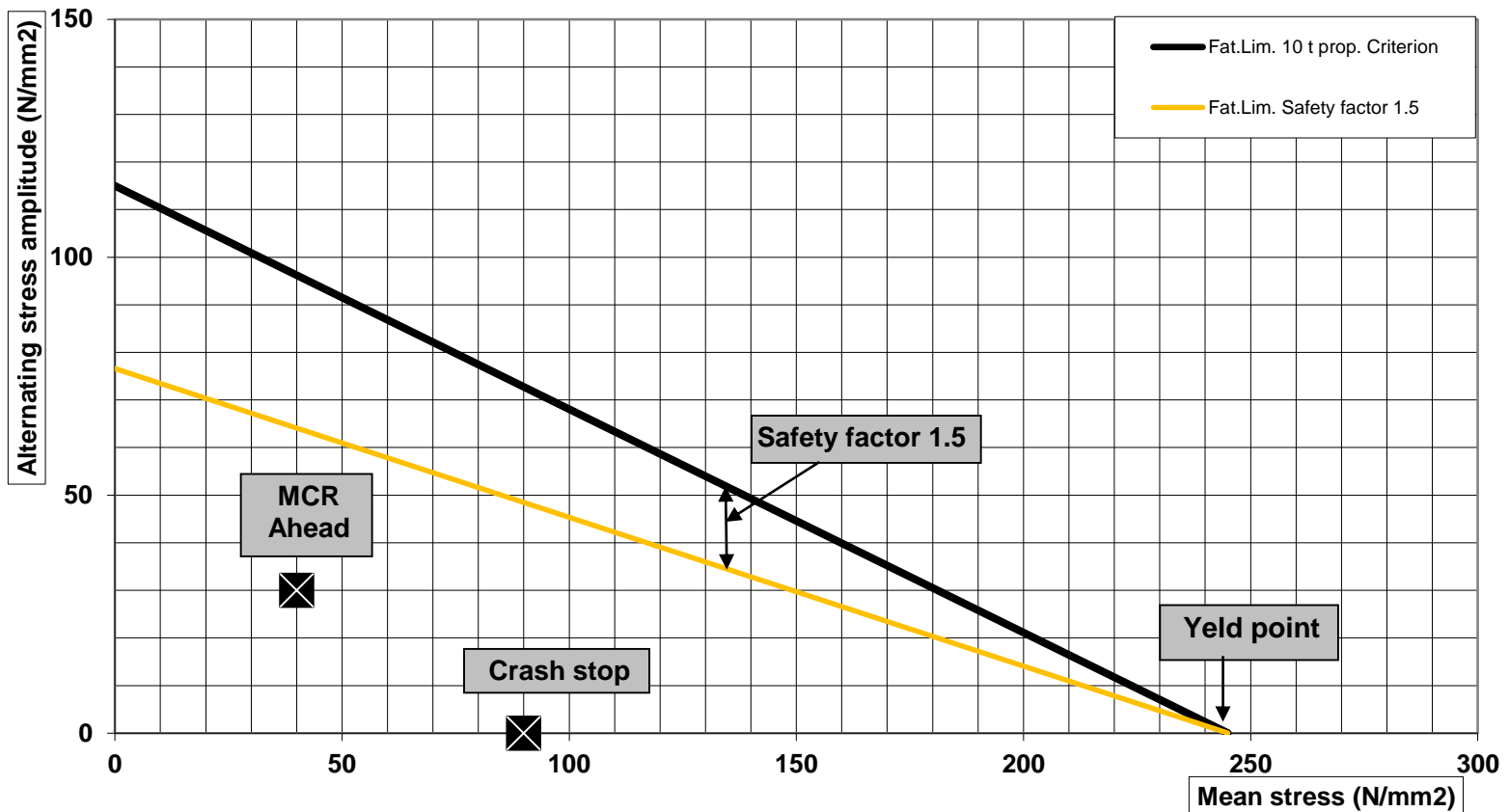
Resistenza a fatica
(10^8 cicli)

Coefficiente di sicurezza



Tensioni a Fatica

Fatigue limits Nickel Aluminium Bronze 10^8 cycles



RINa e LR

Nikel Aluminium Bronze Tensile Strenght 650 N/mm ² , yeld point 245 N/mm ²		Skew: 38°	
Radius (r/R)	0.25	0.6	0.9
Thickness (mm)	183.0	96.3	36.0
RINa 1996	164.0	na	na
RINa 1996 with skew	na	na	na
LR 1996	179.0	85.0	na
LR 1996 with skew	direct calculations required		
RINa 2000 (skew is considered)	181.0	90.6	34.0
LR 2000 (skew is considered)	198	101	na



Caratteristiche dei materiali

Materiale	Carico minimo di rottura (N/mm ²)	Carico di snervamento (N/mm ²)	Allungamento percentuale	Peso specifico (kg/m ³)
Acciaio inox al cromo	680	446	20	7.700
Bronzo Ni-Al	640	270	25	7.650
Bronzo Mn-Ni-Al	640	290	27	7.450

Materiale	σ ammissibile (N/mm ²)			
	Monoelica		Bielica	
	Diesel	Turbina	Diesel	Turbina
Acciaio	40	41	43	44
Bronzo Ni-Al	61	62	64	66

