



**UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



# **Implementación de Sistemas de Ayudas a la Navegación**

**CLASE 4 y 5**

# Contenidos de la clase

- Elementos constitutivos de las boyas
  - ✓ Fondeos
  - ✓ Muertos
  - ✓ Accesorios
- Estabilidad de una boya (análisis simplificado de cargas)
- Dimensionamiento de las cadenas
- Verificación del cuerpo de anclaje
- Estabilidad de boyas (análisis detallado de olas)

# Elementos constitutivos de las boyas

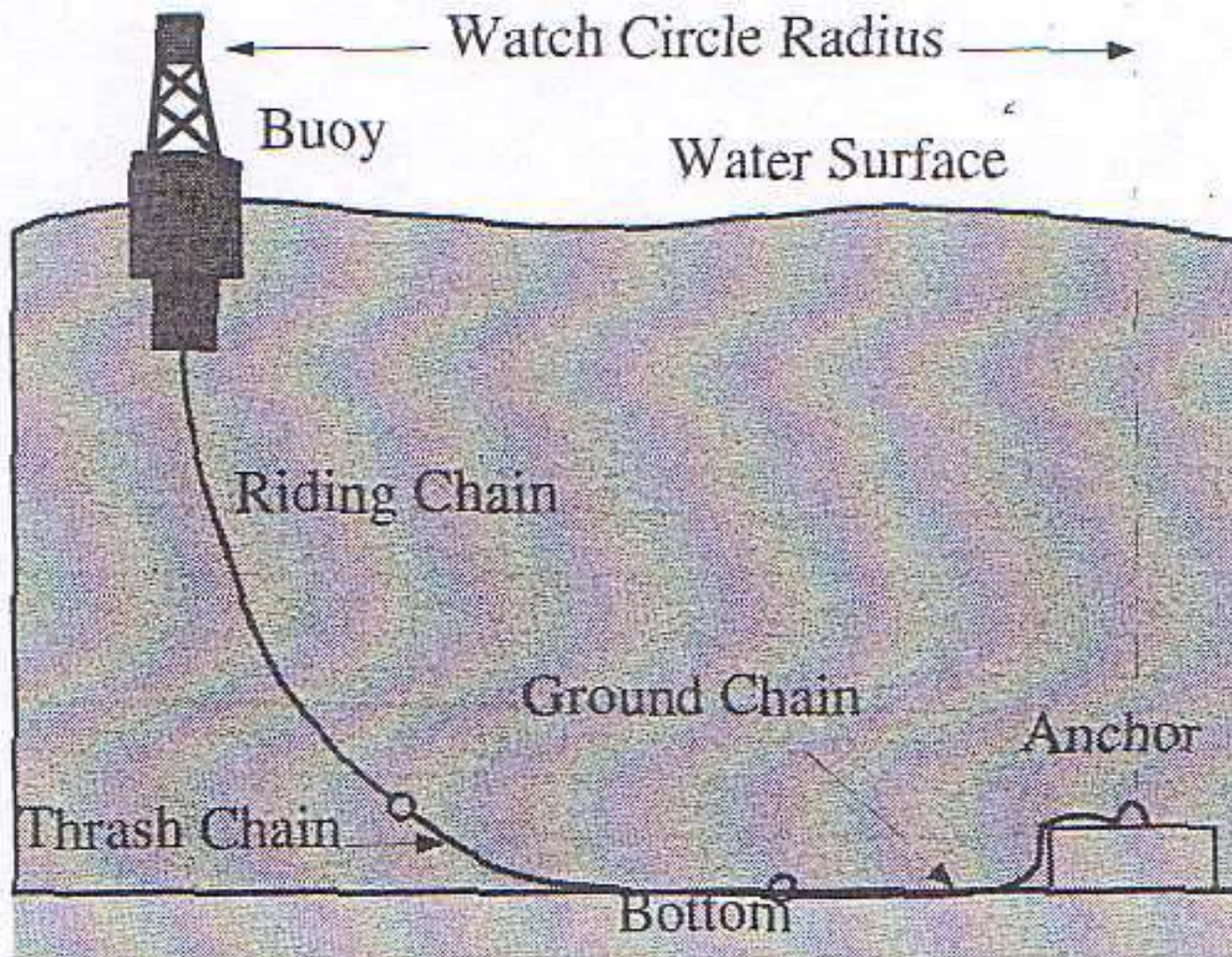


Fig. 1: Typical Mooring System

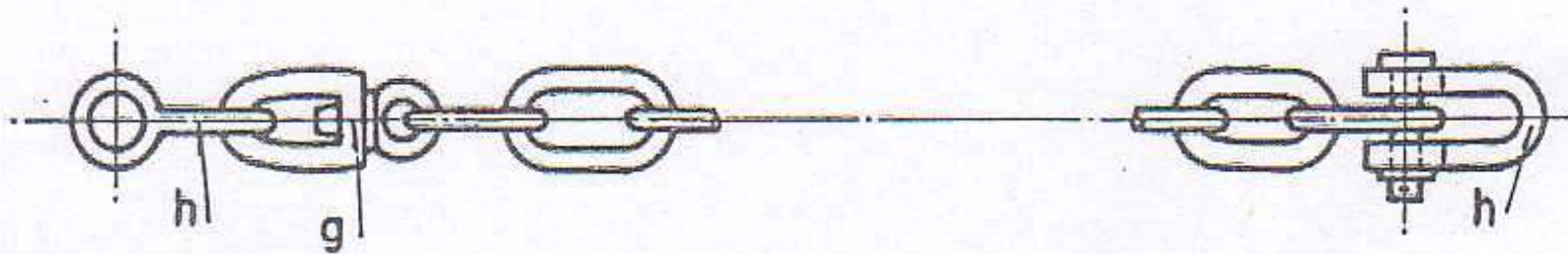
## Elementos constitutivos de las boyas: fondeos



## Elementos constitutivos de las boyas: fondeos



# Elementos constitutivos de las boyas: fondeos



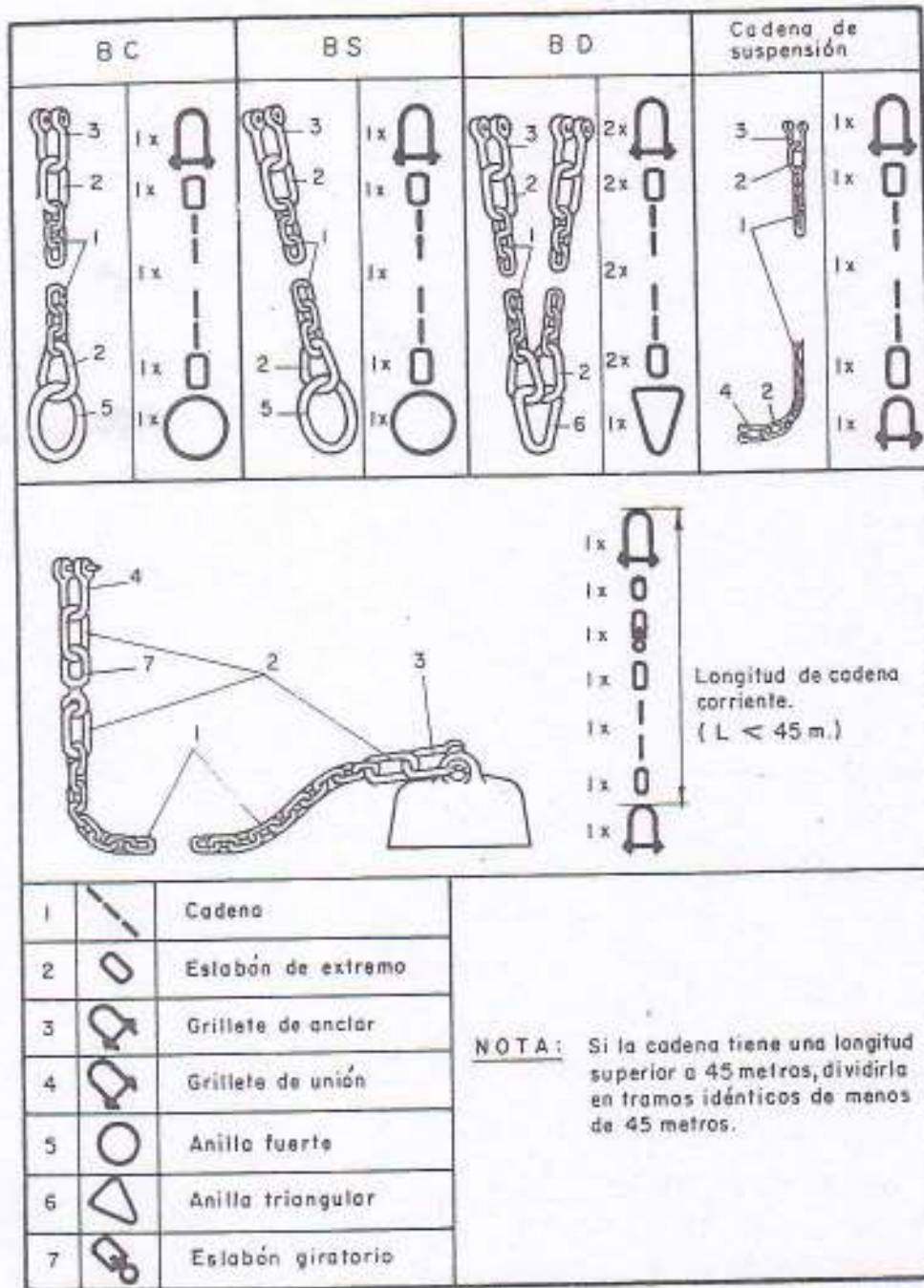
b) Cadena de amarre

Tabla VII.6. Características de las cadenas de suspensión y de amarre usuales en España

h : grillete

g : eslabón giratorio

Elementos  
constitutivos de las  
boyas:  
fondeos



# Elementos constitutivos de las boyas: Accesorios



Grillete giratorio

Grillete



# Elementos constitutivos de las boyas: Cuerpos de anclaje (cuerpos muertos)



# Elementos constitutivos de las boyas: Cuerpos de anclaje (cuerpos muertos)

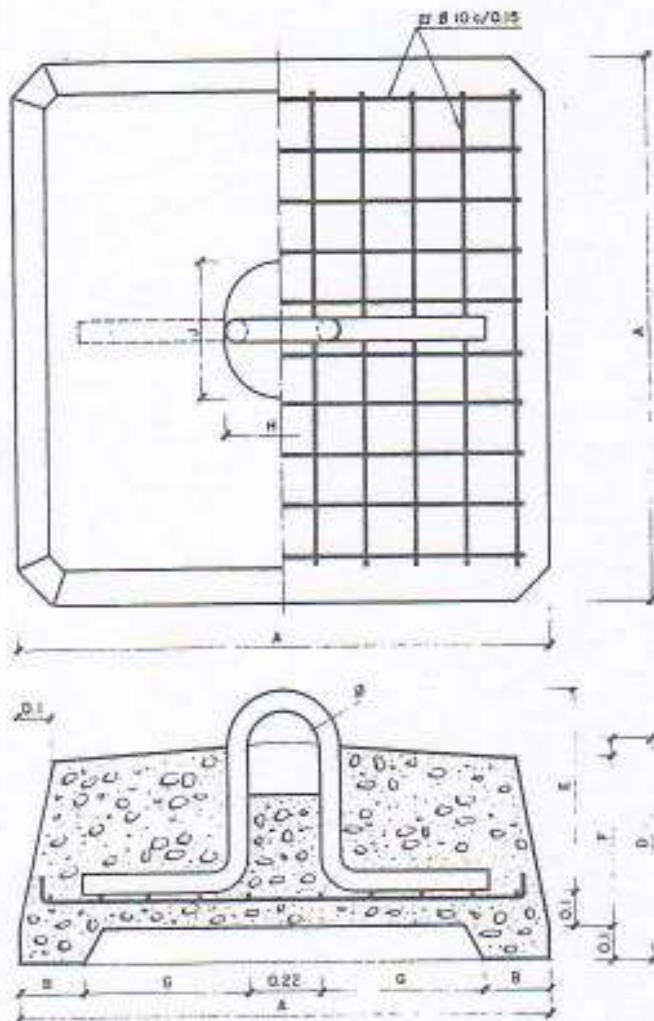
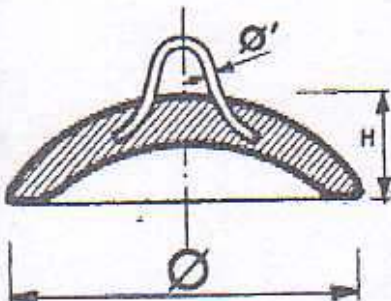
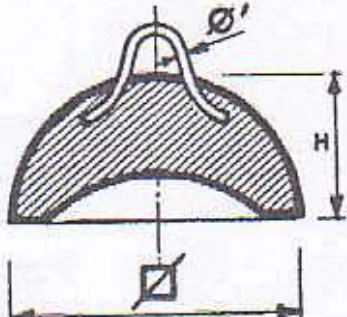
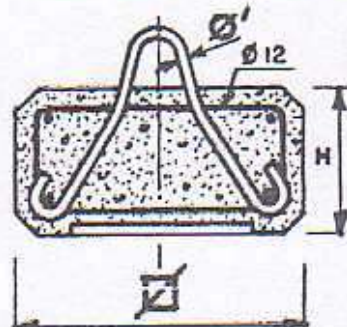


Figura VII.20. Muerto de anclaje de hormigón

Peso de los muertos	DIMENSIONES EN METROS										Peso de las cadenas incorporadas al hormigón — Kgs
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
2 tons.	1,2	0,15	0,9	0,55	0,5	0,4	0,4	0,32	0,37	0,05	1.000
4 tons.	1,6	0,2	1,2	0,65	0,55	0,5	0,5	0,34	0,4	0,06	1.300
5 tons.	1,8	0,3	1,2	0,65	0,55	0,5	0,6	0,34	0,4	0,06	1.500

# Elementos constitutivos de las boyas: Cuerpos de anclaje (cuerpos muertos)

	TIPO «DE VENTOSA»			TIPO «CUADRADO»			TIPO DE «HORMIGON»		
ANCLAJES									
Utilización	FONDOS DE FANGO O ARENA			FONDOS DE ROCA			TODOS FONDOS		
Kilogramos	Ø	H	Ø'	Ø	H	Ø'	Ø	H	Ø'
250	770	180	40	500	270	40	700	320	40
400	865	250	40	620	320	40	800	385	40
600	955	350	40	730	370	40	900	450	40
800	1.060	290	50	750	385	50	1.000	490	50
1.000	1.120	345	50	770	440	50	1.100	510	50
1.250	1.185	415	50	880	440	50	1.200	530	50

# Elementos constitutivos de las boyas: Cuerpos de anclaje (cuerpos muertos)

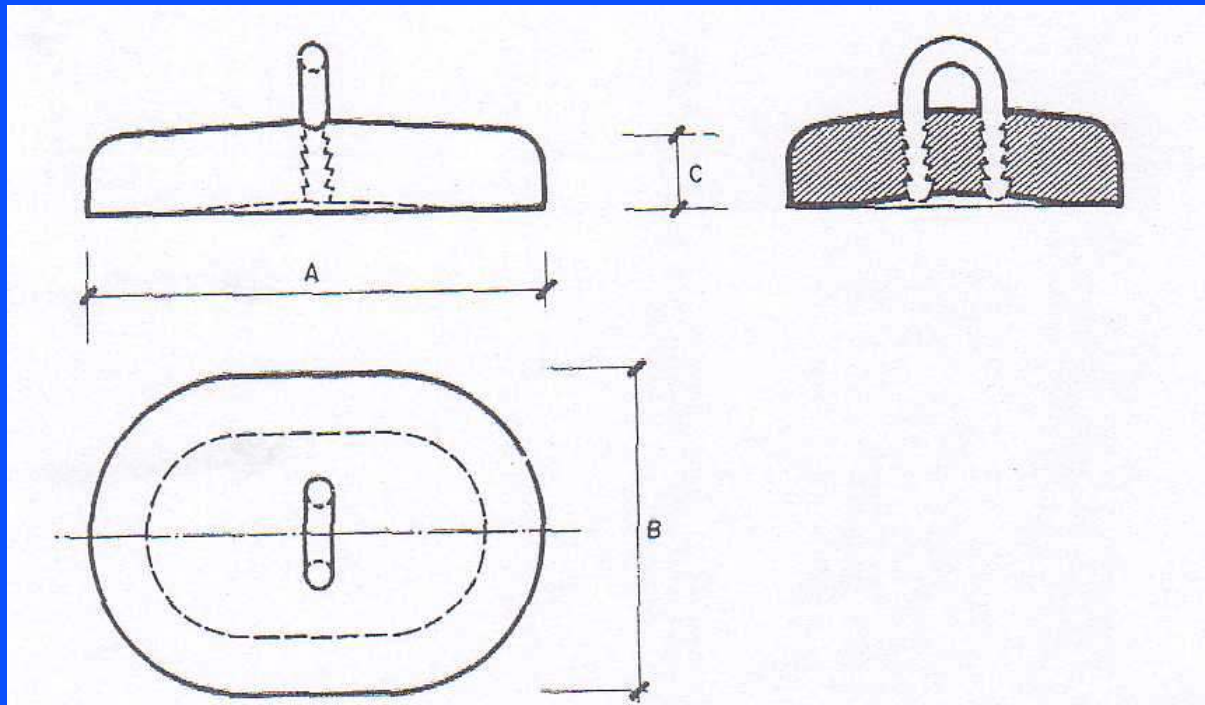
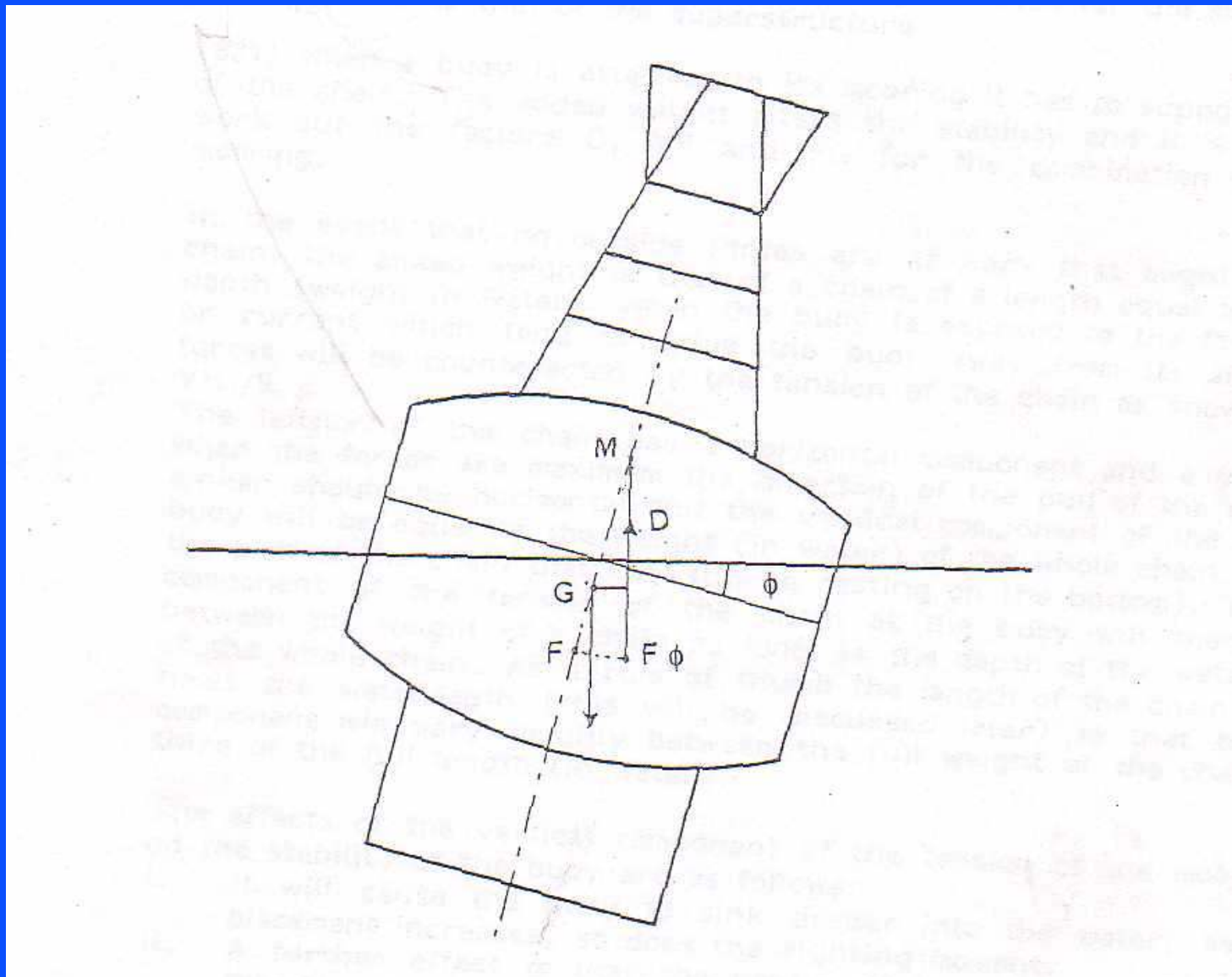


Figura VII.21. Muerto de anclaje de hierro. Tipo español

Dimensiones en milímetros			Peso sumergido
A	B	C	Kilogramos
500	380	100	100
850	600	130	300
916	684	120	500
916	684	145	600
1.143	857	155	750

# Estabilidad de una boya (análisis simplificado)

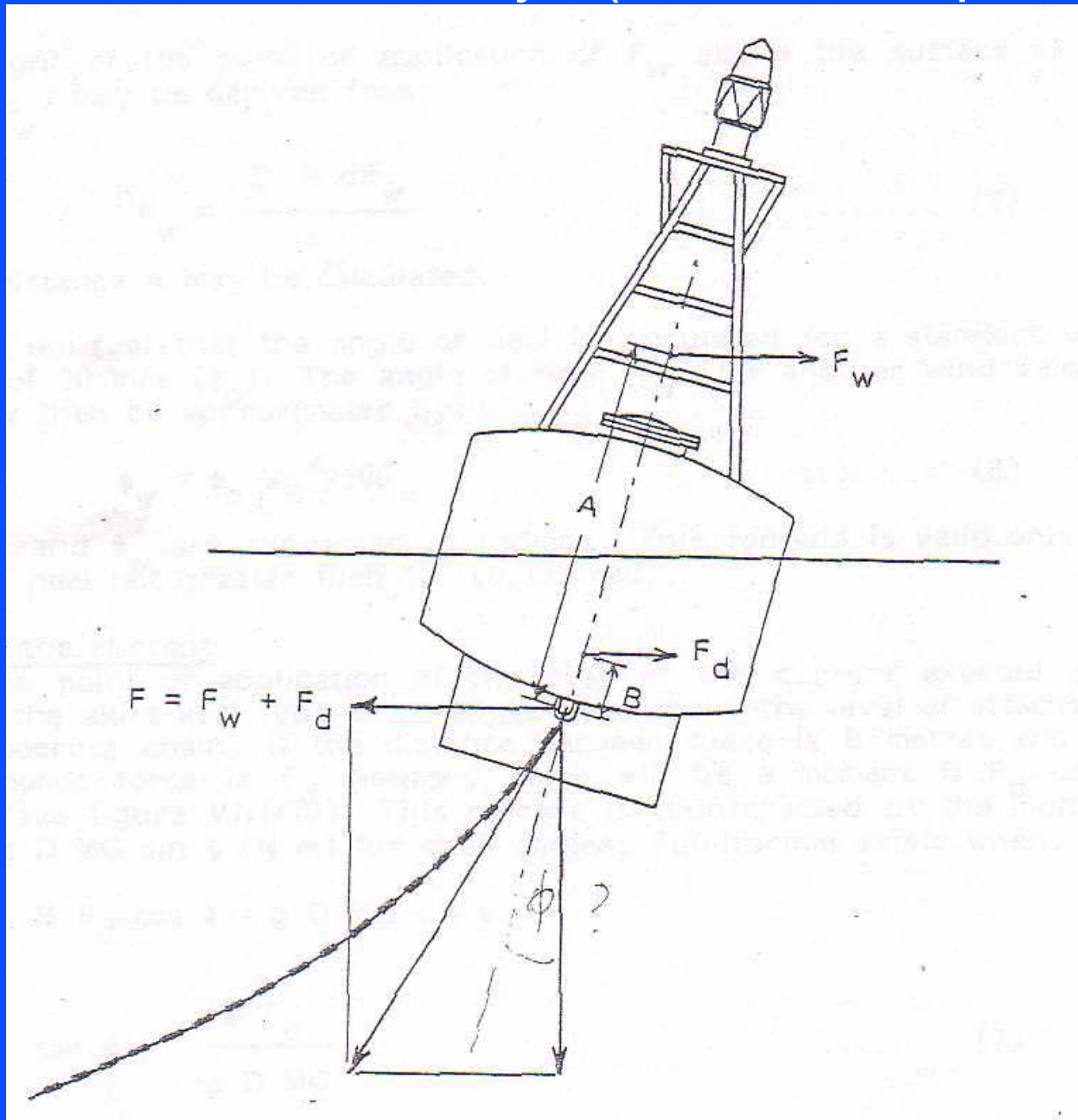


# Estabilidad de una boya (análisis simplificado)

Momento estabilizante

$$M_e = g D M G \sin\phi$$

# Estabilidad de una boya (análisis simplificado)



# Estabilidad de una boya (análisis simplificado)

## Acciones

### Viento

$$F_w = \frac{1}{2} \times \rho_a \times (V_w)^2 \times S_w \times C_w$$

### Corriente

$$F_w = \frac{1}{2} \times \rho_w \times (V_c)^2 \times S_d \times C_d$$

## Estabilidad de una boya (análisis simplificado)

**Parámetro de estabilidad:  
Ángulo de inclinación**

$$\operatorname{Tg} \phi_w = \frac{F_w A}{g D M G}$$

$$\operatorname{Tg} \phi_d = \frac{F_d B}{g D M G}$$

Tener en cuenta consideraciones de  
simultaneidad y dirección

# Estabilidad de una boya (análisis simplificado)

## Influencia del oleaje Aproximación

$$K = 1 + 5 \frac{h}{H}$$

K: Coeficiente de mayoración

h: altura de ola [m]

H: Profundidad [m]

## Estabilidad de una boya (análisis simplificado)

### Periodo de oscilación propio de la señal

$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{I_m}{m g M G}}$$

T: Periodo

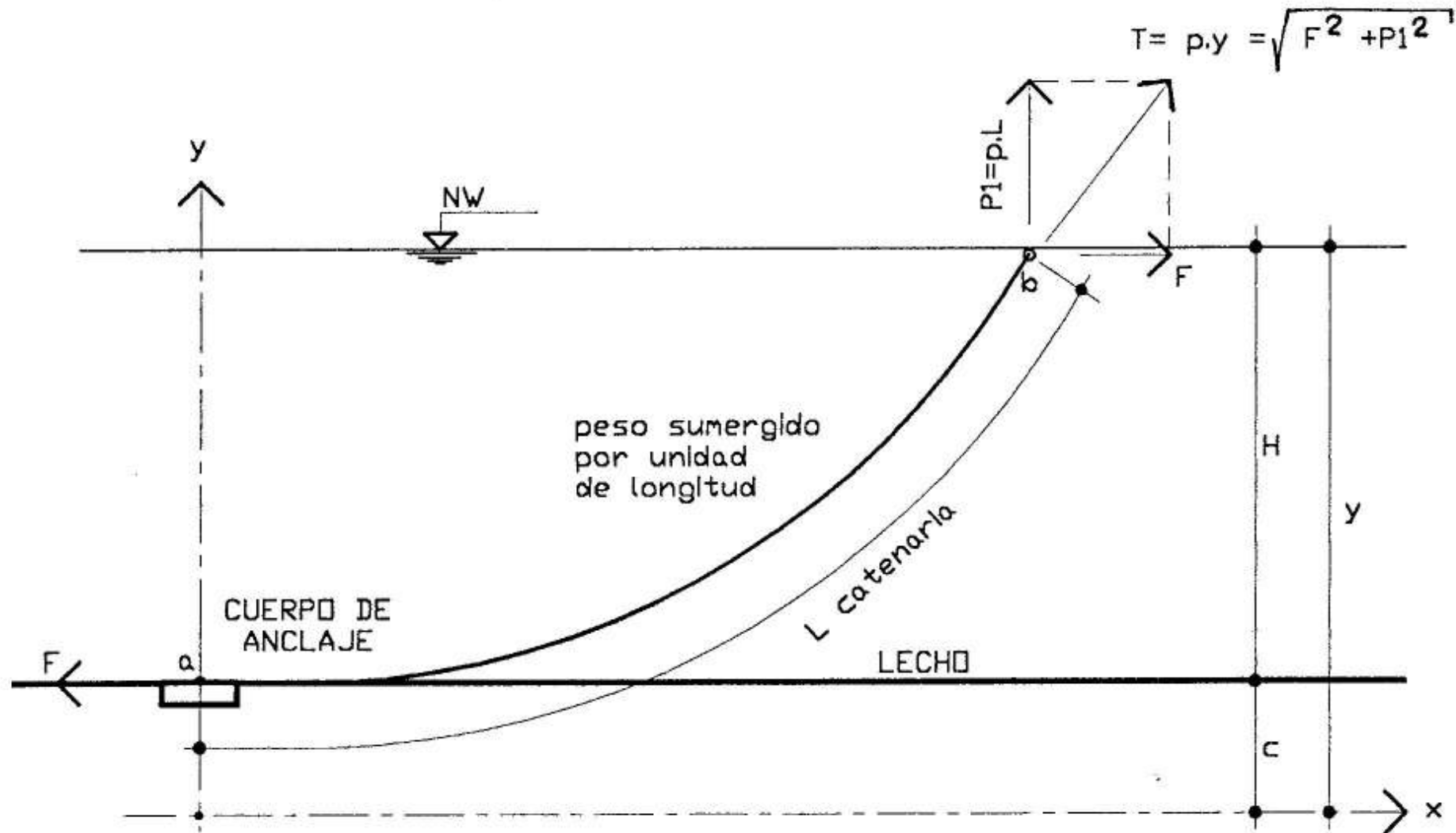
$I_m$ : Momento de inercia (mecánico) respecto de un eje horizontal que pase por G

m: masa del volumen de agua desplazado

$$T \neq T_{ola}$$

Condición para evitar resonancia

# Cálculo de la cadena



## Cálculo de la cadena

**IALA en su Recomendación E- 107 “Pautas en el diseño de anclajes normales” propone algunas consideraciones y requerimientos como ser:**

**§ La cadena es tangencial al lecho del río bajo todas las condiciones de corriente y viento en su posición.**

**§ El eje de la boya es vertical bajo las condiciones más comunes de corriente y viento.**

**§ La relación entre la tensión de rotura de la cadena, con la tensión de cálculo no es menor de 5 bajo las condiciones más desfavorables**

**- La reserva de flotabilidad de una boya totalmente equipada es suficiente bajo las condiciones más desfavorables de corriente y viento.**

Cálculo de la cadena  
Longitud de la cadena  
a) Cadena tangente al lecho

$$H \sqrt{1 + \frac{2F}{P_c \times H}} \leq L$$

L : Longitud de la cadena

F: fuerza horizontal

Pc: peso sumergido de la cadena por metro lineal

H: profundidad

A esta longitud mínima debe sumarse un tramo recto por seguridad que se definió de Lseg = 2 a 3 metros.

# Cálculo de la cadena

## Longitud de la cadena

La recomendación E-107 da algunas reglas prácticas aproximadas como ser:

- La longitud de la cadena es tres veces la profundidad del agua a las mayores profundidades.
- En sitios donde la boya es sometida a la acción de olas y corriente, es recomendado incrementar la longitud de la cadena. Este incremento debe ser elegido entre 0 y 3 veces la profundidad del agua cuando las corrientes varían entre 0 y 6 nudos.

# Cálculo de la cadena

## Longitud de la cadena

El máximo radio de oscilación de la boya es:

$$r_m = \sqrt{L^2 - H^2}$$

Puede ser necesario reducir la longitud de la cadena de anclaje en orden de reducir el radio de oscilación. En este caso no es recomendado reducir la longitud de la cadena en 2 veces la profundidad del agua donde esta última es menor de 50 m. Para profundidades de más de 50 m, una relación de 1.5 puede ser aceptada.

Otras recomendaciones efectuadas en el I.A.L.A. GUIDE. “To the availability and reliability of aids to navigation”, son:

Recomendar una longitud de cadena de 3 veces la profundidad máxima de agua, (profundidad al cero local + altura de marea +  $\frac{1}{2}$  de la altura máxima de la ola) pero pudiendo utilizar longitudes de cadenas menores para evitar la oscilación de la boya pero en este caso debe utilizarse pesos muertos de mayor magnitud, ya que la longitud de la cadena (en su peso por metro lineal) interviene en las ecuaciones de equilibrio y una longitud de cadena menor es suplantada por un mayor peso del cuerpo muerto.

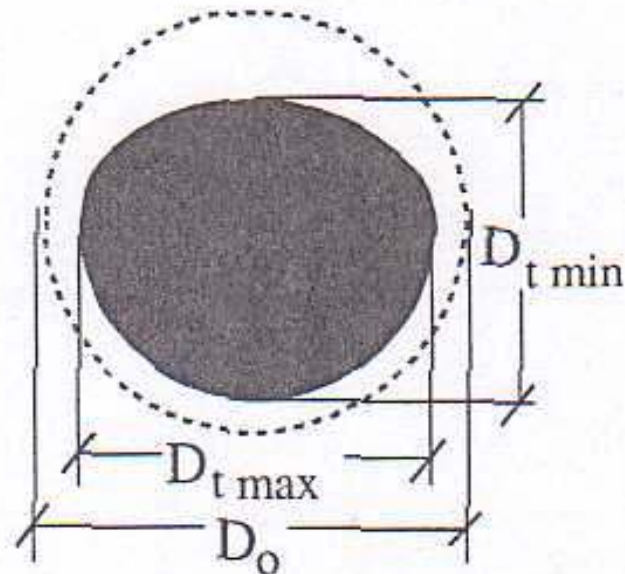
Cálculo de la cadena  
Longitud de la cadena

b ) Cadena Tesada

“Recomendaciones del M.O.P.U. en sus Normas técnicas sobre obras e instalaciones de ayudas a la navegación del año 1986.

# Cálculo de la cadena

## Desgaste (Canadian Cosat Guard)



$D_o$	link original nominal diameter
$D_{t min}$	minimum chain link diameter at time $t$
$D_{t max}$	maximum chain link diameter at time $t$
$D_r$	diameter ratio, $D_{t min} / D_o$
$t$	service life in months

Fig. 4: Idealized Worn Chain Cross-Section

# Cálculo de la cadena

## Desgaste

Fórmula empírica

$$D_r = \frac{\frac{C_1 D_0 t}{\sqrt{1+t}} + C_2 t^2 + C_3 t}{C_4 Depth + C_5}$$

C1, C2, C3, C4 y C5 : coeficientes de regresión

t: duración del fondeo en el agua [meses]

Do= Diámetro nominal cadena sin desgaste [pulgadas]

Depth: [m]

# Cálculo de la cadena

## Desgaste

Fórmula empírica

Wear Model Regression Coefficients		
	Trash Chain	Riding Chain
$C_1$	7,332E-03	2,080E-03
$C_2$	7,569E-05	4,962E-05
$C_3$	-1,162E-02	-7,336E-03
$C_4$	0	-1,179E-02
$C_5$	1	1,555

# Cálculo de la cadena

## Desgaste (Canadian Cosat Guard)

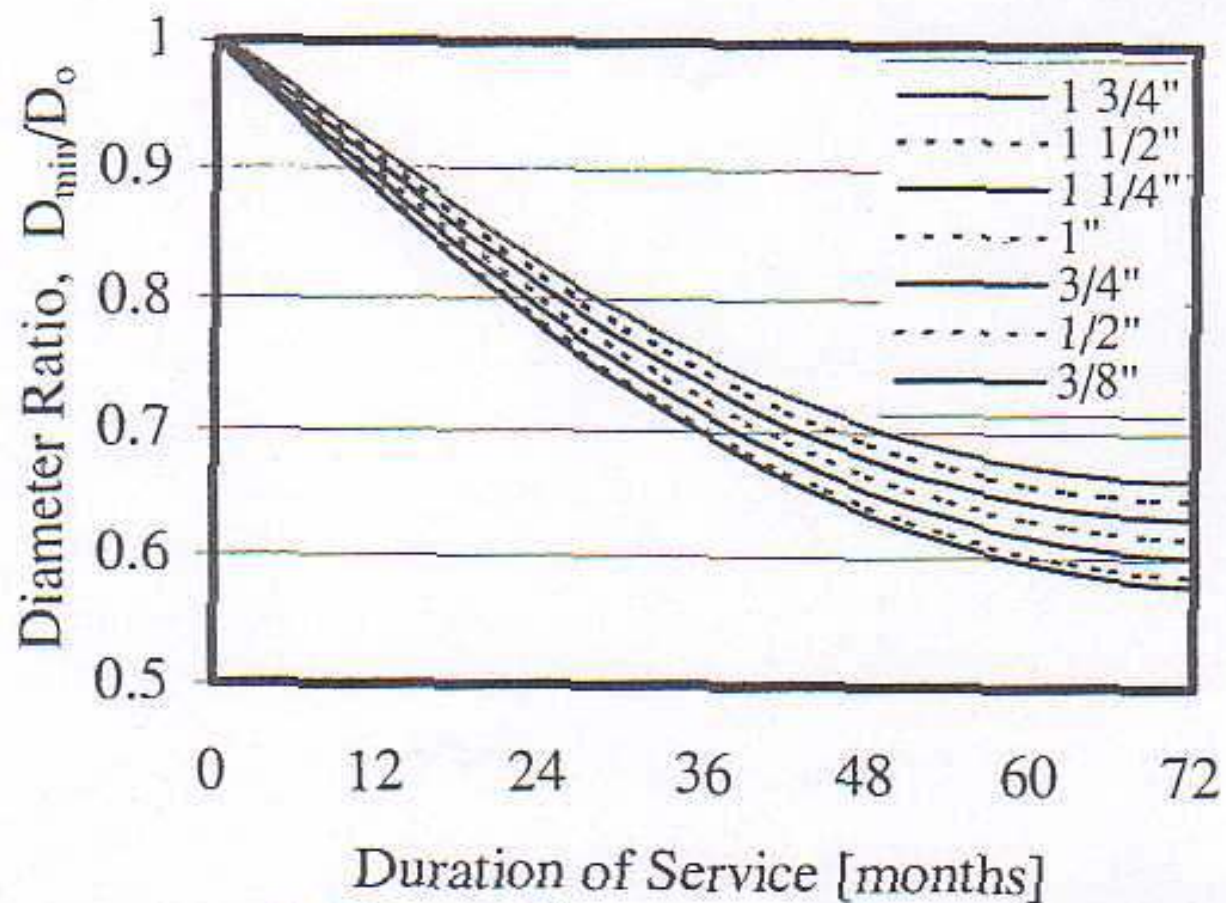


Fig. 5: Thrash Chain Link Wear Model

## Cálculo de la cadena

Desgaste (Canadian Cosat Guard)

$$\frac{D_{\min}}{D_{\max}} = 0.4202 \frac{D_{\min}}{D_{nom}} + 0.5798$$

Fórmula empírica

# Cálculo de la cadena

## Desgaste (Canadian Cosat Guard)

Trash Chain					
	Mooring N°1 1.125" Alloy	Mooring N°2 1.25" Alloy	Mooring N°3 1.5" Carbon	* Mooring N°4 1.75" Carbon	Mooring N°5 1.5" Alloy
Final Link Diameter	0.836 @ 4 yrs.	0.905 @ 5 yrs.	1.062 @ 5 yrs	1.322 @ 4.67 yrs.	1.069 @ 5 yrs.
Rremaining Strength	55%	52%	50%	57%	51%
* Removed form the program early due to severe localized pitting.					
Riding Chain					
	Mooring N°1 1.125" Alloy	Mooring N°2 1.25" Alloy	Mooring N°3 1.5" Carbon	* Mooring N°4 1.75" Carbon	Mooring N°5 1.5" Alloy
Final Link Diameter	1.011 @ 4 yrs.	1.146 @ 5 yrs.	1.102 @ 5 yrs	1.115 @ 4.67 yrs.	1.107 @ 5 yrs.
Rremaining Strength	81%	84%	78%	80%	78%

# Verificación del cuerpo de anclaje

## Análisis simplificado

-Altura del muerto < 0,5 lado menor

-Capacidad de arrastre <sup>$\mu$</sup>  del muerto (fricción)

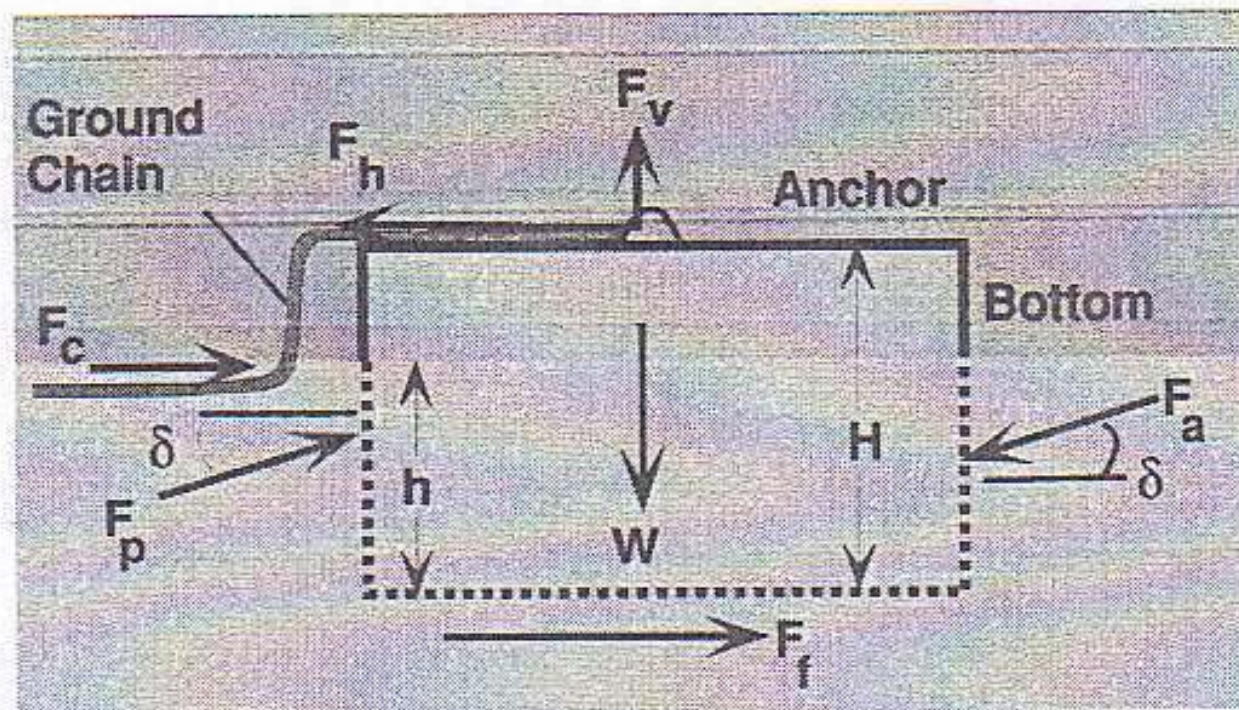
$\mu = 1 / 3$  arena densa

$\mu = 1 / 8$  arena suelta

$\mu = 1 / 10$  limo blando

# Verificación del cuerpo de anclaje

## Análisis detallado (Canadian Coast Guard)



$F_h$	chain horizontal load	$F_v$	chain vertical load
$F_c$	ground chain friction	$F_p$	soil passive pressure
$F_a$	soil active pressure	$W$	buoyant sinker weight
$F_f$	sliding friction force	$H$	anchor height
$h$	depth of embedment		

Fig. 6: Idealized Sinker Loads

# Verificación del cuerpo de anclaje

## Análisis detallado (Canadian Coast Guard)

$$F_c = (\text{soil} + \text{chain weight}) \tan \delta \cdot L$$

$$= (((\gamma_c - \gamma_w)A + 2\gamma_s W_s d) \tan \delta) L \quad [3]$$

Where:  $L = \frac{\text{Depth} \times \text{Scope} - 9 \text{Depth}}{2}$

$Z$ chain linear unit weight	$d$ soil cover depth
$L$ length of ground chain	$\gamma_w$ water unit weight
$W_c$ width of chain link	$\gamma_c$ chain unit weight
$\delta$ soil friction angle	$\gamma_s$ soil unit weight

# Verificación del cuerpo de anclaje

## Análisis detallado (Canadian Coast Guard)

$$F_a = \frac{\gamma h^2 K_a H}{2} \quad \& \quad F_p = \left( \frac{\gamma h^2 K_p}{2} + 2c' \sqrt{\frac{K_p}{2}} \right) H$$

[4]

Where:

$$K_a = \frac{\sin^2(90 + \phi)}{\sin(90 - \delta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi)}{\sin(90 - \delta)}} \right]^2}$$

Teoría de Coulomb

$$K_p = \frac{\sin^2(90 - \phi)}{\sin(90 + \delta) \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi)}{\sin(90 + \delta)}} \right]^2}$$

# Verificación del cuerpo de anclaje

## Análisis detallado (Canadian Coast Guard)

and the soil/anchor frictional force resisting sliding is estimated based on contributions from the bottom and sides of the anchor as follows:

$$F_f = F_{bottom} + F_{sides}$$

Where;

$$F_{bottom} = N \tan \delta \quad [5]$$

$$F_{sides} = \frac{1}{3} \gamma h^3 (1 - \sin \phi) \left[ \sqrt{\frac{K_p}{2}} + \sqrt{K_a} \right] \tan \phi$$

Where N, the effective anchor weight, is the sum of the vertical forces acting on the anchor.

$$N = W - F_v - F_p \sin \delta + F_a \sin \delta \quad [6]$$

The minimum acceptable anchor size is one which ensures that the anchor is not displaced (i.e. the sum of the horizontal forces applied to the anchor is zero).

$$(F_h - F_c) + F_a \cos \delta - F_p \cos \delta - F_f \approx 0 \quad [7]$$

# Verificación del cuerpo de anclaje y fondeo

Factores de seguridad (Canadian Coast Guard)

Design Factors of Safety	
Design Check	Factor of Safety
Buoy Freeboard	1
Service Riding Chain Strength	4
Service Thrash Chain Strength	4
Minimun Sinker Size	1,2
Recovery of Sinker	5

## ALTERNATIVA DE FONDEO

# Fondeo Elástico

### ANCRO MARIN AB SEAFLEX - The mooring system

Integrated thimble made out of Polyamide 6

M10 Bolt(s), Washer(s) and Nut(s) made out of stainless steel, SIS 2343 eqv. to BS 316.

Plate made out of stainless steel, SIS 2343 eqv. to BS 316.

Tube(s) 28 x 1.5, M12 Bolt(s), Washer(s) and Nut(s) made out of stainless steel, SIS 2343 eqv. to BS 316.

SEAFLEX elastic cord, the length is varied depending on water level fluctuations.

Integrated, specially designed, shackle by 8 x 25 mm steel and M12 Bolt, all made out of stainless steel, SIS 2343 eqv. to BS 316. Alternative material such as galvanised steel is available upon request.

# Alternativa de fondeo. Fondeo elástico



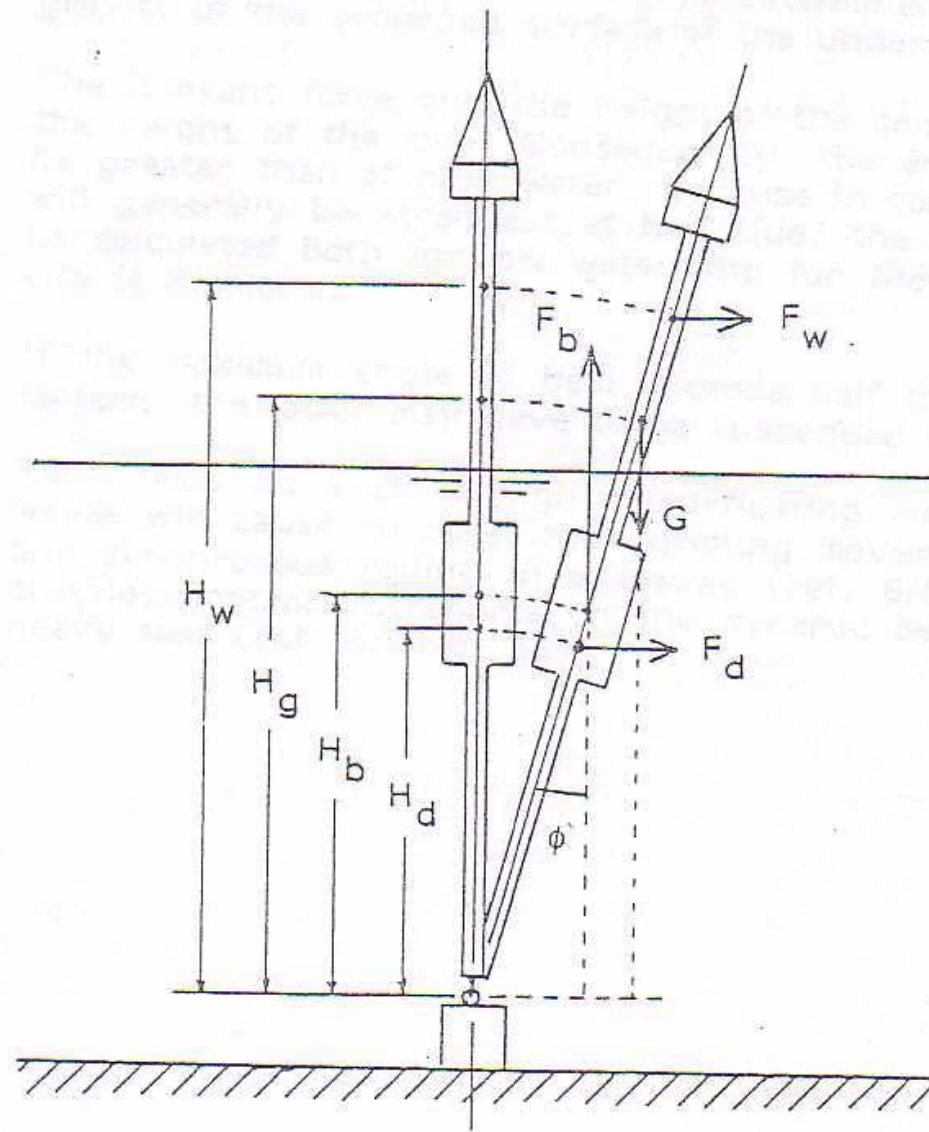


FIGURE VIII/12

$F_b$  = buoyant force(N)

$G^b$  = weight of structure (N)

$F_w$  = force exerted by the wind (N)

$F_d^w$  = force exerted by the current (N)

Estabilidad de  
una boya tipo  
Spar  
(análisis  
simplificado)

## Estabilidad de una boya tipo Spar (análisis simplificado)

$$Tg\phi = \frac{F_w H_w + F_d H_d}{F_b H_b - G Hg}$$

## Estabilidad de boyas (análisis detallado de olas)

$$H = H_D + H_I$$

$H_D$ : por arrastre (velocidad del flujo)

$H_I$ : por inercia (aceleración de la masa de la boya)

## Estabilidad de boyas (análisis detallado de olas)

$$H_D = \frac{1}{2} * CD * \rho * A * u^2$$

$C_D$  : coeficiente de arrastre

$\rho$  : masa específica del agua

A: sección transversal de la boya en el plano normal a la fuerza

u : velocidad del agua

## Estabilidad de boyas (análisis detallado de olas)

$$U = U_m + U_x$$

$U_m$ : velocidad de la corriente (marea, río)

$U_x$ : componente de la velocidad orbital de las partículas (misma dirección que  $U_m$ )

## Estabilidad de boyas (análisis detallado de olas)

$$H_i = C_A * \rho * Vol * a_x$$

$C_A$  : coeficiente de inercia

$\rho$  : masa específica del agua

Vol: volumen de agua desplazada

$a_x$  : aceleración orbital del agua

## Estabilidad de boyas (análisis detallado de olas)

$$\phi = \frac{H}{2} \frac{\sigma}{k} \frac{\cosh(k(d+z))}{\sinh(kd)} [\sin(kx - \sigma t)]$$

$\phi$  : función potencial del campo de velocidades

## Estabilidad de boyas (análisis detallado de olas)

$$u_x = \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

$$a_x = \frac{\partial u_x}{\partial t}$$

$$u_x = \frac{H}{2} \sigma \frac{\cosh[k(d+z)]}{\sinh(kd)} \cos(kx - \sigma t)$$

$$a_x = \frac{H}{2} \sigma^2 \frac{\cosh[k(d+z)]}{\sinh(kd)} \sin(kx - \sigma t)$$

## Estabilidad de boyas (análisis detallado de olas)

$$\sigma = \frac{2 \pi}{T}$$

T: periodo

$$k = \frac{2 \pi}{L}$$

L: Longitud de onda

$$\theta = k x - \sigma t$$

Ángulo de fase

# Estabilidad de boyas (análisis detallado de olas)

**Aguas profundas:  $d > 0,5 L$**

**$d \gg z$                       para boyas**

$$\frac{\cosh[k (d + z)]}{\sinh(k d)} = 1$$

$$u_x = \frac{H}{2} * \sigma * \cos \theta$$

$$a_x = \frac{H}{2} * \sigma^2 * \sen \theta$$

# Estabilidad de boyas (análisis detallado de olas)

**Aguas profundas:  $d > 0,5 L$**

Calculo el valor medio entre 0 y  $\pi / 2$

$$u_x = \int_0^{\frac{\pi}{2}} u_x d\theta = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{H}{2} \sigma \cos \theta d\theta$$

$$a_x = \int_0^{\frac{\pi}{2}} a_x d\theta = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{H}{2} \sigma^2 \sin \theta d\theta$$

$$\bar{u}_x = \frac{H}{2} \frac{2\pi}{T} = \pi \frac{H}{T}$$

$$\bar{a}_x = \frac{H}{2} \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 = 2 H \left( \frac{\pi}{T} \right)^2$$

## Estabilidad de boyas (análisis detallado de olas)

Aguas Intermedias:  $1 / 2 L > d > 1 / 20 L$

**$d \gg z$                       para boyas**

$$\frac{\cosh[k (d + z)]}{\sinh(k d)} \approx \frac{1}{k d}$$

$$u_x = \frac{H}{2} \sigma \frac{1}{k d} \cos \theta$$

$$a_x = \frac{H}{2} \sigma^2 \frac{1}{k d} \sin \theta$$

## Estabilidad de boyas (análisis detallado de olas)

Aguas Intermedias:  $1 / 2 L > d > 1 / 20 L$

Calculo el valor medio entre 0 y  $\pi / 2$

$$u_x = \int_0^{\pi/2} u_x d\theta = \frac{H}{2} \sigma \frac{1}{k d} \int_0^{\pi/2} \cos \theta d\theta$$

$$a_x = \int_0^{\pi/2} a_x d\theta = \frac{H}{2} \sigma^2 \frac{1}{k^* d} \int_0^{\pi/2} \sin \theta d\theta$$

$$\overline{u_x} = \frac{H}{2} \sigma \frac{1}{k d}$$

$$\overline{a_x} = \frac{H}{2} \sigma^2 \frac{1}{k d}$$

# Estabilidad de boyas (análisis detallado de olas)

Aguas Intermedias: si  $d = 1 / 20 L$

Calculo el valor medio entre 0 y  $\pi / 2$

$$\overline{u_x} = \frac{H}{2} \sigma \frac{1}{k d}$$

$$\overline{a_x} = \frac{H}{2} \sigma^2 \frac{1}{k d}$$

$$\overline{u_x} = 10 \frac{H}{T}$$

$$\overline{a_x} = 20 \pi \frac{H}{T^2} \approx 63 \frac{H}{T^2}$$

## Estabilidad de Spares (análisis detallado de olas)

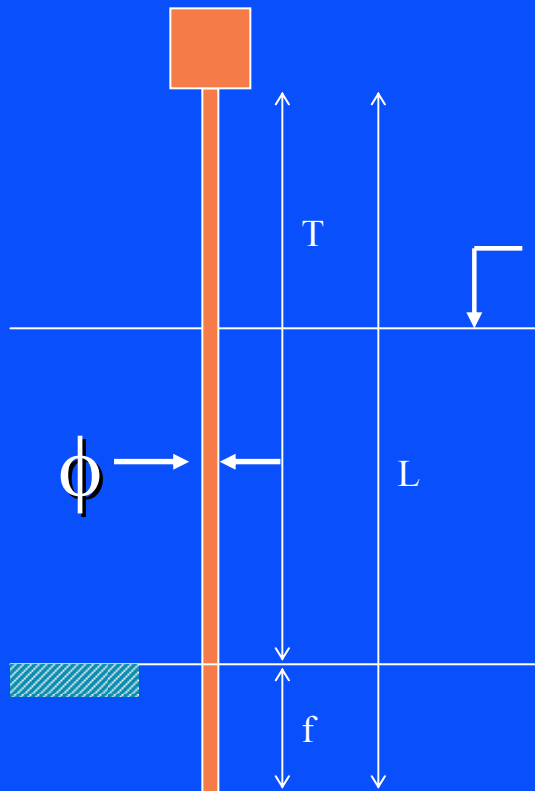
No se puede considerar  $d \gg z$ , por lo que hay que evaluar las acciones del oleaje en franjas horizontales  $dF$

## ¿Qué ola considerar?

- Como condición de servicio, se puede considerar  $H_s$ , pero con una pérdida de divergencia vertical de la linterna menor al 50%
- Como condición última, se puede considerar  $H_{1/10}$

# Pilotes (Aplicación para Balizas)

- Si  $20 \phi < L$ , se puede despreciar el efecto del oleaje



- Para una Baliza:

$$f \approx \frac{1}{2} T$$

- Si el suelo es erosionable, puede haber desmoronamiento. Se sugiere:

$$f > \frac{1}{2} T$$

# Acciones sobre Balizas- Expresiones de Morrison

- Para una Baliza, se pueden aplicar las expresiones de Morrison:

$$F_i = \rho \cdot c_m \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \frac{\partial v}{\partial t}$$

-  $\rho$ : masa específica

$$F_{im} = \frac{1}{2} \rho \cdot c_m \cdot k_{mi} D^2 \cdot H$$

$$c_m < 2$$

$$c_m \approx 2$$

$$F_{dm} = \frac{1}{2} \rho \cdot c_0 \cdot k_{md} H^2 \cdot D$$

$c_0$ : coef. de fricción  $\approx 2$

$K_{mi}$ ;  $k_{md}$  surgen de la Teoría de Airy

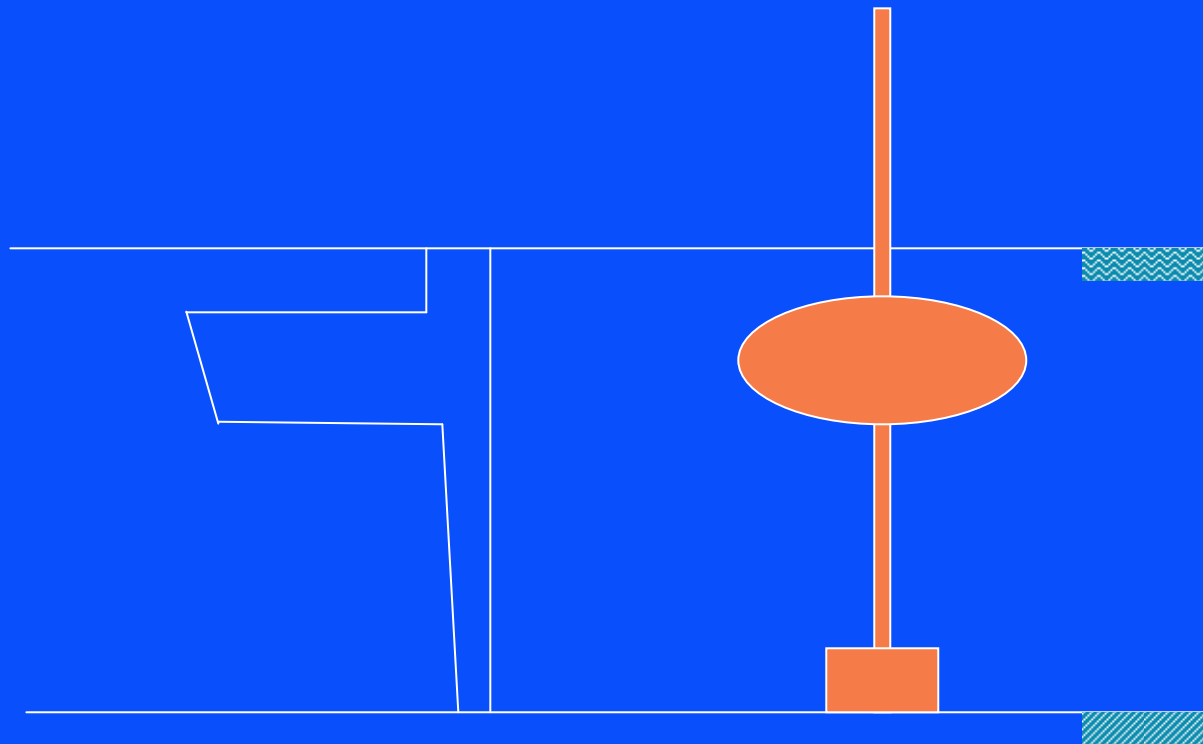
Suma Vectorial

$F_{im}$  se da  $\frac{1}{4} L$  antes de la cresta

$F_{dm}$  se da en la cresta

# Spares

En general, puede despreciarse el efecto sobre el péndulo y se adopta sólo el efecto sobre el flotante.



# BIBLIOGRAFÍA

- IALA Navguide Edition 5, 2006
- IALA , Recomendación E-107
- Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Dirección General de Puertos y Costas (España), “Normas Técnicas sobre Obras e Instalaciones de Ayudas a la Navegación”- 1986. Pag 287 a 309
- THE CANADIAN COAST GUARD MOORING SELECTION GUIDE. Reiner Silberhorn. XVth Conference of IALA- Sydney , March 2002.
- Fondeo elástico para boya II-B Norte. Informe técnico-Fotocopias
- Determinación de Fuerza Horizontal (H) en cadenas de amarre. Apuntes AtoN. 2004
- 2.5 Mooring Forces- Fotocopia AtoN
- Stability of a conventional lighted buoy- Fotocopia