

# Índex Annexes

<b>ANNEX I: Determinació de càrregues .....</b>	<b>4</b>
1.1. Carga màxima.....	5
1.1.1. Cargues que actuen sobre el fondeig .....	5
1.1.2. Empenta de l'aigua.....	6
1.1.3. Força pes .....	6
1.1.4. Força de fregament .....	7
1.1.5. Carga màxima .....	10
1.1.6. Angle crític d'aplicació de la força. ....	11
1.1.7. Presentació dels resultats .....	11
1.2. Rang de treball .....	13
1.2.1. Factors que influeixen .....	13
1.2.2. Longitud de la cadena .....	13
1.2.3. Catenària. ....	14
1.2.4. Determinació angle crític .....	17
1.3. Càlcul general.....	18
1.4. Dimensionament en funció de l'embarcació .....	19
1.4.1. Factors que influeixen .....	19
1.4.2. Limitacions del sistema .....	19
1.4.3. Condicions mediambientals.....	19
1.4.4. Característiques de l'embarcació .....	23
1.4.6. Resultats .....	26
<b>ANNEX II: Càlculs estructurals .....</b>	<b>28</b>
2.1. Fondeig .....	29
2.1.1. Tija.....	29
2.1.2. Resultats .....	32
2.1.3. Hèlix .....	34
2.1.4. Argolla. ....	34
2.1.5. Soldadures .....	35
2.2. Cadena .....	37
2.2.1. Condicions.....	37
2.2.2. Desplaçaments.....	37

2.3. Útil d'assaig .....	38
2.3.1. Condicions .....	39
2.3.2. Tensions generades .....	39
<b>ANNEX III: Patent.....</b>	<b>40</b>

## Índex de figures

<b>Figura 2.1:</b> Esquema cargues fondeig .....	5
<b>Figura 1.2:</b> Condicions de funcionament.....	13
<b>Figura 1.3:</b> Característiques proporcionades pel fabricant.....	14
<b>Figura 1.4:</b> Diagrama de tensions d'una catenària en equilibri.....	15
<b>Figura 1.5:</b> Posició extrema de l'embarcació .....	17
<b>Figura 1.6:</b> Paràmetres d'una onada .....	20
<b>Figura 1.7:</b> Detall mesures .....	24
<b>Figura 1.8:</b> Distància recorreguda per l'embarcació .....	24
<b>Figura 2.1:</b> Model de càlcul.....	34
<b>Figura 2.2:</b> Localització dels cordons de soldadura.....	35
<b>Figura 2.3:</b> Condicions de contorn .....	37
<b>Figura 2.4:</b> Desplaçaments esclavó .....	38

# **ANNEX I: DETERMINACIÓ DE CÀRREGUES**

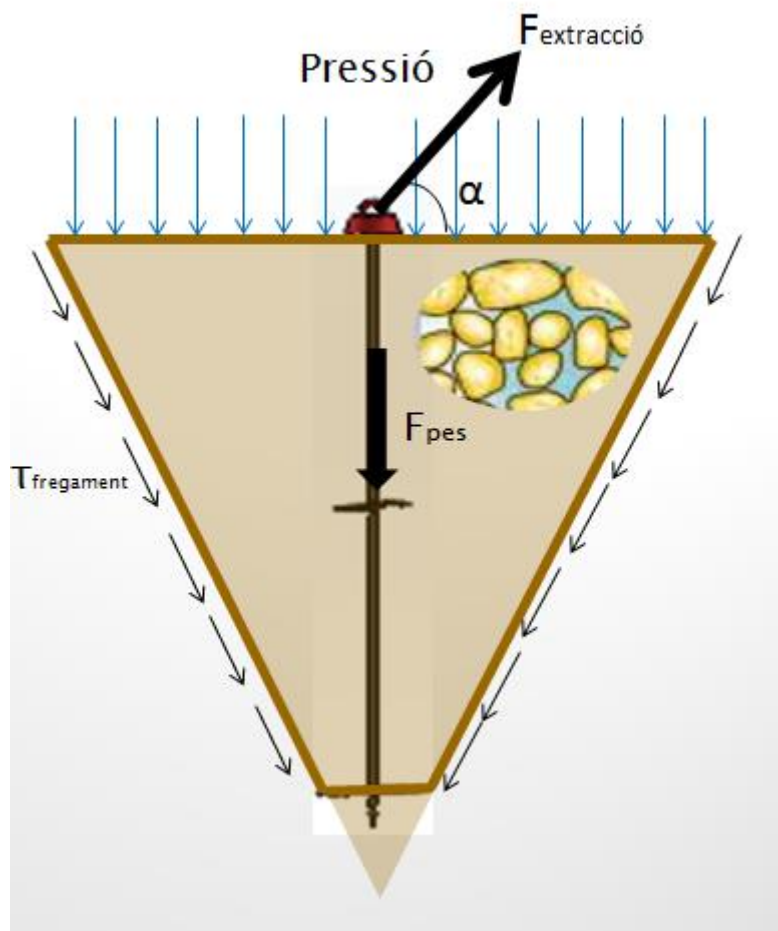
A continuació es realitza un estudi de les diferents cargues que actuen sobre el sistema, plantejant-ne les equacions necessàries per donar solució a les sol·licitacions mecàniques.

## 1.1. Carga màxima

En aquest apartat, només es té en compte el fondeig, i té la finalitat d'obtenir una equació que determini la força màxima que pot suportar aquest, en funció de l'angle d'aplicació de la força. S'entén per carga màxima, la força màxima aplicable, sense que el fondeig perdi les condicions de sistema estàtic.

### 1.1.1. *Cargues que actuen sobre el fondeig*

A continuació es determinen de forma esquemàtica les diferents cargues que actuen sobre el sistema.



**Figura 2.1:** Esquema cargues fondeig

Descripció:

- Pressió en funció de l' alçada del fons marí.
- Pes del volum resistent (Con determinat per l'angle de fregament entre les partícules d'arena).
- Força de fregament.
- Densitat relativa de la sorra.
- Força d'extracció.

### 1.1.2. *Empenta de l'aigua*

La força deguda a l'empenta de l'aigua, segons el principi d'Arquímedes.

$$F_{empenta} = \rho_w \cdot V_{con} \cdot g$$

$\rho_w$ -densitat aigua de mar (Kg/m<sup>3</sup>).  
g- gravetat (m/s<sup>2</sup>).  
V- volum resistent (m<sup>3</sup>).

- Volum resistent.

$$h_{virtual} = \frac{r + \tan \varphi \cdot h_s}{\tan \varphi}$$
$$V_{con} = \frac{1}{3} \pi \cdot [R^2 \cdot h_{virtual} - r^2 (h_{virtual} - h_s)]$$

r- radi hèlix fondeig (m).  
R- radi gran del volum resistent (m).  
 $\varphi$ - angle de cohesió partícules(°).  
h<sub>s</sub>- altura del fondeig (m).

### 1.1.3. *Força pes*

És la força deguda al pes que actua sobre la superfície de l'hèlix del fondeig.

$$F_{pes} = \rho_{SM} \cdot V_{con} \cdot g$$

$\rho_{SM}$ -densitat de la sorra mullada (Kg/m<sup>3</sup>).  
g- gravetat (m/s<sup>2</sup>).  
V- volum resistent (m<sup>3</sup>).

- Densitat aparent de la sorra mullada.

$$\rho_{SM} = \frac{G_s(1+w)}{(1+e)} \cdot \rho_w$$

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

$G_s$ -gravetat específica de les partícules.

$w$ - contingut d'humitat.

$e$ - Relació de vuits.

$\rho_w$ -densitat aigua de mar ( $\text{Kg/m}^3$ ).

$\rho_s$ -densitat de les partícules de sorra ( $\text{Kg/m}^3$ ).

Descripció	Porositat	Relació de vuits	Contingut d'humitat	Densitat( $\text{Mg/m}^3$ )	
	$n$ (%)	$e$	$S_r=1$ $w$ (%)	$\rho_d$	$\rho_s$
Sorra uniforme solta	46	0,85	32	1,44	1,89
Sorra uniforme densa	34	0,51	19	1,75	2,08
Sorra ben rasclada solta	40	0,67	25	1,59	1,98
Sorra ben rasclada uniforme	30	0,43	16	1,86	2,16
Til·lita glacial ben rasclada	20	0,25	9	2,11	2,32
Argila glacial tova	55	1,20	45	1,21	1,76
Argila glacial dura	37	0,60	22	1,69	2,06
Argila lleugerament orgànica tova	66	1,90	70	0,92	1,57
Argila molt orgànica tova	75	3,00	110	0,68	1,43
Argila motmorilonítica orgànica tova (betonita)	84	5,20	194	0,44	1,28
Turba amorfa	91	10	500	0,18	1,09
Turba fibrosa	94	10	1000	0,09	1,03

#### 1.1.4. Força de fregament

És la força en sentit vertical deguda al fregament lateral del volum resistent en contacte amb les altres partícules d'arena. Aquesta ve determinada per les dues components de la força d'extracció en funció de l'angle d'aplicació.

1.1.4.1. Força de fregament vertical

Aquesta és la força de fregament deguda a la component vertical de la força d'extracció.

Tensor de tensions a la superfície lateral del volum resistent

$$\begin{bmatrix} -P_0 & 0 & 0 \\ 0 & -P_0 & 0 \\ 0 & 0 & -P_0 - \rho_{SM}g(z - h_s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -\cos \varphi \\ -\sin \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ P_0 \cos \varphi \\ \sin \varphi (P_0 + \rho_{SM}g(z - h_s)) \end{bmatrix}$$

$$P_0 = \rho_{aigua} \cdot g \cdot h$$

A continuació s'expressa l'equació de la tensió a la superfície lateral del volum resistent deguda a la component vertical de la força d'extracció.

$$\sigma = \vec{t} \cdot \vec{n} = |t| \cdot |n| \cdot \cos \theta = \begin{bmatrix} 0 & -\cos \varphi & -\sin \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ P_0 \cos \varphi \\ \sin \varphi (P_0 + \rho_{SM}g(z - h_s)) \end{bmatrix}$$

$$\sigma = -P_0 \cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi (P_0 + \rho_{SM} \cdot g \cdot (z - h_s))$$

Tensió tangencial deguda a la força de fregament ocasionada per la component vertical de la força d'extracció.

$$\tau_v = \tan \varphi [-P_0 \cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi (P_0 + \rho_{SM} \cdot g \cdot (z - h_s))]$$

Finalment, la component vertical de la força de fregament .

$$\tau_{V1} = \tau_v \cdot \cos \varphi$$

$$F_{f_{V1}} = \int_0^{h_s} \tau_{V1} \cdot dA = \int_0^{h_s} \tau_{V1} \cdot \left[ 2\pi \left( \frac{R-r}{h_s} z + r \right) \right] dz$$

$\rho_{aigua}$ -densitat aigua de mar (Kg/m<sup>3</sup>).

$g$ - gravetat (m/s<sup>2</sup>).

$h$ - altura del terra fins la superfície marina (m).

$\rho_{SM}$ -densitat sorra mullada (Kg/m<sup>3</sup>).

$F_{f_{V1}}$ -força de fregament vertical deguda a la component vertical de la força d'extracció (N).

$\phi$ -angle de cohesió partícules(°)

$\tau_{v1}$ -tensió tangencial deguda a la component vertical de la força d'extracció (Pa).

$R$ - radi gran del volum resistent (m).

$r$ - radi hèlix fondeig (m).

$h_s$ -altura del fondeig (m).



#### 1.1.4.2. Força de fregament horitzontal

És la força de fregament deguda a la component horitzontal de la força d'extracció.

Imposant les lleis bàsiques de l'estàtica (suma de forces i suma de moments igual a zero en qualsevol punt), es troba el perfil de tensions a la semi superfície comprimida del volum resistent, causades per la component horitzontal de la força d'extracció.

$$\sigma(z) = \sigma_{min} + \frac{\sigma_{MAX} - \sigma_{min}}{h_s} \cdot z$$

Imposant que la suma de forces i suma de moments siguin nuls s'obtenen les equacions que permeten determinar la tensió màxima i mínima de l'equació anterior.

$$F_H = \int_0^{h_s} \left( \sigma_{min} + \frac{\sigma_{MAX} - \sigma_{min}}{h_s} \cdot z \right) \cdot 2 \left( \frac{R-r}{h_s} z + r \right) dz$$

$$M_H = \int_0^{h_s} z \cdot \sigma(z) dA = F_H \cdot h_s$$

Solucionant les dues integrals i aïllant.

$$\sigma_{MAX} = \frac{3 \cdot F_H(R + 3r)}{h_s(R^2 + 4Rr + r^2)}$$

$$\sigma_{MAX} = - \frac{3 \cdot F_H(R + r)}{h_s(R^2 + 4Rr + r^2)}$$

R-radi gran del volum resistent (m).

r- radi hèlix fondeig (m).

h<sub>s</sub>-altura del fondeig (m).

F<sub>H</sub>-component horitzontal de la força d'extracció (N).

La tensió tangencial deguda a la força de fregament ocasionada per la component horitzontal de la força d'extracció.

$$\tau_H = (\sigma \cdot \cos \varphi \tan \varphi) + (\sigma \cdot \sin \varphi)$$

$$Ff_{V2} = \int_0^{h_s} \tau_H \cdot \cos \varphi dA = \int_0^{h_s} \tau_H \cdot \cos \varphi \left[ \left( \frac{R-r}{h_s} \right) z\pi + \pi r \right] dz$$

$$Ff_{V2} = \int_0^{h_s} \left[ \left( \sigma_{min} + \frac{\sigma_{MAX} - \sigma_{min}}{h_s} \cdot z \right) (\cos \varphi \tan \varphi + \sin \varphi) \right] \cdot \cos \varphi \cdot \pi \left( \frac{R-r}{h_s} z + r \right) dz$$

$\phi$ -angle de cohesió partícules ( $^{\circ}$ )

R-radi gran del volum resistent (m).

r- radi hèlix fondeig (m).

$h_s$ -altura del fondeig (m).

$Ff_{v2}$ -component vertical de la força de fregament deguda a la component horitzontal de la força d'extracció (N).

#### 1.1.4.3. Força de fregament resultant.

Finalment, la força de fregament en sentit vertical deguda a les dues components.

$$Ff_V = Ff_{V1} + Ff_{V2}$$

$Ff_v$ -component vertical de la força deguda al fregament (N).

$Ff_{v1}$ - component vertical de la força de fregament deguda a la component vertical de la força d'extracció (N).

$Ff_{v1}$ - component vertical de la força de fregament deguda a la component horitzontal de la força d'extracció (N).

#### 1.1.5. Carga màxima

Finalment ja es pot deduir la força màxima admissible pel fondeig en funció de l'angle d'aplicació, sense perdre la condició estàtica.

$$F_{ex} = \frac{F_{pes} + Ff_v + F_{pressió} - F_{empenta}}{\sin \alpha + \cos \alpha \cdot \sin \phi \cdot \cos \phi \cdot \pi}$$

$F_{pes}$ -força deguda al pes (N).

$Ff_v$ -força deguda al fregament (N).

$F_{pressió}$ -força deguda a la pressió de l'aigua (N).

$F_{empenta}$ -força deguda a l'empenta de l'aigua sobre els cossos submergits (N).

$\alpha$ - angle de cohesió partícules( $^{\circ}$ ).

$\phi$ -angle de cohesió partícules( $^{\circ}$ ).

### 1.1.6. Angle crític d'aplicació de la força.

S'anomena angle crític, el que provoca un rendiment menor del fondeig, entenent el rendiment com la capacitat del fondeig per suportar l'esforç sense cedir.

$$\frac{dF_{ex}}{d\alpha} = 0$$
$$\alpha_{crit} = \tan^{-1}\left(\frac{1}{\sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot \pi}\right)$$

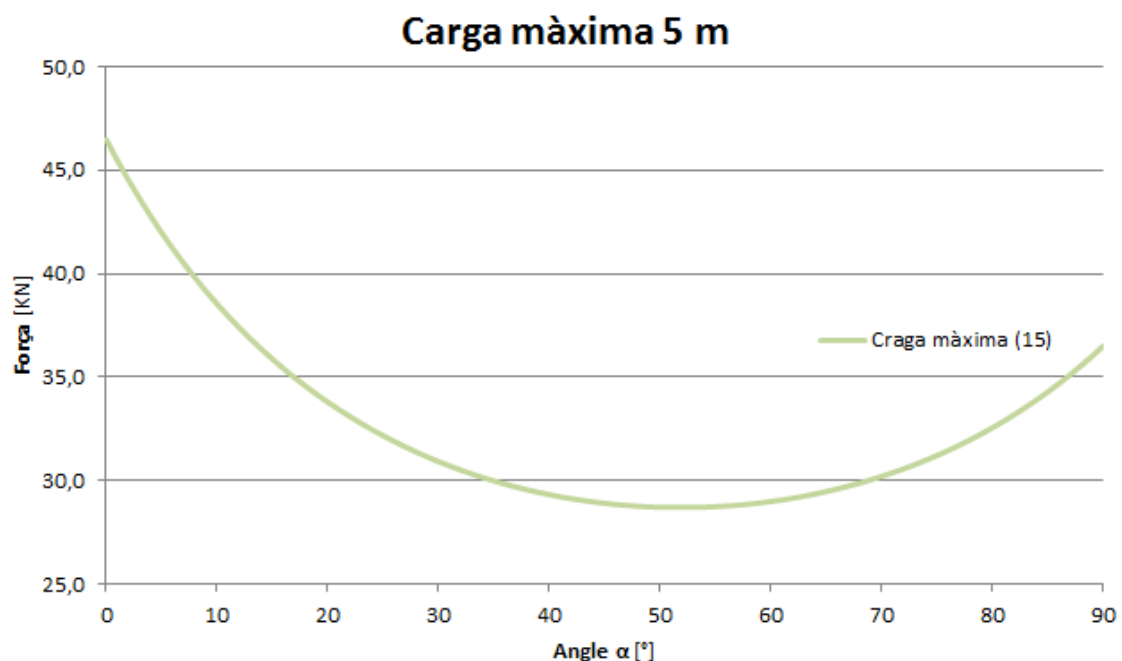
$F_{ex}$ -força màxima aplicada sobre el fondeig.  
 $\phi$ -angle de cohesió partícules(°).  
 $\alpha_{crit}$ -angle crític d'aplicació de la força(°)

### 1.1.7. Presentació dels resultats

Els resultats es presenten de forma gràfica, aquests caracteritzen el comportament de la sonda tenint en compte tots els factors descrits anteriorment, per a unes profunditats de entre 5-15 m.

Aquests resultats corresponen a la caracterització del disseny base.

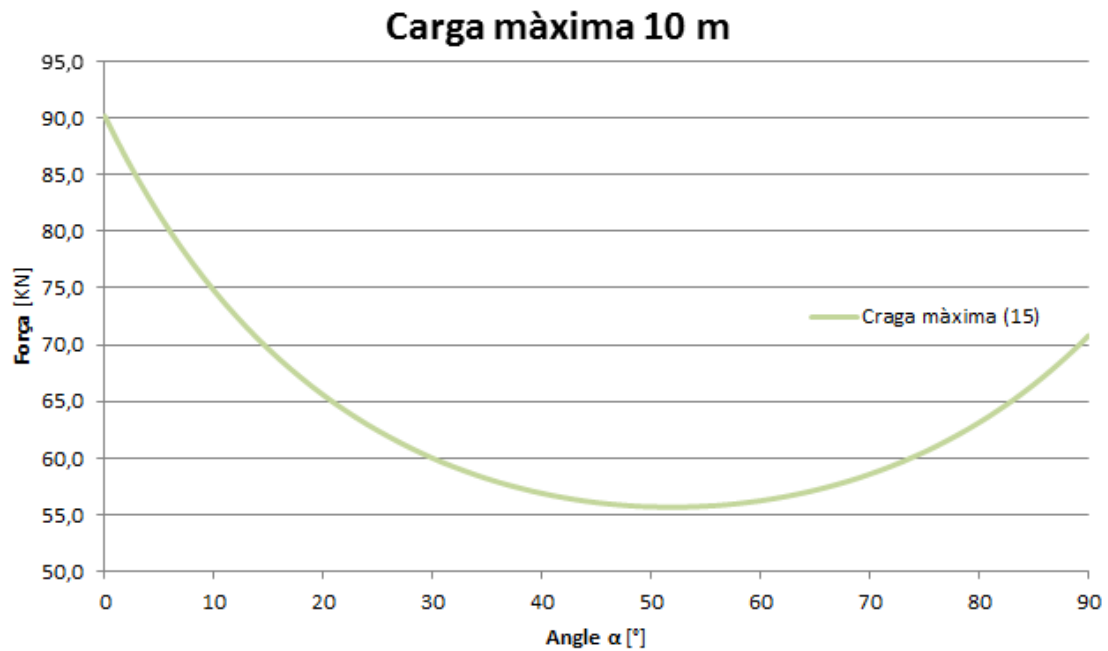
#### 1.1.7.1. Fons marí a 5 metres



\*La funció presenta un mínim quan  $\alpha = 51,85^\circ$

\*Força mínima  $F_{min} = 28,7$  KN.

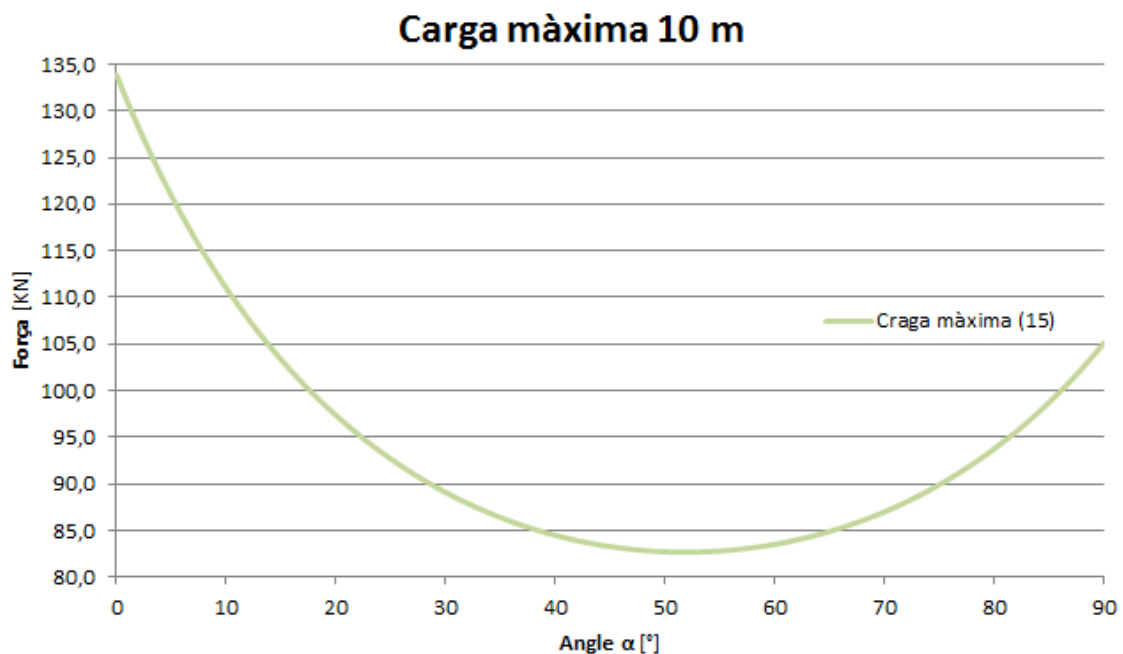
1.1.7.2. Fons marí a 10 metres.



\*La funció presenta un mínim quan  $\alpha = 51,85^\circ$

\*Força mínima  $F_{\min} = 55,6$  kN.

1.1.7.3. Fons marí a 15 metres.



\*La funció presenta un mínim quan  $\alpha = 51,85^\circ$

\*Força mínima  $F_{\min} = 82,6$  kN.

## 1.2. Rang de treball

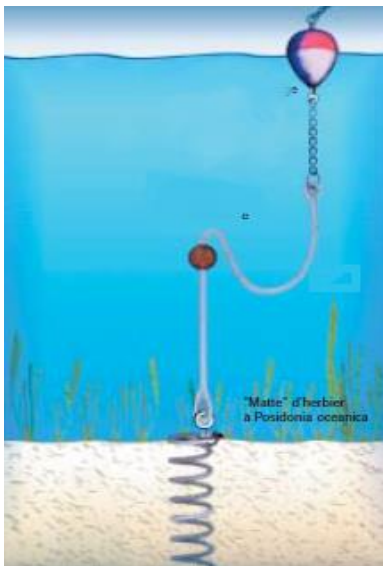
Degut a la gran variació de la força en funció de l'angle d'extracció, és necessari comprovar quin rang d'angles es donen durant el seu funcionament.

### 1.2.1. Factors que influeixen

A continuació s'exposen els factors que influeixen i fan variar el rang de treball.

- Longitud de la cadena.
- Catenària.

### 1.2.2. Longitud de la cadena



**Figura 1.2:** Condicions de funcionament.

Com es pot veure a la figura anterior, els fondejos s'instal·len de forma que la longitud de la cadena és un 30% major que la distància entre el fons i la superfície del mar.

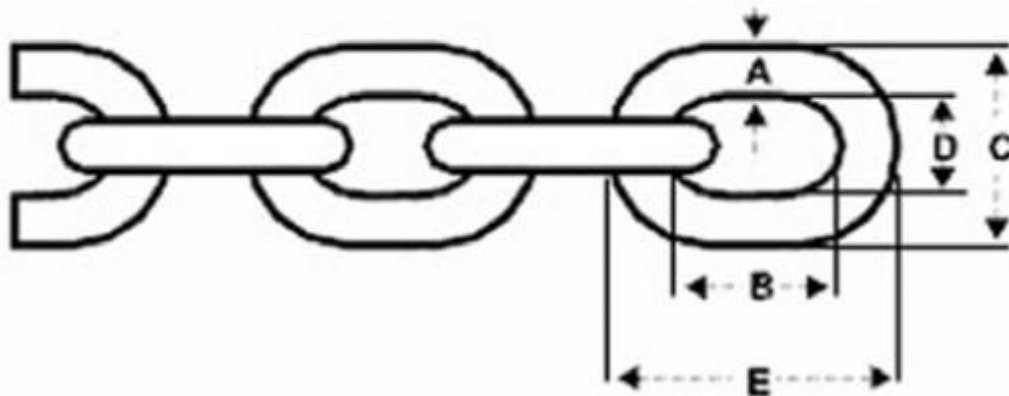
### 1.2.3. Catenària.

S'entén per catenària la corba que descriu una cadena suspesa pels seus extrems i sotmesa a un camp gravitatori uniforme.

Així doncs és important estudiar el grau de curvatura de la cadena que s'utilitza, ja que aquesta afecta directament sobre l'angle d'aplicació de la força.

#### 1.2.3.1. Característiques de la cadena

Code	71173	71174	71175
A (mm)	8		
B (mm)	24		
C (mm)	27,5		
D (mm)	11,5		
E (mm)	40		
Peso / m (kg)	1,42		
Carga de Rotura (kg)	3265		
Bolsa (m)	10	30	50



**Figura 1.3:** Característiques proporcionades pel fabricant

Aquestes són les característiques de les cadenes utilitzades per a la instal·lació dels fondejos facilitades pel fabricant.

### 1.2.3.2. Determinació:

L'equació general que descriu la curvatura d'una cadena suspesa pels seus extrems i sotmesa a un cap gravitatori:

$$y(x) = a \cdot \cosh\left(\frac{x - C_1}{a}\right) + C_2 \quad (1)$$

$$a = \frac{T \cdot \cos(\alpha)}{\lambda} \quad (2)$$

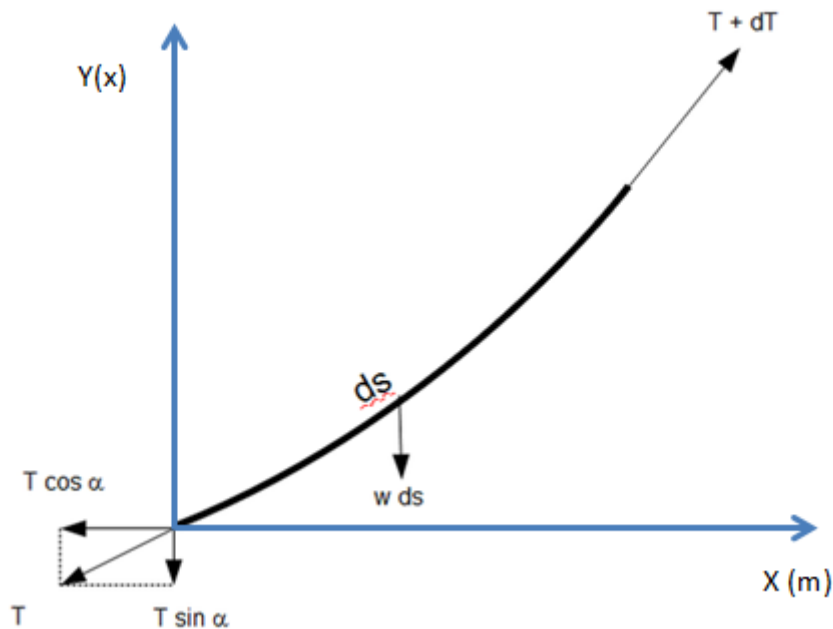
T: Tensió total del cable (Pa).

$\lambda$ : Pes per unitat de longitud (N/m).

$\alpha$ : Angle format per la catenària i l'horitzontal ( $^\circ$ ).

$C_1$ : Constant que depèn de les condicions de contorn.

$C_2$ : Constant que depèn de les condicions de contorn.



**Figura 1.4:** Diagrama de tensions d'una catenària en equilibri.

És necessari definir les condicions de contorn per trobar el valor numèric de les dues constants  $C_1$  i  $C_2$  de l'equació anterior.

En aquest cas imposarem les següents condicions:

$$y(0) = 0 \quad (3) \quad X_0: \text{Distància horitzontal entre els extrems de la cadena (m).}$$

$$y(x_0) = h \quad (4) \quad h: \text{Distància vertical entre els extrems de la cadena (m).}$$

Solucionada l'equació (1) amb les condicions de contorn anteriors i treballant amb una cadena amb una lambda de 1,42 Kg/m, segons el fabricant, s'obtenen els valors de les constants  $C_1$  i  $C_2$ .

Així doncs, la longitud necessària per assegurar que es compleix l'angle ( $\alpha$ ), ve donada per la següent equació:

$$L_{cat} = \int_0^{x_0} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (5) \quad \text{Lcat: Longitud de la catenària (m)}$$

Per últim es realitza el càlcul sense tenir en compte els efectes de la catenària:

$$x_0 = \frac{h}{tg \alpha} \quad (6) \quad \begin{array}{l} X_0 : \text{Distància horitzontal entre els extrems de la} \\ \text{cadena (m).} \\ h: \text{Distància vertical entre els extrems de la} \\ \text{cadena (m).} \end{array}$$

$$L_{Tri} = \sqrt{x_0^2 + y^2} \quad (7) \quad \begin{array}{l} L_{Tri}: \text{Longitud sense efectes de la catenària(m).} \\ \alpha: \text{Angle format per la catenària i l'horitzontal} \\ \text{(°).} \end{array}$$

Resolvent tots els passos anteriors amb un programa de càlcul i comparant els resultats obtingut amb els calculats sense tenir present l'efecte de la catenària, s'obtenen els següents valors:

Alçada (h)	$L_{cat}$ (m)	$L_{Tri}$ (m)
5	6,358118740	6,35811740
10	12,71623808	12,71623550
15	19,07436442	19,07435325

\*Els càlculs s'han realitzat amb un angle  $\alpha=51,85^\circ$  corresponent al més desfavorable pel fondeig.

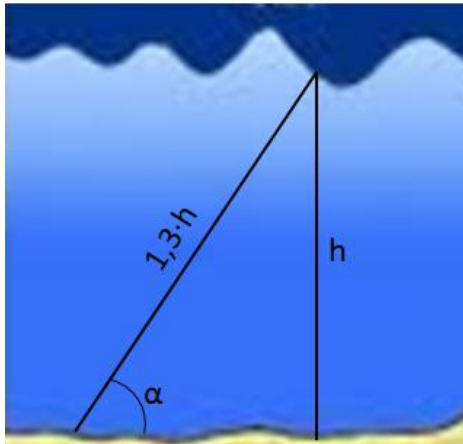
Així doncs s'observa que la corba de la catenària es pot despreciar, ja que els valors de la taula anterior mostren una variació ínfima.



#### 1.2.4. Determinació angle crític

Ja que ha quedat demostrat el poc efecte de la catenària en l'angle d'aplicació, es determina el rang de treball de forma trigonomètrica.

Tenint en compte les dues posicions extremes es donen quan l'embarcació tibia de la cadena i la deixa totalment estirada.



**Figura 1.5:** Posició extrema de l'embarcació

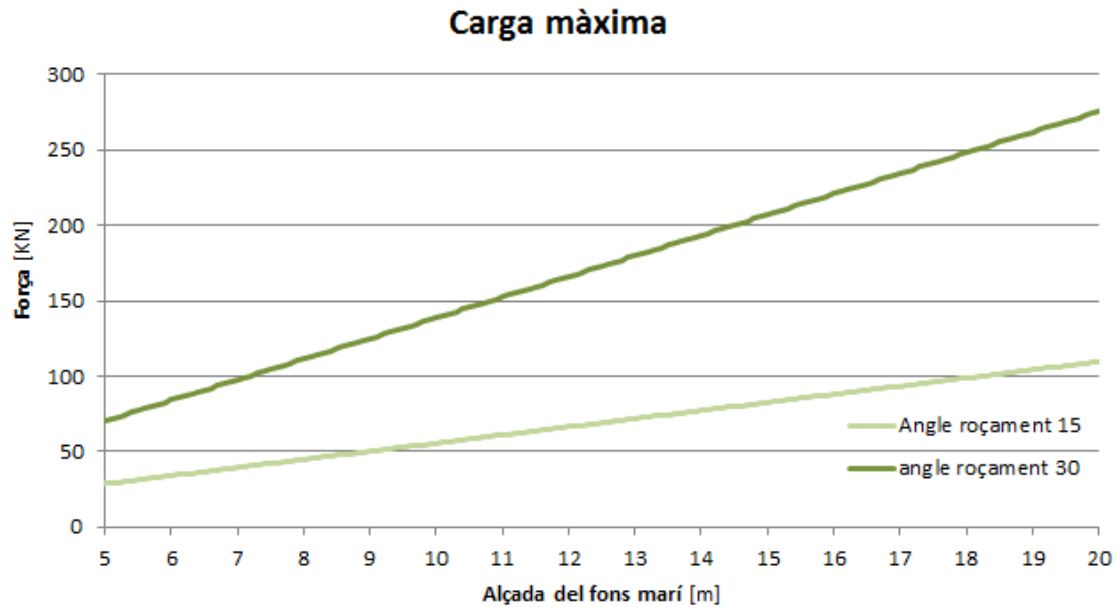
$$\sin \alpha = \frac{h - (H/2)}{1,3 \cdot h}$$

h: Alçada fons (m)  
 $\alpha$ : Angle d'aplicació de la força ( $^{\circ}$ )  
H: Alçada onades (m)

L'angle a la posició més extrema ve determinat per la fórmula anterior. El rang de treball pot variar entre  $[\alpha \div 90 + \alpha]$ . Sense tenir en compte l'alçada de les onades, el rang de treball varia entre  $[50,3^{\circ} \div 140,3^{\circ}]$ , per tant s'ha de tenir present, que el rang de treball passa pel mínim de la funció anterior.

### 1.3. Càlcul general

Degut a que les condicions de treball inclouen l'angle més desfavorable, es confecciona un gràfic mantenint aquest angle fixe en funció de profunditat del mar.



El gràfic conté els dos casos extrems determinats per la variació de l'angle de fregament entre les partícules d'arena. Així doncs, la carga màxima que es pot esperar del fondeig està compresa entre les dues rectes.

## 1.4. Dimensionament en funció de l'embarcació

En aquest apartat s'estableix un mètode quantitatiu, per valorar quin tipus d'embarcacions són aptes per poder-s'hi ancorar.

### 1.4.1. *Factors que influeixen*

En primer lloc es caracteritzen els factors que fan variar la resistència del fondeig.

- Limitacions del sistema
  - Longitud de cadena
- Condicions mediambientals.
  - Densitat de l'aigua.
  - Velocitat lineal de l'aigua.
  - Alçada onades.
  - Velocitat del aire.
- Característiques de l'embarcació.
  - Coeficient dinàmic de l'embarcació.
  - Dimensions de l'embarcació

### 1.4.2. *Limitacions del sistema*

La Longitud de la cadena és un factor limitant, aquesta és efectiva mentre l'alçada de les crestes és inferior a  $1,3 \cdot h$ . En aquestes condicions el sistema intenta submergir l'embarcació, ja que la profunditat del mar és major que la longitud de la cadena.

### 1.4.3. *Condicions mediambientals*

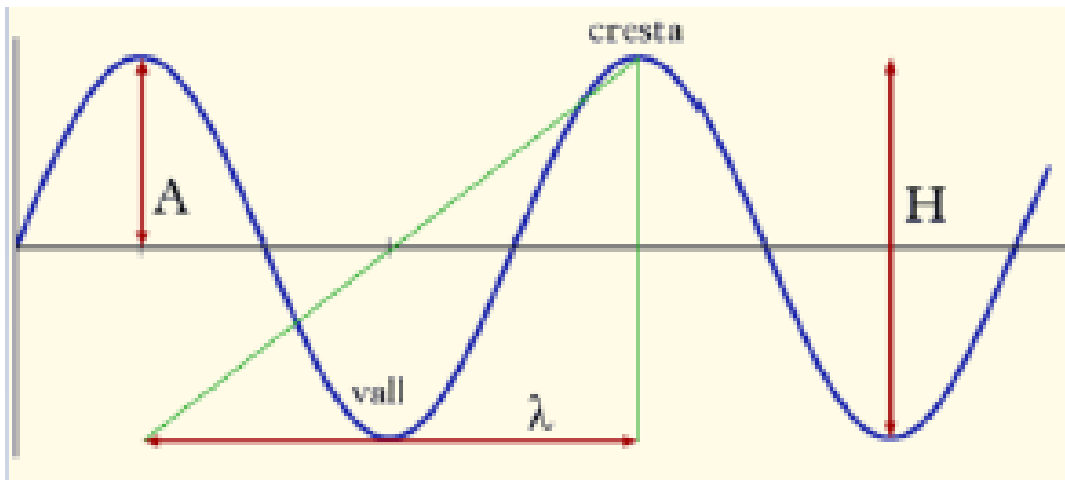
Per valorar l'estat de la mar, es tenen en compte dues variables, en primer lloc l'alçada de les onades i en segon lloc la força del vent.

#### 1.4.3.1. Velocitat de les onades:

Les onades es descriuen mitjançant els següents paràmetres:

- Altura (H): És la distància vertical entre una cresta i una vall consecutives.

- Període (T): És el temps que passa entre el pas de dues crestes o dues valls consecutives.
- Longitud d'ona ( $\lambda$ ): És la distància entre dues crestes consecutives.
- Amplitud (A): És la meitat de l'alçada  $A=H/2$ .
- Velocitat (c): És l'avanç lineal d'una línia de crestes, i és igual a la longitud dividida per el període  $c=\lambda/T$ .
- Pendent (P): És el quocient de dividir l'alçada entre la longitud d'onada  $P=H/\lambda$ .
- Edat de l'onada (e): És el quocient entre la velocitat de propagació i la velocitat del vent  $e=c/V$ .
- Direcció: És el punt de l'horitzó des d'on venen les onades.



**Figura 1.6:** Paràmetres d'una onada

La teoria que descriu el moviment de les onades es fa més senzilla a la mar d'altura, ja que generalment l'alçada (H) de les onades és menor que la seva longitud (L), i més complexa a mesura que arriben a la costa, doncs l'alçada del fons marí hi influeix.

L'equació que descriu el moviment de les onades, on la velocitat de propagació de la onada (c) ve donada per:

$$c^2 = \frac{g}{k} \cdot \tanh(K \cdot h)$$

$$K = \frac{2 \cdot \pi}{L}$$

h: Profunditat de l'aigua (m)  
g: Acceleració gravitacional ( $m/s^2$ )  
L: Longitud d'ona (m)

Quan "K·h" és molt gran, perquè la profunditat (h) és gran (zona d'aigües profundes) la  $\tanh(K \cdot h)$  es fa aproximadament 1.











D'altra banda quan la profunditat (h) és petita, té una gran importància en les transformacions que pateixen les onades i aleshores:

$$c = \sqrt{g \cdot h}$$

c: Velocitat lineal de l'onada (m/s)  
h: Profunditat de l'aigua (m)  
g: Acceleració gravitacional (m/s<sup>2</sup>)







#### 1.4.3.2. Alçada de les onades

L'alçada de les onades amb les condicions necessàries per a la formació d'una mar completament desenvolupada i una velocitat determinada, venen descrites per l'escala de Douglas.

Grau		Denominació	Altura onades m	Equivalència a l'escala de Beaufort
	0	Calma	0	0
	1	Rizada	0 a 0,25	1-2
	2	Marejadeta	0,25 a 0,5	3
	3	Marejada	0,5 a 1,25	4
	4	Forta Marejada	1,25 a 2,5	5
	5	Grossa	2,5 a 4	6
	6	Molt Grossa	4 a 6	7
	7	Arbolada	6 a 9	8-9
	8	Muntanyosa	9 a 14	10-11
	9	Enorme	>14	12







Finalment, tenint en compte l'efecte profunditat amb la velocitat de l'aigua, es determinen les velocitats en funció de l'alçada de les onades per a 5, 10 i 15 metres de profunditat.

- Fons marí a 5 metres.



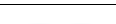

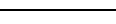

Grau		Denominació	Altura onades m	Velocitat de l'aigua [m/s]	Equivalència a l'escala de Beaufort
	0	Calma	0	< 5	0
	1	Rizada	0 a 0,25	5	1-2
	2	Marejadeta	0,25 a 0,5	7	3
	3	Marejada	0,5 a 1,25	7	4
	4	Forta Marejada	1,25 a 2,5	7	5
	5	Grossa	2,5 a 4	7	6

## Disseny i càlcul d'un fondeig ecològic per a la preservació de la posidònia

- Fons marí a 10 metres.








Grau		Denominació	Altura onades m	Velocitat de l'aigua [m/s]	Equivalència a l'escala de Beaufort
	0	Calma	0	< 5	0
	1	Rizada	0 a 0,25	5	1-2
	2	Marejadeta	0,25 a 0,5	7	3
	3	Marejada	0,5 a 1,25	9	4
	4	Forta Marejada	1,25 a 2,5	10	5
	5	Grossa	2,5 a 4	10	6

- Fons marí a 15 metres.

Grau		Denominació	Altura onades m	Velocitat de l'aigua [m/s]	Equivalència a l'escala de Beaufort
	0	Calma	0	< 5	0
	1	Rizada	0 a 0,25	5	1-2
	2	Marejadeta	0,25 a 0,5	7	3
	3	Marejada	0,5 a 1,25	9	4
	4	Forta Marejada	1,25 a 2,5	10	5
	5	Grossa	2,5 a 4	13	6

#### 1.4.3.3. Velocitat del vent

La velocitat del vent a la nàutica, se sol mesurar en nusos i ve determinada per l'escala de Beaufort.

Número de Beaufort		Velocitat del vent		Denominació
		[Km/h]	Nusos [mn/h]	
0		0 a 1	0	Calma
1		2 a 5	1 a 3	Ventolina
2		6 a 11	4 a 6	Vent fluixet
3		12 a 19	7 a 10	Vent moderat
4		20 a 28	11 a 16	Vent fresquet
5		29 a 38	17 a 21	Vent fresc
6		39 a 49	22 a 27	Vent fort
7		50 a 61	28 a 33	Temporal
8		62 a 74	34 a 40	Temporal fort
9		75 a 88	41 a 47	Temporal molt fort
10		89 a 102	48 a 55	Temporal violent
11		103 a 117	56 a 63	Borrasca
12		>117	64 a 71	Huracà

#### 1.4.3.4. Densitat de l'aigua

La densitat de l'aigua del mar depèn de tres variables: la salinitat, la temperatura i la pressió. El valor de l'aigua de mar en el seu ambient varia a partir del tercer decimal i, per economitzar feina s'adopta la següent:

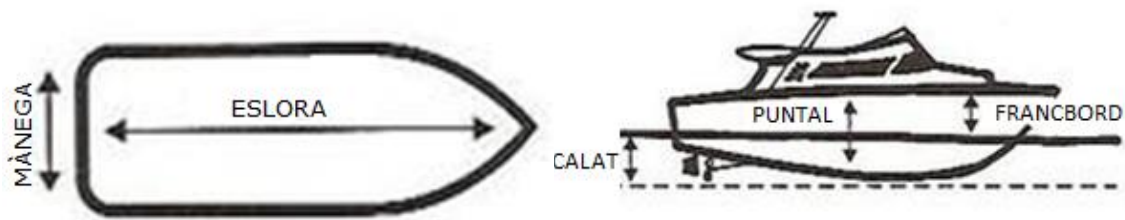
$$\rho_{\text{Mar}} = 1022 \text{ Kg/m}^3.$$

#### 1.4.4. Característiques de l'embarcació

La força resultant de l'acció d'un fluid (aigua de mar) sobre un cos (embarcació) en la direcció del fluid s'anomena força de resistència a l'avanç.

Aquesta ve determinada en funció del coeficient dinàmic de l'embarcació ( $C_D$ ). Per poder realitzar el càlcul s'ha establert un  $C_D = 0,15$ .

Altres característiques importants són la mànega i el calat, ja que aquestes determinen l'àrea perpendicular a la velocitat del fluid (aigua de mar).



**Figura 1.7:** Detall mesures

El càlcul serà vàlid per a totes aquelles embarcacions amb un coeficient dinàmic:

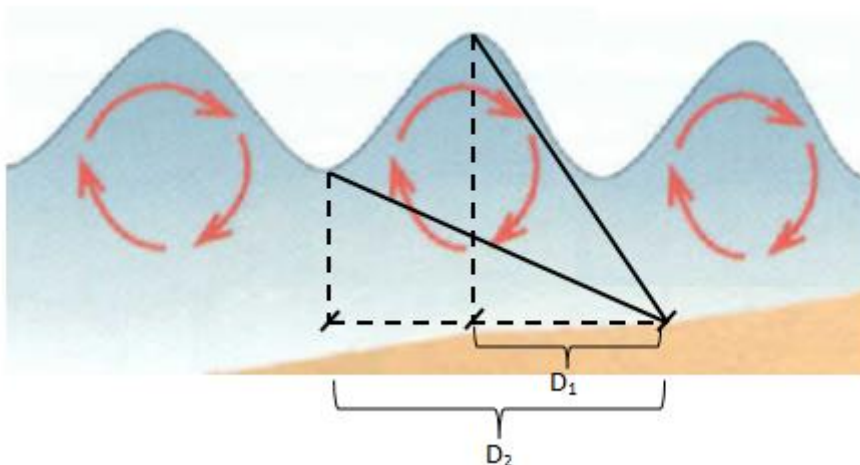
- $C_D \leq 0,15$

#### 1.4.5. Procés de càlcul

##### 1.1.5.1. Energia acumulada pel sistema

- Distància recorreguda

L'embarcació sofreix un desplaçament horitzontal i vertical degut a les onades. La distància horitzontal és la recorreguda per l'embarcació entre la cresta i la vall de l'onada.



**Figura 1.8:** Distància recorreguda per l'embarcació



- Força de resistència a l'avang

La força de resistència a l'avang ve determinada per la següent fórmula:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_{Mar} \cdot c^2 \cdot A$$

$F_D$ : Força (N)  
 $\rho$ : Densitat aigua del mar ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $c$ : Velocitat de l'aigua (m/s)  
 $A$ : Àrea perpendicular a la velocitat ( $\text{m}^2$ )

- Energia acumulada pel sistema:

L'energia cinètica acumulada pel sistema es dedueix de la següent forma:

$$E_C = F_D \cdot d$$

$E_C$ : Energia cinètica (J)  
 $F_D$ : Força de resistència a l'avang (N)  
 $D$ : Distància recorreguda (m)

Tenint en compte l'energia màxima que pot acumular la cadena degut a la seva deformació, la cadena treballa sempre en règim elàstic. Mitjançant un procés de simulació es determina la constant elàstica.

$$E_e = \frac{1}{2} \cdot K \cdot x^2$$






$E_e$ : Energia elàstica de la cadena (J)  
 $K$ : Constant elàstica (N/m)  
 $x$ : Deformació del material (m)

Segons les especificacions del fabricant la cadena pot suportar una carga màxima de 3265 Kg, en funció del nombre d'eslavons (funció de la profunditat) aquesta acumularà més o menys energia.

Finalment igualant les equacions es pot saber quina és l'àrea perpendicular a la velocitat del fluid màxima que el sistema pot suportar.







#### 1.4.6. Resultats

- Distància al fons marí 5 metres.

Grau		Denominació	Altura de les ones [m]	Velocitat de l'aigua [m/s]	Velocitat del vent [Km/h]	Àrea Max submergida [m <sup>2</sup> ]
	0	Calma	0	< 5	0 a 1	40
	1	Rizada	0 a 0,25	5	2 a 11	40
	2	Marejadeta	0,25 a 0,5	7	12 a 19	10
	3	Marejada	0,5 a 1,25	7	20 a 28	5
	4	Forta Marejada	1,25 a 2,5	7	29 a 38	1,5







\*Les condicions del sistema, fan que aquest deixi de ser eficient quan l'alçada de les onades (H) supera els 3 m.

- Distància al fons marí 10 metres.

Grau		Denominació	Altura de les ones [m]	Velocitat de l'aigua [m/s]	Velocitat del vent [Km/h]	Àrea Max submergida [m <sup>2</sup> ]
	0	Calma	0	< 5	0 a 1	170
	1	Rizada	0 a 0,25	5	2 a 11	170
	2	Marejadeta	0,25 a 0,5	7	12 a 19	35
	3	Marejada	0,5 a 1,25	9	20 a 28	7,5
	4	Forta Marejada	1,25 a 2,5	10	29 a 38	2
	5	Grossa	2,5 a 4	10	39 a 49	1

\*Les condicions del sistema, fan que aquest deixi de ser eficient quan l'alçada de les onades (H) supera els 6 m.

- Distància al fons marí 15 metres

Grau		Denominació	Altura de les oles [m]	Velocitat de l'aigua [m/s]	Velocitat del vent [Km/h]	Area Max submergida [m <sup>2</sup> ]
	0	Calma	0	< 5	0 a 1	200
	1	Rizada	0 a 0,25	5	2 a 11	200
	2	Marejadeta	0,25 a 0,5	7	12 a 19	85
	3	Marejada	0,5 a 1,25	9	20 a 28	15
	4	Forta Marejada	1,25 a 2,5	13	29 a 38	6,5
	5	Grossa	2,5 a 4	15	39 a 49	2

## **ANNEX II: CÀLCULS ESTRUCTURALS**

En aquest apartat es dimensionen les parts mecàniques del fondeig, i es comprova mitjançant un programa de simulació d'elements finits, la deformació elàstica de la cadena quan aquesta està sotmesa a una carga i la resistència de l'útil d'assaig.

## 2.1. Fondeig

El fondeig es dimensiona perquè pugui suportar càrregues de fins a 4000 Kg, ja que la força màxima admissible per a la cadena és de 3265 Kg. D'aquesta forma s'assegura que l'element més feble del sistema i el que limita la carga màxima sigui la cadena.

### 2.1.1. Tija

El cilindre està sotmès a un esforç de flexió composta, ja que actuen simultàniament un esforç normal de tracció i un moment flector.

Per realitzar el càlcul es té en consideració l'acció de la sorra que actua sobre la tija. La resistència de la sorra per evitar que la tija es deformi ve determinada pel coeficient de balast.

Classes de sòls	Coeficient de Balast (kp/cm <sup>3</sup> )
Sòl lleuger de torba i fangós	0,5 - 1,0
Sòl pesat de torba i fangós	1,0 - 1,5
Arena fina de ribera	1,0 - 1,5
Capes d'humus, arena i grava	1,0 - 2,0
Terra argilosa mullada	2,0 - 3,0
Terra argilosa humida	4,0 - 5,0
Terra argilosa seca	6,0 - 8,0
Terra argilosa seca dura	10,0 -
Humus fermament estratificat amb arena i poques pedres	8,0 - 10,0
Humus fermament estratificat amb arena i moltes pedres	10,0 - 12,0
Grava fina amb molta arena fina	8,0 - 10,0
Grava mitja amb arena fina	10,0 - 12,0
Grava mitja amb arena grossa	12,0 - 15,0
Grava grossa amb arena grossa	15,0 - 20,0
Grava grossa amb poca arena	15,0 - 20,0
Grava grossa amb poca arena, molt fermament estratificada	20,0 - 25,0

Detall del càlcul:

L'equació general de la fletxa:

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{M_z}{EI} \Rightarrow \frac{d^3 w}{dx^3} = -\frac{T_z}{EI} \Rightarrow \frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{q_y}{EI}$$

w: Fletxa (m)  
M<sub>z</sub>: Moment flector (N·m)  
E: Mòdul elàstic del material (Pa)  
I: Moment d'inèrcia (m<sup>4</sup>)  
T<sub>z</sub>: (N)  
q<sub>y</sub>: Càrrega (N)  
x: Coordenada x (m)

Tenint amb compte que la reacció de la sorra es proporcional al mòdul de balast  $q_y(x) = -\phi k_b w(x)$ :

$$\frac{d^4 w}{dx^4} = -\frac{k_b \cdot R}{EI} w$$

w: Fletxa (m)  
E: Mòdul elàstic del material (Pa)  
I: Moment d'inèrcia (m<sup>4</sup>)  
K<sub>b</sub>: Constant de balast (N/m<sup>3</sup>)  
R: Radi tija (m)

La solució d'aquesta equació diferencial és (comprovada amb Maple):

$$w(x) = e^{\frac{\alpha x}{\sqrt{2}}} \left( C_1 \cos \frac{\alpha x}{\sqrt{2}} + C_2 \sin \frac{\alpha x}{\sqrt{2}} \right) + e^{-\frac{\alpha x}{\sqrt{2}}} \left( C_3 \cos \frac{\alpha x}{\sqrt{2}} + C_4 \sin \frac{\alpha x}{\sqrt{2}} \right)$$

C<sub>1</sub>: Constant  
C<sub>2</sub>: Constant  
C<sub>3</sub>: Constant  
C<sub>4</sub>: Constant

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{K_b}{E \cdot I}}$$

Aplicant les següents condicions de contorn per determinar el valor de les constants:

$$\begin{aligned} w(0) = 0 & \Rightarrow C_1 + C_3 = 0 \\ w'(0) = 0 & \Rightarrow C_1 + C_2 - C_3 + C_4 = 0 \\ w''(0) = -\frac{FL}{EI_z} & \Rightarrow \alpha^2 (C_2 - C_4) = -\frac{FL}{EI_z} \\ w'''(0) = \frac{F}{EI_z} & \Rightarrow \frac{\alpha^3}{\sqrt{2}} (-C_1 + C_2 + C_3 + C_4) = \frac{F}{EI_z} \end{aligned}$$

Resolent les equacions anteriors (via Maple):

$$C_1 = -\frac{\sqrt{2}F}{4\alpha^2 EI}, \quad C_2 = \frac{F(\sqrt{2} - 2\alpha L)}{4\alpha^2 EI}, \quad C_3 = \frac{\sqrt{2}F}{4\alpha^2 EI}, \quad C_4 = \frac{F(\sqrt{2} + 2\alpha L)}{4\alpha^2 EI} \quad \text{F: Força aplicada (N)}$$

La solució final:

$$w(x) = \frac{\sqrt{2}F}{4\alpha^2 EI} \left[ e^{\frac{\alpha x}{\sqrt{2}}} \left( -\cos \frac{\alpha x}{\sqrt{2}} + (1 - \sqrt{2}\alpha L) \sin \frac{\alpha x}{\sqrt{2}} \right) + e^{-\frac{\alpha x}{\sqrt{2}}} \left( \cos \frac{\alpha x}{\sqrt{2}} + (1 + \sqrt{2}\alpha L) \sin \frac{\alpha x}{\sqrt{2}} \right) \right]$$

F: Força aplicada (N)

E: Mòdul elàstic del material (Pa)

I: Moment d'inèrcia (m<sup>4</sup>)

L: Longitud del l'hèlix

x: Coordenada x (m)

Una vegada determinada la fletxa es pot calcular la llei de tallants i flectors:

- Moment flector

$$M_z = EI_z \frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{\sqrt{2}F}{4} \left[ e^{\frac{\alpha x}{\sqrt{2}}} \left( \sin \frac{\alpha x}{\sqrt{2}} + (1 - \sqrt{2}\alpha L) \cos \frac{\alpha x}{\sqrt{2}} \right) + e^{-\frac{\alpha x}{\sqrt{2}}} \left( \sin \frac{\alpha x}{\sqrt{2}} - (1 + \sqrt{2}\alpha L) \cos \frac{\alpha x}{\sqrt{2}} \right) \right]$$

M<sub>z</sub>: Moment flector (N·m)

F: Força aplicada (N)

E: Mòdul elàstic del material (Pa)

I: Moment d'inèrcia (m<sup>4</sup>)

L: Longitud del l'hèlix

x: Coordenada x (m)

- Tallants

$$T_y = -EI_z \frac{d^3 w}{dx^3}$$

Finalment s'ha de trobar la tensió equivalent de Von Mises i comparar-la amb la del material:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{z,\max}}{\pi R^4 / 4}, \quad \tau_{\max} = \frac{4 T_{y,\max}}{3 \pi R^2} \Rightarrow \sigma_{VM} \leq \sqrt{\sigma_{\max}^2 + 3\tau_{\max}^2}$$

M<sub>z,max</sub>: Moment flector màxim (N·m)

T<sub>y</sub>: Tallant màxim (N)

σ<sub>VM</sub>: Tensió equivalent de Von Mises (Pa)

L: Longitud del l'hèlix

x: Coordenada x (m)

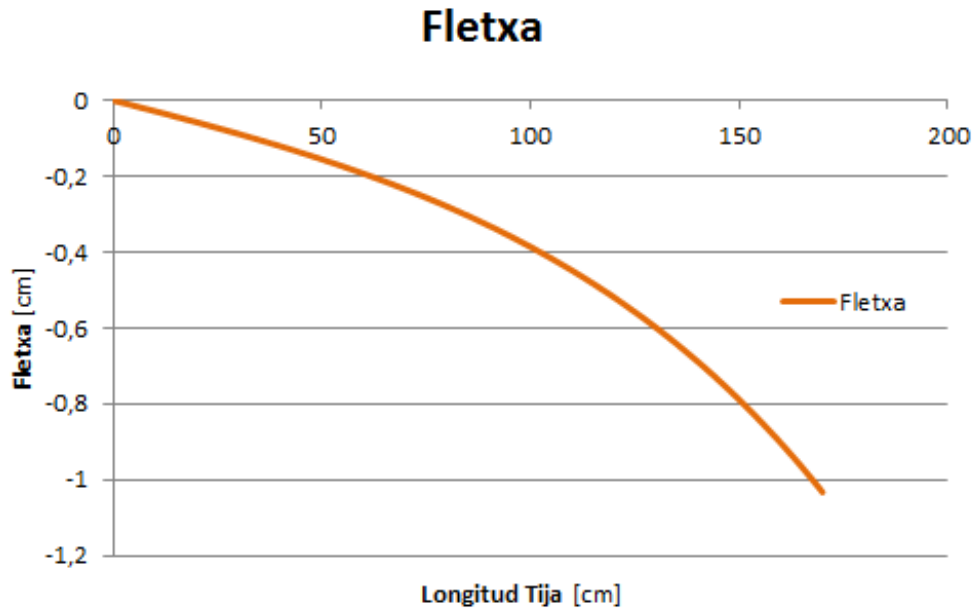
E: Mòdul elàstic del material (Pa)

I: Moment d'inèrcia (m<sup>4</sup>)

### 2.1.2. Resultats

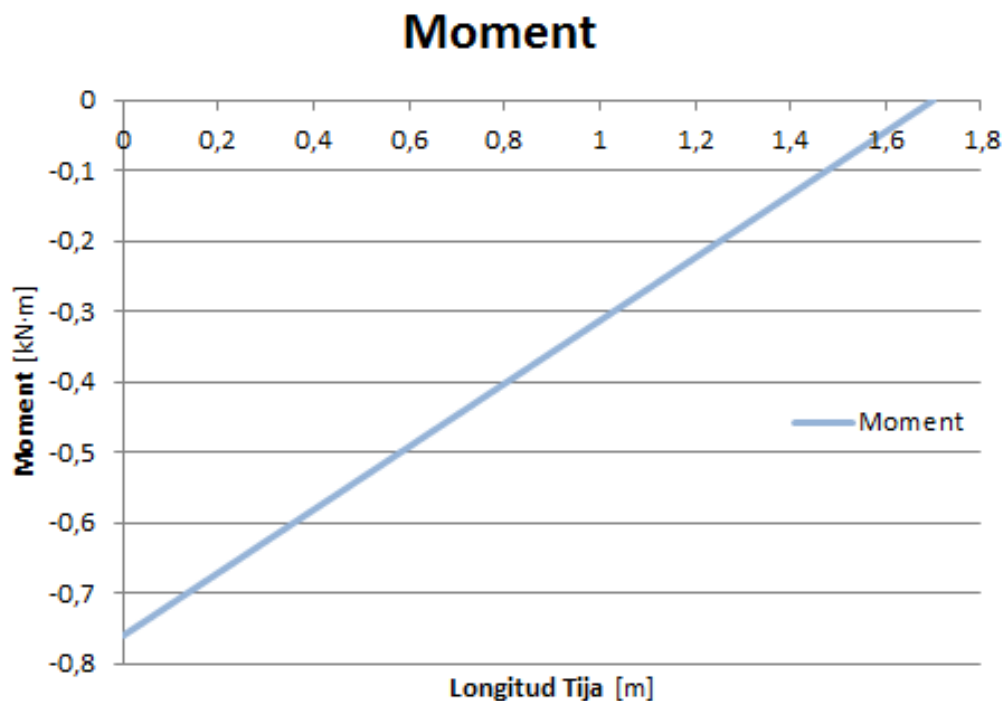
A continuació es mostren de forma gràfica els resultats obtinguts a partir de les equacions anteriors.

#### 2.1.2.1. Fletxa



La deformació màxima que sofreix la tija deguda a una carga de 4000 Kg és de 1,03 cm.

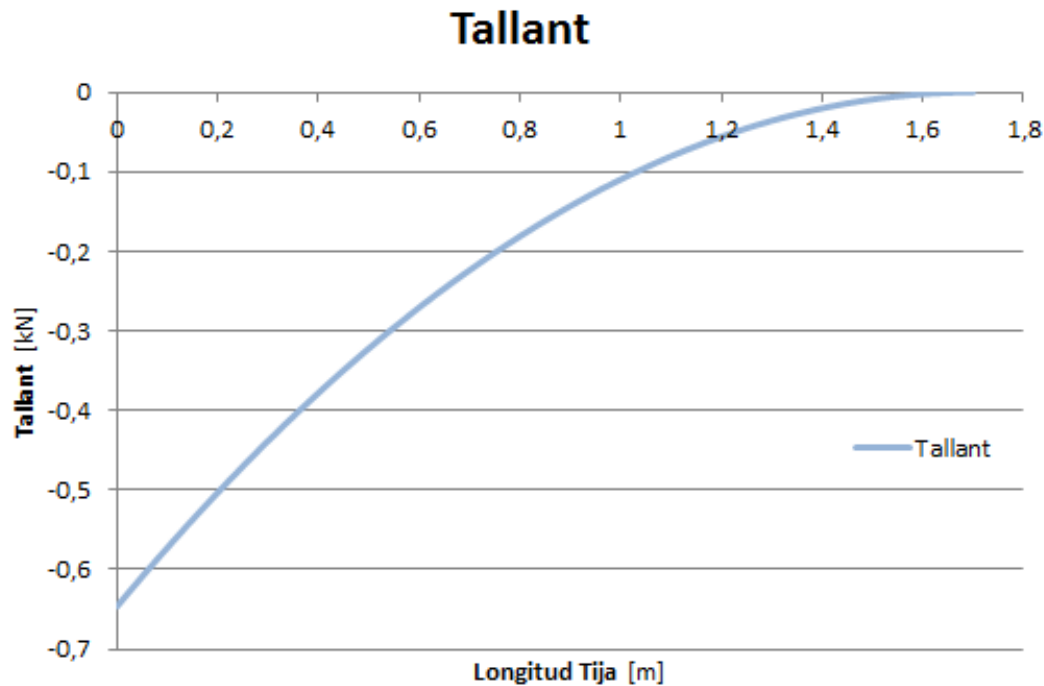
#### 2.1.2.2. Llei de moments flectors





El moment màxim que sofreix la tija degut a una carga de 4000 Kg és de 0,77 kN·m.

#### 2.1.2.3. Llei de tallants



L'esforç tallant màxim que sofreix la tija degut a una carga de 4000 Kg és de 0,65 kN.

#### 2.1.2.4. Validació del radi de la tija

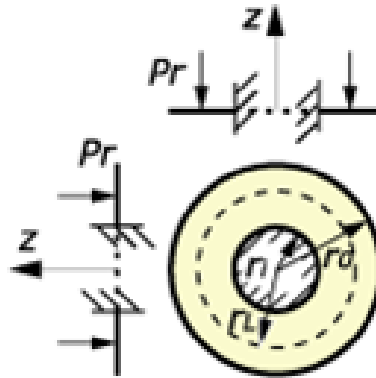
Observant la taula adjunta a continuació:

Denominació	Magnitud
Tija	
Radi	12,5 cm
Moment màxim	0,77 kN·m
Tallant màxim	0,65 kN
Tensió equivalent de Von Mises	136 MPa
Material	
Límit elàstic	550 MPa

El fondeig és apte per suportar les sol·licitacions mecàniques exigides pel sistema.

### 2.1.3. Hèlix

Es considera l'hèlix com una placa cilíndrica encastada en el seu interior i amb una càrrega repartida a tota la seva superfície.



**Figura 2.1:** Model de càlcul

Tenint en compte les dimensions del fondeig i que la càrrega màxima és de 4000 Kg, s'obtenen els següents resultats.

	Desplaçament vertical	Tensió màxima	Epessor de la xapa
	w (mm)	$\sigma_{MAX}$ (MPa)	e (mm)
	0,0994	167	10
	0,194	261	8
Hèlix	0,460	464	6

Comparant els resultats amb les propietats del material:

Material	Acer
Límit elàstic	219 MPa
Límit plàstic	332 MPa

Es determina una espesor de 10 mm per a la xapa.

### 2.1.4. Argolla.

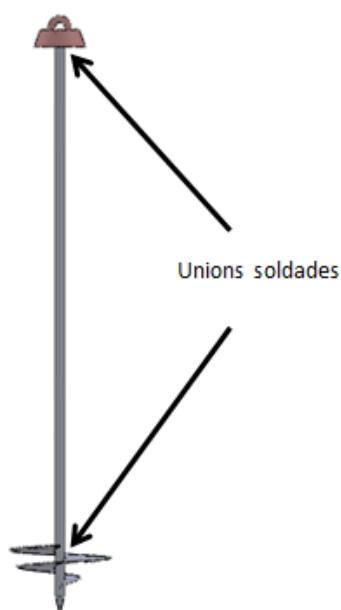
L'argolla no es dimensiona, ja que aquesta es compra en un proveïdor especialitzat en la fabricació d'aquestes.

### 2.1.5. Soldadures

Es determina l'espessor del cordó de soldadura i la longitud d'aquest en funció dels esforços a transmetre i la geometria de la unió.

En aquest cas es tracta de dimensionar dues soldadures en angle, ja els angles formats entre les dues xapes estan compresos entre  $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$ .

Tal i com es pot observar a la següent imatge, una soldadura correspon a la unió entre la tija i l'argolla i l'altra soldadura té la funció d'unir l'hèlix i la tija.



**Figura 2.2:** Localització dels cordons de soldadura.

La resistència per unitat de superfície del cordó de soldadura és igual al valor  $f_{vW,d}$  el qual es pot obtenir a partir de la següent equació.

$$f_{vW,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$f_u$ : Resistència a tracció de l'acer 219 MPa.  
 $\beta_w$ : Coeficient de correlació en funció del tipus d'acer i les peces a soldar.  
 $\gamma_{M2}$ : Coeficient de seguretat 1,5.

Tenint amb compte la següent taula:

Acer	$f_u$ N/mm <sup>2</sup>	$\beta_w$
S 235	360	0,80
S 275	430	0,85
S 355	510	0,90

Per a dimensionar l'espessor de la soldadura en angle, s'haurà de complir la condició expressada a la següent equació:

$$a \leq 0,7 \cdot e_{\min}$$

a: Espessor de la soldadura.  
e<sub>min</sub>: Espessor mínima de les xapes a soldar.

El resultat de l'expressió anterior sempre s'haurà de arrodonir a la baixa sense poder adoptar valors inferiors als de la següent taula.

a ≥ 3mm	per	e <sub>min</sub> ≤ 10mm
a ≥ 4,5mm	per	e <sub>min</sub> ≤ 20mm
a ≥ 5,6mm	per	e <sub>min</sub> > 20mm

Donat l'esforç que sol·licita la unió, una vegada obtingut l'espessor de soldadura, en funció de les xapes a unir, la longitud del cordó de soldadura haurà de complir amb la següent equació:

$$F_{W,Ed} \leq a \cdot L_W \cdot f_{vW,d}$$

F<sub>W,Ed</sub>: Esforç sol·licitat per la unió.  
a: Espessor de la soldadura.  
L<sub>W</sub>: Longitud del cordó de soldadura.

Tenint en compte totes les condicions, es troben les dimensions que s'han de garantir en les dues soldadures. Aquestes no podran ser mai inferiors al càlcul.

	Força màxima (kN)	e <sub>min</sub> (mm)	Espesor (a) (mm)	Longitud (L <sub>W</sub> ) (mm)
Bastec-Argolla	40	25	17,5	40 mm
Bastec-Hèlix	40	8	6	100 mm

Una vegada realitzada la soldadura, és necessari que el refredament sigui lent amb la finalitat d'evitar tensions residuals originades en refredaments ràpids. Aquestes tensions poden originar una fallides prematures degut als esforços de fatiga en que està sotmès el fondeig (cada estrabada de l'embarcació és un cicle de treball).

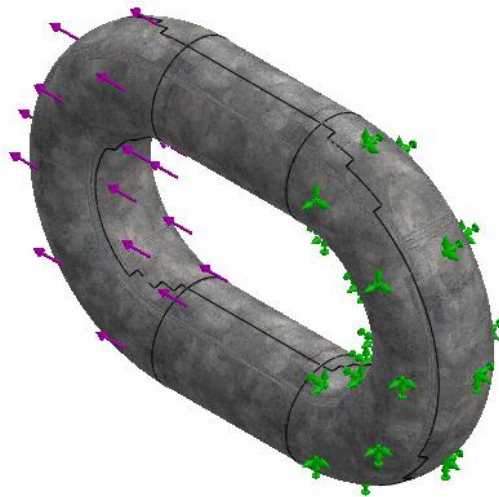
## 2.2. Cadena

Amb la intenció de determinar la deformació soferta per la cadena quan se li aplica una carga, s'ha simulat el seu comportament en un programa d'elements finits.

### 2.2.1. Condicions

Per dur a terme la simulació s'ha simulat un únic eslavó aplicant les següents condicions de contorn:

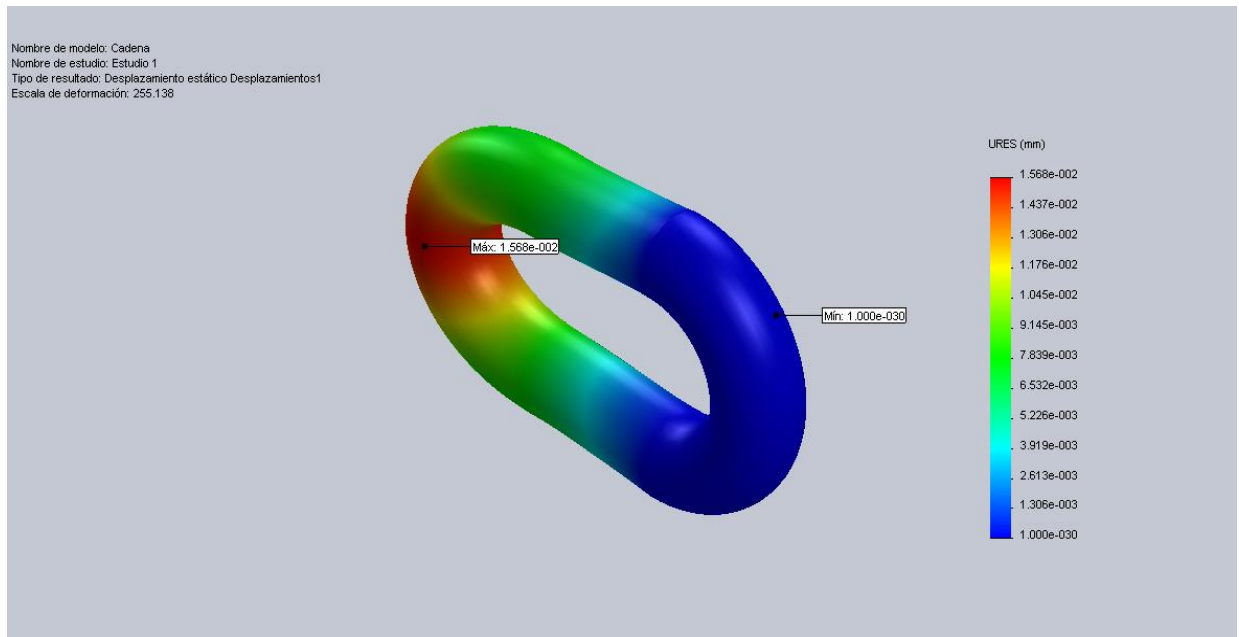
- Encastrament perfecte en un dels seus extrems
- Força de 10000 N en el sentit longitudinal de l'eslavó.



**Figura 2.3:** Condicions de contorn

### 2.2.2. Desplaçament

A la següent imatge es mostren els desplaçaments obtinguts en aplicar una força de 10000 N.



**Figura 2.4:** Desplaçaments esclavó

S'obté un desplaçament màxim de 0,0156 mm

### 2.2.3. Constant elàstica del material

La constant elàstica del material ve determinada per la següent fórmula:

$$F = K \cdot x$$

F= Força aplicada (N)

K= Constant elàstica (N/m)

x= Desplaçament màxim (m)

A partir de la constant elàstica del material es pot determinar l'energia màxima que pot acumular la cadena, quan aquesta està sotmesa a una força.

## 2.3. Útil d'assaig

Per validar les parts estructurals de l'útil d'assaig es fa servir el mateix programa de simulació numèrica per a elements finits. Es simula aquella posició en que les parts estructurals de l'útil estan mecànicament més compromeses.

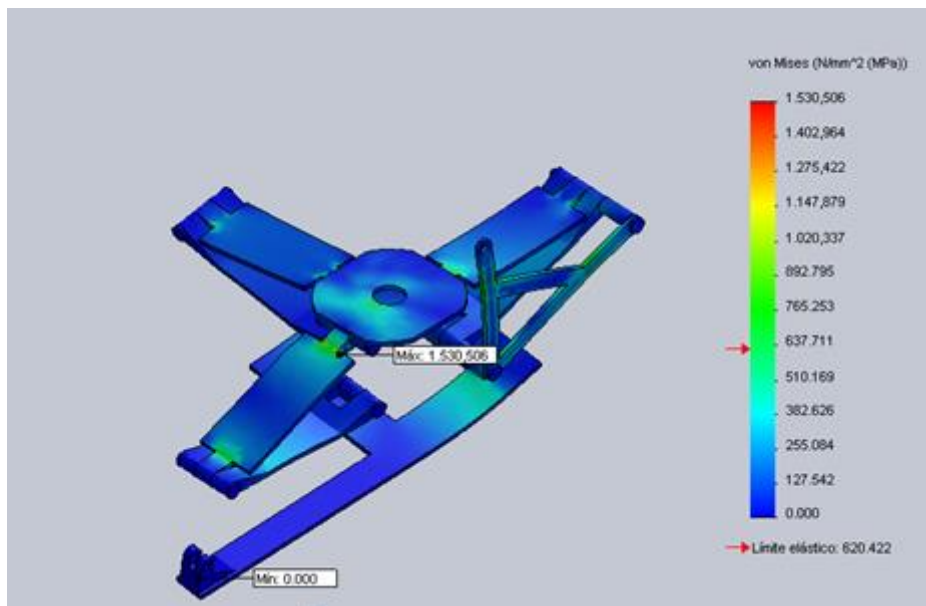
### 2.3.1. *Condicions*

La simulació té en compte les següents condicions:

- Encastrament a l'orifici de la part superior de la base
- Aplicació d'una força de 3500 Kg.

### 2.3.2. *Tensions generades*

Les tensions generades, tenint present les condicions anteriors, es mostren a la següent imatge.



**Figura 2.5:** Tensions útil d'assaig

En cap cas superen el límit elàstic del material, per tant és vàlid el disseny del mecanisme.

## **ANNEX III: PATENT**