

3. ERANSKINA.- EGITURA-KALKULUAK

ANEJO 3.- CALCULOS ESTRUCTURALES

ÍNDICE

ANEJO 3.- CÁLCULOS ESTRUCTURALES

1.	Dimensionamiento pantalla micropilotes	4
1.1.	Datos de partida	4
1.2.	Fallo estructural de los micropilotes	4
1.2.1.	Resistencia estructural del micropilote a compresión	5
1.2.2.	Resistencia estructural del micropilote a cortante	8
1.2.3.	Resistencia estructural del micropilote a flexión	10
1.2.4.	Combinación de esfuerzos	11
1.3.	Viga de reparto	12
1.3.1.	Comprobación a flexión	12
1.3.2.	Comprobación a cortante	15
1.4.	Anclajes	16
1.4.1.	Comprobación de la tensión admisible del acero	16
1.4.2.	Comprobación del arrancamiento del bulbo	16
1.4.3.	Comprobación del deslizamiento del tirante en la lechada, dentro del bulbo	16

1. DIMENSIONAMIENTO PANTALLA MICROPILOTES

1.1. DATOS DE PARTIDA

Tal y como viene recogido en el informe de “Actualización de la solución de estabilización del camino de acceso al barrio de Partaitti en Angiozar (Bergara)” redactado por Ingek y, más en concreto, en su punto “5.3.1 Pantalla inferior” del capítulo “5.3 Cálculo y definición de la solución”, las solicitaciones estimadas sobre el sostenimiento son las siguientes:

- Axil máximo: 71kN/m.
- Momento flector máximo: 22,39mkN/m.
- Esfuerzo cortante máximo: 68kN/m.

Consideramos, a priori, el siguiente planteamiento de pantalla:

- Micropilotes Ø101.6 x 9mm.
 - Acero: N-80 (fyk = 560MPa).
 - Longitud estimada: 9m (Ingek).
 - Espaciado entre ejes: 0,75m.
 - Diámetro perforación: 185mm.
- Anclajes (Ingek):
 - Barras GEWI diámetro 32mm.
 - Acero BSt 500 S.
 - Longitud total: 14m.
 - Longitud libre: 9m.
 - Longitud bulbo: 5m.
 - Tesado: 15T.
 - Separación: 1,5m.
 - Diámetro bulbo: 133mm.
 - Inclinación con la horizontal: 15°.
 - Tensión de bloqueo: 12T.

Por tanto, los esfuerzos a considerar por micropilote serán los siguientes:

$$N^* = 0.75m \times 71kN/m = 53.3kN.$$

$$V^* = 0.75m \times 68kN/m = 51kN.$$

$$M^* = 0.75m \times 22.4mkN/m = 16.8mkN.$$

1.2. FALLO ESTRUCTURAL DE LOS MICROPILOTES

Se considera lo indicado en la “Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carreteras” publicado por el Ministerio de Fomento.

1.2.1. RESISTENCIA ESTRUCTURAL DEL MICROPILOTE A COMPRESIÓN

Se debe comprobar lo siguiente:

$$N_{c,Rd} \geq N_{c,Ed}$$

donde:

$N_{c,Rd}$: Resistencia estructural del micropilote sometido a esfuerzos de compresión, o máxima capacidad que se le puede asignar como elemento estructural frente a este tipo de esfuerzos.

$N_{c,Ed}$: Esfuerzo axial de cálculo (compresión), obtenido a partir de acciones mayoradas.

La resistencia estructural de micropilote presenta la siguiente expresión:

$$N_{c,Rd} = (0,85 A_c f_{cd} + A_s f_{sd} + A_a f_{yd}) \cdot \frac{R}{1,20 F_e}$$

donde:

A_c : Sección neta de lechada o mortero, descontando armaduras. Para calcularla se debe utilizar el diámetro nominal del micropilote.

f_{cd} : Resistencia de cálculo del mortero o lechada de cemento a compresión:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

f_{ck} : Resistencia característica del mortero o lechada de cemento a compresión simple, a los veintiocho días (28 d) de edad.

γ_c : Coeficiente parcial de seguridad para el mortero o lechada¹⁴. Se tomará un valor de uno coma cincuenta ($\gamma_c = 1,50$).

A_s : Sección total de las barras corrugadas de acero.

f_{sd} : Resistencia de cálculo del acero de las armaduras corrugadas. Deberá considerarse menor o igual que cuatrocientos megapascales:

$$f_{sd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_s} \leq 400 \text{ MPa}$$

f_{sk} : Límite elástico del acero de las armaduras corrugadas, que puede obtenerse de la tabla 2.2.

γ_s : Coeficiente parcial de seguridad para el acero de las armaduras corrugadas¹⁵. Se tomará un valor de uno coma quince ($\gamma_s = 1,15$).

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero de la armadura tubular. Deberá considerarse menor o igual que cuatrocientos megapascales:

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_a} \leq 400 \text{ MPa}$$

f_y : Límite elástico del acero de la armadura tubular, que puede obtenerse de la tabla 2.1.

γ_a : Coeficiente parcial de seguridad para el acero de la armadura tubular¹⁶. Se tomará un valor de uno coma diez ($\gamma_a = 1,10$).

A_a : Sección de cálculo de la armadura tubular de acero:

$$A_a = \frac{\pi}{4} [(d_e - 2 r_e)^2 - d_i^2] \cdot F_{u,c}$$

donde:

d_e : Diámetro exterior nominal de la armadura tubular.

r_e : Reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión, que puede obtenerse de la tabla 2.4.

d_i : Diámetro interior nominal de la armadura tubular.

$F_{u,c}$: Coeficiente de minoración del área de la armadura tubular en función del tipo de unión (compresión). Salvo justificación expresa se deberán adoptar los valores de la tabla 3.4.

donde,

TABLA 2.4. REDUCCIÓN DE ESPESOR DE ARMADURA POR EFECTO DE LA CORROSIÓN¹, r_e (mm)

TIPO DE TERRENO	VIDA ÚTIL REQUERIDA AL MICROPILOTE ³ (años)				
	5	25	50	75	100
Suelos naturales sin alterar	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Suelos naturales contaminados o suelos industriales	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Suelos naturales agresivos (turberas, ciénagas, etc.)	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Rellenos no agresivos sin compactar ²	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Rellenos agresivos sin compactar (cenizas, escorias, etc.) ²	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75

Consideramos suelos naturales sin alterar y una vida útil de 50 años $\rightarrow r_e = 0.6\text{mm}$.

TABLA 3.4. COEFICIENTE $F_{u,c}$

TIPO DE UNIÓN	$F_{u,c}$
Mediante manguitos exteriores doblemente roscados, sin disminución de sección	1,0
De rosca machihembrada con sección ensanchada	
De rosca machihembrada, sin sección ensanchada y con contacto a tope en ambos extremos	
Otras uniones diseñadas específicamente para no sufrir pérdidas de resistencia	
Resto de casos	0,5

Se disponen uniones mediante manguitos exteriores doblemente roscados, sin disminución de sección $\rightarrow F_{u,c} = 1.0$.

El factor R se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$R = 1,07 - 0,027 C_R \leq 1$$

donde:

C_R : Coeficiente adimensional cuyo valor²⁰ se tomará de la tabla 3.6.

TABLA 3.6. COEFICIENTE C_R

TIPO DE COACCIÓN LATERAL	C_R
Fangos y turbas con $15 \text{ kPa} \leq s_u \text{ (kPa)} \leq 25$	18 - 12
Arcillas y limos blandos con $15 \text{ kPa} \leq s_u \text{ (kPa)} \leq 25$	12 - 8
Suelos no cohesivos de compactidad ²¹ media ($0,35 < I_D < 0,65$) que cumplan alguno de los siguientes requisitos: <ul style="list-style-type: none"> – Encontrarse permanentemente por encima del nivel freático – Presentar un coeficiente de uniformidad mayor o igual que dos ($D_{60}/D_{10} \geq 2$) 	8 - 7
Suelos cohesivos de consistencia media ($25 \text{ kPa} \leq s_u \text{ (kPa)} \leq 50$)	
<i>Libre</i> (sin terreno o rodeado de terreno <i>inestable</i> ²²)	H/ D_R

Siendo:

D_R : Diámetro del micropilote en la zona de pandeo. Cuando en la zona libre (sin terreno o rodeado de terreno *inestable*) se haya colocado tubería de revestimiento perdida, D_R será el diámetro de dicha tubería; si no fuera así se tomará el diámetro exterior de la armadura tubular ($D_R = d_e$).

H: Longitud de la zona libre (sin terreno o rodeado de terreno *inestable*).

Consideramos, para arcillas y limos blandos, $C_R = 12$.

Por tanto,

Diámetro nominal micropilote:	185	mm
Sección neta de mortero A_c :	24452	mm ²
Resistencia característica mortero f_{ck} :	25	MPa
Resistencia mortero f_{cd} :	17	MPa
Sección total barras corrugadas A_s :	0	mm ²
Límite elástico acero armaduras corrugadas f_{sk} :	500	MPa
Resistencia de cálculo del acero f_{sd} :	400	MPa
Límite elástico del acero tubular f_y :	560	MPa
Resistencia de cálculo del acero tubular f_{yd} :	400	MPa
Diámetro exterior nominal d_e :	101,6	mm
Diámetro interior nominal d_i :	83,6	mm
Espesor armadura tubular t :	9,0	mm
Reducción por corrosión r_e :	0,60	
$F_{u,c}$:	1,00	
Sección de cálculo de armadura tubular A_a :	2428	mm ²
F_e :	1,00	
C_R :	12	
R :	0,75	
$0,85 \cdot A_c \cdot f_{cd}$:	346	kN
$A_s \cdot f_{sd}$:	0,00	kN
$A_a \cdot f_{yd}$:	971	kN

Resistencia estructural del micropilote a compresión
 $N_{c,Rd}$: **819 kN**

1.2.2. RESISTENCIA ESTRUCTURAL DEL MICROPILOTE A CORTANTE

Se supondrá que únicamente colabora la armadura tubular del micropilote.
 Se deberá cumplir la siguiente condición:

$$V_{Ed} \leq V_{c,Rd}$$

donde:

V_{Ed} : Esfuerzo cortante de cálculo, obtenido a partir de acciones mayoradas.

$V_{c,Rd}$: Resistencia de cálculo de la sección a esfuerzo cortante. Se adoptará $V_{c,Rd} = V_{pl,Rd}$

$V_{pl,Rd}$: Valor de cálculo de la resistencia plástica de la sección a esfuerzo cortante. Se determinará de acuerdo con la expresión³:

$$V_{pl,Rd} = \frac{2 A_{Pr}}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_y}{\gamma_a}$$

donde:

f_y : Límite elástico del acero de la armadura tubular, que puede obtenerse de la tabla 2.1.

γ_a : Coeficiente parcial de seguridad para el acero de la armadura tubular⁴. Se tomará un valor de uno coma diez ($\gamma_a = 1,10$).

A_{Pr} : Sección reducida de la armadura tubular de acero, calculada teniendo en cuenta la reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión:

$$A_{Pr} = \frac{\pi}{4} [(d_e - 2 r_e)^2 - d_i^2]$$

siendo:

d_e : Diámetro exterior nominal de la armadura tubular.

r_e : Reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión. Deberá tomarse de la tabla 2.4.

d_i : Diámetro interior nominal de la armadura tubular.

Por tanto,

Sección reducida de la armadura tubular de acero A_{Pr} : 2427,83 mm²

Resistencia estructural del micropilote a cortante $V_{c,Rd}$: 454,29 kN

1.2.3. RESISTENCIA ESTRUCTURAL DEL MICROPILOTE A FLEXIÓN

Se deberá verificar que:

$$M_{c,Rd} \geq M_{Ed}$$

donde:

M_{Ed} : Momento flector de cálculo, obtenido a partir de acciones mayoradas.

$M_{c,Rd}$: Resistencia de cálculo de la sección a flexión. Se determinará de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Si } \frac{d_e - 2 r_e}{t - r_e} \leq \frac{16450}{f_y} \quad , \quad M_{c,Rd} = W_{pl} \frac{f_y}{\gamma_a} \cdot F_{u,f}$$
$$\text{Si } \frac{16450}{f_y} < \frac{d_e - 2 r_e}{t - r_e} \leq \frac{21150}{f_y} \quad , \quad M_{c,Rd} = W_{el} \frac{f_y}{\gamma_a} \cdot F_{u,f}$$

siendo:

d_e : Diámetro exterior nominal de la armadura tubular.

r_e : Reducción de espesor de la armadura por efecto de la corrosión. Deberá tomarse de la tabla 2.4.

t : Espesor de la armadura tubular.

f_y : Límite elástico del acero de la armadura tubular, expresado en megapascales (MPa), que puede obtenerse de la tabla 2.1.

γ_a : Coeficiente parcial de seguridad para el acero de la armadura tubular¹. Se tomará un valor de uno coma diez ($\gamma_a = 1,10$).

W_{pl} : Módulo plástico de la sección:

$$W_{pl} = \frac{(d_e - 2 r_e)^3 - d_i^3}{6}$$

W_{el} : Módulo elástico de la sección:

$$W_{el} = \frac{\pi[(d_e - 2 r_e)^4 - d_i^4]}{32 (d_e - 2 r_e)}$$

d_i : Diámetro interior nominal de la armadura tubular.

$F_{u,f}$: Coeficiente de minoración del módulo resistente de la armadura tubular en función del tipo de unión. Si no se dispusiera de ensayos específicos² sobre las propias uniones a utilizar, se adoptará un valor de cero coma cinco ($F_{u,f} = 0,5$).

Para este caso, siguiendo con lo reflejado en el artículo “Ensayos sobre sistemas de unión de armaduras tubulares en los micropilotes” incluido en las Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS. 3ª sesión: Micropilotes de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica (SEMSIG) y la Asociación de Empresas de la Tecnología del Suelo y del Subsuelo (AETESS), y lo indicado en el “Estudio experimental sobre la resistencia a flexión de las uniones roscadas machihembradas en secciones tubulares de acero para micropilotes” redactado por C. Zanuy y P. de la Fuente de la Universidad Politécnica de Madrid y M. Pinilla de Keller, optamos por considerar un

valor de $F_{u,f} = 0,8$, correspondiente a uniones mediante manguitos exteriores doblemente roscados, sin disminución de sección.

Módulo elástico de la sección W_{el} :	51594,74	mm ³
Módulo plástico de la sección W_{pl} :	71295,17	mm ³
Coefficiente minoración por tipo de unión $F_{u,f}$:	0,80	

Resistencia estructural del micropilote a flexión $M_{c,Rd}$: **29** **kN*m**

1.2.4. COMBINACIÓN DE ESFUERZOS

Por tanto, considerando la acción simultánea de los esfuerzos se deberá verificar:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

Por lo que,

$$\frac{53,3}{819} + \frac{51}{454,29} + \frac{16,8}{29} = 0,07 + 0,11 + 0,58 = 0,76 \leq 1 \rightarrow \text{válido}$$

1.3. VIGA DE REPARTO

Suponemos una viga de reparto rectangular de dimensiones 0.4x1.2m de hormigón HA-25, armada con 6Ø16 (12.06cm²) longitudinales en cada una de las caras y 2 cercos Ø12 cada 0.15m.

La carga repartida equivalente debido al tesado de los anclajes será:

$$q = \frac{P}{L_a} = \frac{150kN}{1.5m} = 100 \text{ kN/m}$$

Así, los esfuerzos a considerar serán:

$$M^* = \frac{q \times L^2}{8} = \frac{100 \times 1.5^2}{8} = 28.13 \text{ mkN}$$

$$V^* = 1.15 \times \frac{q \times L}{2} = 1.15 \times \frac{100 \times 1.5}{2} = 86.25 \text{ kN}$$

1.3.1. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN

A continuación, figura el cálculo realizado mediante el Prontuario informático del hormigón estructural adaptado al Código Estructural.

Tipología de sección

Sección rectangular

Sección bruta

Ac	480000,00	Área en mm ²
U	3200,00	Perímetro en mm
Ix	6,400E+009	Inerciax en mm
Iy	5,760E+010	Inerciy en mm
v	200,00	Distancia cdg-fibra superior en mm
v'	200,00	Distancia cdg-fibra inferior en mm

Armado

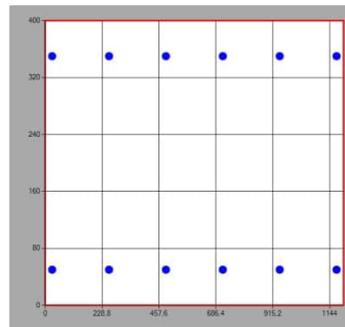
As	1206,37	Área armadura tracción en mm ²
d	350,00	Canto útil tracción en mm
As'	1206,37	Área armadura comp. En mm ²
d'	50,00	Canto útil compresión en mm

Sección homogeneizada

Ah	495330,78	Área en mm ²
Ix	6,745E+009	Inerciax en mm
Iy	5,994E+010	Inerciy en mm
v	200,00	Distancia cdg-fibra superior en mm
v'	200,00	Distancia cdg-fibra inferior en mm

Sección fisurada

v	59	Distancia cdg-fibra superior en mm
Ix	7,32E+008	Inerciax en mm
Mfis	86,50	Momento de fisuración en KNm



COMPROBACIÓN

Datos de diseño

Momento de diseño (kNm) 28 kN·m

Resultados

Mu	Sección		Armadura de tracción		Armadura de compresión						
	109,07	Momento resistido en kNm	d (mm)	Area (mm ²)	eps s	sigma s (MPa)	d (mm)	Area (mm ²)	eps s	sigma s (MPa)	
x	94	Profundidad de la fibra neutra (mm)	250,00	603,19	0,00581	0,00581	50,00	603,19	-0,00164	-0,00164	
1/r	0,03723	Curvatura última, en 1/m	Punto	M (kNm)	1/r (1/m)	x (mm)	sup	inf	csup (MPa)	st (MPa)	sc (MPa)
sup	0,00350	Def. unitaria fibra sup.	0	0,00	0,00000	0	0,00000	0,00000	0,00	0,00	0,00
inf	0,00953	Def. unitaria cdg armadura	Momento de diseño	28,00	0,00040	202	-0,00008	0,00004	-1,31	11,75	-4,13
			1-Fisuración	28,91	0,00041	202	-0,00008	0,00004	-1,35	12,14	-4,26
			1'-Sección fisurada	28,91	0,00251	79	-0,00020	0,00055	-3,14	136,04	35,64
			2-Plastifica acero	85,71	0,00910	111	-0,00101	0,00172	-12,58	434,78	70,98
			3-Plastifica hormigón	99,99	0,02174	92	-0,00200	0,00452	-16,67	434,78	252,18
			4-Rompe hormigón	109,07	0,03723	94	-0,00350	0,00767	-16,67	434,78	416,98

DIMENSIONAMIENTO

Datos de diseño

Md 28 kN·m
 lambda 1
 r 50 mm

Resultados

As tracción necesaria = 560,19mm²

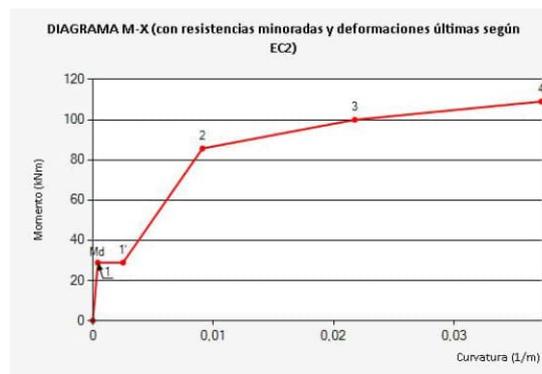
	d12	d16	d20	d25	d32
Barras	5	3	2	2	2
Capas	1	1	1	1	1
s (mm)	275	556	1120	1110	1096
As (mm ²)	565,49	603,19	628,32	981,75	1608,50

As compresión necesaria = 560,19mm²

	d12	d16	d20	d25	d32
Barras	5	3	2	2	2
Capas	1	1	1	1	1
s (mm)	275	556	1120	1110	1096
As (mm ²)	565,49	603,19	628,32	981,75	1608,50

DIAGRAMA M-X

Punto	M (kNm)	1/r (1/m)	x (mm)	sup	einf	csup (MPa)	st (MPa)	sc (MPa)
0	0,00	0,00000	0	0,00000	0,00000	0,00	0,00	0,00
Momento de diseño	28,00	0,00040	202	-0,00008	0,00004	-1,31	11,75	-4,13
1-Fisuración	28,91	0,00041	202	-0,00008	0,00004	-1,35	12,14	-4,26
1'-Sección fisurada	28,91	0,00251	79	-0,00020	0,00055	-3,14	136,04	35,64
2-Plastifica acero	85,71	0,00910	111	-0,00101	0,00172	-12,58	434,78	70,98
3-Plastifica hormigón	99,99	0,02174	92	-0,00200	0,00452	-16,67	434,78	252,18
4-Rompe hormigón	109,07	0,03723	94	-0,00350	0,00767	-16,67	434,78	416,98



1.3.2. COMPROBACIÓN A CORTANTE

A continuación, figura el cálculo realizado mediante el Prontuario informático del hormigón estructural adaptado al Código Estructural.

Datos

bw	1200 mm
N (comp. Positiva)	0 kN
Tipo de sección	No pretensada
Diámetro vainas	0 mm
Nº vainas de pretensado	0 mm
Theta	21,8
ctg(Theta)	2,5
As	1206 mm ²
d	350 mm
Area sección	4800 cm ²

DIMENSIONAMIENTO

Datos de diseño

Ved 87 kN
alfa 90

Resultados

Ast necesaria = 960,00 mm²/m

	d6	d8	d10	d12
nº ramas	2	2	2	2
s (mm)	58	104	163	235
Ast (mm ² /m)	974,98	966,64	963,68	962,53
VRds (kN)	333,82	330,97	329,96	329,56

El ángulo óptimo para las bielas de compresión es: 21,8°

1.4. ANCLAJES

1.4.1. COMPROBACIÓN DE LA TENSIÓN ADMISIBLE DEL ACERO

El área de la sección del tirante A_T es: 804mm².

Así, para anclajes permanentes, deberán cumplirse simultáneamente las siguientes condiciones:

$$N_d / A_T \leq f_{pk} / 1.30 \rightarrow 150 \times 10^3 \text{ N} / 804 \text{ mm}^2 = 186.6 \text{ MPa} < 550 \text{ MPa} / 1.30 = 423 \text{ MPa} \rightarrow \text{OK.}$$

$$N_d / A_T \leq f_{yk} / 1.15 \rightarrow 150 \times 10^3 \text{ N} / 804 \text{ mm}^2 = 186.6 \text{ MPa} < 500 \text{ MPa} / 1.15 = 434 \text{ MPa} \rightarrow \text{OK.}$$

1.4.2. COMPROBACIÓN DEL ARRANCAMIENTO DEL BULBO

Se deberá cumplir la siguiente condición:

$$N_d / (\pi \times \varnothing_n \times L_b) \leq a_{adm}$$

siendo,

\varnothing_n : diámetro nominal del bulbo (diámetro de perforación) = 133mm.

L_b: longitud de cálculo del bulbo = 5m.

a_{adm}: adherencia admisible = 0.6MPa

La longitud del bulbo deberá ser superior a la mínima (L_{min}):

$$L_{min} = N_d / (\pi \times \varnothing_n \times a_{adm}) = 150 \times 10^3 / (\pi \times 133 \times 0.6) = 0.6 \text{ m} < 5 \text{ m} \rightarrow \text{OK.}$$

Por lo que,

$$150 \times 10^3 / (\pi \times 133 \times 5 \times 10^3) = 0.07 \text{ MPa} \leq 0.6 \text{ MPa} \rightarrow \text{OK.}$$

1.4.3. COMPROBACIÓN DEL DESLIZAMIENTO DEL TIRANTE EN LA LECHADA, DENTRO DEL BULBO

Se deberá verificar:

$$N_d / (L_b \times p_T) \leq \tau_{lim} / 1,2$$

siendo,

p_T : perímetro nominal del tirante = 100.53mm.

L_b : longitud de cálculo del bulbo = 5m.

τ_{lim} : adherencia límite entre el tirante y la lechada: $6.9 \times (f_{ck}/22.5)^{2/3} = 6.9 \times (30/22.5)^{2/3} = 8.36\text{MPa}$

Ya que se considera la resistencia característica de la lechada: $f_{ck} = 30\text{MPa}$.

Por tanto,

$150 \times 10^3 / (5 \times 10^3 \times 100.53) = 0.29\text{MPa} \leq \tau_{lim} / 1.2 = 8.36 / 1.2 = 6.97\text{MPa} \rightarrow \text{OK}$.