

DISEÑO Y CÁLCULO DE UN SILO DE HORMIGÓN POSTESADO EN BENI SUEF (EGIPTO).

PARTE II-ANEJO DE CÁLCULO

Alumno: Manuel Rios Bort

Universidad Politécnica de Valencia

ETSI Caminos, Canales y Puertos de Valencia

Grado en Ingeniería de Obras Públicas

Curso 2013/2014

Fecha de presentación: Julio 2014





DISEÑO Y CALCULO DE UN SILO DE HORMIGÓN POSTESADO EN BENI SUEF (EGIPTO)

Alumno:

Manuel Rios Bort

Dirigido por:

Prof. Carlos Miguel Gisbert Doménech (Depto. Ingeniería de la Construcción, UPV)

29/07/2014



0. INDICE

0. Indice	3
1. Normativa aplicable	4
2. Justificación de materiales	5
2.1 Hormigón según EHE 08	5
2.1.1 Clase de exposición	5
2.1.2 Máximo contenido de cemento, mínima a/c y resistencia mínima	5
2.1.3 Docilidad	7
2.1.4 Tamaño máximo del árido	7
2.1.5 Tipo de cemento	8
2.1.6 Designación	8
2.1 Acero según EHE 08	9
2.2.1 Armadura pasiva	9
2.1.2 Armadura activa	10
3. Evaluación de acciones	15
4. Pre-dimensionamiento	27
5. Sistema de postesado	28
5.1 Elección del anclaje	28
5.2 Geometría del macizo de anclaje	28
5.3 Dimensionamiento del macizo de anclaje	30
5.4 Tipo y diámetro de las vainas	32
6. Dimensionamiento y armado	28
6.1 Comprobación E.L.U	33
6.1.1 Comprobación frente a solicitaciones normales	33
6.1.2 Comprobación frente a solicitaciones tangenciales	37
6.2 Comprobación E.L.S de fisuración	39



1. NORMATIVA APLICABLE

La normativa y recomendaciones que se ha tenido en cuenta para el diseño y cálculo del silo es la siguiente:

- Egyptian Code for Computation of loads and forces in Structural & Buildings works (Ministerial Decision No.45 of 1993. Permanent Committee for the elaboration of the Foundations of Computation of Loads and Forces in Structural & Building works (1999).
- Egyptian Code For Design and Construction of Reinforced Concrete Structures, 2001.
- British Standard, Regulations and Codes of Practice BS 8110.
- The ITBTP annals July 86 Professional design and calculation rules of reinforced or post tensioned concrete silos will be used for design and calculation of reinforced or postensioned concrete silos.
- Uniform Building Code (UBC-97).
- American Society of Civil Engineers.
- EHE 08
- EUROCODIGO 1 Bases de proyecto y acciones en estructuras, parte 4; acciones en silos y depósitos.

2. JUSTIFICACIÓN DE MATERIALES

2.1. HORMIGÓN SEGÚN EHE 08

2.1.1. CLASE DE EXPOSICIÓN

Según el artículo 8.2 bases de cálculo adicionales orientadas a la durabilidad.

Antes de comenzar el proyecto, se deberá identificar el tipo de ambiente que defina la agresividad a la que va a estar sometido cada elemento estructural.

El tipo de ambiente al que está sometido un elemento estructural viene definido por el conjunto de condiciones físicas y químicas a las que está expuesto, y que puede llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a los de las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural.

El tipo de ambiente viene definido por la combinación de:

- una de las clases generales de exposición, frente a la corrosión de las armaduras, de acuerdo con 8.2.2.
- las clases específicas de exposición relativas a los otros procesos de degradación que procedan para cada caso, de entre las definidas en 8.2.3.

La clase general de exposición que corresponde con el ambiente donde se ubica el Silo es IIb; corrosión de origen diferente de los cloruros; exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia, en zonas con precipitación media anual inferior a 600 mm.

Para el caso de la cimentación, la clase de exposición será IIa, ya que se trata de un elemento que estará enterrado.

Aunque el silo se va a utilizar para el almacenamiento de Clinker, no será necesario que el hormigón con el que se construya el silo tenga características específicas derivadas de la agresividad del Clinker.

No obstante, para el caso de la cimentación y debido a la composición del terreno, se va a tener que utilizar un cemento resistente a los sulfatos.

2.1.2. MÍNIMO CONTENIDO DE CEMENTO, MÁXIMA A/C Y RESISTENCIA MÍNIMA

Según indica el artículo 7.3.1 Requisitos de dosificación y comportamiento del hormigón. Para conseguir una durabilidad adecuada del hormigón se deben cumplir los requisitos siguientes:

1. Requisitos generales:

- Máxima relación agua/cemento, según 37.3.2.
- Mínimo contenido de cemento, según 37.3.2.

Tabla 37.3.2.a Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	CLASE DE EXPOSICIÓN												
		I	Ila	Ilb	IIla	IIlb	IIlc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Máxima Relación a/c	masa	0,65	-	-	-	-	-	-	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	armado	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	pretensado	0,60	0,60	0,55	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45	0,45	0,55	0,50	0,50
Mínimo contenido de cemento (kg/m ³)	masa	200	-	-	-	-	-	-	275	300	325	275	300	275
	armado	250	275	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300
	pretensado	275	300	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300

Tabla 37.3.2.b Resistencias mínimas recomendadas en función de los requisitos de durabilidad (*)

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	CLASE DE EXPOSICIÓN												
		I	Ila	Ilb	IIla	IIlb	IIlc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
resistencia	masa	20	-	-	-	-	-	-	30	30	35	30	30	30
Mínima (N/mm ²)	armado	25	25	30	30	30	35	30	30	30	35	30	30	30
	pretensado	25	25	30	30	35	35	35	30	35	35	30	30	30

De las tablas 37.2.3.a y 37.3.2.b se extrae que para el muro:

Resistencia mínima: 30 N/mm²

Máxima relación a/c: 0,55

Mínimo contenido de cemento: 300 Kg/m³

Mientras que para la cimentación:

Resistencia mínima: 25 N/mm²

Máxima relación a/c: 0,60

Mínimo contenido de cemento: 275 Kg/m³

El artículo 31.4 dice que en los hormigones estructurales, la resistencia de proyecto f_{ck} no será inferior a 20 N/mm² en hormigones en masa, ni a 25 N/mm² en hormigones armados o pretensados.

2.1.3. DOCILIDAD

Según el artículo 31.5 la docilidad del hormigón será la necesaria para que, con los métodos previstos de puesta en obra y compactación, el hormigón rodee las armaduras sin solución de continuidad y rellene completamente los encofrados sin que se produzcan coqueas. La docilidad del hormigón se valorará determinando su consistencia.

La docilidad del hormigón se valorará determinando su consistencia por medio del ensayo de asentamiento, según UNE-EN 12350-2.

Las distintas consistencias y los valores límite del asentamiento del cono, serán los siguientes:

Tipo de consistencia	Asentamiento en cm
Seca (S)	0-2
Plástica (P)	3-5
Blanda (B)	6-9
Fluida (F)	10-15
Líquida (L)	16-20

Así pues para los dos tramos de muro de hormigón, debido a la alta concentración de armadura, para evitar posibles problemas con la entrada del hormigón y el relleno de las armaduras, la consistencia será: Fluida

Por otro lado, la consistencia del hormigón utilizado en la cimentación será: Blanda

2.1.4. TAMAÑO MÁXIMO DEL ÁRIDO

El artículo 28.2 de la EHE 08 dice: se denomina tamaño máximo D de un árido la mínima abertura de tamiz UNE EN 933-2:96 por el que pase más del 90% en peso (% desclasificados superiores a D menor que el 10%), cuando además pase el total por el tamiz de abertura doble (% desclasificados superiores a 2D igual al 0%).

El tamaño máximo de un árido grueso será menor que las dimensiones siguientes:

- 0,8 de la distancia horizontal libre entre vainas o armaduras que no formen grupo, o entre un borde de la pieza y una vaina o armadura que forme un ángulo mayor que 45° con la dirección de hormigonado.
- 1,25 de la distancia entre un borde de la pieza y una vaina o armadura que forme un ángulo no mayor que 45° con la dirección de hormigonado.
- 0,25 de la dimensión mínima de la pieza.

Atendiendo a las restricciones antes mencionadas, D_{\max} deberá ser menor que:

- $D \leq 0,8 \cdot (400 - 35 \cdot 2 - 25 \cdot 2 - 192) = 70,4 \text{ mm}$
- $D \leq 1,25 \cdot 50 = 62,5 \text{ mm}$
- $D \leq 0,25 \cdot 400 = 100 \text{ mm}$

Así pues, se utilizará un árido para la fabricación del hormigón de la estructura con tamaño máximo del árido de 20 mm.

2.1.5. TIPO DE CEMENTO

El artículo 28 del la EHE 08 permite para el caso de estructuras de hormigón pretensado y hormigón armado la utilización de los siguientes cementos para la composición del hormigón.

Tipo de hormigón	Tipo de cemento
Hormigón en masa	Cementos comunes excepto los tipos CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T y CEM III/C Cementos para usos especiales ESP VI-1
Hormigón armado	Cementos comunes excepto los tipos CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T, CEM III/C y CEM V/B
Hormigón pretensado	Cementos comunes de los tipos CEM I y CEM II/A-D, CEM II/A-V, CEM II/A-P y CEM II/A-M(V,P)

Se utilizarán cualquiera de los cementos que se recogen en el cuadro anterior y que la EHE 08 permite en función del tipo de hormigón a fabricar. Para el caso de la cimentación, se utilizará un cemento permitido para conformar hormigón armado pero además deberá ser del tipo SR con características resistentes a los sulfatos.

Además de las características citadas anteriormente, el artículo 31 indica que el ión cloruro total aportado por los componentes no excederá de los siguientes límites para obras de hormigón pretensado 0,2% del peso del cemento Y 0,4% para obras de hormigón armado.

2.1.6. DESIGNACIÓN DEL HORMIGÓN

Por lo tanto, definidas las características del hormigón, se puede concluir que el hormigón que se utilizará para la construcción del silo será

Para el tramo de muro de hormigón postesado será: HP-30/F/20/IIb

Para el tramo del muro de hormigón armado será: HA-30/F/20/IIb

Para la cimentación se utilizará: HA-25/B/20/IIa

2.2. ACERO SEGÚN EHE 08

2.2.1. ARMADURA PASIVA

2.2.1.1. BARRAS Y ROLLOS DE ACERO CORRUGADO SOLDABLE

Como establece el artículo 32.2 de la EHE 08 sólo podrán emplearse barras o rollos de acero corrugado soldable que sean conformes con UNE EN 10080.

Los posibles diámetros nominales de las barras corrugadas serán los definidos en la serie siguiente, de acuerdo con la tabla 6 de la UNE EN 10080:

6 – 8 – 10 - 12 - 14 - 16 - 20 – 25 - 32 y 40 mm.

Salvo en el caso de mallas electrosoldadas o armaduras básicas electrosoldadas en celosía, se procurará evitar el empleo del diámetro de 6mm cuando se aplique cualquier proceso de soldadura, resistente o no resistente, en la elaboración o montaje de la armadura pasiva.

El acero que se utilizara para elaborar las armaduras pasivas del silo es del tipo B500S, el cual reúne las siguientes características:

- Límite elástico $f_y \geq 500$ (N/mm²)
- Carga unitaria de rotura $f_s \geq 550$ (N/mm²)
- Alargamiento de rotura $\epsilon_{u,5} \geq 12$ %
- Alargamiento total bajo carga máxima $\epsilon_{max} \geq 5,0$ % (suministrado en barra)
- Alargamiento total bajo carga máxima $\epsilon_{max} \geq 5,0$ % (suministrado en rollo)
- Relación $f_s/f_y \geq 1,05$

2.2.1.2. ALAMBRES CORRUGADOS Y LISOS

Los diámetros nominales de los alambres serán los definidos en la tabla 6 de la UNE EN 10080 y, por lo tanto, se ajustarán a la serie siguiente:

4–4,5–5–5,5–6–6,5–7–7,5–8- 8,5- 9–9,5–10–11–12–14y16mm.

A los efectos de esta Instrucción, se define el siguiente tipo de acero para alambres, tanto corrugados como lisos:

Tabla32.3 Tipo de acero para alambres

Designación	Ensayo de tracción ⁽¹⁾				Ensayo de doblado-desdoblado, según UNE-EN ISO 15630-1 $\alpha = 90^\circ$ ⁽⁵⁾ $\beta = 20^\circ$ ⁽⁶⁾ Diámetro de mandril D'
	Límite elástico f_y (N/mm ²) (2)	Carga unitaria de rotura f_s (N/mm ²) (2)	Alargamiento de rotura sobre base de 5 diámetros A (%)	Relación f_s/f_y	
B 500 T	500	550	8 ⁽³⁾	1,03 ⁽⁴⁾	5 d ⁽⁷⁾

2.2.2. ARMADURA ACTIVA

2.2.2.1. CORDONES DE PRETENSADO

Cordones, a los efectos de esta Instrucción, son aquéllos que cumplen los requisitos técnicos establecidos en la UNE 36094, o en su caso, en la correspondiente norma armonizada de producto. Sus características mecánicas, obtenidas a partir del ensayo a tracción realizado según la UNE-EN ISO 15630-3, deberán cumplir las siguientes prescripciones:

- La carga unitaria máxima f_{\max} no será inferior a los valores que figuran en la tabla siguiente:

Para este caso, se utilizarán cordones de 7 alambres del tipo Y1860S7

Tabla 34.5.b Cordones de 7 alambres

Designación	Serie de diámetros nominales, en mm	Carga unitaria máxima f_{\max} en N/mm ²
Y 1770 S7	16,0	1.770
Y 1860 S7	9,3 - 13,0 - 15,2 - 16,0	1.860

- El elástico f_y estará comprendido entre el 0,88 y el 0,95 de la carga unitaria máxima f_{\max} . Esta limitación deberán cumplirla no solo los valores mínimos garantizados, sino también cada uno de los elementos ensayados.
- El alargamiento bajo carga máxima, medido sobre una base de longitud igual o superior a 500 mm, no será inferior a 3,5%
- La estricción a la rotura será visible a simple vista.
- El módulo de elasticidad tendrá el valor garantizado por el fabricante, con una tolerancia de $\pm 7\%$
- La relajación a las 1.000 horas a temperatura de $20^\circ \pm 1^\circ \text{C}$, y para una tensión inicial igual al 70 por 100 de la carga unitaria máxima real, determinada no será superior al 2,5 por 100.
- El valor medio de las tensiones residuales a tracción del alambre central deberá ser inferior a 50 N/mm² al objeto de garantizar un comportamiento adecuado frente a la corrosión bajo tensión

El valor del coeficiente de desviación D en el ensayo de tracción desviada, según UNE-EN ISO 15630-3, no será superior a 28, para los cordones con diámetro nominal igual o superior a 13 mm.

Las características geométricas y ponderales, así como las correspondientes tolerancias, de los cordones se ajustarán a lo especificado en la UNE 36094.

2.2.2.2. SISTEMA DE PRETENSADO

En el caso de armaduras activas postesadas, sólo podrán utilizarse los sistemas de pretensado que cumplan los requisitos establecidos en el documento de idoneidad técnica europeo, elaborado específicamente para cada sistema por un organismo autorizado en el ámbito de la Directiva 89/106/CEE y de conformidad con la Guía ETAG 013 elaborada por la European Organisation for Technical Approvals (EOTA).

Todos los aparatos utilizados en las operaciones de tesado deberán estar adaptados a la función, y por lo tanto:

- Cada tipo de anclaje requiere utilizar un equipo de tesado, en general se utilizará el recomendado por el suministrador del sistema.
- Los equipos de tesado deberán encontrarse en buen estado con objeto de que su funcionamiento sea correcto, proporcionen un tesado continuo, mantengan la presión sin pérdidas y no ofrezcan peligro alguno.
- Los aparatos de medida incorporados al equipo de tesado, permitirán efectuar las correspondientes lecturas con una precisión del 2%. Deberán contrastarse cuando vayan a empezar a utilizarse y, posteriormente, cuantas veces sea necesario, con frecuencia mínima anual.

Se debe garantizar la protección contra la corrosión de los componentes del sistema de pretensado, durante su fabricación, transporte y almacenamiento, durante la colocación y sobre todo durante la vida útil de la estructura.

2.2.2.3. ANCLAJES

Los anclajes deben ser capaces de retener eficazmente los tendones, resistir su carga unitaria de rotura y transmitir al hormigón una carga al menos igual a la máxima que el correspondiente tendón pueda proporcionar. Para ello deberán cumplir las siguientes condiciones:

- a) El coeficiente de eficacia de un tendón anclado será al menos igual a 0,95, tanto en el caso de tendones adherentes como no adherentes. Además de la eficacia se verificarán los criterios de no reducción de capacidad de la armadura y de ductilidad conforme a la Guía ETAG 013 elaborada por la European Organisation for Technical Approvals (EOTA).
- b) El deslizamiento entre anclaje y armadura debe finalizar cuando se alcanza la fuerza máxima de tesado (80% de la carga de rotura del tendón). Para ello:

Los sistemas de anclaje por cuñas serán capaces de retener los tendones de tal forma que, una vez finalizada la penetración de cuñas, no se produzcan deslizamientos respecto al anclaje.

Los sistemas de anclaje por adherencia serán capaces de retener los cordones de tal forma que, una vez finalizado el tesado no se produzcan fisuras o plastificaciones anormales o inestables en la zona de anclaje,

- a) Para garantizar la resistencia contra las variaciones de tensión, acciones

dinámicas y los efectos de la fatiga, el sistema de anclaje deberá resistir 2 millones de ciclos con una variación de tensión de 80 N/mm^2 y una tensión máxima equivalente al 65% de la carga unitaria máxima a tracción del tendón. Además, no se admitirán roturas en las zonas de anclaje, ni roturas de más del 5% de la sección de armadura en su longitud libre.

- b) Las zonas de anclaje deberán resistir 1,1 veces la carga de rotura del anclaje con el coeficiente de eficacia indicado en el punto a) del presente artículo. El diseño de las placas y dispositivos de anclaje deberá asegurar la ausencia de puntos de desviación, excentricidad y pérdida de ortogonalidad entre tendón y placa.

Los ensayos necesarios para la comprobación de estas características serán los que figuran en la UNE 41184.

Los elementos que constituyen el anclaje deberán someterse a un control efectivo y riguroso y fabricarse de modo tal, que dentro de un mismo tipo, sistema y tamaño, todas las piezas resulten intercambiables. Además deben ser capaces de absorber, sin menoscabo para su efectividad, las tolerancias dimensionales establecidas para las secciones de las armaduras.

2.2.2.4. VAINAS

En los elementos estructurales con armaduras postesas es necesario disponer conductos adecuados para alojar dichas armaduras. Para ello, lo más frecuente es utilizar vainas que quedan embebidas en el hormigón de la pieza, o se recuperan una vez endurecido éste.

Deben ser resistentes al aplastamiento y al rozamiento de los tendones, permitir una continuidad suave del trazado del conducto, garantizar una correcta estanquidad en toda su longitud, no superar los coeficientes de rozamiento de proyecto durante el tesado, cumplir con las exigencias de adherencia del proyecto y no causar agresión química al tendón.

En ningún caso deberán permitir que penetre en su interior lechada de cemento o mortero durante el hormigonado. Para ello, los empalmes, tanto entre los distintos trozos de vaina como entre ésta y los anclajes, habrán de ser perfectamente estancos.

El diámetro interior de la vaina, habida cuenta del tipo y sección de la armadura que en ella vaya a alojarse, será el adecuado para que pueda efectuarse la inyección de forma correcta.

2.2.2.5. ACCESORIOS

Los accesorios auxiliares de inyección más utilizados son:

- Tubo de purga o purgador: Pequeño segmento de tubo que comunica los conductos de pretensado con el exterior y que se coloca, generalmente, en los puntos altos y bajos de su trazado para facilitar la evacuación del aire y del agua del interior de dichos conductos y para seguir paso a paso el avance de la inyección. También se llama respiradero.

- Boquilla de inyección: Pieza que sirve para introducir el producto de inyección en los conductos en los que se alojan las armaduras activas. Para la implantación de las boquillas de inyección y tubos de purga se recurre al empleo de piezas especiales en T.
- Separador: Pieza generalmente metálica o de plástico que, en algunos casos, se emplea para distribuir uniformemente dentro de las vainas las distintas armaduras constituyentes del tendón.
- Trompeta de empalme: Es una pieza, de forma generalmente troncocónica, que enlaza la placa de reparto con la vaina. En algunos sistemas de pretensado la trompeta está integrada en la placa de reparto.
- Tubo matriz: Tubo, generalmente de polietileno, de diámetro exterior algo inferior al interior de la vaina, que se dispone para asegurar la suavidad del trazado.

Todos estos dispositivos deben estar correctamente diseñados y elaborados para permitir el correcto sellado de los mismos y garantizar la estanquidad bajo la presión nominal de inyección con el debido coeficiente de seguridad. A falta de especificación concreta del proveedor, estos accesorios deben resistir una presión nominal de 2 N/mm^2 .

La ubicación de estos dispositivos y sus características estarán definidos en proyecto y será comprobada su idoneidad por el proveedor del sistema de pretensado.

2.2.2.6. PRODUCTOS DE INYECCIÓN

Con el fin de asegurar la protección de las armaduras activas contra la corrosión, en el caso de tendones alojados en conductos o vainas dispuestas en el interior de las piezas, deberá procederse al relleno de tales conductos o vainas, utilizando un producto de inyección adecuado.

Los productos de inyección pueden ser adherentes o no, debiendo cumplir, en cada caso, las condiciones que se indican en 35.4.2 y 35.4.3.

Los productos de inyección estarán exentos de sustancias tales como cloruros, sulfuros, nitratos, etc., que supongan un peligro para las armaduras, el propio material de inyección o el hormigón de la pieza.

En este caso, se utilizarán productos de inyección adherente que según indica la EHE 08 en su artículo 35.4.2.2 deberán cumplir:

- El contenido en iones cloruro no será superior a 0'1% de la masa de cemento.
- El contenido en iones sulfato no será superior a 3'5% de la masa de cemento.
- El contenido en iones sulfuro no será superior a 0'01% de la masa de cemento.

Además, las lechadas y morteros de inyección deben tener las siguientes propiedades determinadas mediante UNE-EN 445.

- La fluidez medida mediante el método del cono de Marsh, de 100 mm de diámetro, debe ser menor que 25 s en el rango de temperaturas especificado por el fabricante, tanto inmediatamente después del amasado como 30 minutos después o hasta terminar la inyección o el tiempo definido por el fabricante o



prescrito por el proyectista. En el caso de lechadas tixotrópicas su fluidez se debe medir con un viscosímetro y debe estar comprendida entre 120 y 200 g/m³.

- La cantidad de agua exudada después de 3 h debe ser menor que el 2% en el ensayo del tubo de exudado en el rango de temperaturas definido por el fabricante.
- La reducción de volumen no excederá del 1%, y la expansión volumétrica eventual será inferior al 5%. Para las lechadas fabricadas con agentes expansivos, no se admite ninguna reducción de volumen.
- La relación agua/cemento deberá ser menor o igual que 0,44.
- La resistencia a compresión debe ser mayor o igual que 30 N/mm² a los 28 días.
- El fraguado no debe empezar antes de las 3 h en el rango de temperaturas definido por el fabricante. El final del fraguado no debe exceder de las 24h.
- La absorción capilar a los 28 días debe ser menor de 1g/m³

3. EVALUACIÓN DE ACCIONES

Las acciones a tener en cuenta para el diseño y calculo del silo de son:

I. ACCIONES PERMANENTES

a. PESO PROPIO MURO

El muro esta compuesto en dos partes. La base se construirá de hormigón armado hasta una altura de 4,80 metros y con un espesor de 0,8 metros.

$$Pp_1=(\gamma_{horm}\times e\times h)= 25\times 0,8\times 4,80= 96 \text{ KN/m}$$

El resto del muro del silo, está diseñado como un muro de hormigón postesado con un espesor de 0,4 metros.

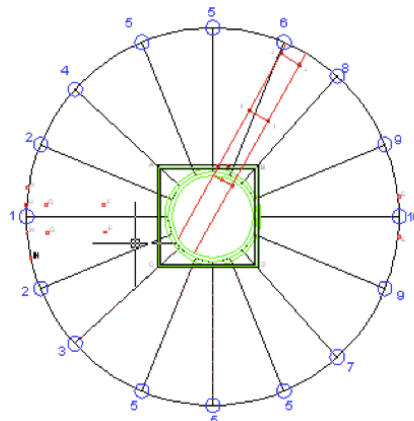
$$Pp_2=(\gamma_{horm}\times e\times h)= 25\times 0,4\times (35,05-4,80)=302,5 \text{ KN/m}$$

a. CARGA MUERTA

La carga muerta corresponde al peso de la cubierta del silo. La cual consta de una parte accesible y de otra no accesible.

Este es uno de los datos de partida. Del análisis de las acciones soportadas por la cubierta, que se puede ver a continuación, se desprende que la carga muerta total que genera la cubierta será 3767 KN.

LOADS TABLE											
UNITS:kN	Number of supports	SUPPORT TYPE	DEAD LOAD	LIVE LOAD	DUST	MATERIAL	HORIZONTAL WIND DIRECTION +X	HORIZONTAL WIND DIRECTION +Y	HORIZONTAL EARTHQUAKE	HORIZONTAL EARTHQUAKE	
							HORIZONTAL VERTICAL	HORIZONTAL VERTICAL	HORIZONTAL VERTICAL	HORIZONTAL VERTICAL	
	1	1	-213	-267	0	0	105	-93	14	30	0
	2	2	-358	-516	0	0	194	-186	96	-186	14
	1	3	-253	-669	-16	-12	119	-143	114	-143	36
	1	4	-286	-668	-64	-12	119	-143	114	-143	37
	5	5	-725	-1245	0	0	0	525	-465	30	0
	1	6	-301	-316	0	0	52	-93	139	-93	10
	1	7	-357	-686	-16	-120	119	-143	114	-143	37
	1	8	-426	-718	-16	-120	127	-143	126	-143	39
	2	9	-372	-518	0	-128	194	-186	308	-246	16
	1	10	-476	-310	0	-128	105	-93	226	-123	9
TOTAL LOADS			kN								
T			-3767	-5913	-112	-520	1134	-1223	1776	-1685	258
			-384,00	-602,75	-11,42	-53,01	115,60	-124,67	181,04	-171,76	26,30
										2,24	29,56
											3,08



II. ACCIONES PERMANENTES DE VALOR NO CONSTANTE

A este tipo de acciones corresponde la carga procedente de los esfuerzos de pretensado, la cual se calculará más adelante junto con el esfuerzo provocado por la presión horizontal que ejerce el relleno interior del silo, sobre las paredes del mismo.

III. ACCIONES VARIABLES

La carga variable total extraída del análisis de la cubierta es de 5913 KN.

a. VIENTO

Los esfuerzos debido a la acción que ejerce el viento sobre el muro del silo han sido calculados teniendo en cuenta el EGYPTIAN ESTÁNDARS CODE. En este se indica, que tanto los esfuerzos de presión como de succión que ejerce el viento se calculan con la formula:

$$P=C \times K \times q \quad \text{donde:}$$

P: Hace referencia al esfuerzo del viento por unidad de área. Perpendicular a la superficie, se considera como presión cuando actúa del exterior del silo hacia el muro y succión a la inversa.

q: Coeficiente básico de presión en función de la localización geográfica.

$$q=0,7\text{KN/m}^2$$

K: Coeficiente de exposición al viento que varía en función de la altura.

Altura (m)	Coeficiente k
0-10 m	1.0
10-20m	1.1
20-30m	1.3
30-50m	1.5
50-80m	1.7
80-120m	1.9
120-160m	2.1
Mas de 160m	2.3

C: Coeficiente de distribución de la presión que depende de la geometría del elemento.

$$C=\psi \times (H \div D) \quad \text{donde:}$$

Ψ : Coeficiente de forma. Para forma circular $\psi=1$

H: Altura del silo en metros.

D: Diámetro del silo en metros.

$$C=1'00 \times (48,3/38)=1,27$$

Por lo tanto, el valor del esfuerzo perpendicular a la superficie del silo será:

$$P=1,27 \times K \times 0,70$$

Altura (m)	Coefficiente k	P (KN/m ²)
0-10	1'00	0'889
10-20	1'10	0'98
20-30	1'30	1'155
30-50	1'50	1,333

La distribución de presiones sobre las paredes del silo no se considerará en el cálculo por ser insignificante en relación con el resto de acciones. No obstante, si se tendrá en cuenta su acción sobre la cubierta del silo.

b. PRESIÓN EJERCIDA POR EL MATERIAL DE RELLENO

Para el calculo de la presión que ejerce el material de relleno sobre las paredes del silo, se han tenido en cuenta las indicaciones del ITBTP ANNALS de Julio de 1986, que establece reglas para el diseño de silos de hormigón armado y postesado.

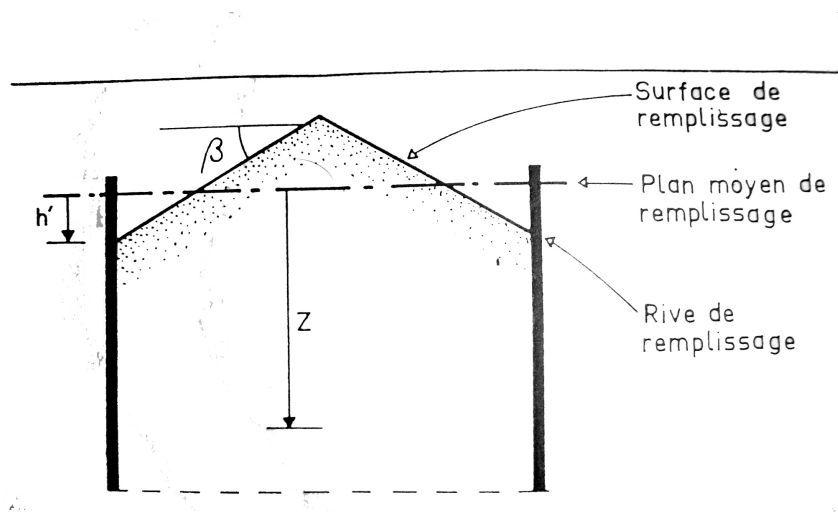
Obtención de los parámetros geométricos necesarios para el cálculo:

El principal parámetro de la sección es el radio hidráulico. $R_h = S/L$

- S: Área interior del silo= 1134'11 m²
- L: Perímetro interior del silo= 119'38 m

$$R_h = 9'5 \text{ m}$$

Para silos de admisión vertical como es nuestro caso, la superficie de material almacenado genera un cono de revolución como el que se observa en la imagen.



La línea horizontal que delimita un volumen de material igual al de la superficie del cono de revolución, marca el origen de coordenadas (z), a partir del cual se establece la profundidad del silo.

La altura del origen de coordenadas (z), se obtiene de la siguiente forma:

A partir de la línea de intersección del muro del silo con la superficie del cono de revolución que forma el material de relleno, considerar una altura h' .

$$h' = 2/3R_n \cdot \tan b = 4'41 \text{ m}$$

La altura total del cono de revolución se obtiene como;

$$H1 = R_{\text{interior}} \cdot \tan(\phi) = 19 \cdot \tan(33^\circ) = 12'33 \text{ m}$$

La altura total del material $H = 46'06 \text{ m}$

Por tanto, el eje de coordenadas (z), se encuentra a una altura de:

$$h = H + h' - H1 = 46'06 + 4'41 - 12'33 = 37'86 \text{ m}$$

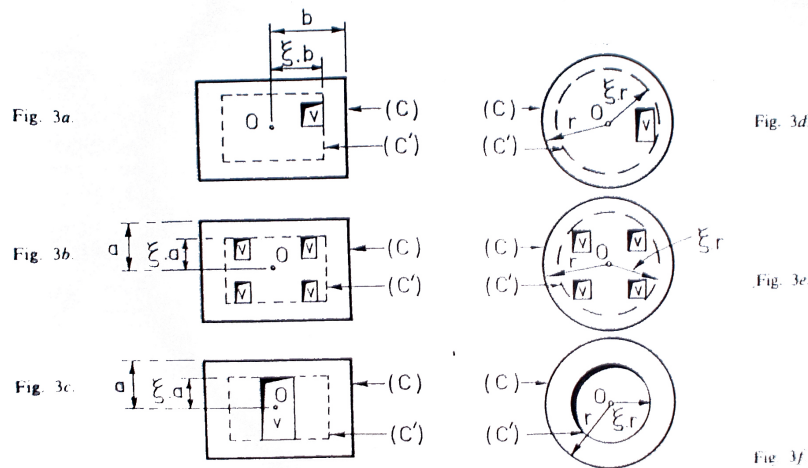
Clasificación del tipo de descarga

El tipo de descarga del silo, se clasifica en función de tres condiciones. Si alguna de estas tres condiciones no se cumple, se clasificará como descarga anormal.

- 1) La descarga se realiza por gravedad sin insuflación de aire.
- 2) Existencia de una estructura interior de descarga.
- 3) Los orificios de descarga están situados en el fondo del silo y la coordenada relativa del punto más externo de vertido es $(\xi) \leq 0'4$

La coordenada relativa (ξ) se obtiene a partir de:

- (C) Contorno de la sección
- (O) Centro de la sección
- (V) Proyección de los orificios de descarga
- (C') Contorno exterior más pequeño que intersecta con el punto de vertido más externo.



En este caso, la descarga del silo será de tipo anormal ya que el valor de (ξ) es $0'91 > 0'4$.

Características del material

Las características del material de relleno (Clinker) necesarias para el cálculo de los esfuerzos que este genera sobre las paredes del silo son:

Densidad $\gamma=1,50 \text{ ton/m}^3$

Angulo de rozamiento interno $\phi=33^\circ$

Angulo de fricción con el muro $\delta=24,45^\circ$

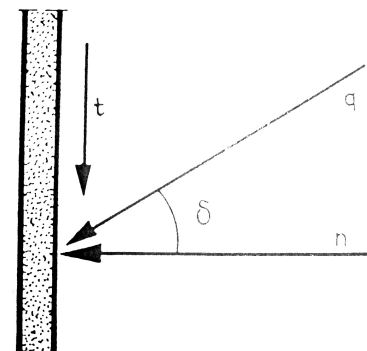
El ángulo de fricción se obtiene a partir de la relación entre los ángulos de rozamiento del clinker y el muro de hormigón $\rho= \tan \delta / \tan \phi= 0.70$

Definición de las acciones que actúan sobre el muro

La carga que el material de relleno ejerce sobre la superficie del muro, es una acción que forma ángulo δ con la horizontal. Esta acción se puede descomponer en una fuerza vertical y otra horizontal. De tal forma que:

n: Componente horizontal

t: Componente vertical t: $n \cdot \tan \delta$



Cálculo de las presiones sobre el muro

i. Presión vertical media

La presión vertical media que el material ejerce sobre el plano horizontal a una profundidad (z) respecto del eje de coordenadas se define como:

$$V_o = n_o / \lambda + \gamma h''$$

Donde $h'' = 1/2 R_h \cdot \tan \delta = 2'16 \text{ m}$

(λ) parámetro que depende del estado de equilibrio.

Primer estado de equilibrio

Este estado de equilibrio por lo general se produce después de un llenado, cuando se realiza en un solo paso, y cuando la masa de polvo permanece en reposo.

$$\lambda_1 = \frac{1 - m \sin(\varphi)}{1 + m \sin(\varphi)} \cos^2(\delta) \text{ with } m = \sqrt{1 - \rho^2} \text{ and } \rho = \frac{\tan \delta}{\tan \varphi}$$

$$\lambda_1 = 0'36$$

Segundo estado de equilibrio

El segundo estado de equilibrio es el que se produce durante la descarga del material y depende del proceso de llenado. Es el estado que hay que tener en cuenta para el cálculo de las tensiones en las paredes del silo.

$$\lambda_2 = \cos^2(\delta) = 0.83$$

Esta formula se utiliza en el caso de que la descarga del material sea del tipo normal.

ii. Altura de referencia

Para cada estado de equilibrio, la norma establece además una altura de referencia.

$$z_{01} = \frac{R_h}{\lambda_1 \tan(\delta)} = 57.32 \text{ m} \quad ; \quad z_{02} = \frac{R_h}{\lambda_2 \tan(\delta)} = 25.22 \text{ m}$$

iii. Profundidad reducida "x" y función exponencial

La profundidad reducida y la función exponencial quedan definidas por las siguientes expresiones:

$$x = \frac{z - h''}{z_0} \quad ; \quad y = 1 - e^{-x}$$

Estas expresiones nos permiten calcular el valor de las acciones en cada uno de las diferentes alturas del silo.

iv. Expresiones que definen las acciones actuantes sobre las paredes del silo

Dependen del estado de equilibrio que se quiera calcular y vienen definidas por las siguientes expresiones:

Para el primer estado de equilibrio

$$n_1 = k_n \left(\frac{\gamma_1 r_h}{tg\delta} \right) y$$

$$t_1 = n_1 tg\delta = k_n \gamma_1 r_h y$$

$$\bar{v}_1 = k_c \gamma (z_{01} \bar{y} + h'')$$

$$T = \gamma_1 r_h z_{01} y (\bar{x} - \bar{y})$$

Para el Segundo estado de equilibrio, suponiendo que la descarga es de tipo normal:

$$n_2 = k_n \left(\frac{\gamma_2 r_h}{tg\delta} \right) y$$

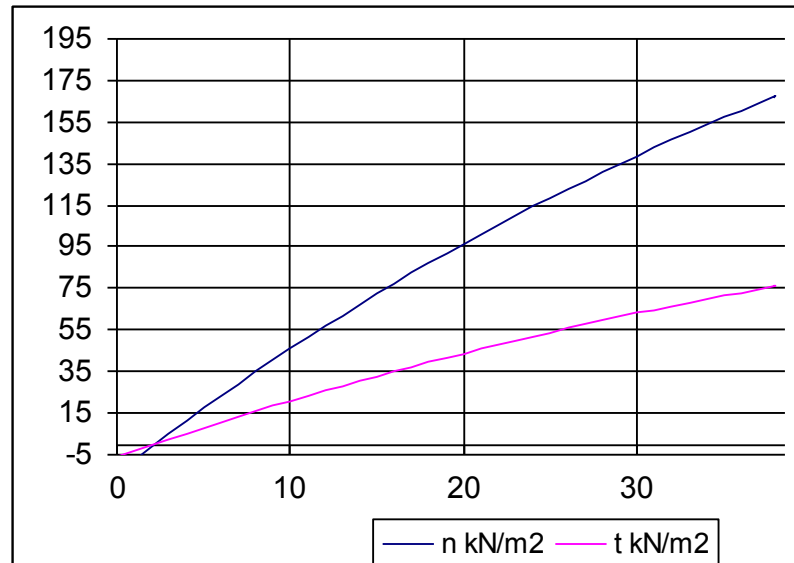
$$t_2 = n_2 tg\delta = k_n \gamma_2 r_h y$$

$$\bar{v}_2 = k_c \gamma (z_{02} \bar{y} + h'')$$

$$T = \gamma_1 r_h z_{01} y (\bar{x} - \bar{y})$$

v. Valores de las componentes vertical y horizontal

Para el primer estado de equilibrio, los resultados obtenidos son:

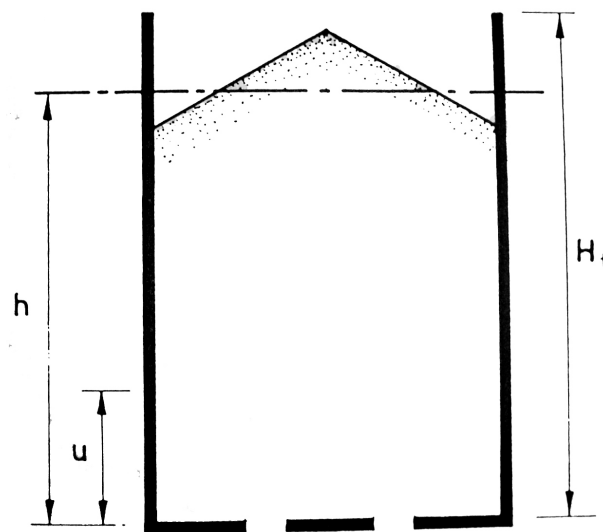


Para el segundo estado de equilibrio, habíamos supuesto que la descarga era del tipo normal, pero puesto que no es así los resultados que obtendríamos con dicha formulación no serían del todo reales.

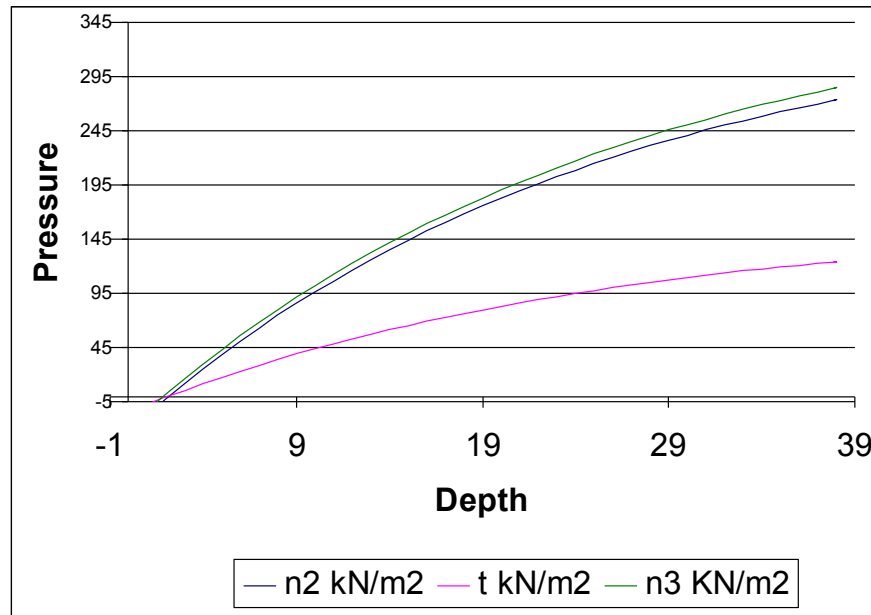
Para silos con descarga del tipo anormal, la norma establece un tercer estado de equilibrio; el valor de la componente normal se calculará con las siguientes expresiones:

$$n_3 = n_2 + \frac{\bar{n}_1}{15} \left(1 - \frac{4u}{5H_t} \right) \text{ if } 0.6 \leq \xi \leq 1$$

$$n_3 = n_2 + \frac{\bar{n}_1}{15} (5\xi - 2) \left(1 - \frac{4u}{5H_t} \right) \text{ if } 0.4 < \xi < 0.60$$



Obteniéndose los siguientes resultados de t , n_2 y n_3



El silo se diseñara teniendo en cuenta el peor de los siguientes caso:

- Para n_3
- Para n_2 mas el momento de ovalización.

vi. Momento de ovalización

Debido a que la descarga del material se realizará según la normal de forma anormal, la distribución de presiones que ejerce el Clinker sobre las paredes del silo no se distribuirá uniformemente sobre las mismas.

Esto quiere decir que en el momento de descarga del silo, para una misma cota de muro, las paredes estará sometidas a compresiones distintas. Este fenómeno provocará la aparición de un momentos flectores sobre algunos tramos de muro y que deberá tenerse en cuenta en el diseño del silo.

Se establecen 3 posibles configuraciones del silo y se calculará para cada una de ellas el momento de ovalización que se genera en cada tramo de muro.

- Caso 1: Base del silo rígida y parte superior libre.
- Caso 2: Base del silo rígida y parte superior rígida.
- Caso 3: Base y parte superior del silo con libertad de movimiento.

El momento de ovalización se define como:

$$M_{ov} = \pm M_{ref} x G \left(\psi, \frac{u}{H_t} \right) x \frac{1}{1 + \frac{4n_{02}r^3}{E_t h_0^3}}$$

Donde:

$$M_{ref} = \mu * n_1 * r^2 \text{ if } 0.6 \leq \xi \leq 1 = 30.56 \text{ mTn/m}$$

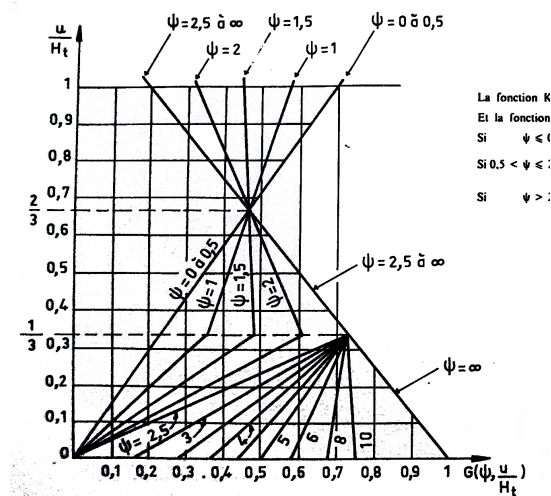
$$\psi = \frac{H}{r} \sqrt{\frac{h_0}{r}} \text{ con } r = \text{radio; } h_0 = \text{espesor del muro y } H_1 = \text{altura total}$$

u = altura del punto considerado

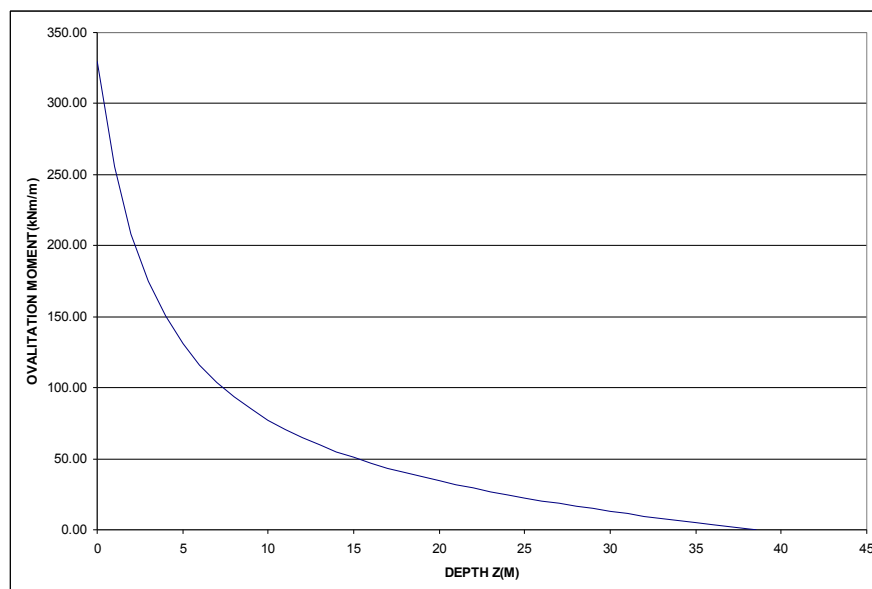
$$n_{02} = n_2/k_n$$

Ei = Modulo de Young del hormigón para acciones de corta duración $E = 11000 \cdot f_c^{1/3}$ con f_c MPa, = 34.180 N/mm²

G(y,u/Ht) se extrae de la siguiente gráfica:



Los resultados obtenidos del momento de ovalización en función de la altura del silo, se recogen en la siguiente gráfica:



Los cálculos se han realizado en la hoja de Excel 02c_HOJA DE CÁLCULO que se adjunta con el documento, donde se pueden observar los esfuerzos para los diferentes estados de equilibrio en función de la profundidad del silo.

c. ACCIÓN TÉRMICA

Para el cálculo de los esfuerzos producidos por la acción térmica, se han tenido en cuenta las indicaciones del ITBTP ANNALS de Julio de 1986, que establece reglas para el diseño de silos de hormigón armado y postesado.

Las condiciones de temperatura en la zona en que se ubica el silo son:

Temperatura mínima: 5,70°C

Temperatura máxima: 45°C

Temperatura media: 25°C

Según establece la norma, el esfuerzo generado por el gradiente de temperatura es:

$$M_{\Delta t} = \frac{\alpha_t \Delta t E I}{h_o}$$

Donde:

α_t : Coeficiente de dilatación térmica del hormigón $\alpha_t = 10^{-5}$

h_o : espesor del muro

I: Momento de inercia

I para ELU = $0,03 h_o^3$

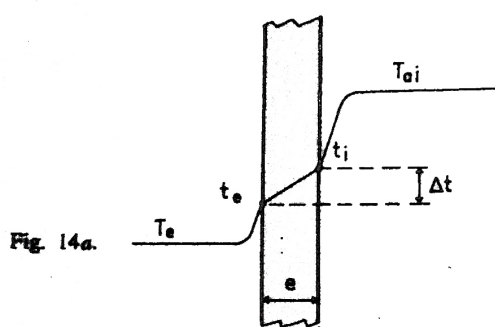
I para ELS = $h_o^3 / 12$

Δt : Incremento de temperatura

E: Módulo Young del hormigón para acciones de larga duración

$E = 3700 \cdot f_{cj}^{1/3}$ Donde: $f_{cj} = 1.1 \times f_{c28}$ así pues, $E = 11867 \text{ N/mm}^2$

Dicho esfuerzo depende principalmente del gradiente de temperatura entre el material-muro-exterior. De esta forma consideramos dos casos en los que el gradiente y por tanto los esfuerzos en el muro serán máximos:



a. Contacto aire-muro

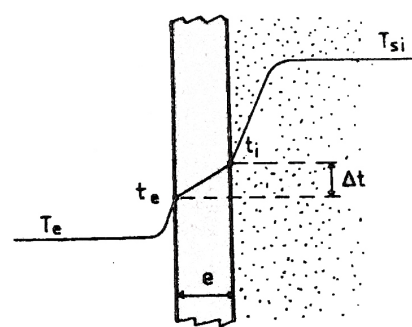


Fig. 14b.

b. Contacto muro-material

CASO A: CONTACTO AIRE-MURO

La comprobación se realiza entre la temperatura del aire interior del silo y la mínima temperatura exterior del silo, ya que son las de mayor diferencia.

$$t_i - t_e = \Delta t = (T_{ai} - T_e) \frac{e}{0.30 + e}$$

Te: Mínima temperatura del aire exterior = 5,70 °C

e: Espesor del muro = 0,4 m.

Tr: Temperatura media de referencia del material en el interior del silo = 100 °C

Tai: Máxima temperatura del aire interior

Tai = 0,72Tr = 72 °C, por lo tanto:

$$\Delta t = 37,89 \text{ °C}$$

CASO B: CONTACTO MURO-MATERIAL

La comprobación se realiza entre la mínima temperatura del aire exterior del silo y la máxima temperatura del material, ya que son las de mayor diferencia.

$$t_i - t_e = \Delta t = (T_{si} - T_e) \frac{e}{1 + e}$$

Tsi: Máxima temperatura del material

Tsi = 0,90Tr = 90 °C, por lo tanto:

$$\Delta t = 48,17 \text{ °C}$$

Por comparación podemos observar que el mayor gradiente y por tanto, los mayores esfuerzos sobre el muro, se darán en el caso B.

Así pues para $\Delta t = 48,17 \text{ °C}$,

Para el cálculo de ELU, el momento generado será: $M_{\Delta t} = 27'44 \text{ KN/m}$

Para el cálculo de ELS, el momento generado será: $M_{\Delta t} = 76'23 \text{ KN/m}$

Los cálculos se han realizado en la hoja de Excel 02c_HOJA DE CÁLCULO que se adjunta con el documento

d. ACCIÓN SISMICA

No se contempla para el cálculo de esta estructura.

4. PRE-DIMENSIONAMIENTO

En este apartado se va a explicar como se ha realizado el pre-dimensionamiento de la armadura activa que se introducirá en el interior de los muros del silo.

Como se ha indicado anteriormente, el muro del silo está compuesto de dos partes, la base del silo y hasta una altura de muro de 4'80 m consiste en un muro de hormigón armado. Mientras que desde la cota 4'80 hasta la coronación del muro del silo, este consistirá en un muro de hormigón postesado.

La principal función que debe cumplir la armadura activa, es la de dotar al muro de la suficiente resistencia a tracción para soportar los esfuerzos de compresión que el relleno almacenado en el silo, ejerce sobre las paredes del mismo.

Es por esto, que partiendo de los resultados obtenidos de las presiones horizontales que genera el Clinker almacenado, podemos conocer el valor de la tensión que deben ejercer los cables en cada tramo de muro, en función de la profundidad.

Teniendo en cuenta, el modelo de cálculo citado en la memoria, que indica la forma de obtención de la fuerza de tracción que se debe generar en cada tramo de muro, y suponiendo que:

- Inicialmente se prevé la utilización de cordones de acero Y1860S7 de sección $15'7 \text{ mm}^2$ y una carga unitaria máxima de 1860 N/mm^2 como armadura activa.
- Para la simplificación del cálculo se considera un porcentaje de pérdidas debidas al proceso de tesado del 25%
- La fuerza de tesado inicial se realizará a un 75% de la fuerza máxima que el acero puede soportar.
- Despreciamos el efecto producido del momento de ovalización generado durante la descarga del material y el producido en el momento en que el silo se encuentra parcialmente lleno.

Podemos concluir, que la sección de armadura activa necesaria para resistir los esfuerzos producidos por material almacenado en el interior del silo deberá cumplir para cada tramo de muro:

$$T = 0,75 \times \% \text{Pérdidas} \times f_{up} \times A_p$$

Despejamos A_p ,

$$A_p = T / (0,75 \times \% \text{Pérdidas} \times f_{up})$$

Los cálculos se han realizado en la hoja de Excel 02c_HOJA DE CÁLCULO que se adjunta con el documento y el resultado está recogido en la 01_MEMORIA TFG.

5. SISTEMA DE POSTESADO

El sistema de postesado que se va a disponer alrededor del diámetro del silo consiste básicamente, en el trazado de cables de distinto número de cordones, en función de los esfuerzos a los que se verá sometido el tramo de muro. De esta forma, a medida que aumente la presión sobre el muro, aumentará el número de cordones necesarios para resistir dichos esfuerzos.

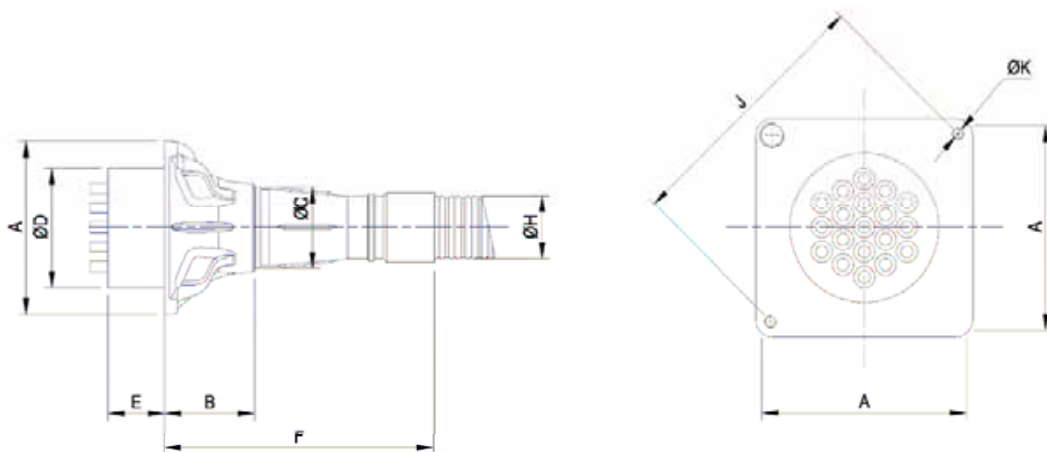
Se dispondrán cuatro resaltos que permitirán alojar los elementos de anclaje, dichos resaltos, estarán situados en posiciones perpendiculares entre ellos, de forma que para tesar el diámetro total del silo, se utilizarán cuatro tramos de cable.

El trazado y disposición de los elementos de anclaje y de los cables de tesado se puede observar en los planos P04_DEFINICIÓN ARMADURA ACTIVA.

5.1. ELECCIÓN DEL ANCLAJE

Para la elección de los elementos del sistema de postesado se ha realizado una búsqueda en catálogos de fabricantes de sistemas de pretensado.

Se han seleccionado como dispositivos para el anclaje de los cables de acero postesado, los anclajes del tipo GC de DYWIDAG que cuentan con las siguientes características:



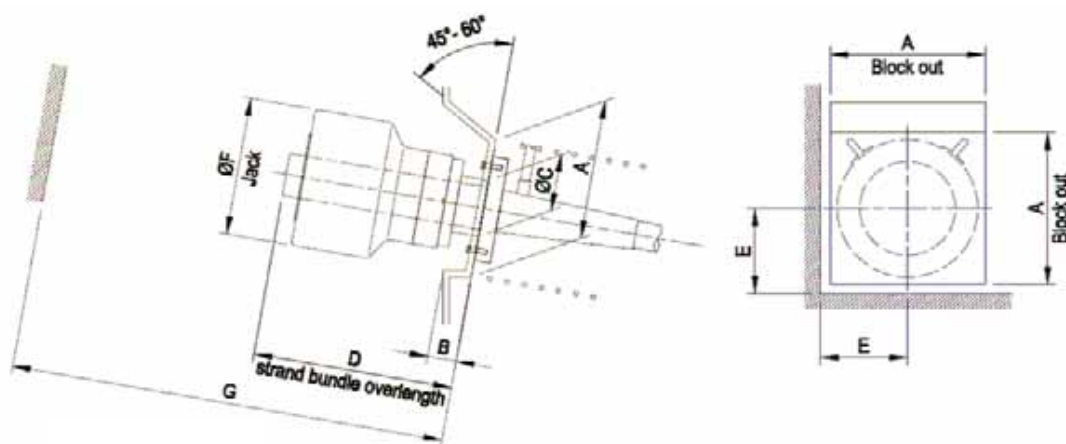
5.2. GEOMETRÍA DEL MACIZO DE ANCLAJE

De los cálculos de pre-dimensionamiento realizados, se puede extraer que se van a utilizar dispositivos para el anclaje de cables de 3,7 y 12 cordones.

Por esto, el resalto que se debe disponer para la ubicación de los anclajes será como mínimo de 230 mm de espesor.

Unit	□A	B	ØC	ØD	E	F	ØH	J ⁽¹⁾	K
6-3	130	120	50	95	50	120 ⁽²⁾	50	140	M12
6-4	140	120	60	110	55	120 ⁽²⁾	60	154	M12
6-7	180	135	76	135	60	135 ⁽²⁾	76	210	M12
6-12	230	220	92	170	75	220 ⁽²⁾	92	264	M16
6-15	260	240	113	190	85	240 ⁽²⁾	113	316	M16
6-19	290	150	131	200	95	450	112	354	M16
6-22	320	150	153	220	100	640	112	400	M16
6-27	350	170	164	240	110	620	127	430	M16
6-31	375	170	173	260	120	580	143	470	M16
6-37	410	170	196	280	135	770	142	524	M16

Además del espacio necesario para disponer el elemento de anclaje, deberá haber la suficiente separación (E) respecto al paramento y el resto de dispositivos de anclaje, además del suficiente espacio para poder ejercer la fuerza de tesado mediante los gatos de anclaje.



Esta separación (E), para los anclajes de 3, 7 y 12 cordones, será la que se establece en la siguiente tabla:

Unit	Jack ZPE	A	B	ØC	D	E	ØF	G	Weight kg
6-1	ZPE-23FJ	135	140	40	300	90	116	1200	23
	ZPE-30	200			600	100	140	1350	28
6-2	ZPE-60	170	140	60	650	140	180	1100	74
6-3	ZPE-60	195	140	70	650	140	180	1100	74
6-4	ZPE-7A	220	145	80	650	200	280	1400	115
6-7	ZPE-12St2	305	150	90	670	200	310	1300	151
	ZPE-200				950	210	315	2000	308
	ZPE-185				620	180	300	1220	280
6-12	ZPE-19	370	155	125	700	250	390	1500	294
6-15	ZPE-460/31	460	175	150	570	300	485	1500	435
	ZPE-500				1050	330	550	2100	1064

Para los anclajes de cables de 3 cordones, la separación del eje de simetría del anclaje respecto del paramento o eje de otro anclaje será de 140 mm.

Para los anclajes de cables de 7 cordones, la separación del eje de simetría del anclaje respecto del paramento o eje de otro anclaje será de entre 200-180 mm.

Para los anclajes de cables de 12 cordones, la separación del eje de simetría del anclaje respecto del paramento o eje de otro anclaje será de 250 mm.

Así pues, para alojar los dispositivos de anclaje de los cables de tesado, se deberán disponer resaltos de al menos un espesor de: $250 + 230/2 = 365$ mm de espesor.

En este caso, se ha decidido que el espesor total será de 400 mm por facilidad de ubicación y montaje de los anclajes y por facilidad constructiva ya que coincidirá con el espesor del muro de hormigón armado que conforma la base.

La norma establece además, que antes de anclar el cable, este deberá prolongarse según una trayectoria recta y perpendicular al anclaje un longitud que variará en función del tipo de anclaje y el número de cordones del cable.

Para el caso en cuestión deberá ser de:

Unit	A	B	ØC	ØD	E	F	ØH	J ⁽¹⁾	K
6-3	130	120	50	95	50	120 ⁽²⁾	50	140	M12
6-4	140	120	60	110	55	120 ⁽²⁾	60	154	M12
6-7	180	135	76	135	60	135 ⁽²⁾	76	210	M12
6-12	230	220	92	170	75	220 ⁽²⁾	92	264	M16
6-15	260	240	113	190	85	240 ⁽²⁾	113	316	M16
6-19	290	150	131	200	95	450	112	354	M16
6-22	320	150	153	220	100	640	112	400	M16
6-27	350	170	164	240	110	620	127	430	M16
6-31	375	170	173	260	120	580	143	470	M16
6-37	410	170	196	280	135	770	142	524	M16

Para conocer la longitud del resalto y la inclinación de las paredes sobre las que apoyarán los anclajes se realizará un estudio detallado ya que es una zona con requisitos y especificaciones que tiene cierta dificultad de resolución.

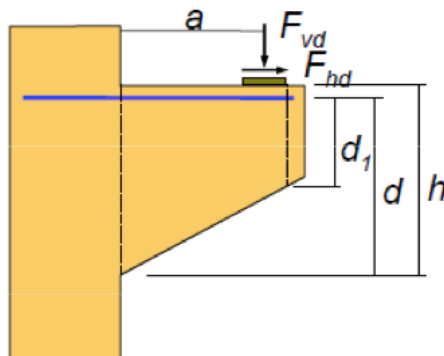
5.3. DIMENSIONAMIENTO DEL MACIZO DE ANCLAJE

En el siguiente apartado se va tratar el dimensionamiento de la armadura del macizo donde se situarán los anclajes de los cables del sistema de tesado.

El modelo de cálculo es similar a una ménsula corta, se obtendrá una armadura principal además de una armadura secundaria.

El dimensionamiento se realizará en función de la fuerza de tesado, ya que la función del armado será principalmente la de soportar el esfuerzo durante el tesado de los cables, más cuando no se han tesado ambos extremos del anclaje.

La EHE 08 en su artículo 64 define como ménsula corta aquella que cumpla las siguientes condiciones en función de su geometría.



Condición 1

$$d1 \geq 0,5 \times d$$

Condición 2

$$d \geq \frac{a}{0,85} \times \cotg\theta$$

El cálculo se puede observar en la 02c_HOJA DE CÁLCULO y los resultados con el armado y las comprobaciones realizadas se adjunta a continuación.

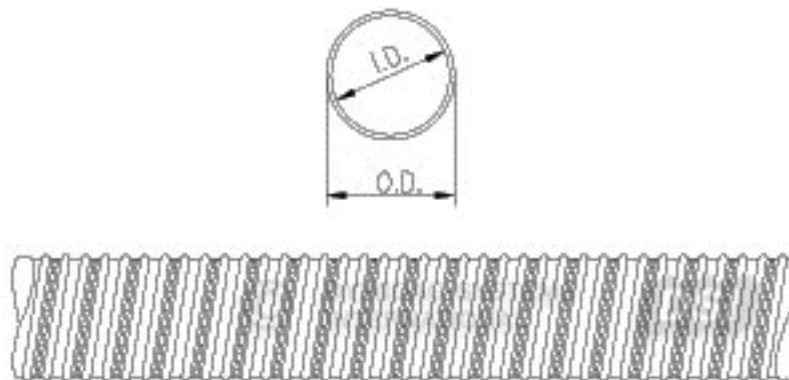
Armadura principal		
Fvd (N)	323651,21	
tg θ	0,71428571	
Fhd (N)	0	
Fyd (N/mm²)	400	
As1 (mm²)	5,77948582	3Ø16
Fvd (N)	756126,743	
tg θ	0,71428571	
Fhd (N)	0	
Fyd (N/mm²)	400	
As1 (mm²)	13,5022633	5Ø20
Fvd (N)	1277306,23	
tg θ	0,71428571	
Fhd (N)	0	
Fyd (N/mm²)	400	
As1 (mm²)	22,8090398	5Ø25

TRAMO 1
TRAMO 2
TRAMO 3

Armadura secundaria		
Fvd (N)	323651,21	
T2d (N)	64730,2411	
Fhd (N)	0	
Fyd (N/mm²)	400	
Ase (mm²)	1,61825603	4Ø8
Fvd (N)	756126,743	
T2d (N)	151225,349	
Fhd (N)	0	
Fyd (N/mm²)	400	
Ase (mm²)	3,78063372	7Ø8
Fvd (N)	1277306,23	
T2d (N)	255461,245	
Fhd (N)	0	
Fyd (N/mm²)	400	
Ase (mm²)	6,38653114	8Ø8

5.4. TIPO Y DIAMETRO DE LAS VAINAS

Para la protección de los cordones se utilizarán vainas metálicas corrugadas. Estas vainas de chapa fina (0,25-0,35 mm) y con costillas proveen una buena protección secundaria contra la corrosión a la vez que garantizan una perfecta adherencia entre los tendones y el hormigón. La protección primaria es provista por la alcalinidad de la lechada de cemento y del hormigón.



En cuanto al diámetro de la vaina que recubrirá los cordones de pretensado, el catalogo establece un diámetro nominal en función del numero de cordones que contenga, así pues:

Unit	□A	B	ØC	ØD	E	F	ØH	J ⁽¹⁾	K
6-3	130	120	50	95	50	120 ⁽²⁾	50	140	M12
6-4	140	120	60	110	55	120 ⁽²⁾	60	154	M12
6-7	180	135	76	135	60	135 ⁽²⁾	76	210	M12
6-12	230	220	92	170	75	220 ⁽²⁾	92	264	M16
6-15	260	240	113	190	85	240 ⁽²⁾	113	316	M16
6-19	290	150	131	200	95	450	112	354	M16
6-22	320	150	153	220	100	640	112	400	M16
6-27	350	170	164	240	110	620	127	430	M16
6-31	375	170	173	260	120	580	143	470	M16
6-37	410	170	196	280	135	770	142	524	M16

- Para los cables de 3 cordones, el diámetro de la vaina será de 50 mm
- Para los cables de 7 cordones, el diámetro de la vaina será de 76 mm
- Para los cables de 12 cordones, el diámetro de la vaina será de 92 mm

6. DIMENSIONAMIENTO Y ARMADO

En el siguiente apartado se va a tratar de exponer el procedimiento seguido para la obtención del armado del muro del silo y su dimensionamiento. En este caso nos centraremos en la armadura pasiva y para ello nos basaremos en los resultados obtenidos del modelo de cálculo implementado en el programa SAP2000.

Para poder realizar el dimensionamiento de forma eficaz, se ha creado una envolvente de esfuerzos tanto para el estado limite ultimo como para el de servicio, con el objetivo de conocer el rango de esfuerzos máximo y mínimo entre el que nos tenemos que mover para conseguir un dimensionamiento correcto de la estructura para ambos estados limite.

Las comprobaciones que se van a realizar son:

Para Estado Limite Ultimo:

- Tensiones normales
- Tensiones tangenciales

Para Estado Limite de Servicio:

- Fisuración

En cada caso, se comprobarán los esfuerzos en las dos direcciones y en ambas caras del muro. El EUROCODIGO 01, establece un modelo de cálculo para placas sometidas a esfuerzos en dos direcciones, pero por simplicidad de cálculo, realizaremos el dimensionamiento en base a los resultados obtenidos con el programa SAP2000.

6.1. COMPROBACIÓN E.L.U

6.1.1. E.L.U FRENTE A SOLICITACIONES NORMALES

El primer paso para la obtención de la armadura pasiva a disponer en el muro, para soportar los esfuerzos debidos a solicitaciones normales, es la obtención de la armadura mínima tanto por criterios geométricos como mecánicos.

En este caso, nos encontramos frente a una tipología estructural tipo muro, que se prevé construir con acero B500S, además consideraremos ambas caras como traccionadas por lo que la armadura por criterios geométricos será la misma para ambas.

La armadura mínima mecánica se obtendrá mediante la formula para secciones rectangulares de hormigón armado que establece la EHE 08.

Así pues, los resultados de armado mínimo son:

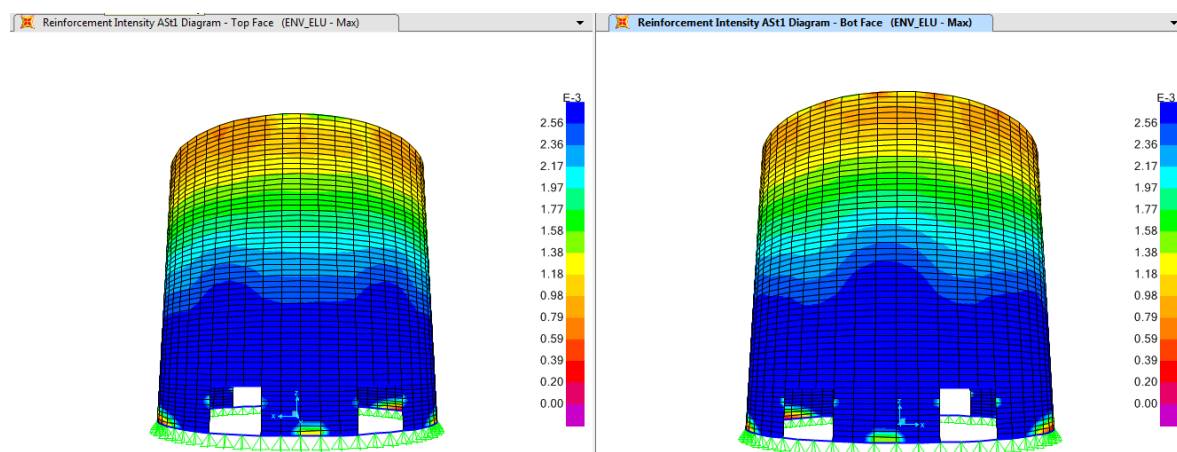
CARACTERÍSTICAS DE LA SECCIÓN					
Armadura longitudinal					
ZONA		h	b	d	d'
MURO H. ARMADO		0,800	1,00	0,765	0,035
MURO POSTESADO		0,400	1,00	0,365	0,035
fcd (Mpa)	16,66	fyd (Mpa)	434		
ZONA	Ac	Armadura mínima geométrica		Armadura mínima mecánica	
		HORIZ (cm²)/m	VERT (cm²)/m	HORIZ (cm²)/m	VERT (cm²)/m
MURO H.ARMADO	0,800	25,60	7,20	12,28	12,28
MURO POSTESADO	0,400	12,80	3,60	6,14	6,14
				Armadura mínima a disponer	
				HORIZ (cm²)/m	VERT (cm²)/m
MURO H.ARMADO				25,60	12,28
MURO POSTESADO				12,80	6,14

Estos resultados, nos permiten establecer un armado base, a partir del cual y en función de los resultados obtenidos en el modelo de SAP2000, podemos conocer aquellas zonas que necesitarán un refuerzo debido a que los esfuerzos se encontrarán concentrados en las mismas.

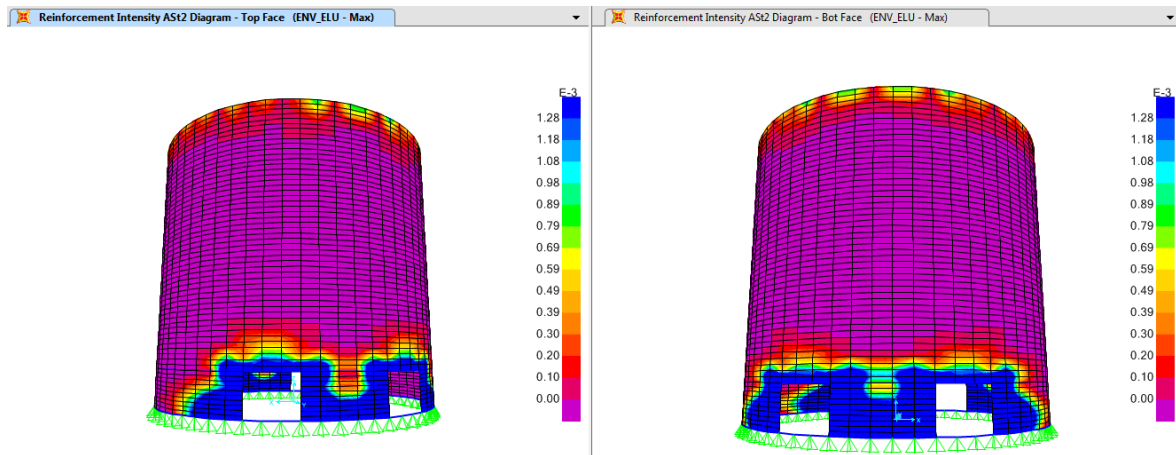
A continuación, se van a analizar los resultados obtenidos tanto para armadura horizontal como vertical si establecemos como armadura base la armadura mínima obtenida anteriormente.

Los resultados se encuentran expresados en m²/m, las zonas sombreadas de azul oscuro son aquellas que necesitarán mas armadura de la dispuesta, el resto cumplirían si se estableciera el armado mínimo como base.

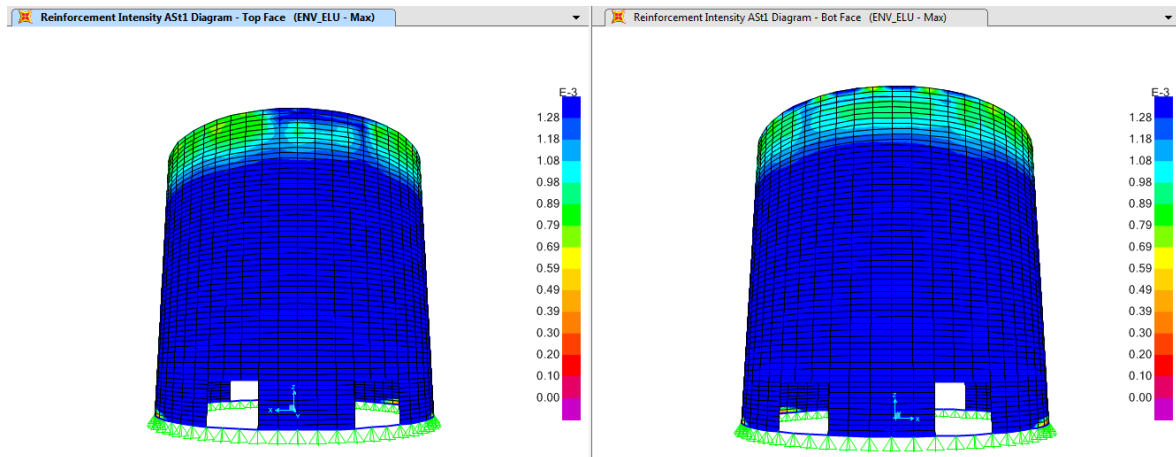
Como se puede observar en la siguiente imagen, si establecemos como **armado base horizontal**, la armadura mínima obtenida **para el tramo de muro de hormigón armado**. La totalidad del mismo necesitaría un refuerzo adicional, por lo que no sería lógico establecer este valor como base, siendo **necesario aumentarlo**



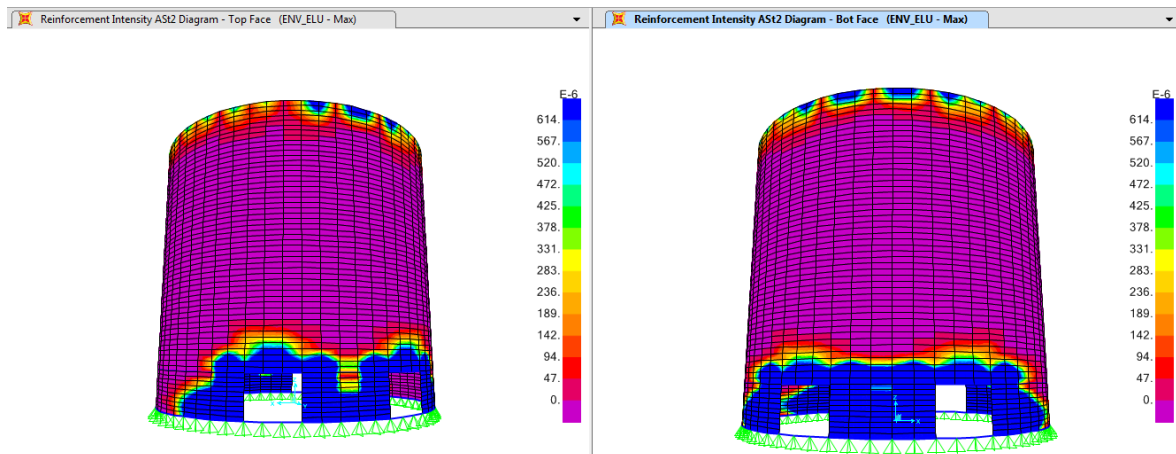
Para el caso del **armado base vertical para el tramo de muro de hormigón armado**, podemos observar que dicho tramo **cumplirá siendo necesario reforzar las zonas próximas a las aberturas de paso** de las cintas transportadoras.



Si analizamos lo que ocurriría si el **armado base horizontal del tramo de muro de hormigón postesado** fuera el obtenido como armado mínimo, se observa que no cumpliría en casi la totalidad del mismo, por lo que **se desecha la opción**.



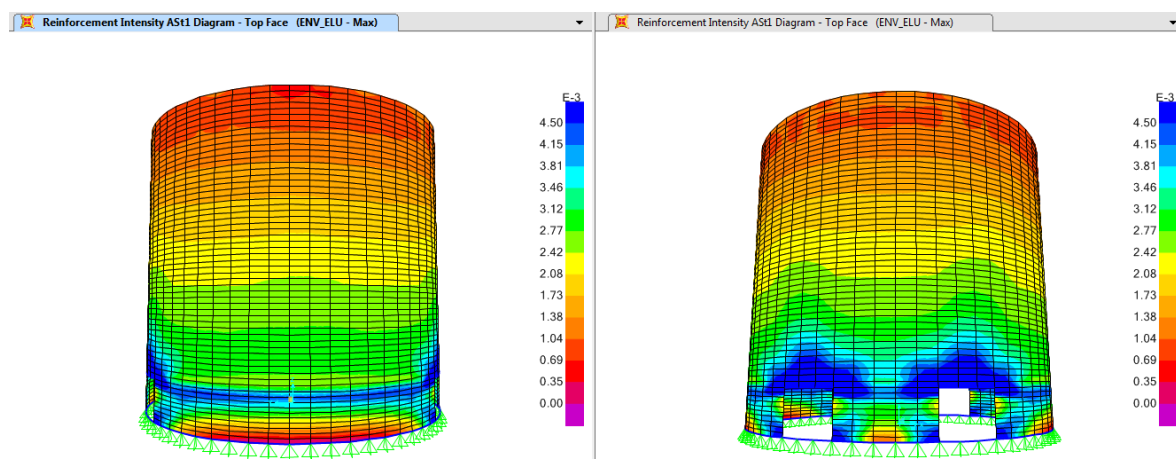
Por ultimo, si disponemos el armado mínimo vertical obtenido anteriormente como **armado base vertical para el tramo de muro de hormigón postesado**, observamos que tan solo será necesario reforzar algunas zonas por lo que criterios de ahorro económico **si se considerará** dicha opción.



Por lo tanto, concluimos que como armadura base vertical se dispondrá la armadura obtenida por mínimos siendo necesario reforzar algunas zonas de la estructura.

Realizado el análisis, se propone un armado base que cumpla con las restricciones mecánicas impuestas por los esfuerzos y que permita una mayor facilidad constructiva, teniendo en cuenta también criterios de ahorro de material. Por tanto;

Para el caso de la armadura horizontal, para ambos tramos de muro no sería recomendable disponer la armadura mínima como base y será necesario aumentarla. Se propone colocar una armadura base de $45 \text{ cm}^2/\text{m}$ para ambos tramos, siendo necesario reforzar algunas zonas del muro.



Por tanto, el armado base que se dispondrá como armadura pasiva para soportar las tensiones generadas por los esfuerzos normales será:

Cuantía base a disponer				
Tramo	Armado horizontal (cm²/m)		Armado vertical (cm²/m)	
	Cara exterior	Cara interior	Cara exterior	Cara interior
H.armado	45	45	12,28	12,28
Postesado	45	45	6,14	6,14
	25,6	25,6	6,14	6,14

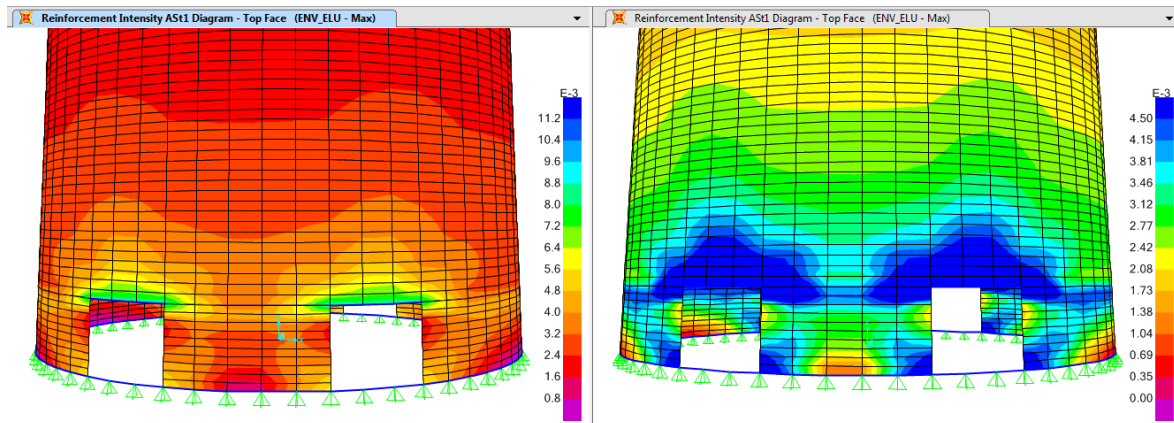
Cuantía de refuerzo en armadura horizontal a disponer			
TRAMO		Armado horizontal (cm²/m)	
		Cara exterior	Cara interior
Esquina inferior aberturas de paso		15	15
Parte sup del dintel	1er metro	35	35
	2do metro	25	25
	3er metro	15	15

Cuantía de refuerzo en armadura vertical a disponer		
TRAMO	Armado vertical (cm²/m)	
	Cara exterior	Cara interior
Parte superior del silo (2 metros)	6,14	6,14
Zona aberturas de paso + 4 metros hasta una altura de 8 metros	32,72	32,72

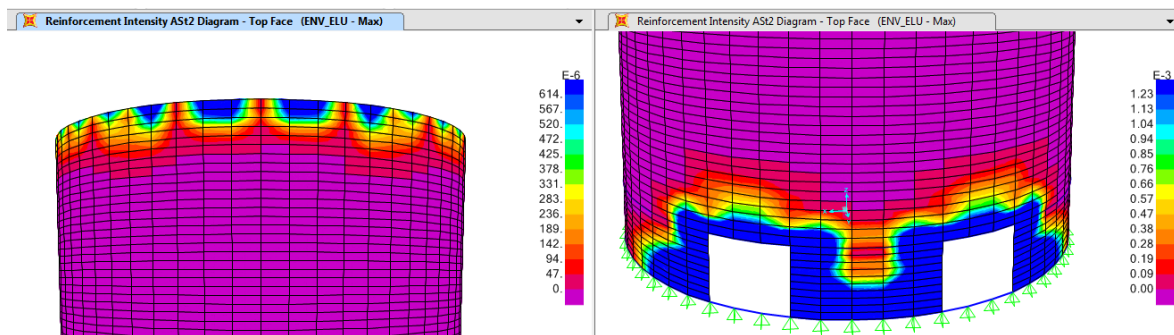
Puesto que en la parte superior estaríamos colocando mucha mas armadura de la necesaria por cálculo, el tramo de muro de hormigón postesado se dividirá en dos tramos reduciendo de esta forma el armado en la parte superior.

A partir del armado base, será necesario reforzar con mas armadura aquellas zonas que en los gráficos se observa el sombreado en color azul oscuro.

Para el caso de la armadura horizontal, se deberá reforzar el ancho del dintel + longitud de solape con 80 cm² el primer metro, 70 cm² el segundo metro por encima del dintel y 60 cm² el tercer y cuarto metro.



Para el caso de la armadura vertical, se deberá aumentar la armadura base en la parte superior del silo mediante una cuantía 12,28 cm² en los primeros dos metros de anillo. Además se reforzará la zona alrededor de las aberturas con una cuantía de 45 cm² hasta una altura de 3 metros por encima del dintel y se prolongará 4 metros + longitud de solape.



6.1.2. E.L.U FRENTE A SOLICITACIONES TANGENCIALES

Para realizar el dimensionamiento y armado del muro frente a solicitaciones tangenciales, se va a suponer que no se dispondrá armadura transversal y que por lo tanto, la comprobación a realizar será la siguiente:

La EHE08 en su artículo 44 establece que la comprobación a realizar será la siguiente:

$$V_d \leq V_{cu} > V_{u2,min}$$

Siendo:

V_{cu} la contribución del hormigón a la resistencia al esfuerzo cortante, y que se obtiene con la siguiente formula.

$$V_{cu} = \left[\frac{0,15}{\gamma_c} \xi (100 \rho_l f_{cv})^{1/3} + 0,15 \alpha_l \sigma'_{cd} \right] \beta b_0 d$$

$V_{u2,min}$ el esfuerzo frente a cortante por tracción en el alma y que para piezas sin armadura de cortante y con la sección fisurada se obtiene de la siguiente expresión.

$$V_{u2} = \left[\frac{0,075}{\gamma_c} \xi^{3/2} f_{cv}^{1/2} + 0,15 \sigma'_{cd} \right] b_0 d$$

Al igual que en los apartados anteriores, los cálculos se han realizado en 02c_HOJA DE CÁLCULO, de la cual se extrae las siguientes tablas para cada tramo de muro.

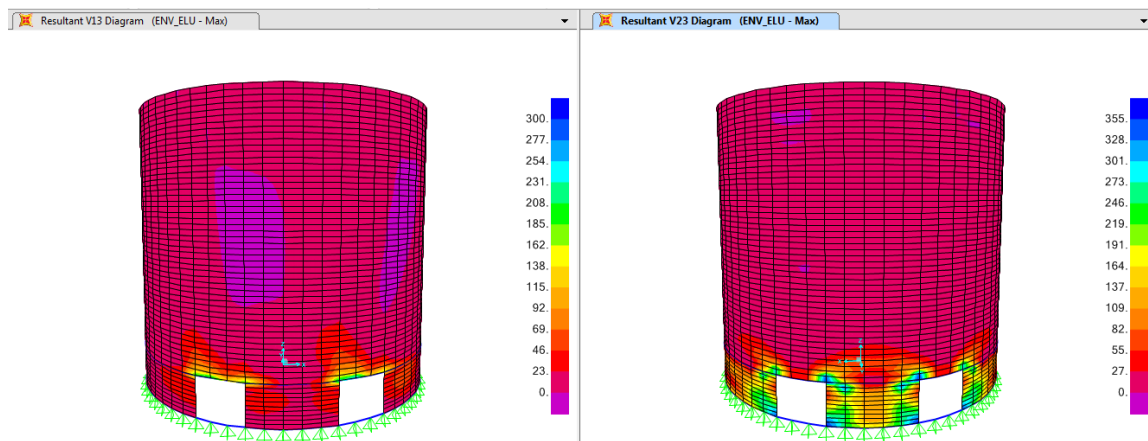
E.LU SOLICITACIONES TANGENCIALES					
Muro postesado dirección horizontal					
Vd		≤	Vu2 min		209,48
Vu2 min		209,48	Vcu		238,98
As	45,00	≤	2	0,02	
yc	1,5				
ξ	1,74				
ρ _l	0,01232877				
fcv	25				
b ₀	1				
d	0,365				

E.LU SOLICITACIONES TANGENCIALES					
Muro postesado dirección vertical					
Vd		≤	Vu2 min		209,48
Vu2 min		209,48	Vcu		123,05
As	6,14	≤	2	0,02	
yc	1,5				
ξ	1,74				
ρ _l	0,00168272				
fcv	25				
b ₀	1				
d	0,365				

E.LU SOLICITACIONES TANGENCIALES					
Muro h. Armado dirección horizontal					
Vd		≤	Vu2 min		355,33
Vu2 min	355,33		Vcu	339,91	
As	45,00		≤	2	0,02
yc	1,5				
ξ	1,51				
ρ _l	0,00588235				
fcv	25				
b ₀	1				
d	0,765				

E.LU SOLICITACIONES TANGENCIALES					
Muro h. Armado dirección vertical					
Vd		≤	Vu2 min		355,33
Vu2 min	355,33		Vcu	220,50	
As	12,28		≤	2	0,02
yc	1,5				
ξ	1,51				
ρ _l	0,00160573				
fcv	25				
b ₀	1				
d	0,765				

Si comparamos estos valores con los resultados obtenidos en el modelo de cálculo del programa SAP2000, se puede ver que en ningún caso los esfuerzos tangenciales superan el valor de Vu2 min y por lo tanto, no será necesario disponer armadura para resistir esfuerzos cortantes.



6.2. COMPROBACIÓN E.L.S DE FISURACIÓN

Puesto que las placas que conforman el modelo estarán sometidas a esfuerzos en diversas direcciones, para realizar la comprobación frente a fisuración del muro del silo, se va a comprobar que la tensión a la que se verán sometidas las placas en ambas direcciones, no supera el la resistencia media a flexotracción.

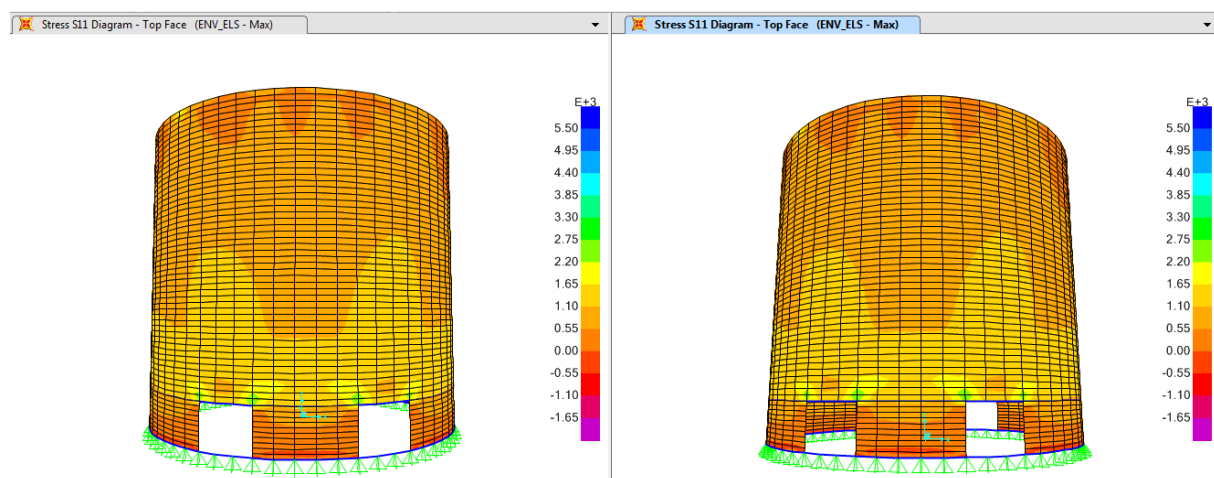
El valor de la resistencia media a flexotracción $f_{ctm,fl}$ se ha obtenido en el 02c_ANEJO DE CÁLCULO, está expresado en Kn/m^2 y se puede observar en la siguiente tabla.

COMPROBACIÓN E.L.S FISURACIÓN					
MURO H.ARMADO					
Comprobación de fisuración					
h	800	fctm	2,56496392	fctm,fl (Kn/m)	
fck	25	fctm*	-0,45197114		
lb	0,04		2,5649639		
			2564,96		

COMPROBACIÓN E.L.S FISURACIÓN					
MURO POSTESADO					
Comprobación de fisuración					
h	400	fctm	2,56496392	fctm,fl (Kn/m)	
fck	25	fctm*	0,57401443		
lb	0,01		2,5649639		
			2564,96		

Este valor de $f_{ctm,fl}$ se ha calculado para ambos tramos de muro y comparándolo con los resultados obtenidos del modelo de SAP2000 que se adjuntan a continuación, para ambas caras del muro y en las dos direcciones principales, se puede concluir que no aparecerán fisuras ya que en ningún caso se superará el límite establecido.

Tensiones en ambas caras en la dirección horizontal, expresados en Kn/m^2



Tensiones en ambas caras en la dirección vertical expresados en Kn/m^2

