

DETERMINACIÓN DE FUERZAS EN ANCLAJES EN SILOS CON GEOMEMBRANAS

Cocco, Leonardo José^a; Fragueiro, Agustín^a; Castelló, Walter^a

^aFCEfYN Universidad Nacional de Córdoba, lcocco@unc.edu.ar, afraqueiro@unc.edu.ar,
walter.castello@unc.edu.ar

Palabras clave: Silos, Geomembranas, Anclajes

RESUMEN

El análisis de las estructuras utilizadas para el acopio de materiales siempre ha presentado desafíos y particularidades que muchas veces no son contempladas totalmente por normativas específicas. Precisamente, una tipología que tiene cierto auge actualmente es la constituida por silos enterrados de hormigón armados recubiertos en su interior por geomembranas. Este trabajo analiza el comportamiento del material acopiado y su interacción con la geomembrana, utilizando simulaciones numéricas y normativa internacional sobre la temática. El análisis realizado permitió la determinación del estado tensional correspondiente y la estimación de las fuerzas desarrolladas en la geomembrana con el objetivo final del diseño del sistema de anclajes necesarios para la misma. Los resultados muestran una gran sensibilidad de la fuerza desarrollada en la geomembrana, a los valores de fricción relativos entre geomembrana-hormigón y geomembrana-grano. Además, los resultados de las simulaciones numéricas muestran muy buena concordancia con los valores obtenidos por las normativas internacionales sobre la temática, lo cual permite, frente a la falta de datos específicos, utilizar la normativa inclusive para este tipo de casos.

ABSTRACT

The analysis of the structures used for the stockpiling of materials has always presented challenges and particularities that are often not fully contemplated by specific regulations. Precisely, a typology that is currently booming is that of buried reinforced concrete silos covered inside by geomembrane. This work analyzes the behavior of the stockpiled material and its interaction with the geomembrane, using numerical simulations and international regulations on the subject. The analysis carried out allowed the determination of the corresponding tension state and the estimation of the forces developed in the geomembrane with the final objective of designing the system of anchors necessary for it. The results show a high sensitivity of the force developed in the geomembrane, to the relative friction values between geomembrane-concrete and geomembrane-grain. In addition, the results of the numerical simulations show very good agreement with the values obtained by the international regulations on the subject, which allows, in the absence of specific data, to use the regulations even for this type of case.

INTRODUCCIÓN

El estudio del comportamiento mecánico de materiales ensilados es de gran importancia en muchas aplicaciones industriales, en especial el almacenado de productos agrícolas, de minería y de construcción entre otros. En el último medio siglo ha aumentado significativamente el tamaño de los silos, las tipologías estructurales adoptadas y el uso de nuevo materiales, con el fin de mejorar distintos procesos de los materiales ensilados.

En general, el diseño de este tipo de estructuras está basado en las especificaciones de normas vigentes (ACI 313-97, Eurocode 1 – Parte 4 – 91) que tienen su base en fórmulas empíricas obtenidas de aproximaciones teóricas al comportamiento del material, siendo las más conocidas las debida a Janssen (1895) y la más reciente debida a Reimbert (1971). Estas normas permiten caracterizar las presiones sobre las paredes y superficie de la tolva, las cuales dependen principalmente de la geometría del silo, en especial de la relación altura diámetro y de la forma de la tolva, ambas relacionadas con el tipo de movimiento que experimenta el material al vaciar el silo.

Desde hace unos años, se ha empezado a utilizar geomembranas en silo enterrados, con el objetivo de bajar la fricción entre el material acopiado y las paredes del silo (en general de hormigón armado) para favorecer su vaciado. La utilización de esta tipología estructural, que combina soluciones clásicas con nuevos materiales, ha cobrado auge y no se encuentra específicamente abordada por ninguna normativa internacional.

Este trabajo analiza un caso particular de este tipo de estructuras, en el cual se colocó una geomembrana sobre las paredes de un silo enterrado de hormigón armado, con el objetivo de reducir la fricción entre el grano almacenado (en este caso soja) y las paredes del silo. La geomembrana estaba sujeta a las paredes del silo por medio de un sistema de anclajes en la zona superior del mismo. Durante el proceso de vaciado la geomembrana sufrió una rotura generalizada, lo cual suscitó el interés de conocer las posibles causas de dicha rotura. El análisis fue realizado por medio de simulaciones numéricas y análisis analíticos, tendientes a brindar comprensión en lo sucedido y generar herramientas que permitan realizar un diseño apropiado de esta tipología estructural. Las simulaciones numéricas fueron realizadas con el objetivo de comprender los fenómenos físicos más importantes que serían los causantes del daño observado en la geomembrana. Cabe mencionar, que la idea principal de dichas simulaciones es facilitar una interpretación ingenieril de lo sucedido y de las posibles causas que provocaron los daños en la geomembrana. Es decir, proporcionar herramientas para la comprensión de lo sucedido considerando todas las incertidumbres involucradas en un fenómeno físico muy complejo.

En función de estos aspectos mencionados, y dada la complejidad del problema en análisis, se desarrollaron modelaciones numéricas tendientes a proveer patrones de comportamiento y posibles causas de los daños encontrados en la geomembrana. Los resultados encontrados y sus correspondientes conclusiones se presentan en los siguientes párrafos.

COMPORTAMIENTO DE SILOS

En este apartado se describen brevemente las principales características del comportamiento del tipo de estructura en análisis. Principalmente, se pretende aclarar aspectos de su comportamiento no tan comunes a otro tipo de estructuras y que deben ser considerados cuando se analizan estructuras de silos bajo cargas de material acopiado, ya que su incidencia es de relevancia.

Formas de flujo que se producen en silos

Los modos de flujo en depósitos geométricamente simétricos son tres: flujo másico, flujo en chimenea o canalizado y flujo expandido o mixto. Los dos principales tipos de flujo son el flujo másico y el flujo canalizado. Cabe destacar que estos tipos de flujos también son aplicables para silos no cilíndricos (silos planos), como está plasmado en las normativas correspondientes (ACI 313-97; Eurocode 1–Parte 4–91).

Si durante la descarga se produce un flujo de tipo másico, esto significa que en todo punto dentro del depósito el material se encuentra en movimiento. Es decir, que hay desplazamiento del material almacenado a lo largo de las paredes verticales del depósito y de las paredes del embudo que forma la tolva. Este tipo de flujo garantiza una descarga completa a velocidades predecibles y tiene un patrón de flujo del tipo “primero entrado – primero salido”. Si la superficie de la tolva no tiene la inclinación suficiente o son rugosas, ocurre un flujo de tipo canalizado durante la descarga por gravedad. Esto significa que el material almacenado se estanca en la zona cercana a las paredes y cae desde la superficie superior del material dentro del canal de flujo vertical que se forma sobre la abertura de salida. El tipo de flujo es “último entrado – primero salido”, que resulta inconveniente si el material se degrada con el tiempo.

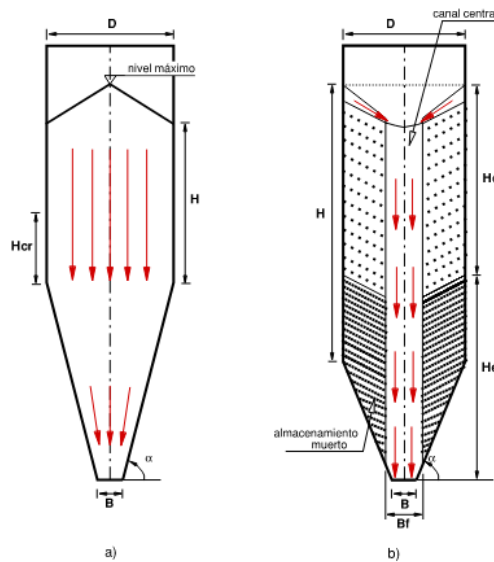


Figura 1. Tipos de flujo: a) flujo másico; b) flujo canalizado

El límite entre el flujo másico y el canalizado, para depósitos simétricos y tolvas cónicas o en cuña, depende del ángulo de inclinación de la superficie de la tolva α , del ángulo de fricción interna del material ϕ y del ángulo de fricción entre el material granular y la membrana ϕ_w . En el caso analizado en este trabajo, se tiene $\alpha=37^\circ$ y asumiendo en principio $\phi_w=17^\circ$ el flujo característico se encuentra en una zona indefinida que puede activar cualquiera de los tipos de flujos donde los 17° se obtienen de suponer en primera instancia 0,31 como valor rozamiento soja – membrana ($17^\circ = \arctg$ de 0,31) y este sería un ángulo de rozamiento estático. El ángulo de rozamiento dinámico o cinemático durante el vaciado es mucho menor aún y, por lo tanto, se estaría prácticamente en situación de flujo de masa el cual produce efectivamente el arrastre de la membrana.

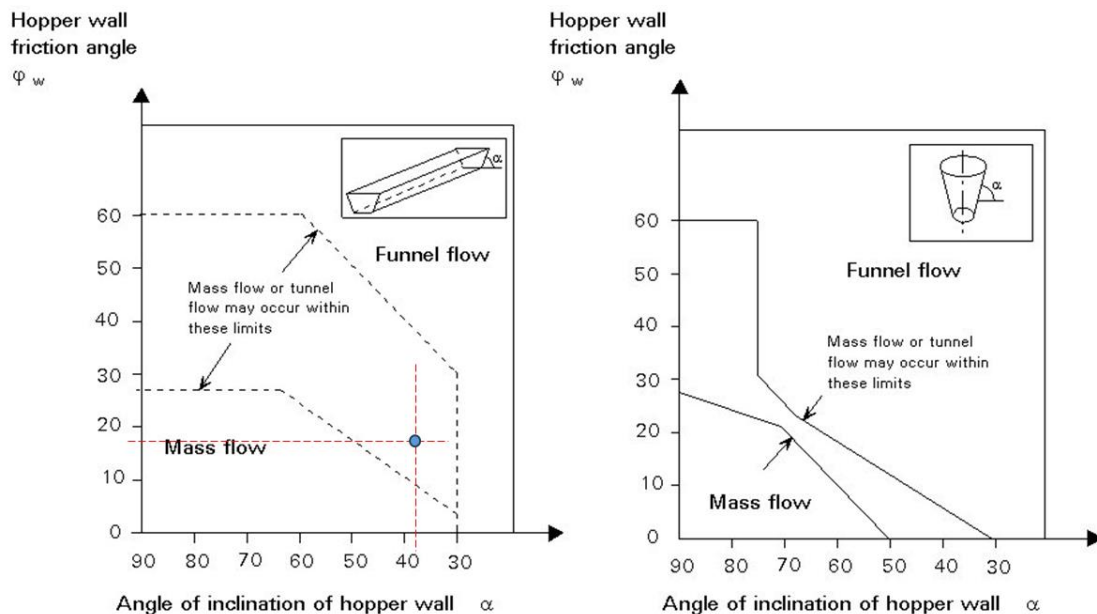


Figura 2. Tipos de flujo

Presiones y su relación con el tipo de flujo y forma de tolva

En el diseño de los depósitos la predicción de las presiones sobre las paredes y superficie de la tolva sigue siendo un problema bastante complejo. Las aproximaciones al análisis de las cargas varían en un rango muy amplio, pero es conocido que están directamente relacionadas con el patrón de flujo que se desarrolla en el depósito. En general, el flujo másico es más fácil de predecir y reproducir que el patrón con flujo canalizado o en chimenea. Los tipos de carga varían de estáticas, durante el llenado y almacenamiento del material, a dinámicas durante la descarga.

La fricción con las paredes y superficie de la tolva es el factor que más afecta el funcionamiento de estas últimas, alimentadores y sumideros. Se recomienda calcular la apertura mínima de salida de la tolva en base a la fricción entre el material almacenado y superficie de la tolva a fin de lograr el flujo y presiones deseadas. La fricción depende de propiedades del sólido almacenado y de las características de la superficie de la estructura y por factores ambientales tales como la temperatura y la humedad. La fricción entre el material y la pared está relacionada con las propiedades de adhesión, cohesión y desgaste. La interacción entre la rugosidad de la superficie y el tamaño de las partículas es un conjunto de parámetros que afecta la magnitud de la fricción que se genera. Se ha observado que el ángulo de fricción entre el material y las superficies de la tolva disminuye cuando aumenta la presión que el material ejerce sobre la misma. En los silos reales la rigidez de la tolva suele ser elevada por lo que el efecto de la compresibilidad del sólido no provocaría mayores cambios en la distribución de presiones.

Durante la etapa de llenado la magnitud y distribución de las presiones presentan baja sensibilidad a las propiedades elásticas del sólido almacenado, esto indicaría que las condiciones de equilibrio son las que prevalecen en esta etapa y no las condiciones cinemáticas.

El flujo canalizado genera un volumen de granos “estancados” en la tolva y por lo tanto no se generan tensiones tangenciales superficiales de arrastre de la membrana.

En definitiva y de acuerdo con la Figura 1, el flujo másico es el que mayores tensiones tangenciales produce entre el grano y la superficie de la tolva, por lo tanto, es el tipo de flujo que tendería especialmente a arrastrar la membrana a lo largo de la superficie de hormigón. Es por ello, que este trabajo analiza únicamente los efectos que este tipo de flujo produce en la estructura estudiada.

MODELO NUMÉRICO

Se desarrollaron simulaciones numéricas tendientes a capturar el comportamiento de la estructura analizada, en forma global y local, prestando particular atención a geomembrana y sus anclajes. Se utilizó la norma Eurocode 1 – Parte 4 – 91 para comparar los resultados obtenidos, mediante las simulaciones numéricas, en relación con los perfiles de presiones determinados sobre las paredes del silo. En la *Figura 3* se puede observar la geometría del silo en estudio en el presente trabajo.

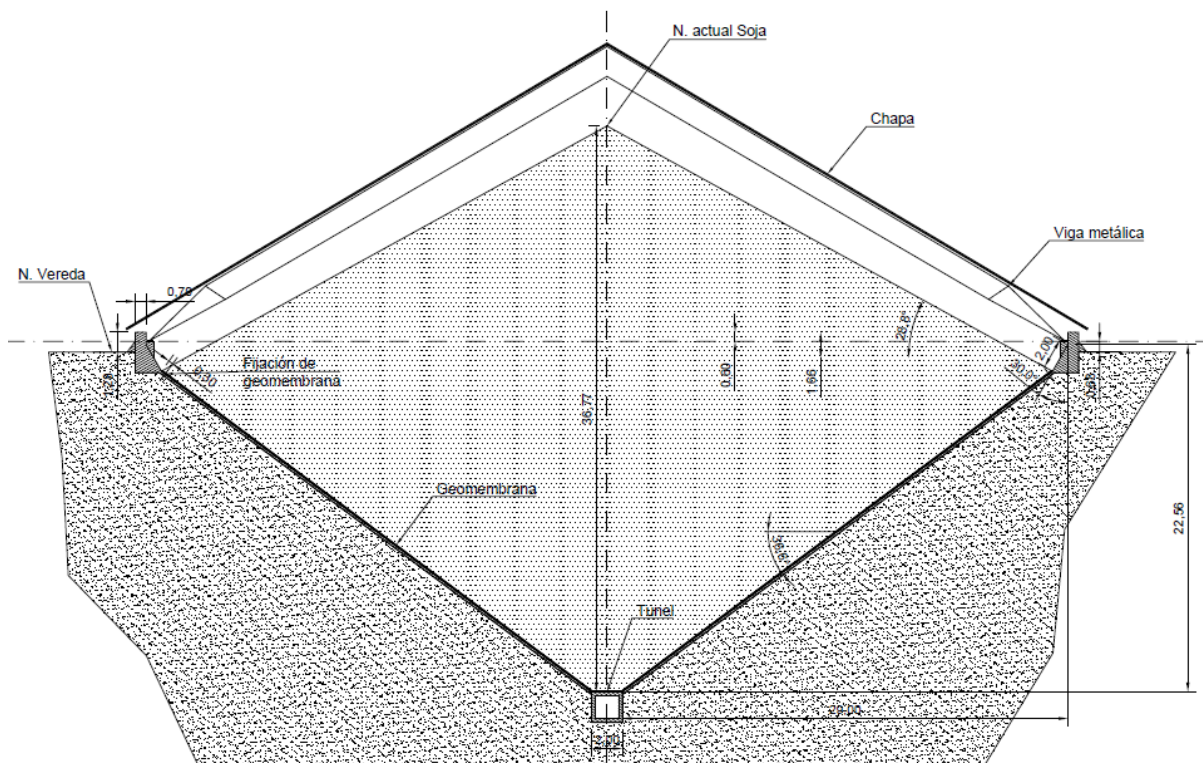


Figura 3. Geometría del silo en estudio. Llenado de soja hasta nivel de anclajes de membrana.

Las propiedades mecánicas del material acopiado (granos de soja), se describen en la *Tabla 1* que es un extracto de la norma Eurocode 1. La superficie de la tolva está materializada por hormigón armado y el techo metálico no fue incluido en el modelo numérico ya que para los estados de cargas analizados no influye en el comportamiento estructural del silo.

El modelo numérico fue realizado utilizando elementos de deformación plana, lo cual constituye el tipo de comportamiento esperable dado el desarrollo longitudinal del silo analizado. El material granular (granos de soja) fue modelado utilizando un modelo constitutivo denominado como “hardening soil”, el cual presenta comportamiento no lineal y tiene aptitudes validadas por la bibliografía especializada en el tema, para la modelación de materiales granulares. Además, permite captar en forma apropiada el estado tensional de la estructura luego del llenado de la misma. El material que constituye la superficie de la tolva fue representado por medio de un material elástico lineal con características típicas correspondiente a un hormigón armado promedio (H-21). El modelo numérico desarrollado permitió la simulación de los dos estados de carga determinantes para el silo, el primero correspondiente al llenado y el segundo, correspondiente al vaciado. El primero fue realizado por medio de un análisis estático y el segundo por medio de un análisis dinámico.

Es importante destacar que el modelo se ha realizado asumiendo que el llenado de soja se realizó hasta alcanzar el nivel de los anclajes de la membrana.

Por su parte, la fricción entre el material acopiado y la superficie de la tolva fue modelada por medio de fricción de Coulomb entre las superficies en contacto entre

dichos componentes del modelo numérico. Se realizaron dos simulaciones variando el coeficiente de fricción entre dichas superficies, para evaluar su impacto en los resultados. Los valores del coeficiente de fricción utilizados fueron 0.33 y 0.4 para cada caso respectivamente.

En forma complementaria a los modelos numéricos realizados, se utilizó la norma del Eurocode 1 – Parte 4 – 91 con el objetivo de validar los resultados obtenidos en los modelos numéricos desarrollados y, además, para el análisis de las fuerzas desarrolladas en la geomembrana por medio de un modelo analítico.

Type of particulate solid ^{d, e}	Unit weight ^b		Angle of repose	Angle of internal friction		Lateral pressure ratio		Wall friction coefficient ^c				Patch load solid reference factor
	γ		ϕ_r	ϕ_i		K		μ ($\mu = \tan \phi_w$)				C_{op}
	γ_ℓ	γ_u						Wall type D1	Wall type D2	Wall type D3	a_μ	
	Lower	Upper		Mean	Factor	Mean	Factor	Mean	Mean	Mean	Factor	
	kN/m ³	kN/m ³	degrees	degrees								
Default material ^a	6,0	22,0	40	35	1,3	0,50	1,5	0,32	0,39	0,50	1,40	1,0
Aggregate	17,0	18,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,39	0,49	0,59	1,12	0,4
Alumina	10,0	12,0	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,46	0,51	1,07	0,5
Animal feed mix	5,0	6,0	39	36	1,08	0,45	1,10	0,22	0,30	0,43	1,28	1,0
Animal feed pellets	6,5	8,0	37	35	1,06	0,47	1,07	0,23	0,28	0,37	1,20	0,7
Barley	7,0	8,0	31	28	1,14	0,59	1,11	0,24	0,33	0,48	1,16	0,5
Cement	13,0	16,0	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,46	0,51	1,07	0,5
Cement clinker	15,0	18,0	47	40	1,20	0,38	1,31	0,46	0,56	0,62	1,07	0,7
Coal	7,0	10,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,44	0,49	0,59	1,12	0,6
Coal, powdered	6,0	8,0	34	27	1,26	0,58	1,20	0,41	0,51	0,56	1,07	0,5
Coke	6,5	8,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,49	0,54	0,59	1,12	0,6
Flyash	8,0	15,0	41	35	1,16	0,46	1,20	0,51	0,62	0,72	1,07	0,5
Flour	6,5	7,0	45	42	1,06	0,36	1,11	0,24	0,33	0,48	1,16	0,6
Iron ore pellets	19,0	22,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,49	0,54	0,59	1,12	0,5
Lime, hydrated	6,0	8,0	34	27	1,26	0,58	1,20	0,36	0,41	0,51	1,07	0,6
Limestone powder	11,0	13,0	36	30	1,22	0,54	1,20	0,41	0,51	0,56	1,07	0,5
Maize	7,0	8,0	35	31	1,14	0,53	1,14	0,22	0,36	0,53	1,24	0,9
Phosphate	16,0	22,0	34	29	1,18	0,56	1,15	0,39	0,49	0,54	1,12	0,5
Potatoes	6,0	8,0	34	30	1,12	0,54	1,11	0,33	0,38	0,48	1,16	0,5
Sand	14,0	16,0	39	36	1,09	0,45	1,11	0,38	0,48	0,57	1,16	0,4
Slag clinkers	10,5	12,0	29	26	1,00	0,45	1,11	0,48	0,57	0,67	1,16	0,6
Soya beans	7,0	8,0	29	25	1,16	0,63	1,11	0,24	0,38	0,48	1,16	0,5
Sugar	8,0	9,5	38	32	1,19	0,50	1,20	0,46	0,51	0,56	1,07	0,4
Sugarbeet pellets	6,5	7,0	36	31	1,16	0,52	1,15	0,35	0,44	0,54	1,12	0,5
Wheat	7,5	9,0	34	30	1,12	0,54	1,11	0,24	0,38	0,57	1,16	0,5

NOTE Where this table does not contain the material to be stored, testing should be undertaken.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del material acopiado

MODELO ANALÍTICO

En este apartado se desarrolla el método aplicado para la evaluación de las cargas sobre la tolva del silo, considerando para ello los lineamientos propuestos por la norma EN 1991-1-4 Actions on Structures – Part 4: Silos and Tanks.

Cálculo de las presiones normales y tangenciales de la tolva

Organiza:

La Figura 4 muestra algunos detalles respecto de la notación empleada en la norma EN 1991-1-4 para definir las características geométricas del silo. Así mismo pueden observarse la nomenclatura empleada por la norma para las cargas actuantes en las distintas partes de silo. En particular a lo que se refiere este documento resulta importante evaluar las cargas sobre la tolva del silo.

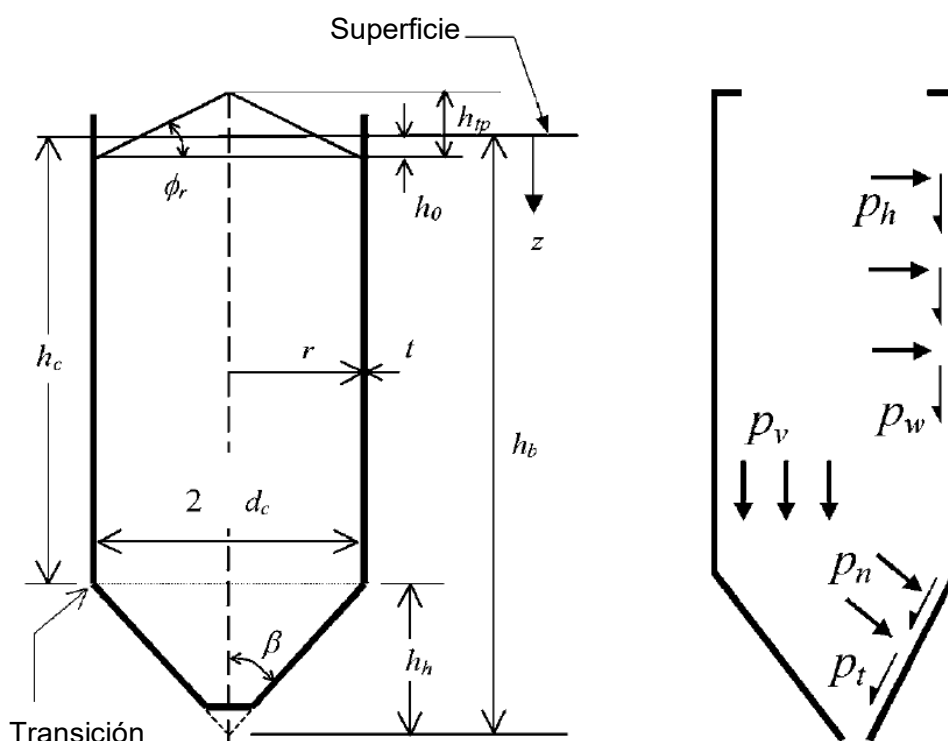


Figura 4. Definición geométrica y de cargas de acuerdo a la norm EN1991-1-4

La Tabla 2 muestra algunas magnitudes características consideradas en el análisis, algunos datos han sido medidos y otros son extraídos de la Tabla E.1 del Anexo E de la referencia EN 1991-1-4.

Parámetros de los granos de soja			
ϕ_{im}	25,00	°	Angulo de fricción interno
ϕ_w	17,22	°	Angulo de fricción de pared
ϕ_r	29,00	°	Angulo de reposo
μ	0,31	-	Coefficiente de fricción de pared
K	0,63	-	Valor característico de la relación de presión lateral
γ	7455,60	N/m ³	Peso específico de la soja

Tabla 2. Magnitudes características del material granulado

Parámetros geométricos del silo			
β	52,96	°	Semi-ángulo de la tolva
A	57,52	m ²	Área de la sección plana del silo a nivel de transición
U	117,04	m	Perímetro de la sección plana del silo a nivel de trans.
d_c	57,2	m	Dimensión característica de la sección plana del silo
h_h	21,70	m	Altura de tolva entre vértice y transición

Tabla 3. Magnitudes características del silo

A partir de los parámetros definidos en la Tabla 2 y la *Tabla 3* se pueden evaluar los siguientes parámetros característicos

$$h_0 = \frac{d_c}{4} \tan \phi_r = \frac{57,2 \text{ m}}{4} \tan 29^\circ = 7,69 \text{ m}$$

Altura por debajo de la superficie equivalente a la base de pila superior (ver Figura 4)

$$z_0 = \frac{1}{K\mu} \frac{A}{U} = \frac{1}{0,63 \cdot 0,31} \frac{57,52 \text{ m}^2}{117,04 \text{ m}} = 2,52 \text{ m}$$

Altura característica de Janssen

Siguiendo lo propuesto en la Sección 6 de la EN 1991-1-4 la presión media vertical sobre la tolva a una determinada distancia x medida verticalmente desde el vértice de tolva, se puede evaluar con

$$p_v(x) = \frac{\gamma h_h}{n-1} \left[\frac{x}{h_h} - \left(\frac{x}{h_h} \right)^n \right] + p_{vft} \left(\frac{x}{h_h} \right)^n \quad (1)$$

en la cual el exponente “ n ” resulta

$$n = S(F_e \mu_{h_{eff}} \cot \beta + F_e) - 2 \quad (2)$$

donde

$$S = 1,5$$

Coeficiente de geometría de la tolva

$$\gamma = 7455,60 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

Valor característico del peso específico del contenido

$$h_h = 21,70 \text{ m}$$

Altura de tolva entre vértice de la tolva y el nivel de transición

$$x$$

Coordenada vertical que define la posición donde se evalúa la presión

$$\mu_{h\,eff} = \min\left(\mu; \frac{1-K}{2 \tan \beta}\right) = \min(0,31; 0,25)$$

media sobre la pared de la tolva
medida desde el vértice de tolva
Coeficiente de fricción de pared
efectivo o movilizado

$$\mu_{h\,eff} = 0,25$$

$$F_e = \frac{1 + \sin \phi_{im} \cos \varepsilon}{1 - \sin \phi_{im} \cos(2\beta + \varepsilon)}$$

Valor característico de la relación
de presión en la tolva para el caso
de solicitaciones durante la
descarga.

$$= \frac{1 + \sin 25^\circ \cos 18^\circ}{1 - \sin 25^\circ \cos(2 \cdot 52,96^\circ + 18^\circ)} = 1,13$$

$$\varepsilon = \phi_w + \sin^{-1}\left(\frac{\sin \phi_w}{\sin \phi_i}\right)$$

$$= 17,22^\circ + \sin^{-1}\left(\frac{\sin 17,22^\circ}{\sin 25^\circ}\right) = 18^\circ$$

$$p_{vft} = \gamma h_0 = 7455,60 \frac{N}{m^3} 7,69 m$$

Presión media vertical a nivel de
transición después del llenado

$$= 57,4 \text{ kPa}$$

De modo que el exponente “n” resulta finalmente:

$$n = 1,5(1,13 \cdot 0,25 \cot 52,96^\circ + 1,13) - 2 = 0,0997$$

Y la expresión que define la presión media sobre la superficie de la tolva

$$p_v(x) = \frac{7455,60 \frac{N}{m^3} 21,7 m}{(0,0997-1,0)} \left[\frac{x}{21,7 m} - \left(\frac{x}{21,7 m}\right)^{0,0997} \right] + 57,4 \text{ kPa} \left(\frac{x}{21,7 m}\right)^{0,0997} \quad (3)$$

Luego las cargas de presión normal y tangencial sobre la superficie de la tolva se pueden establecer según

$$p_{ne}(x) = F_e p_v(x) = 1,13 p_v(x) \quad \text{Presión normal en la tolva} \quad (4)$$

$$p_{te}(x) = \mu_{h\,eff} F_e p_v(x) = 0,25 \cdot 1,13 p_v(x) \quad \text{Presión tangencial en la tolva} \quad (5)$$

RESULTADOS OBTENIDOS

En esta sección se presentan los principales resultados obtenidos por las simulaciones numéricas llevadas a cabo, su validación a través del modelo analítico y se describirá conceptualmente el comportamiento de la estructura y el proceso que habría llevado a la rotura del sistema de anclajes que sujetaba la geomembrana.

En primer lugar, se realizó el modelo numérico con un valor de fricción de 0.33 entre el material acopiado y la superficie de la tolva. En la Figura 5 se muestra la geometría del modelo numérico y su discretización.

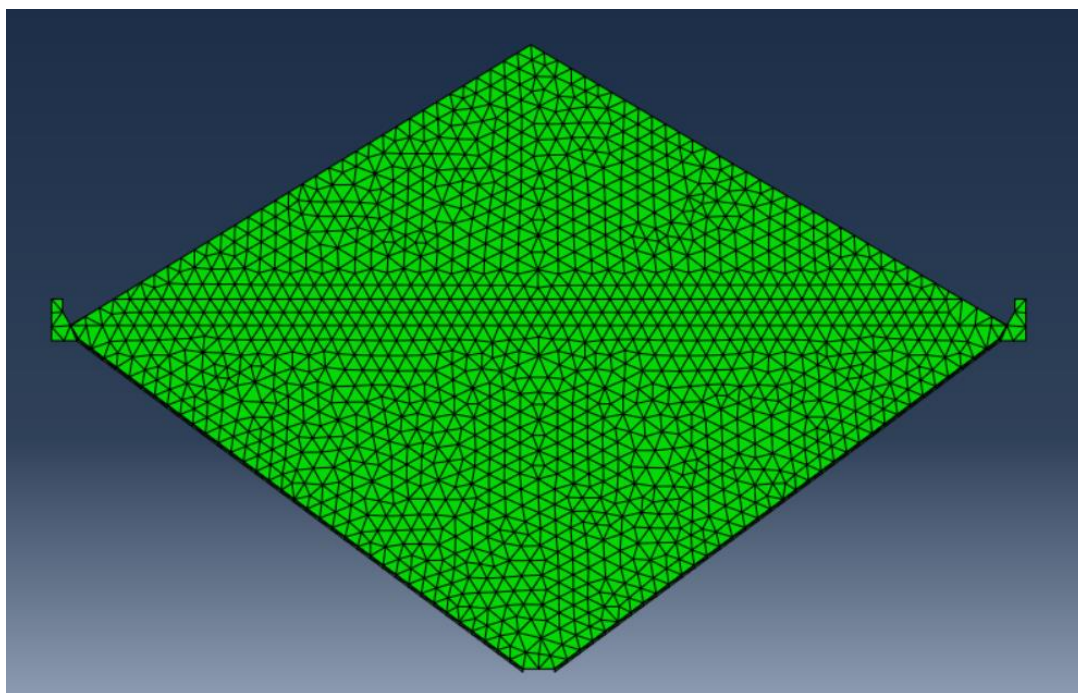


Figura 5. Geometría y discretización de modelo numérico

En la Figura 6, Figura 7 y Figura 8 se pueden apreciar las tensiones σ_{22} (siendo el eje 2 el eje vertical), σ_{11} (siendo el eje 1 el eje horizontal) y σ_{12} , respectivamente, para el estado de carga correspondiente a la finalización del llenado del silo. Las unidades de dichas tensiones es kPa (Kilopascales).

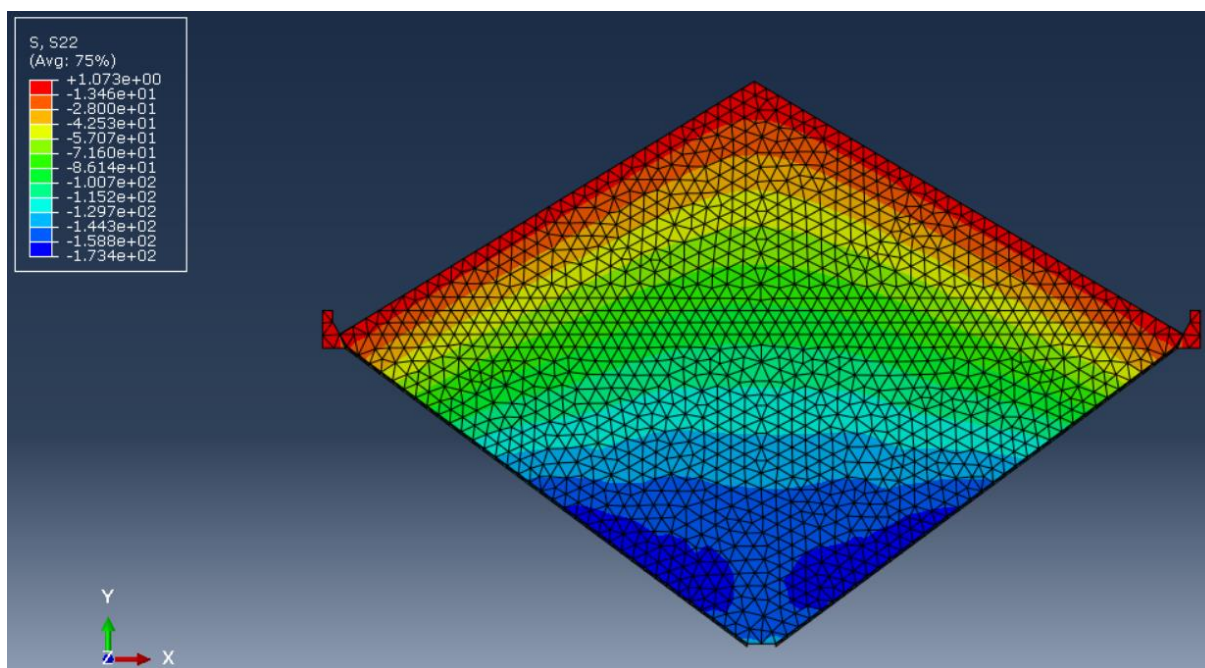


Figura 6. Tensiones σ_{22} llenado

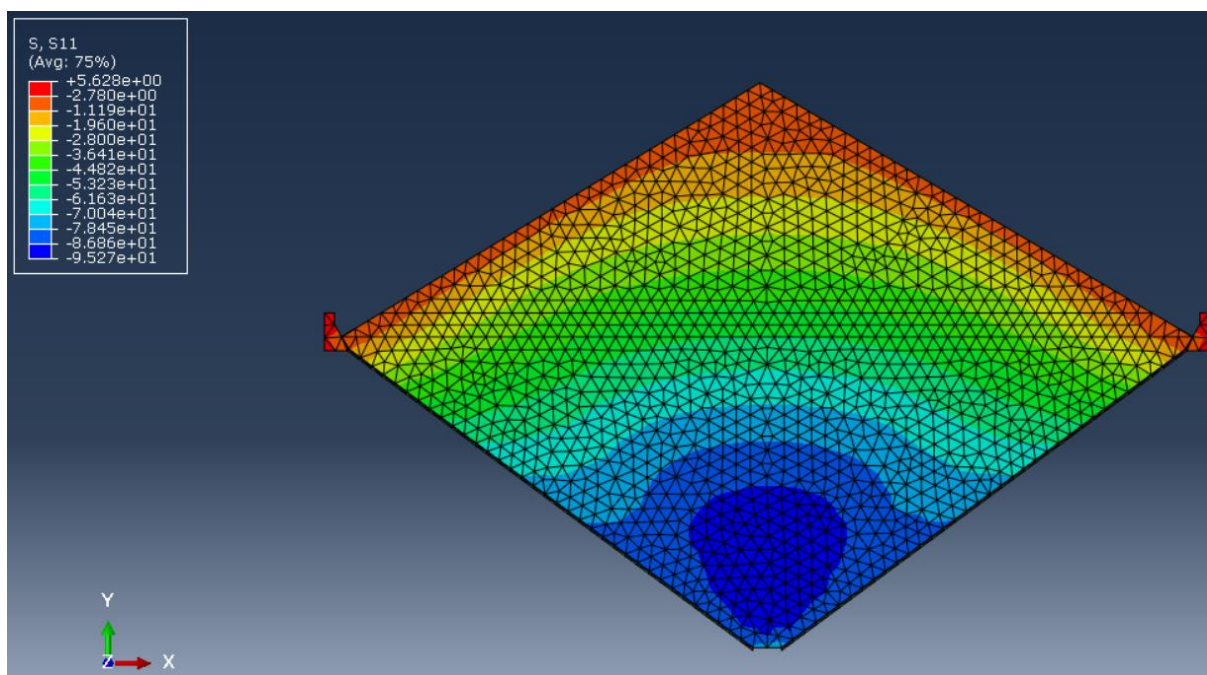


Figura 7. Tensiones σ_{11} llenado

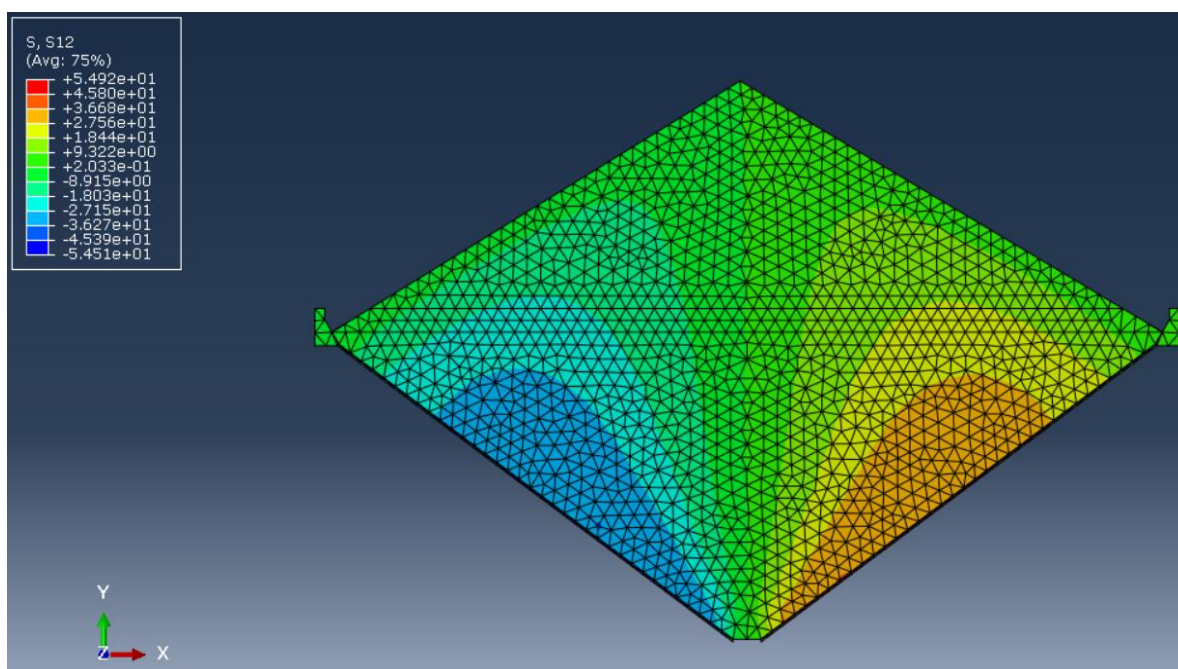


Figura 8. Tensiones σ_{12} llenado

El estado tensional al final del llenado del silo se adopta como estado inicial para el escenario de carga correspondiente al vaciado del silo. El vaciado del silo fue modelado por medio de un análisis dinámico, en el cual se representan los primeros instantes del vaciado y las tensiones que se desarrollan en las paredes de la estructura en estudio. El tiempo representado fue tal que las tensiones desarrolladas estuvieran estabilizadas y puedan ser consideradas como las que soportaría la estructura en todo el proceso de vaciado. En la Figura 9, Figura 10 y Figura 11 se puede apreciar las tensiones σ_{22} , σ_{11} y σ_{12} correspondientes al vaciado del silo.

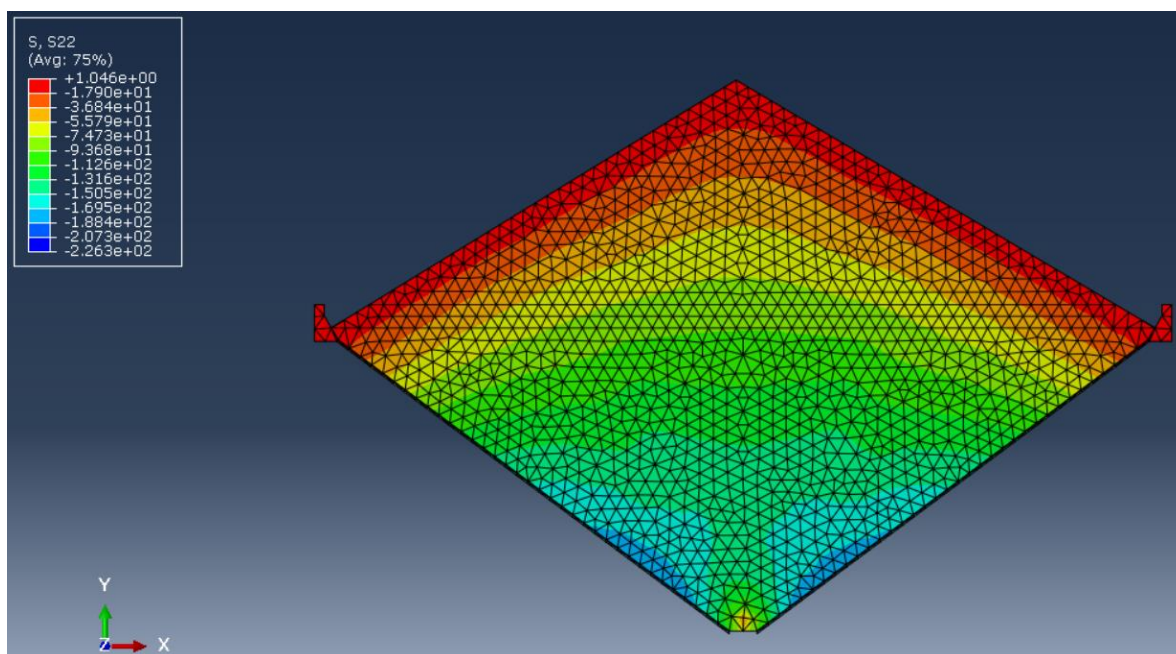


Figura 9. Tensiones σ_{22} vaciado

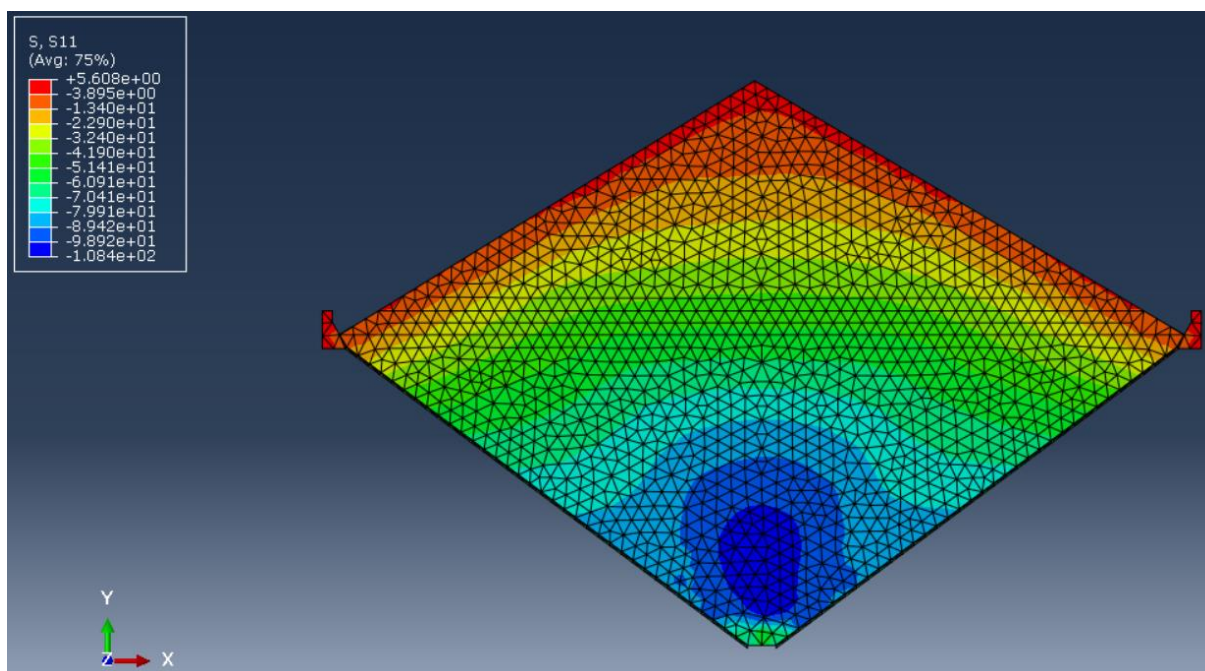


Figura 10. Tensiones σ_{11} vaciado

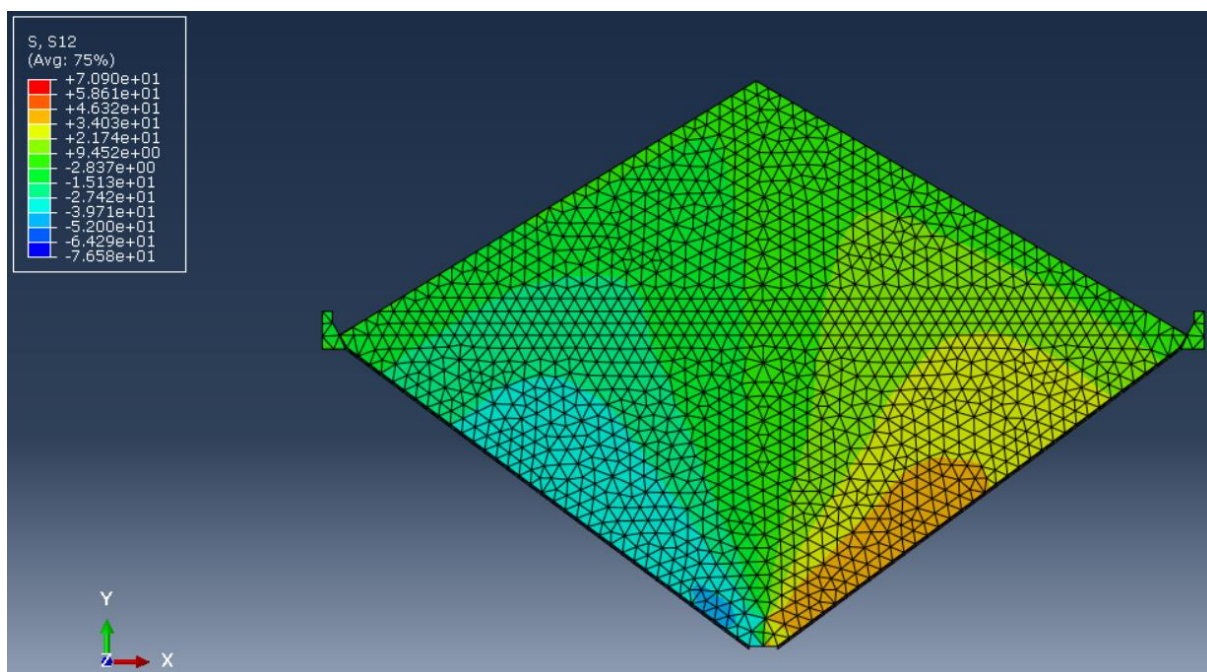


Figura 11. Tensiones σ_{12} vaciado

Una vez obtenidos los resultados para el modelo numérico que utilizaba una fricción de 0.33 entre el material acopiado y la superficie de la tolva, se desarrolló otro modelo numérico en el cual el valor de la fricción mencionada se llevaba a 0.40 con la intención de analizar los efectos sobre los resultados de este parámetro. En la Figura 12, Figura 13 y Figura 14 se pueden apreciar las tensiones σ_{22} , σ_{11} y σ_{12} para el escenario de carga de vaciado.

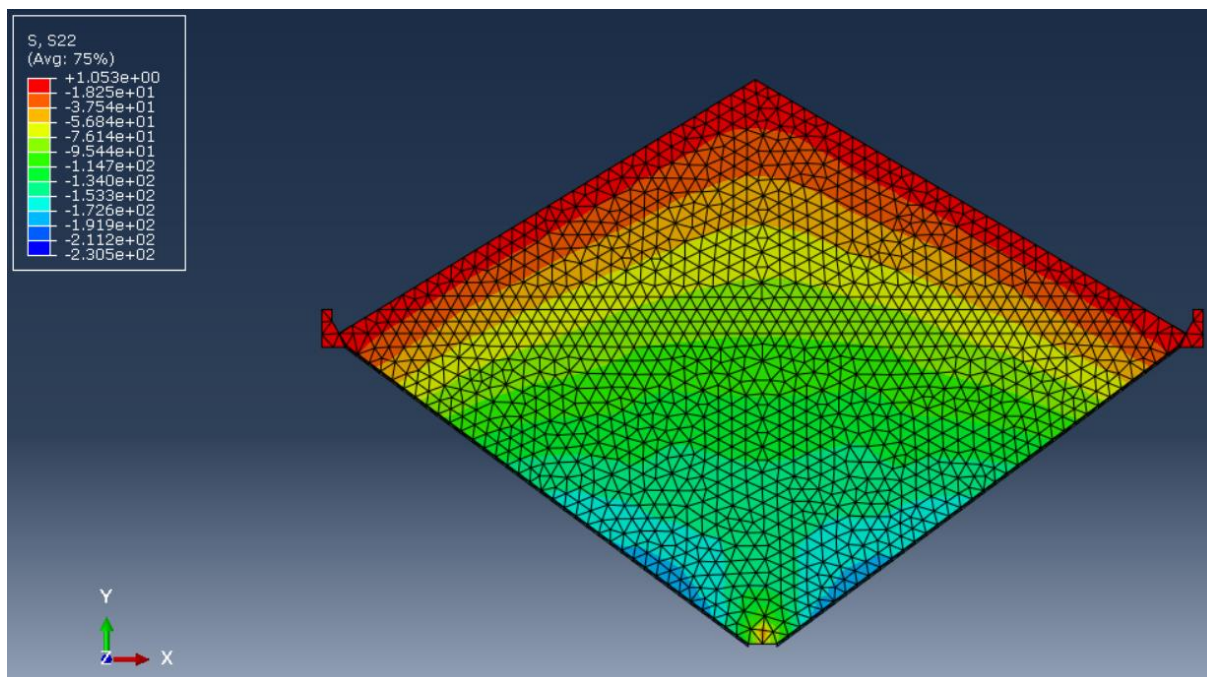


Figura 12. Tensiones σ_{22} vaciado (fricción 0.40)

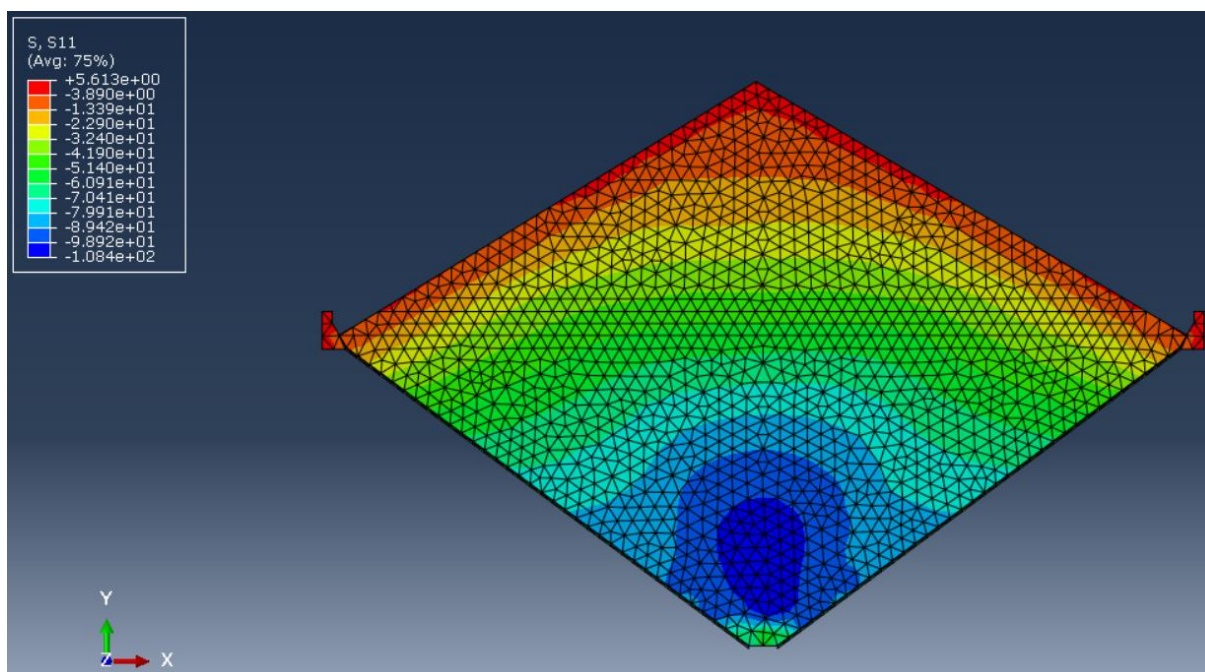


Figura 13. Tensiones σ_{11} vaciado (fricción 0.40)

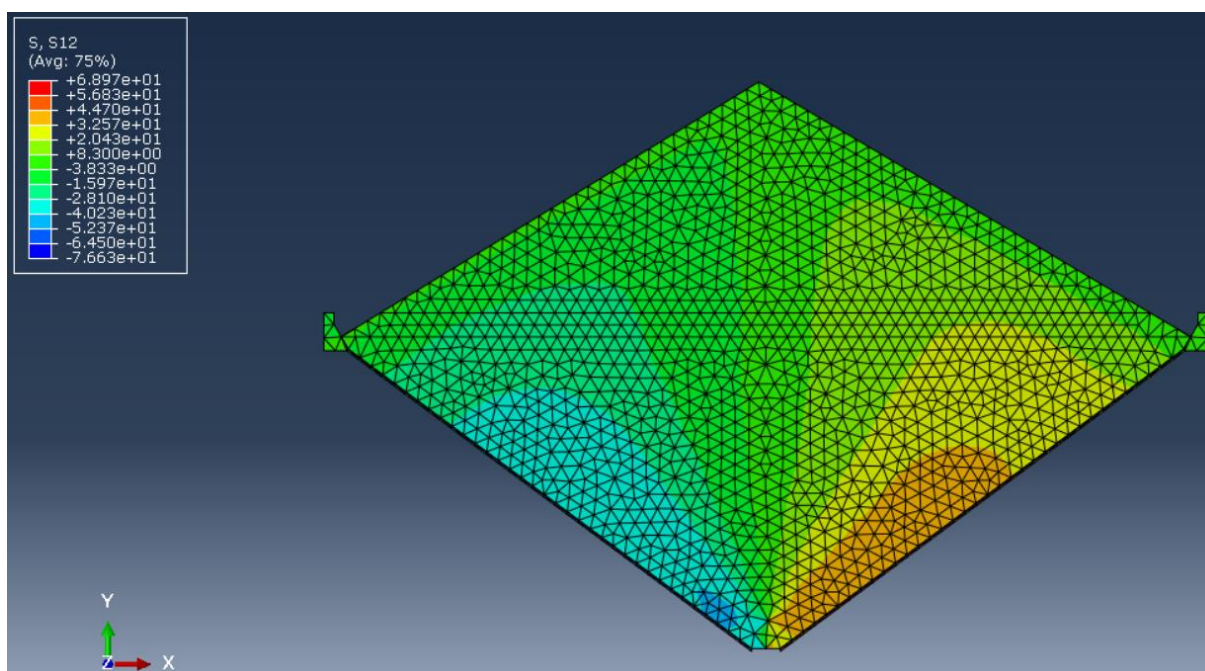


Figura 14. Tensiones σ_{12} vaciado (fricción 0.40)

De estos modelos numérico (con fricción de 0.33 y 0.40), se extrajeron los perfiles de tensiones normales y tangenciales en la superficie de la tolva para poder estimar una fuerza desarrollada en la geomembrana. En este sentido, en la Figura 15 se puede apreciar los valores de las tensiones normales y tangenciales en función del desarrollo de la pared del silo, tanto para ambos modelos numéricos como para los valores obtenidos aplicando la norma Eurocode1 – Parte 4 – 91, específicamente el capítulo 6 de dicha normativa.

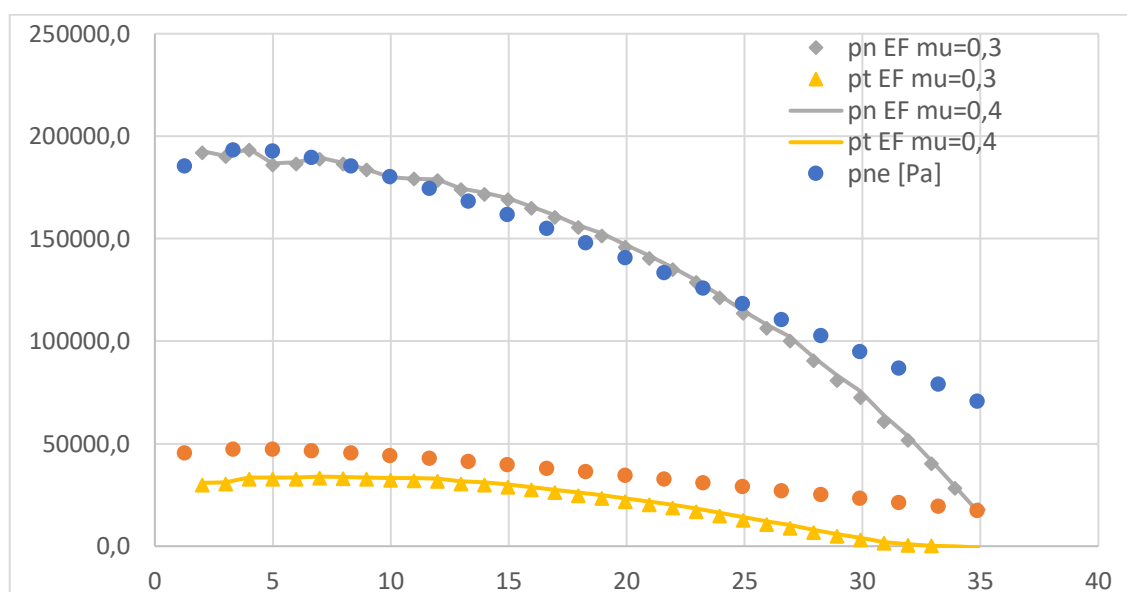


Figura 15. Perfil de tensiones normales y tangenciales a la pared del silo

Los valores de las tensiones están expresados en Pa (Pascales) y las distancias de desarrollo de la superficie de la tolva en m (metros). De esta comparativa, se observa que el cambio en el valor de la fricción en los modelos numéricos no influye significativamente en los valores de las tensiones normales y tangenciales, al menos en el rango de valores utilizados. Por otro lado, se puede observar una aceptable correlación con los valores obtenidos con la aplicación de la normativa Eurocode1 – Parte 4 -91, lo cual valida los resultados de los modelos numéricos y, además, permite su utilización en la estimación de la fuerza desarrollada en la geomembrana.

Precisamente, el siguiente análisis, es la estimación de la fuerza que se podría desarrollar en la geomembrana por medio de un modelo analítico. A partir de aquí son muy importantes los valores a usar para representar el rozamiento entre grano y membrana y entre membrana y hormigón. Se ha recurrido a una búsqueda de antecedentes y bibliografía al respecto para a su adopción en este trabajo.

En función de la estructura analizada y la presencia de la geomembrana, se pueden identificar dos comportamientos en función de los valores de fricción que se desarrollan entre los distintos materiales, el primero, si la fricción entre el grano y la membrana es menor o igual que la fricción entre la membrana y la superficie de la tolva, en este caso se produce el deslizamiento del grano sobre la membrana y esta última no desarrolla fuerza alguna en su plano. El segundo comportamiento, en el cual el valor de la fricción entre grano y membrana es superior al valor de fricción entre membrana y la superficie de la tolva, en este caso la membrana intenta deslizarse con respecto a la superficie de la tolva, arrastrada por el grano. En este caso sí se desarrolla fuerza en la membrana y esta debe ser retenida por los anclajes colocado en la parte superior de la tolva.

La bibliografía analizada al respecto indica que el rango de variación de ambos valores es muy amplio y depende de diferentes factores. De todos modos, se puede asumir de entre los valores recabados que es perfectamente factible que el rozamiento grano membrana sea superior al rozamiento membrana hormigón. Por ejemplo, sería factible que en una celda silo como la que se analiza en este trabajo, los valores de coeficiente

de rozamiento sean los siguientes:

- Coeficiente de rozamiento estático grano-membrana: 0.35
- Coeficiente de rozamiento estático hormigón-membrana: 0.30

Otro aspecto muy importante para considerar es el aumento de la fricción en materiales granulares como los analizados en este caso (granos de soja), debido a la presencia de humedad, temperatura y altas presiones.

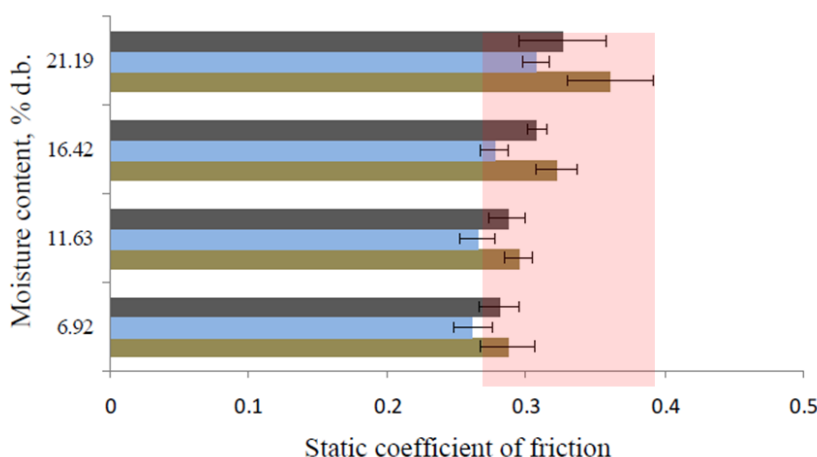


Figura 16. Efactor del contenido de humedad en el coeficiente de fricción estático para granos de soja contra diferentes tipos de superficie

Para la determinación de la fuerza que se desarrollaría en la geomembrana, en caso de que el coeficiente de fricción entre grano y membrana sea superior al de membrana hormigón, se utilizó un modelo analítico en el cual se integra la resultante de la fuerza tangencial a lo largo del desarrollo de la geomembrana. En este modelo no se considera el peso propio de la membrana ya que es despreciable. Si se produjera una diferencia de coeficientes de fricción del orden de 0.5% (menor al 1%) o sea:

$$(\mu \text{ G-M} - \mu \text{ H-M}) / \mu \text{ G-M} = 0.005$$

$\mu \text{ G-M}$: coeficiente de rozamiento Grano-Membrana

$\mu \text{ H-M}$: coeficiente de rozamiento Hormigón-Membrana

la fuerza desarrollada por una faja de membrana de un metro es del orden de 5500 N (Newtons), es decir, 560.84 kg (kilogramos fuerza por metro lineal en profundidad de la celda). Esto muestra una gran sensibilidad para un diferencial de fricción entre el grano y la geomembrana, lo cual se traduce en fuerzas membranales desarrollada en la misma. La membrana trasladaría esta fuerza directamente a los anclajes que le brindan sujeción a la misma. Por lo tanto, si se colocan anclajes cada 10 cm cada uno debería tener una capacidad admisible superior a 51 kg a corte. Este es un análisis de factibilidad mínimo, pero no significa definir una fuerza de diseño requerida para los anclajes, de todos modos, si se compara con la capacidad de los clavos que fueron utilizados en la fijación de la membrana queda claro que tales clavos tenían una resistencia insuficiente. Según la información del propio fabricante, la capacidad máxima con 18 mm de penetración sería de 20 kg.

Si bien esta fuerza no provocaría la rotura de la membrana le provocaría una deformación específica localizada y longitudinal de $\varepsilon=0.31\%$ (importante pero menor que la deformación específica última capaz de desarrollar dicha membrana $\varepsilon_u=12\%$). Consecuentemente, la membrana trasladaría esta fuerza a los anclajes.

Este análisis final cuantitativo es el que se verificaría en caso de producirse flujo másico que como se ha demostrado por medio de la Figura 2 es muy factible de ocurrir con esta geometría de silo y características del grano almacenado.

CONCLUSIONES

En función de los resultados obtenidos de los modelos numéricos, el modelo analítico para la estimación de la fuerza desarrollada por la membrana y el análisis realizado del comportamiento global y local de la estructura, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los ensayos experimentales muestran que los valores de fricción entre grano y geomembrana y entre geomembrana y superficie de la tolva, son muy variables, aunque se mantienen dentro del mismo orden de magnitud.
- Los modelos numéricos arrojan resultados comparables con los valores obtenidos de la aplicación de la normativa Eurocode1 – Parte 4 -91, particularmente siguiendo los lineamientos correspondientes al capítulo 6 de dicha normativa.
- Los resultados de los modelos numéricos con distintos valores de fricción entre grano y pared de silo, al menos en el rango evaluado (0.33 a 0.40), no presentan diferencias significativas en cuanto a los valores de tensiones desarrollados en la estructura en análisis.
- En función de los modelos numéricos realizados y el modelo analítico para la estimación de la fuerza desarrollada en la geomembrana, se puede concluir que el mecanismo de falla ocurrido en la estructura en análisis fue el siguiente: en primera instancia y debido a múltiples factores (como ser humedad en los granos, temperatura, presión elevada, costra presente entre grano y geomembrana, falta de rectitud en las superficie de la tolva, etc.), se produce un leve aumento en el valor de fricción entre grano y geomembrana por sobre el valor de fricción entre hormigón y geomembrana, esto trae aparejado que el grano arrastra la membrana y el deslizamiento se producen entre la membrana y la superficie de la tolva. Este fenómeno provoca que la membrana desarrolle fuerza en su plano y que la misma sea soportada en primera instancia por la membrana localmente y en última instancia por los anclajes de esta en la parte superior.
- En función de los resultados obtenidos y los análisis realizados se pudo determinar un valor de referencia para el diseño del sistema de anclaje de las geomembranas utilizadas en este tipo de estructuras. Esto constituye una herramienta muy útil para el diseño de estos componentes.

REFERENCIAS

- Pernich, Adriana, 2010. "Predicción Numérica de los Campos de Tensiones durante el Llenado y Descarga de Silos de Almacenamiento de Materiales Granulares". Tesis Doctoral, FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba.
- Eurocode1, 1991. "Eurocode1: Actions on structures – Part 4: Silos and tanks". Normativa Europea.
- ACI 313-97, 1997. "Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials". ACI Committee 313.
- Tavakoli, H., Rajabipour, A. y Mohtasebi, S., 2009. "Moisture-Dependent some Engineering Properties of Soyabean Grains". Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript 1110. Vol. XI. February 2009.