



**universidad  
de león**

## **TESIS DOCTORAL**

**Determinación de los empujes y de las propiedades mecánicas de los pellets de madera almacenados en un silo de 2 m de altura y comparación con otros ensayos a escala real y de laboratorio**

**Determination of the thrusts and mechanical properties of wood pellets stored in a 2 m high silo and comparison with other real-scale and laboratory tests.**

**Autor**

**Gerardo Hernández Rodrigo**

**Programa de doctorado: Ingeniería de Biosistemas**

**Tutor**

**Dr. D. Pedro José Aguado Rodríguez**

**Directores**

**Dr. D. Pedro José Aguado Rodríguez**

**Dr. D. Luis Herráez Ortega**

**Dr. D. Ángel Ruíz Padín**

**León a octubre de 2023**

# ÍNDICE

<b>1. Agradecimientos.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Sumario.....</b>	<b>3</b>
<b>3. Abstract.....</b>	<b>4</b>
<b>4. Símbolos y abreviaturas .....</b>	<b>5</b>
<b>5. Planteamiento de la necesidad de la investigación.....</b>	<b>7</b>
<b>6. Objetivos.....</b>	<b>7</b>
<b>7. Antecedentes .....</b>	<b>8</b>
<b>8. Materiales y métodos: .....</b>	<b>11</b>
8.1. Silo de ensayo.....	15
8.2. Material ensayado.....	17
8.3. Tratamiento de los datos: .....	18
8.4. Cálculo de los empujes y los parámetros con el Eurocódigo .....	21
8.5. Determinación de los parámetros mecánicos de cada partícula (pellet) .....	29
<b>9. Resultados .....</b>	<b>29</b>
9.1. Comparación con resultados de otros ensayos.....	29
9.2. Resultados del ensayo con pellets. Gráficas de los empujes .....	29
9.2.1. Resultados del primer ensayo .....	30
9.2.2. Resultado del segundo ensayo .....	32
9.2.3. Resultados del tercer ensayo .....	35
9.2.4. Resultados del cuarto ensayo .....	37
9.2.5. Resultados del quinto ensayo.....	39
9.3. Parámetros de los ensayos de laboratorio a nivel de partícula.....	41
<b>10. Discusión de los resultados .....</b>	<b>41</b>
10.1. Discusión de los resultados.....	41
10.1.1. Comparación de empujes con otros materiales y con Eurocódigo.....	41
10.2. Comparación de parámetros en el silo con los del Eurocódigo y con los de los ensayos experimentales .....	50

10.3. Comparación de parámetros en el silo con los de los ensayos experimentales para pellets a nivel de partícula. 53

**11. Conclusiones: .....54**

11.1. Entre empujes de pellets y el Eurocódigo ..... 54

11.2. Comparación de pellets con maíz..... 55

11.3. Comparación con el Eurocódigo y los ensayos de laboratorio..... 56

11.4. Comparación de parámetros en el silo con los de los ensayos experimentales para pellets a nivel de partícula 56

**12. Investigaciones futuras .....56**

**13. Bibliografía: .....57**

## **1. Agradecimientos**

Esta ocasión, me gustaría aprovecharla para dedicarle este trabajo a todas aquellas personas que están junto a mí, pero sobre toda a aquellas que ya no lo están y, que su ejemplo a través de la constancia, el sacrificio, el esfuerzo, el tesón y el trabajo ha sido inspirador a lo largo de mi trayectoria. Sin olvidarme, como no, de los que aún están, como mi familia (mi madre, mi hermano, mi mujer y mi hija), de los amigos y compañeros de estudios y de todas aquellas personas que se han cruzado a lo largo de mi camino, aprendiendo día a día de todos ellos; tampoco pueden quedar atrás mis compañeros de trabajo en el E.S.T.I.A. (para mí, siempre será la ESTIA), siendo Victorino y Juan Antonio dos de los colaboradores necesarios a la hora de realizar ciertos ensayos de esta investigación. También al ya fallecido profesor Ángel Couto Yáñez, cuyos trabajos en esta línea de investigación han sido de esenciales para el desarrollo de la presente tesis doctoral. Para terminar, extender mi agradecimiento a mis tres tutores D. Pedro Aguado, D. Luís Herráez y D. Ángel Ruíz Padín que sin su paciencia consejos y saber hacer, no hubiera podido llegar hasta el final de este camino.

¡¡Muchas gracias a todos y a cada uno de vosotros por vuestra aportación!!

## **2. Sumario**

Ante la creciente necesidad de descarbonizar el planeta mediante fuentes renovables más eficientes, limpias e inagotables, no cabe duda que los pellets se postulan como una de las alternativas de futuro más esperanzadoras para afrontar esta nueva “etapa verde” en la que nos vemos envueltos y, como parte de la sociedad, nos vemos en la obligación de colaborar para minimizar en lo posible el cambio climático. Así mismo también, como parte de la comunidad científica, debemos asumir el compromiso de contribuir en la medida de lo posible en el desarrollo de la ciencia y de los métodos que de ella se derivan para mejorar el mundo que nos rodea.

Una de las fuentes de energía renovables que más está creciendo en los últimos años es la basada en pellets de madera. Al ser un combustible de reciente aparición aún hay muchos aspectos que han de ser estudiados. Un de los aspectos fundamentales en la logística de los pellets es su almacenamiento, debiendo dimensionar recipientes de grandes dimensiones, en la mayoría de los casos, silos.

Para el cálculo de la estructura del silo es necesario conocer los valores de una serie de parámetros aún muy escasos en la bibliografía (ángulo de rozamiento interno, constante

K, etc). Por otra parte, estos valores se basan en ensayos de laboratorio que pueden tener diferencias, como se demuestra en esta tesis doctoral, con los observados en silo de tamaño real. En la presente tesis doctoral se presentan valores de algunos de estos parámetros obtenidos en el silo de ensayo y se comparan con los obtenidos en el laboratorio a nivel de partícula y con el material ensayado a granel. Además, se han obtenido los empujes del material almacenado sobre la pared del silo tanto en llenado, como en reposo y en el vaciado, con objeto de comparar dichos empujes con los calculados con el Eurocódigo usando los diferentes valores parámetros obtenidos, para así poder valorar el grado de precisión de los cálculos de dicha norma, con respecto a los valores reales. Asimismo, se han comparado dichos empujes obtenidos en el silo de ensayo con los realizados con otros materiales y en otros silos con el fin de comprobar la validez de los mismos y conocer las diferencias que los empujes presentan con este nuevo material.

### **3. Abstract**

Given the growing need to decarbonize the planet through more efficient, clean and inexhaustible renewable sources, there is no doubt that pellets are proposed as one of the most hopeful alternatives for the future, to face this new “green stage” in which we find ourselves. wrapped. and, that as part of society we are obliged to collaborate to minimizing climate change as much as possible. Likewise, as part of the scientific community, we must assume the commitment to contribute as much as possible to the development of science and the methods derived from it to improve the world around us.

One of the renewable energy sources that has been growing the most in recent years is that based on wood pellets. Being a fuel of recent appearance, there are still many aspects that have to be studied. One of the fundamental aspects in the logistics of pellets is their storage, requiring large containers, in most cases, silos.

To calculate the silo structure, it is necessary to know the values of a series of parameters that are still very scarce in the literature (angle of internal friction, constant K, etc.). On the other hand, these values are based on laboratory tests that may have differences, as demonstrated in this doctoral thesis, with those observed in real-size silos. In this doctoral thesis, values of some of these parameters obtained in the test silo are presented and compared with those obtained in the laboratory at the particle level and with the bulk material. Furthermore, the thrusts of the stored material on the silo wall have been obtained both during filling, at rest and during emptying, in order to compare these thrusts with those calculated with the Eurocode using the different parameter values obtained, and, in order to be able to assess the degree of precision of the calculations of such standard,

with respect to the real values. Likewise, the thrusts obtained in the test silo have been compared with those obtained using other materials and in other silos, in order to check their validity and know the differences that these thrusts present using this new material.

#### 4. Símbolos y abreviaturas

##### Letras latinas mayúsculas

- A: área de la sección transversal del cilindro del silo ( $m^2$ ).
- CI: Intervalo de confianza
- $C_{pf}$ : Coeficiente de referencia del sólido para cargas concentradas para el sólido considerado (tabla E.1 del Eurocódigo).
- CV. Coeficiente de variación
- D: Deformación (m).
- E: Relación entre la excentricidad del canal de flujo y el radio del silo.
- $E_p$ : Módulo de elasticidad o módulo de Young.
- F: Fuerza (kN)
- $F_{GAi,t}$ : Fuerza de empuje perpendicular a la pared registrada por la célula ( $KN/m^2$ ).
- $F_{L1A,t}$ : Fuerza vertical registrada por la célula a la altura L1 en el instante  $t$  (Célula 9A) en KN.
- $F_{L1B,t}$ : Fuerza vertical registrada por la célula a la altura L1 en el instante  $t$  (Célula 9B) en KN.
- $F_{L1C,t}$ : Fuerza vertical registrada por la célula a la altura L1 en el instante  $t$  (Célula 9C) en KN.
- G: Módulo de cortante
- K: Relación entre la presión horizontal y la vertical.
- $K_m$ : Valor medio del coeficiente de presiones laterales.
- $K_u$ : Constante
- $p_{hGAi,t}$ : Presión horizontal en la célula a la altura  $h$  ( $KN/m^2$ ).
- $S_{GAi}$ : Superficie del recuadro de la célula ( $m^2$ ).
- $S_{C,t}$ : Superficie interior de la pared de acero del cilindro ( $m^2$ ).
- U: Perímetro interno de la sección transversal del silo (m).
- $V_c$ : Volumen del cilindro ( $m^3$ )
- $V_h$ : Volumen de la tolva ( $m^3$ )
- $W_{hsm}$ : Peso del material almacenado en la tolva (kN)
- Z: Es la profundidad desde la superficie equivalente del material almacenado (m).

### Letras latinas minúsculas:

- $a_k$ : Coeficiente de modificación para el coeficiente de presiones laterales.
- $a_\phi$ : Coeficiente de modificación del ángulo de rozamiento interno.
- $d_c$ : diámetro del silo (m).
- $e_r$ : Excentricidad máxima de la superficie del cono superior durante el llenado. (m).
- $e_{p,i}$ : Coeficiente de restitución partícula- partícula
- $e_{w,i}$ : Coeficiente de restitución partícula- pared
- $h_c$ : Altura del segmento de pared vertical del silo desde la transición hasta la superficie equivalente. (m).
- $n_{zSk,t}$ : Tensión vertical de compresión por unidad de longitud del perímetro del silo (kN/m).
- $p_{hf}$ : Presión horizontal (kN/m<sup>2</sup>).
- $p_{hm,t}$ : Presión horizontal del material en el instante "t" (kN/m<sup>2</sup>).
- $p_{pf}$ : Carga concentrada, presión de carga concentrada por coeficiente de carga concentrada. (kN/m<sup>2</sup>).
- $p_{vt,t}$ : Empuje vertical en la transición cilindro-tolva (kN/m<sup>2</sup>).
- $p_{wf}$ : Presión vertical (kN/m<sup>2</sup>).
- $p_{w,t}$ : Fuerza por unidad de superficie de la pared del cilindro (kN/m<sup>2</sup>).
- $t$ : Tiempo (s)

### Letras griegas:

- $\gamma$ : Valor característico del peso unitario (kN/m<sup>3</sup>).
- $\delta$ : Peso específico (kN/m<sup>3</sup>)
- $\mu$ : Valor característico del coeficiente de rozamiento con la pared.
- $\mu_m$ : Coeficiente de rozamiento de la pared de acero del cilindro.
- $\rho_p$ : Densidad real (kg/m<sup>3</sup>).
- $\sigma$ : Desviación estándar
- $\sigma_p$ : Densidad de pellets (kg/m<sup>3</sup>).
- $\nu$ : Coeficiente de Poisson
- $\phi_{im}$ : Ángulo de rozamiento interno del material almacenado (°).
- $\phi_p$ : Ángulo de rozamiento partícula-partícula (°).
- $\phi_w$ : Ángulo de rozamiento partícula-pared (°).

## 5. Planteamiento de la necesidad de la investigación

Como se ha comentado en el apartado anterior del sumario, de un tiempo a esta parte los pellets se han puesto de moda, siendo una oferta más en el mercado energético, bien sea para un uso doméstico o industrial como pueden ser las incipientes centrales térmicas urbanas, en las que se centraliza la generación de agua caliente para calefacción y para el ACS de uno o varios barrios de una ciudad en una única central térmica de biomasa, como la de la imagen:

Este tipo de centrales necesitan un abastecimiento y almacenamiento de altas capacidades, así como, unos medios de alimentación de las calderas que sean de flujo casi continuo y que degraden el material lo menos posible, ya que, la eficiencia de la combustión radica en gran medida en el tipo de combustible y en la forma que esté llega a la cámara de combustión. Es por ello, que hay que ahondar en este sentido a la hora de conocer más en profundidad el comportamiento de los pellets tanto en su transporte como en su almacenamiento. Por otra parte, hay parámetros de cálculo que no están definidos para los pellets, teniendo a día de hoy, que utilizar los valores de esos parámetros de otros materiales, como es el caso de los pellets de remolacha, siendo rescatados de los datos existentes para el almacenamiento de piensos destinados a la alimentación animal y que nos vemos obligados a utilizar en nuestra comparación con el método de cálculo del Eurocódigo, por no existir otros valores más afines para los coeficientes  $K_m$  y  $a_k$ .

Asimismo, se desconoce el comportamiento que presentan los pellets en los procesos de carga, reposo y descarga de los silos y, que en esta tesis analizaremos pudiendo arrojar algo de luz sobre esta materia, habiendo llegado a conclusiones relevantes.

### La antigua fábrica de Cristalerías Lantarón se convertirá en una central térmica de biomasa para Zamora

Dará suministro de agua caliente y calefacción a varias zonas de la capital zamorana

En El Español destacan la noticia de nuestro proyecto en Zamora. Con el objetivo de dar suministro de agua caliente y calefacción a varias zonas de la capital zamorana por medio de la transformación de la antigua fábrica de Cristalerías Lantarón en una central térmica a base de biomasa. Continuamos llevando a cabo sistemas energéticos limpios y sostenibles. Pronto ampliamos más información.



La antigua fábrica de Cristalerías Lantarón en Vista Alegre (2019)

siguientes:

## 6. Objetivos

El objetivo general de la presente tesis doctoral es obtener datos a escala real de los empujes de los pellets de madera almacenados en silos, así como, de algunos parámetros usados en el dimensionamiento de dichas estructuras. Como objetivos particulares se pueden citar los

1. Determinar los empujes sobre las paredes de un silo a escala real de los pellets de madera almacenados en las fases de llenado, reposo y descarga.
2. Determinar la constante K (Relación entre la presión vertical y horizontal), el coeficiente de Poisson y el coeficiente de rozamiento con la pared, a escala real.
3. Comparar los empujes con los obtenidos en la norma europea de dimensionamiento de silos (EN 1991-4:2006).
4. Comparar los parámetros obtenidos en el silo de ensayo con los obtenidos a nivel de laboratorio y los propuestos en las normas internacionales.

## 7. Antecedentes

Hasta la fecha, para los pellets de madera todos los datos referentes a empujes de los pellets en su almacenamiento, así como, sus parámetros físicos han sido obtenidos de forma empírica a través de modelos de elementos discretos (DEM), entre otros, como es el caso de la simulación de la rotura de pellets sometidos a esfuerzos uniaxiales y ensayos de compresión diametral para estudiar la rotura del pellet. (*Gilvari et al. 2020*).

(*Schott y Alabama. 2016*) desarrollaron un modelo DEM para simular una durabilidad prueba de pellets, haciendo hincapié en las pruebas de durabilidad no llegando a reproducir adecuadamente unas condiciones de manipulación realistas a escala industrial.

(*Hlosta et al. 2020*) combinaron los resultados experimentales obtenidos de varios ensayos con simulaciones numéricas para validar los valores de diferentes coeficientes de interacción (es decir, el coeficiente de fricción estática, el coeficiente de fricción de rodadura o el coeficiente de restitución) necesarios para desarrollar un DEM.

(*Rozbroj et al. 2019*) utilizaron simulaciones DEM para realizar un análisis de sensibilidad del grado de precisión de longitud de pellets cilíndricos con la calibración óptima del tiempo y Velocidad durante la descarga de un recipiente cilíndrico.

(*Jezerska et al. 2018*) determinaron muchos parámetros en cuanto a las propiedades físicas y mecánicas de pellets de madera, pero no se centraron en los parámetros requeridos por las simulaciones DEM. (*Hlosta et al. 2018*) determina el coeficiente de restitución de la partícula para varios materiales, incluidos pellets cilíndricos de abeto.

(*O'Sullivan et al., 2004*) describen el coeficiente de restitución. Siendo este el coeficiente que relaciona la cantidad de energía disipada durante la colisión entre dos objetos, ya sean estos dos partículas o una partícula y la pared que la contiene.

(Dyjakon y Noszczyk 2019) determinaron una partícula densidad de  $1\,385\text{ kg m}^3$  para pellets de aserrín de pino, mientras que, (Frodeson et al. 2019) obtuvieron una densidad aproximada valor de  $1100\text{ kg m}^3$  para materia prima de madera de pino y (Jezerska et al. 2018) obtuvieron una densidad de pellets de alrededor  $1\,350\text{ kg m}^3$ .

Como ya se ha comentado, existe poca literatura a la hora de la determinación real de parámetros de pellets de madera, por ejemplo, para el módulo de elasticidad de los pellets de madera. (Kocsis y Csanády . 2017) midieron el módulo de elasticidad durante la formación de pellets individuales a través de un canal de compresión con el diámetro del pellet final. Para un pellet de madera con un diámetro similar al probado en esta investigación ( $\varnothing = 6\text{ mm}$ ), encontraron un módulo de elasticidad en el comprimido pellet de 146 y 221 MPa para abeto (*Picea abies*) y falsa acacia (*Robinia pseudoacacia*). Estos valores son mayores a los obtenidos en esta investigación, que se ha realizado por este equipo y cuya publicación vio la luz en 2020 denominado, “Determination of mechanical properties for wood pellets used in DEM simulations” (E Gallego. 2020).

Existen hoy diversos materiales de origen biológico, ya sea subproductos, desechos, cultivos agrícolas o forestales que son susceptibles de transformación industrial para su aprovechamiento como biocombustibles sólidos, tanto en instalaciones industriales, como agropecuarias o en uso doméstico. La presentación más común de estos materiales es en forma de pellets, cuyo manejo o transporte se realiza mediante el uso de tornillos de Arquímedes (sinfín), sistemas neumáticos, de cadenas o de cinta, elevadores de cangilones o tuberías, entre otros. Por otro lado, el almacenamiento de estos materiales se lleva a cabo fundamentalmente en tolvas, silos o instalaciones tipo “trinchera”.

Los productos peletizados son muy heterogéneos en cuanto a su tamaño, humedad o propiedades mecánicas, por lo que interactúan con los dispositivos de transformación, transporte o almacenaje de diferente manera. Por ello, estos dispositivos trabajan generalmente con una amplia variedad de partículas en las que varían aspectos clave para su manejo como el tamaño, origen del material o la relación de aspecto de la partícula con respecto al dispositivo de transporte o almacenamiento. Como consecuencia, existen actualmente muchos problemas en el manejo y almacenamiento de estos materiales como el bloqueo del material o fallos en su entrada a las instalaciones de almacenamiento (Dai et al 2008). Las instalaciones industriales que manejan productos peletizados abordan habitualmente la resolución de este problema mediante la implantación de soluciones prácticas “ad-hoc” y a través de diferentes pruebas, pero sin disponer de un fundamento científico de los parámetros mecánicos y geométricos intervienen en el problema, ni con un conocimiento exacto de la justificación física del mismo.

Hoy en día, todavía existe un gran vacío de conocimiento sobre el comportamiento de todos estos materiales (Ayuga, 2008; Ramírez-Gómez, 2016), y su forma de interacción con las máquinas y equipos que entran en la cadena logística de su uso industrial. Por esta razón es imprescindible progresar en el conocimiento de las propiedades mecánicas, y así conocer mejor su forma de interacción, (flujos, presiones, atascos etc.) (Wu et al., 2011)

Para el diseño de los silos que almacenan estos materiales existen diversas normas en diferentes países, como son las normas americanas (ACI 313-97 y NSI/ASAE EP433 DEC1988) o la norma europea (EN 1991-4:2006). Estas normas se basan en los estudios científicos realizados hasta el momento de su elaboración. Como el uso de los pellets es relativamente reciente se aprecia en las mismas una falta de información para obtener unos resultados ajustados cuando se dimensionan silo que van a almacenar este tipo de material (Gallego 2020).

En los métodos de cálculo propuestos por estas normas y en el resto de métodos, ya sea mediante el apoyo de un software (cálculo matricial, calculo con elementos finitos, cálculo con elementos discretos, etc), o realizados manualmente, para calcular el empuje de los materiales almacenados son necesarios una serie de parámetros. En general se usan el ángulo de rozamiento interno, el ángulo de rozamiento con la pared, el ángulo de talud natural, la relación entre la presión horizontal y la vertical (K) y el peso específico, pudiéndose utilizar otros parámetros en técnicas avanzadas de cálculo. Estos parámetros deben determinarse experimentalmente o tomar los datos de materiales parecidos que se encuentren en la bibliografía. El Eurocódigo 1, parte 4, (EN 1991-4:2006) recomienda obtener los valores experimentalmente debido a la variabilidad de materiales que existen y propone métodos de ensayo descritos en sus anexos.

Existen numerosas publicaciones sobre los valores obtenidos en laboratorio sobre estos parámetros para algunos materiales (Moya 2013, Moya 2006, Molenda 2002). Sin embargo, sobre los valores de los pellets de madera existen muy pocos ensayos a escala de laboratorio (Gallego 2020, Moya 2022, Wu 2011). Los pellets de los ensayos de Gallego y Moya son del mismo origen que los utilizados en la presente tesis doctoral, en concreto, el artículo de Gallego forma parte de los trabajos de esta tesis, por ello, sus valores se utilizarán para hacer comparaciones con los resultados.

Algunos autores ya han comentado que, debido al factor de escala, los valores obtenidos en los ensayos a escala de laboratorio difieren de los reales (Couto 2012), es decir, los valores en silos de tamaño real pueden ser diferentes. En la bibliografía ya hay algunos ensayos experimentales en silos donde se han obtenido valores de algunos de estos

parámetros (Couto 2012, Ruiz 2012) pero no existen datos experimentales a esta escala con pellets, por lo que serían de gran interés para que el dimensionamiento de estas estructuras sea correcto. De lo contrario puede derivar en fallos estructurales y accidentes.

Para comprobar que los parámetros mecánicos son correctos es necesario comparar los cálculos de los empujes provocados por el material con ensayos experimentales a escala real con los mismos materiales o, al menos parecidos. Existen ya numerosos ensayos experimentales donde se determinan los empujes de materiales almacenados a escala real (Couto 2013), sin embargo, no existen este tipo de ensayos para silos de pellets.

En la presente investigación se pretende resolver esta falta de información, aportando datos de los parámetros mecánicos de los pellets necesarios para el dimensionamiento de los silos a escala real, así como, obtener datos de los empujes en estos materiales en un silo para determinar lo ajustado de los valores obtenidos con la normativa actual. Para ello se utilizará un silo experimental de 2 m de altura, instrumentado, desarrollado en la Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal de la Universidad de León (Couto 2012 y Ruiz 2012). De esta forma se pretende mejorar y hacer más seguro el dimensionamiento de los silos para almacenamiento de pellets.

## **8. Materiales y métodos:**

El material empleado en estos ensayos ha constado en su mayor parte en la utilización de un silo de acero inoxidable, compuesto por dos partes, la primera de ellas es un cilindro de dos metros de alto por uno de diámetro, en su parte inferior se dispone una segunda parte de base tronco cónica (tolva), de un metro de diámetro superior y 0,35 metros de diámetro inferior con una altura de 0,5 metros. A su vez a esta tolva está acoplada una tajadera metálica que permite cerrar o abrir la salida del silo. Esta tajadera desemboca en el sinfín de descarga, con el que se procede a las descargas del silo. Este sinfín, es a su vez, utilizado en su arte media, para también descargar una tolva intermedia (silo 2) de almacenamiento de pellets; este sinfín de descarga abastece a un segundo sinfín de carga, que es el encargado de rellenar la tolva intermedia y finalmente el silo 1 si se desea, creando así un circuito cerrado en el que se produce la recirculación del material y su distribución y almacenaje donde se prefiera, bien en la tolva intermedia o bien en el propio silo.



Imagen 1: Imagen general del sistema de recirculación de los pellets para los ensayos

Por otro lado, mencionar que el silo 1 está suspendido sobre tres células de carga que a su vez están soportadas por tres patas HEB-100, dispuestas a 120° respecto del eje longitudinal del silo. Estas células que representan el nivel "L0" soportan el peso de todo el silo. Sobre ellas, se disponen otras tres células con la misma disposición a 120°, y sobre las que descansa solamente el cilindro del silo, dando lugar al nivel "L1", como se aprecia en la

figura 3. Tanto las tres células del nivel L0 como las tres células del nivel L1, sus lecturas son centralizadas en una caja suma, para poder tener una lectura única de cada trio de células, conociendo así el peso total del silo y del cilindro, así como del material que hay en su interior.



Imagen 2: Armario de lecturas

Tanto las señales analógicas de las dos cajas suma como las lecturas de cada una de

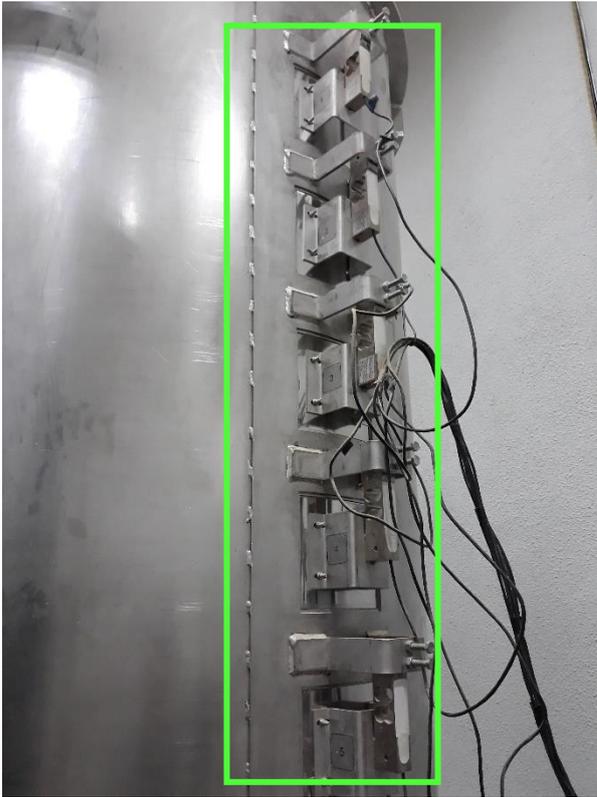


Imagen nº 3: Disposición de las células de presión

las células independientes (mV/V), son procesadas por un convertidor analógico digital y mediante una curva de calibración se transmite a la red RS485, a través de esta red se obtienen los datos mediante un protocolo de comunicaciones estándar usando un SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition).

En la imagen 2, se puede visualizar el cuadro de lecturas de las células, en el que, en la pantalla nº 8 se ve la lectura del trio de células del nivel L0 y en la pantalla nº 9 la del nivel L1. En la pantalla nº 10 la lectura de la célula GA0 (ubicada en la tolva) y en las otras siete pantallas el resto de las células.

El cilindro del silo está instrumentalizado, a través de la colocación, en su parte exterior, de siete células de presión

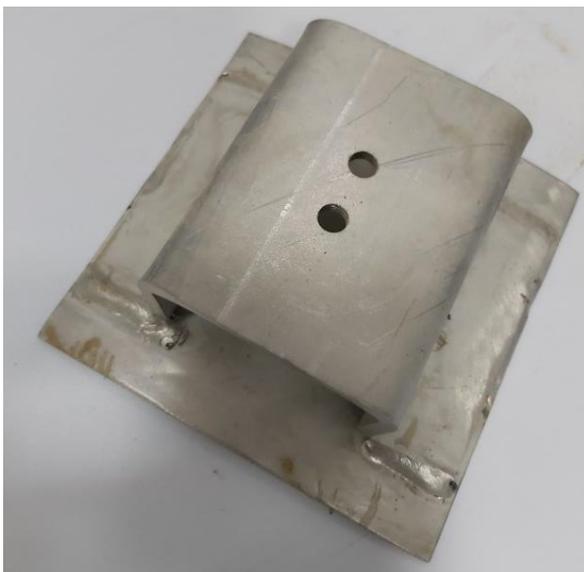


Imagen nº 4: Detalle de la chapa que cierra la ventana y que transmite los empujes a la célula.

dispuestas longitudinalmente desde su parte inferior hasta su parte superior, como se puede ver en la imagen de la izquierda, foto nº3, (células denominadas desde GA1 hasta GA7) y una más dispuesta en el lateral de la tolva (GA0). Para el soporte de las células se han diseñado dos piezas de acero inoxidable en forma de omega, en la que, una de ellas está soldada a la pared del cilindro, que es la que hace de soporte de la célula y, la otra es la que está atornillada al recorte de chapa que cierra la abertura realizada en el cilindro, a modo de ventana y que transmite el empuje a la célula al estar unida también a

ésta. Esta última chapa que cierra el recorte en el cilindro (que hemos denominado ventana) tienen una superficie de 15 x 15 cm y poseen la capacidad de transmitir los empujes interiores del material sobre su pared porque son flotantes, estando solamente sustentadas por su unión con la célula de carga. Como se puede ver en la imagen nº 3, y en la imagen de detalle nº 4. Las chapas en omega poseen un espesor de 5 mm la que sustenta la célula de carga y de 3 mm la omega que sirve de tapadera de la ventana del silo, estos espesores evitan la deformación de las piezas favoreciendo que la totalidad de los empujes sean absorbidos por las células, evitando así errores en la lectura del valor transmitido.

Una simulación de su instalación se puede apreciar en la figura nº 1, siguiente.

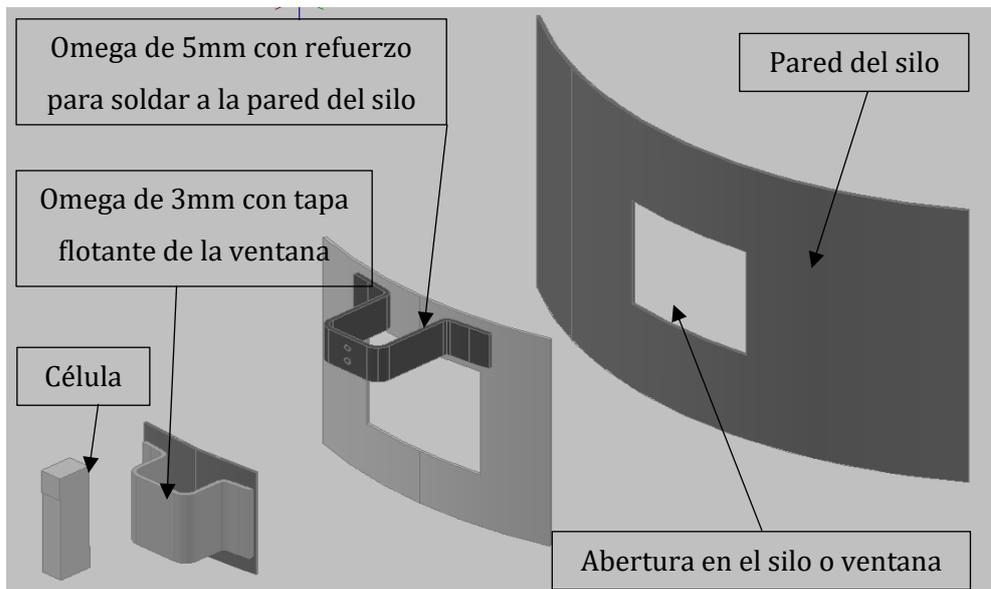


Figura nº 1: Colocación del sistema de anclaje de las células de carga

El resto de material utilizado lo componen una tolva de almacenaje intermedia (silo 2), dos sinfines provistos de tornillo sinfín flexible tipo spiracem de 60mm de diámetro con un paso de 40mm y un espesor o altura de gusano de 12mm, que discurre por tubos de PVC



Imagen nº 5: Sinfín tipo spiracem

de 90 mm y, con motores de 1 cv controlado por un variador de frecuencia el motor del sinfín de descarga para ajustar el volumen de alimentación entre ellos y, por tanto el caudal de llenado o vaciado según proceda.

Finalmente, las lecturas de las células son centralizadas a través de una interfaz y procesadas mediante un programa informático diseñado a medida para este propósito, que nos

permite, por un lado, seleccionar los intervalos de lecturas de los valores emitidos por las células tanto en las fases de llenado y vaciado (cada 5 segundos) como en las de reposo (cada 30 segundos); por otro lado, también nos permite registrar y guardar todos los datos de las lecturas. Considerando que el proceso de carga solía durar 2,5 horas aproximadamente, en reposos se mantenía durante 3 o 4 días, lo que producía miles de datos en cada uno de los ensayos.

### 8.1. Silo de ensayo

Para el desarrollo de los trabajos se ha utilizado un silo experimental desarrollado en la Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal de León (Couto 2012 y Ruiz 2012) consistente en un silo metálico con diferentes sensores situado en el interior de un laboratorio para evitar la influencia de las condiciones ambientales (sol, viento, etc).

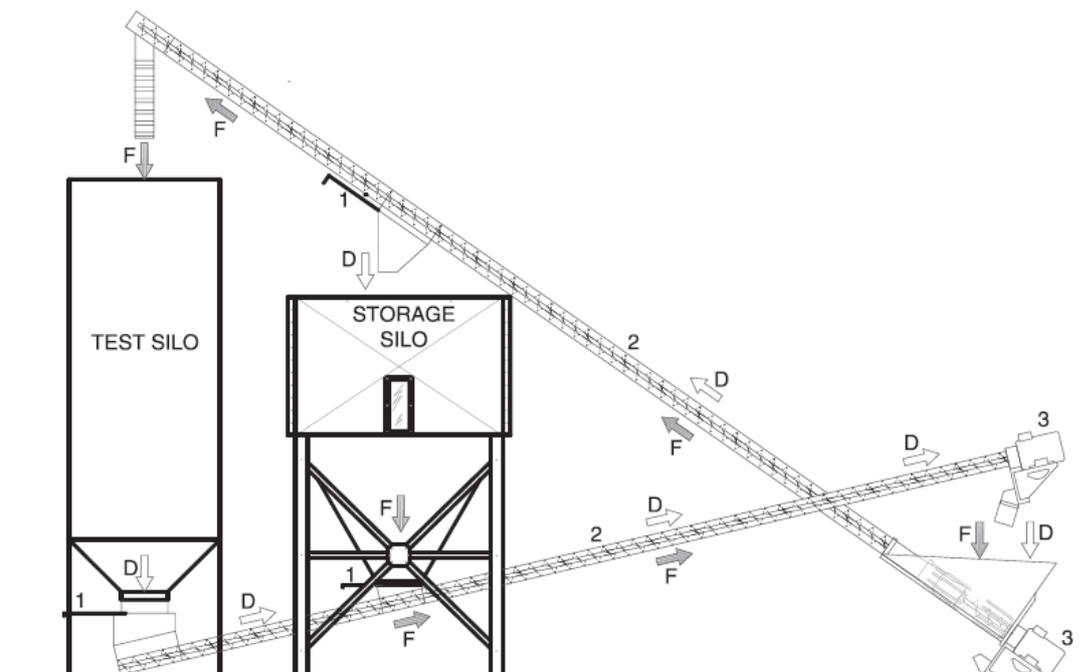


Figura nº 2: Imagen de la estación de ensayos, extraída del artículo: Design and instrumentation of a mid-size test station for measuring static and dynamic pressures in silos under different conditions – Part I: Description (A. Couto, A. Ruiz, P.J. Aguado. 2012)

La estación de ensayo se compone de dos silos (imagen 1 y 2) conectados por sinfines que permiten la carga y la descarga de los silos y el paso de material de uno a otro. El silo de ensayo (silo 1), que es en el que se colocan los distintos sensores, es de sección circular y tiene una tolva centrada, es decir con la boca de salida situada en el eje vertical del silo, el otro silo es de sección cuadrada (silo 2) y se utiliza solo para almacenar el material de los ensayos. Para el llenado del silo 2, se suspendieron con apoyo de una pala de tractor



La chapa del silo de ensayo es de 3 mm de espesor, mientras que los anillos de refuerzo para él tienen 50 mm de ancho y 10 mm de espesor. El silo tiene las dimensiones indicadas en la figura nº 3.

Se trata, por tanto, según el Eurocódigo 1 (CEN 2006), parte 4, de un silo esbelto, ya que la relación altura/diámetro del cilindro es igual a 2 ( $h_c/d_c = 2$ ).

Para la medición de los empujes horizontales del material almacenado sobre la pared se ha cortado la misma para que queden trozos cuadrados con una separación de 1 mm con el resto de la pared, de forma que se muevan independientemente. Estos trozos de pared o ventanas se han unido a unas células de carga de flexión de forma que se pueda conocer el empuje sobre los mismos (figura nº 1 e imágenes 3 y 4) Esto se ha realizado a diferentes alturas a lo largo de una generatriz del silo, justo debajo de la unión entre el cilindro y la tolva y en el cilindro a siete alturas diferentes (figura nº 2) Las células de carga se han elegido para que sufran deformaciones de entre 0,3 y 0,5 mm en carga límite, para evitar errores en la medición provocados por el desplazamiento de las ventanas de la pared.

La velocidad de llenado y de descarga se controla mediante variadores de frecuencia que regulan la rotación de los motores.

## 8.2. Material ensayado

Los pellets usados para la realización del ensayo a escala real fueron cedidos por la empresa COTERRAM GENERACIÓN S.A. (Imagen nº 6). Su diámetro es de  $6 \pm 1$  mm (UNE-EN ISO 17225-1:2014) y la longitud variable, entre 3,15 y 40 mm, con los bordes quebrados (irregulares). Los pellets son Clase A1 según la norma UNE-EN ISO 17225-2 (AENOR 2021)

La humedad media en el momento de recibir el material fue del 6,5%, obtenida mediante la norma ASTM D3302 (ASTM 2010), con una desviación estándar del 0,25%. En



Imagen nº 6: Pellets usados en el ensayo

el momento de los ensayos la humedad fue del 7,15% con una desviación estándar del 0,16%. Para determinarla se tomaron tres muestras.

El material usado para la fabricación de los pellets fueron troncos de pino silvestre (*Pinus sylvestris*). Los troncos son descortezados, se desecha la corteza, se astilla, se seca, pasa por los molinos primario y

secundario y se peletiza. No se hace torrefacción ni se añade almidón.

El porcentaje de finos (partículas de menos de 3,15 mm), determinados por tamizado según la norma UNE-EN ISO 5370:2023 (AENOR 2023), es del 0,21% en peso. Para determinarlo se tomaron tres muestras.

La densidad aparente sin compactación fue de 660 kg/m<sup>3</sup> con una desviación estándar de 0,03 kg/m<sup>3</sup>. La densidad aparente compactando, mediante sacudidas, determinada según la norma UNE-EN ISO 17828:2016, fue de 7,06 kN/ m<sup>3</sup> con una desviación estándar de 0,02 kg/m<sup>3</sup>. Para determinar ambas se tomaron tres muestras.

### 8.3. Tratamiento de los datos:

La lectura y almacenamiento de los datos enviados por las células de carga, es realizado por un ordenador usando un software diseñado específicamente para estos ensayos. Esta aplicación facilita la selección del intervalo de tiempo entre lecturas (a partir de décimas de segundo), almacenándolas en un archivo de texto.

La nomenclatura empleada es la utilizada en el Eurocódigo 1, parte 4 (CEN, 2006), pero también incluye términos específicos de este trabajo. Los parámetros usados son los siguientes:

Los valores de los empujes perpendiculares a la pared se obtienen directamente de las lecturas proporcionadas por las células de carga de flexión situadas a diferentes alturas a lo largo de la generatriz del silo. El valor dado por la célula de carga es la fuerza total sobre la parte de la pared recortada (“ventana”), por tanto, si se divide por la superficie de dicha ventana se obtiene la presión sobre la pared en la zona (altura) donde se sitúa la célula de carga. Estas lecturas incluyen la presión perpendicular debajo de la unión entre el cilindro vertical y la tolva, ya que existe una célula justo debajo. Para una posición “i” y un tiempo “t” tendremos:

$$p_{hGAi,t} = \frac{F_{GAi,t}}{S_{GAi}}$$

La fuerza vertical en el cilindro se mide con las tres células de carga de compresión situadas entre éste y la tolva, al nivel “L1” (foto nº 5), como son tres células de carga situadas a 120º, la fuerza total será la suma de las tres ( $F_{L1A}+F_{L1B}+F_{L1C}$ ). Si a esta fuerza se le descuenta el peso de la estructura que está por encima (del cilindro y de la tapa si la tuviese), que es conocido pues es el valor con el silo vacío, el valor que queda es debido al rozamiento del material almacenado sobre el cilindro. Lo que se hace en los ensayos es poner a cero los

sensores al inicio del ensayo de forma que el valor obtenido sea directamente el del rozamiento.

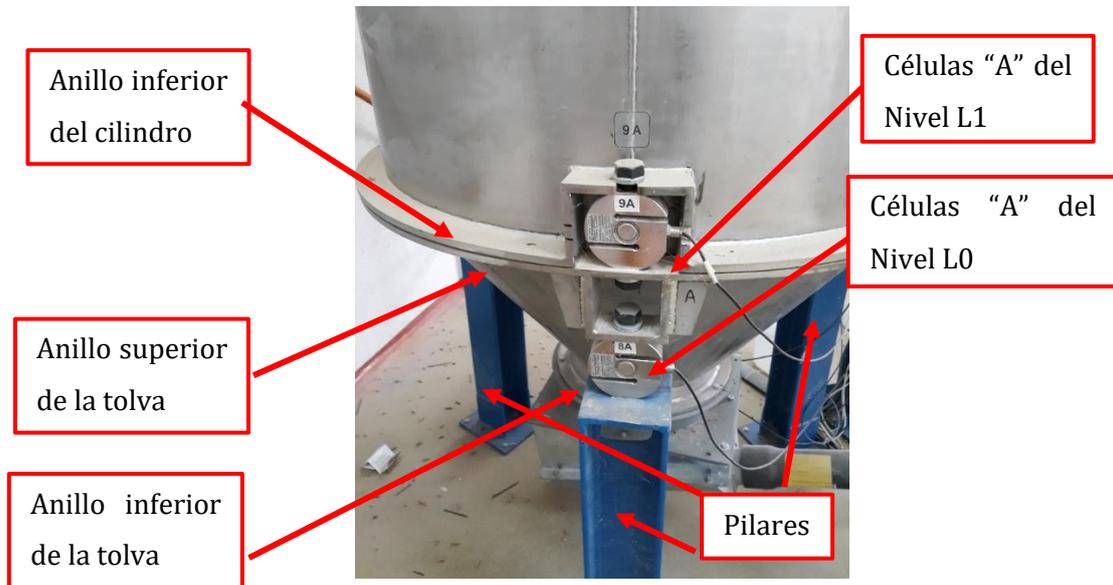


Imagen nº 7: Descripción de niveles y anillos

Para obtener el valor por unidad de longitud en todo el perímetro del anillo ( $U$ ), se dividirá la fuerza total por la longitud de dicho perímetro, es decir por la longitud de la circunferencia ( $U$ ) que describe la pared en una sección transversal del cilindro.

La fuerza por unidad de longitud en un instante "t" vendrá dada por la siguiente expresión:

$$n_{zSk,t} = \frac{F_{L1A,t} + F_{L1B,t} + F_{L1C,t}}{U}$$

Si lo que se quiere obtener es la tensión (fuerza por unidad de superficie) entonces hay que dividir la fuerza total por la superficie de acero del interior del cilindro ( $S_{c,t}$ ) con la que roza el material (depende del nivel de llenado). Es decir, mediante la siguiente expresión, donde " $p_{w,t}$ " es la tensión de rozamiento con la pared:

$$p_{w,t} = \frac{F_{L1A,t} + F_{L1B,t} + F_{L1C,t}}{S_{c,t}}$$

Como se conoce la superficie total del cilindro se podrá conocer el coeficiente de rozamiento con la pared ( $\mu_m$ ), pues la fuerza de rozamiento y dicho coeficiente están relacionadas de la siguiente forma para un instante "t":

$$\mu_m = \frac{p_{w,t}}{p_{hm,t}}$$

Donde “ $p_{hm,t}$ ” es la presión horizontal para un instante “ $t$ ” obtenida como valor medio de todos los empujes a diferentes alturas sobre el cilindro en los sensores sobre los que actúa el material almacenado (hasta donde se ha llenado el silo).

El peso específico del material almacenado se puede obtener a partir de las células de carga de compresión del nivel “L0”, es decir, las que se encuentran entre la tolva y los pilares. Estas células soportan todo el peso del silo, ya que la boca de salida está separada del sinfín (unida solo por una membrana para evitar que se derrame el material. Al igual que en el caso anterior, si al inicio del ensayo se ponen a cero, se descuenta el peso de la estructura y solo mide el peso del material almacenado. Al ser también 3 sensores separados 120°, la expresión para determinar el peso específico en un instante “ $t$ ” será la siguiente:

$$\delta = \frac{F_{L0A,t} + F_{L0B,t} + F_{L0C,t}}{V_c + V_h}$$

Donde “ $V_c$ ” y “ $V_h$ ” son el volumen del cilindro y de la tolva respectivamente.

Se puede determinar el empuje vertical en la transición “ $p_{vt,t}$ ” entre la tolva y el cilindro, simplemente restando a lo medido en las células “L0”, lo medido en las células “L1” y el peso del material almacenado en la tolva. Es decir, restando al peso total del material, el peso transferido al rozamiento (células “L1”) y el peso de lo almacenado en la tolva. Es decir, mediante la siguiente fórmula:

$$p_{vt,t} = \frac{(F_{L0A,t} + F_{L0B,t} + F_{L0C,t}) - (F_{L1A,t} + F_{L1B,t} + F_{L1C,t}) - W_{hsm}}{A}$$

Donde “ $W_{hsm}$ ” es el peso del material almacenado en la tolva cuando está llena (desde la boca de salida a la transición entre la tolva y el cilindro) y “ $A$ ” el área de la sección transversal del silo (del cilindro). Se divide por “ $A$ ” para obtenerlo en unidades de presión, en este caso en  $kN/m^2$ .

El parámetro “ $K$ ”, fundamental para el cálculo del empuje del material almacenado en un silo, puede ser también calculado en la transición a partir de los datos obtenidos. “ $K$ ” es el cociente entre la presión horizontal y la vertical, como conocemos la presión horizontal (valor de la célula de flexión número 1) y la presión vertical en la transición “ $p_{vt,t}$ ”, calculada anteriormente, podemos calcular el valor de “ $K$ ” para cada instante “ $t$ ” en la transición (unión entre la tolva y el cilindro vertical) mediante la siguiente expresión:

$$K = \frac{p_{hGA1,t}}{p_{vt,t}}$$

Lógicamente este valor puede obtenerse siempre que el material supere la transición, si la tolva no está llena no se puede obtener.

#### 8.4. Cálculo de los empujes y los parámetros con el Eurocódigo

Existen varias normas a nivel internacional para el cálculo de silos, las más usadas son las normas americanas (ACI 313-97 y NSI/ASAE EP433 DEC1988) y la norma europea (EN 1991-4:2006). En la presente tesis doctoral se ha decidido comparar los resultados con la norma europea por ser la de aplicación en nuestro país.

El silo, al ser de menos de 100 toneladas de capacidad se considera de clase de evaluación de acciones 1. Por otra parte, es un silo esbelto, ya que la relación altura/diámetro del cilindro es igual a 2 ( $h_c/d_c = 2$ ).

Según el Eurocódigo 1, parte 4, la carga de llenado simétrico en un silo esbelto se puede calcular de la siguiente forma:

Se determinarán los valores de la presión horizontal " $p_{hf}$ ", de la presión por tracción debida al rozamiento con la pared " $p_{wf}$ " y la presión vertical " $p_{vf}$ ", a cualquier profundidad " $z$ ", en llenado y durante el almacenamiento mediante las siguientes expresiones:

$$p_{hf} = p_{h0} \cdot Y_j(z)$$

$$p_{wf} = \mu \cdot p_{h0} \cdot Y_j(z)$$

$$p_{vf} = \frac{p_{h0}}{K} \cdot Y_j(z)$$

Siendo,

$$p_{h0} = \gamma \cdot K \cdot z_0$$

$$z_0 = \frac{1}{K \cdot \mu} \cdot \frac{A}{U}$$

$$Y_j(z) = 1 - e^{-z/z_0}$$

Donde,

$\gamma$ : es el valor característico del peso unitario

$\mu$ : es el valor característico del coeficiente de rozamiento con la pared para el material almacenado deslizando contra la pared vertical

K: es el valor característico del coeficiente de presiones laterales

Z: es la profundidad desde la superficie equivalente del material almacenado (m).

A: es el área de la sección transversal plana del silo (m<sup>2</sup>).

U: es el perímetro interno de la sección transversal plana del silo (m).

El valor característico de la fuerza vertical resultante  $n_{zSk}$  (de compresión) en la pared por unidad de perímetro, a cualquier profundidad z, vendrá dada por:

$$n_{zSk} = \int_0^z p_{wf}(z) dz = \mu \cdot p_{h0} \cdot [z - z_0 \cdot Y_j(z)]$$

Además, se debe considerar una carga concentrada “ $p_{pf}$ ”.

$$p_{pf} = C_{pf} \cdot p_{hf}$$

siendo,

$$C_{pf} = 0,21 \cdot C_{op} \cdot [1 + 2 \cdot E^2] \cdot \left(1 - e^{\{-1,5 \cdot [(h_c/d_c)^{-1}]\}}\right)$$

$$E = 2 \cdot \frac{e_f}{d_c}$$

Donde,

$e_f$  es la excentricidad máxima de la superficie del cono superior durante el llenado (m).

$p_{hf}$  es el valor local de la presión en el llenado a la altura a la que se aplica la carga concentrada. (kN/m<sup>2</sup>).

$C_{op}$  es el coeficiente (de mayoración de cargas) de referencia del sólido para cargas concentradas para el sólido considerado (tabla E.1 del Eurocódigo).

$h_c$  altura del segmento de pared vertical del silo desde la transición hasta la superficie equivalente (m).

$d_c$  dimensión característica de la sección transversal interna del silo (m).

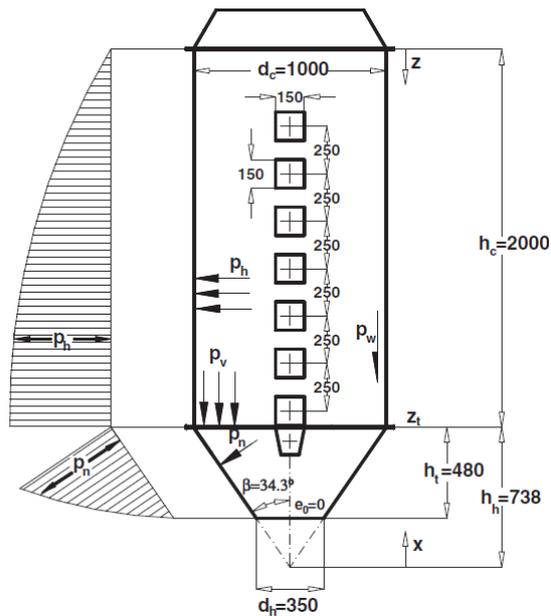


Figura 4: Fuerzas actuantes en el silo. (A Couto. 2012)

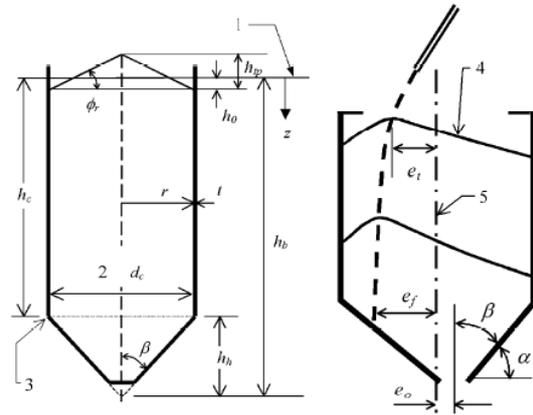


Figura 5: Nomenclatura de Eurocódigo

Si “ $C_{pr}$ ” da valor negativo, se tomará valor “0”. Pero en silos de clase de evaluación de acciones 1 (silos de < 100 toneladas, Eurocódigo 1, parte 4) esta carga puede ignorarse. En la presente tesis doctoral se ha calculado la carga concentrada para poder comparar los valores tanto si se aplica como si no.

Para el caso de la descarga deben usarse incrementos simétricos para representar los posibles incrementos transitorios en la presión que se producen en las paredes de los silos durante el proceso de descarga. Para los silos en todas las clases de evaluación de acciones, se deberían determinar las presiones simétricas de descarga  $p_{he}$  y  $p_{we}$  según:

$$p_{he} = C_h p_{hf}$$

$$p_{we} = C_w p_{wf}$$

donde

$C_h$  es el coeficiente de descarga para la presión horizontal;

$C_w$  es el coeficiente de descarga para la presión de tracción por rozamiento con la pared.

Los coeficientes de descarga  $C_h$  y  $C_w$  se calculan según las siguientes expresiones:

Para los silos en todas las clases de evaluación de acciones que se descargan desde arriba (sin flujo dentro del sólido almacenado) se deberían determinar los valores de  $C_h$  y  $C_w$  según:

$$C_h = C_w = 1,0$$

Para silos esbeltos en las clases de evaluación de acciones 2 y 3, se deberían determinar los coeficientes de descarga según:

$$C_h = C_o = 1,15$$

$$C_w = 1,10$$

donde

$C_o$  es el coeficiente de descarga para todos los sólidos ( $C_o = 1,15$ ).

Para silos esbeltos en la clase de evaluación de acciones 1 en los que se han usado los valores medios de propiedades del material  $K$  y  $\mu$  en el cálculo, se deberían determinar los coeficientes de descarga según:

$$C_h = 1,15 + 1,5 (1 + 0,4 e/d_c) C_{op}$$

$$C_w = 1,4 (1 + 0,4 e/d_c)$$

$$e = \text{máx. } (e_f, e_o)$$

donde

$e_f$  es la excentricidad máxima de la superficie del cono superior durante el llenado;

$e_o$  es la excentricidad del centro de la boca de salida;

$C_{op}$  es el coeficiente de referencia del sólido de la carga concentrada para cada sólido (tabla E.1 del Eurocódigo 1, parte 4).

Debe, además, usarse la carga concentrada en la descarga para representar asimetrías accidentales de cargas durante la descarga, así como las excentricidades en el llenado y descarga. Puede ignorarse la carga concentrada en la descarga para silos en clase de evaluación de acciones 1, como es nuestro caso. En la presente tesis doctoral se analizarán los resultados de las dos alternativas, con y sin carga concentrada.

La carga concentrada,  $p_{pe}$ , se obtiene de la forma siguiente:

$$p_{pe} = C_{pe} \cdot p_{he}$$

para  $h_c/d_c > 1,2$ ,  $C_{pe}$  se obtiene de la expresión:

$$C_{pe} = 0,42 \cdot C_{op} \cdot [1 + 2 \cdot E^2] \cdot \left(1 - e^{\{-1,5 \cdot [(h_c/d_c)^{-1}]\}}\right)$$

$$E = 2e/d_c$$

$e = \text{máx. } (e_f, e_o)$

$e_f$  es la excentricidad máxima de la superficie del cono superior durante el llenado;

$e_o$  es la excentricidad del centro de la boca de salida;

$p_{he}$  es el valor local de la presión de descarga a la altura a la que se aplica la carga concentrada

$C_{op}$  es el coeficiente de referencia del sólido para cargas concentradas para el sólido considerado (tabla E.1 del Eurocódigo 1, parte 4).

El parámetro “K” se define en el Eurocódigo como “la relación entre la presión horizontal media en la pared vertical de un silo y la tensión vertical media en el sólido al mismo nivel”.

K es el valor característico del coeficiente de presiones laterales

$K_m$  es el valor medio del coeficiente de presiones laterales.

Ambos se relacionan mediante las siguientes expresiones:

$$\text{Valor característico superior } K = a_K \cdot K_m$$

$$\text{Valor característico inferior } K = \frac{K_m}{a_K}$$

Donde “ $a_K$ ” es el coeficiente de modificación para el coeficiente de presiones laterales.

Se usará el valor superior para empujes laterales y rozamiento, y el inferior para el caso de presiones verticales.

El Eurocódigo recomienda obtener  $K_m$  mediante ensayos, no obstante, de forma aproximada se puede obtener de la siguiente forma:

$$K_m = 1,1 \cdot (1 - \text{sen } \phi_{im})$$

Donde, “ $\phi_{im}$ ” es el ángulo de rozamiento interno del material almacenado.

En el caso de que no se pueda obtener de otra forma, el Eurocódigo presenta una tabla (tabla E.1 del Eurocódigo 1, parte 4). En dicha tabla no hay valores para pellets de madera, lo más parecido son los “piensos en pellets” con valores de  $K_m = 0,47$  y  $a_K = 1,07$ , o la “remolacha azucarera en pellets” con valores de  $K_m = 0,52$  y  $a_K = 1,15$ .

De la misma forma los valores característicos de “ $\phi_{im}$ ” son:

Valor característico superior  $\phi_i = a_\phi \cdot \phi_{im}$

Valor característico inferior  $\phi_i = \frac{\phi_{im}}{a_\phi}$

Donde “ $a_\phi$ ” es el coeficiente de modificación del ángulo de rozamiento interno.

El Eurocódigo también recomienda obtener “ $\phi_{im}$ ” mediante ensayos, pero en el caso de que no se pueda obtener de otra forma, el Eurocódigo presenta también valores en la misma tabla (tabla E.1 del Eurocódigo 1, parte 4). En dicha tabla no hay valores para pellets de madera, lo más parecido son los “piensos en pellets” con valores de  $\phi_m = 35$  y  $a_\phi = 1,06$ , o la “remolacha azucarera en pellets” con valores de  $\phi_m = 31$  y  $a_\phi = 1,16$ .

De la misma forma recomienda obtener experimentalmente el coeficiente de rozamiento con la pared “ $\mu$ ”. En el caso de que no se pueda obtener de otra forma, el Eurocódigo presenta también valores en la misma tabla (tabla E.1 del Eurocódigo 1, parte 4). En dicha tabla no hay valores para pellets de madera, lo más parecido son los “piensos en pellets” con valores de  $\mu = 0,23$  para paredes tipo D1 (deslizantes) y  $\mu = 0,28$  para paredes tipo D2 (lisas) y la “remolacha azucarera en pellets” con valores de  $\mu = 0,35$  para paredes tipo D1 (deslizantes) y  $\mu = 0,44$  para paredes tipo D2 (lisas). Al estar construido el silo con acero inoxidable pulido se han considerado los valores de una pared tipo D1. No obstante, se compararán los valores obtenidos tanto con los valores de paredes D1 como los de paredes D2.

En los silos en clase de evaluación de acciones 1 se pueden usar el valor medio del coeficiente de rozamiento con la pared “ $\mu$ ”, el valor medio de coeficiente de presiones laterales “ $K_m$ ” y el valor medio del ángulo de rozamiento interno “ $\phi_{im}$ ” del material almacenado.

Para calcular la altura de la superficie equivalente es necesario conocer el ángulo de talud natural “ $\phi_r$ ”, este puede obtenerse experimentalmente, en caso contrario se puede usar la misma tabla, en ella no hay valores para pellets de madera, lo más parecido son los “piensos en pellets” con  $\phi_r = 37$  y la “remolacha azucarera en pellets” con  $\phi_r = 36$ . Dado que no hay valores experimentales en la bibliografía se toma el valor del material más parecido, es decir, el de la “remolacha azucarera en pellets”.

Debido a la falta de materiales similares en el Eurocódigo, para realizar los cálculos con dicha norma, se decidió obtener los valores obtenidos usando el mismo material que el utilizado en la presente tesis (pellets de la misma procedencia), y cuyos valores se recogen en el artículo publicado por Moya, Sánchez y Villar-García (Moya 2022).

En dicho trabajo el ángulo de rozamiento interno de la masa de pellets y la cohesión aparente fueron determinadas mediante dos ensayos, el ensayo de corte directo y el ensayo triaxial. En las tablas 1 y 2 se muestran los resultados:

Material	Ángulo de rozamiento interno ( $\varphi$ )	Cohesión aparente (C, kPa)
Pellets de madera	40,7 ± 1,2	23,02 ± 27,89

Tabla 1: Valor medio ± desviación estándar del ángulo de rozamiento interno y la cohesión aparente de los pellets de madera obtenidos en el ensayo de corte directo (Moya 2022).

Deformación axial	Ángulo de rozamiento interno ( $\varphi$ )		Cohesión aparente (C, kPa)	
	10%	20%	10%	20%
Pellets de madera	50,5 ± 2,1	54,6 ± 0,3	-22,73 ± 1,66	-28,68 ± 20,66

Tabla 2: Valor ± desviación estándar del ángulo de rozamiento interno y la cohesión aparente de los pellets de madera obtenidos en el ensayo triaxial (Moya 2022).

Para los cálculos con el Eurocódigo se decidió adoptar los valores del ensayo de corte directo por estar de lado de la seguridad en la determinación de los empujes perpendiculares a la pared (si los valores son menores, el empuje horizontal aumenta) y ser el valor más similar a otros autores (Wu 2011).

El valor del coeficiente de rozamiento con la pared obtenido en dicho trabajo fue de 0,52 con una desviación estándar de ± 0,06.

El valor característico del coeficiente de presiones laterales (K) no se presenta en dicho artículo, ni existen valores en la bibliografía, por lo que se ha tomado el más parecido encontrado en el Eurocódigo, que es el de “piensos en pellets” con valores de  $K_m = 0,47$  y  $a_K = 1,07$ .

La densidad aparente se determinó para esta tesis doctoral, como se indicó en el capítulo de “material ensayado”, compactando, según la norma UNE-EN ISO 17828:2016. El valor obtenido fue de 7,06 kg/ m<sup>3</sup> con una desviación estándar de 0,02 kg/m<sup>3</sup>.

Según el Eurocódigo, a partir de datos experimentales se obtienen los valores característicos de la siguiente forma:

$$\text{Valor característico superior} = X_{0,90} = \bar{x} \cdot (1 + 1,28 \cdot \delta)$$

$$\text{Valor característico inferior} = X_{0,10} = \bar{x} \cdot (1 - 1,28 \cdot \delta)$$

Donde,  $\bar{x}$  es el valor medio de la propiedad y  $\delta$  el coeficiente de variación.

Para los valores tomados directamente del Eurocódigo, como es el caso de K, los valores característicos se obtienen de la siguiente forma:

$$\text{Valor característico superior} = K = K_m \cdot a_K$$

$$\text{Valor característico inferior} = K = \frac{K_m}{a_K}$$

Por tanto, los valores usados para los cálculos son los siguientes:

Parámetro	Coef. de variación	$a_K$	Valor superior	Valor inferior
Coef. de presiones laterales "K"		1,07	0,50	0,44
Ángulo de rozamiento interno " $\phi_i$ " (°)	0,0295		42,24	39,16
Coef. de rozamiento con la pared " $\mu$ "	0,1154		0,60	0,44
Ángulo de talud natural " $\phi_r$ " (°)		*	36	36
Densidad aparente " $\gamma$ " (kN/m <sup>3</sup> )	0,0028		7,09	7,03

Tabla 3: Valores de los parámetros usados en la presente tesis doctoral

\* No se da este valor en el Eurocódigo

Para estar del lado de la seguridad, los valores (superior o inferior) usados para el cálculo de empujes son:

Parámetro	Límite	Valor
Coeficiente de presiones laterales "K"	Superior	0,50
Ángulo de rozamiento interno " $\phi_i$ " (°)	Inferior	39,16
Coeficiente de rozamiento con la pared " $\mu$ "	Inferior	0,44
Ángulo de talud natural " $\phi_r$ " (°)	Valor único	36
Densidad aparente " $\gamma$ " (kN/m <sup>3</sup> )	Superior	7,09

Tabla 4: Valores de los parámetros usados para el cálculo de empujes

### **8.5. Determinación de los parámetros mecánicos de cada partícula (pellet)**

Los valores de los parámetros mecánicos de los pellets de madera se han determinado considerando la relación entre partículas individuales (partícula-partícula), estos datos han sido tomados del trabajo realizado en la Universidad Politécnica de Madrid, en el que el autor de la presente tesis doctoral ha participado y, que se corresponde con el artículo publicado en la dirección: <https://doi.org/10.31545/intagr/130634>.

## **9. Resultados**

### **9.1. Comparación con resultados de otros ensayos**

Los ensayos realizados con pellets se han comparado con otro ensayo realizado en silos instrumentados utilizando otros materiales, con objeto de obtener una mejor interpretación de los resultados y analizar la influencia en la magnitud y distribución de los empujes al utilizar un grano en forma de pellet.

Para ello se ha utilizado el ensayo, el realizado en el mismo silo que el utilizado para los pellets, pero usando trigo (Couto 2013)

### **9.2. Resultados del ensayo con pellets. Gráficas de los empujes**

A continuación, se muestran los resultados de los cinco ensayos realizados en el silo de la Universidad de León, en concreto los empujes perpendiculares a la pared durante el llenado y la descarga, la presión máxima vertical en la transición, las tensiones verticales en la pared del cilindro, la constante K y el coeficiente de rozamiento con la pared ( $\mu_m$ ).

### 9.2.1. Resultados del primer ensayo

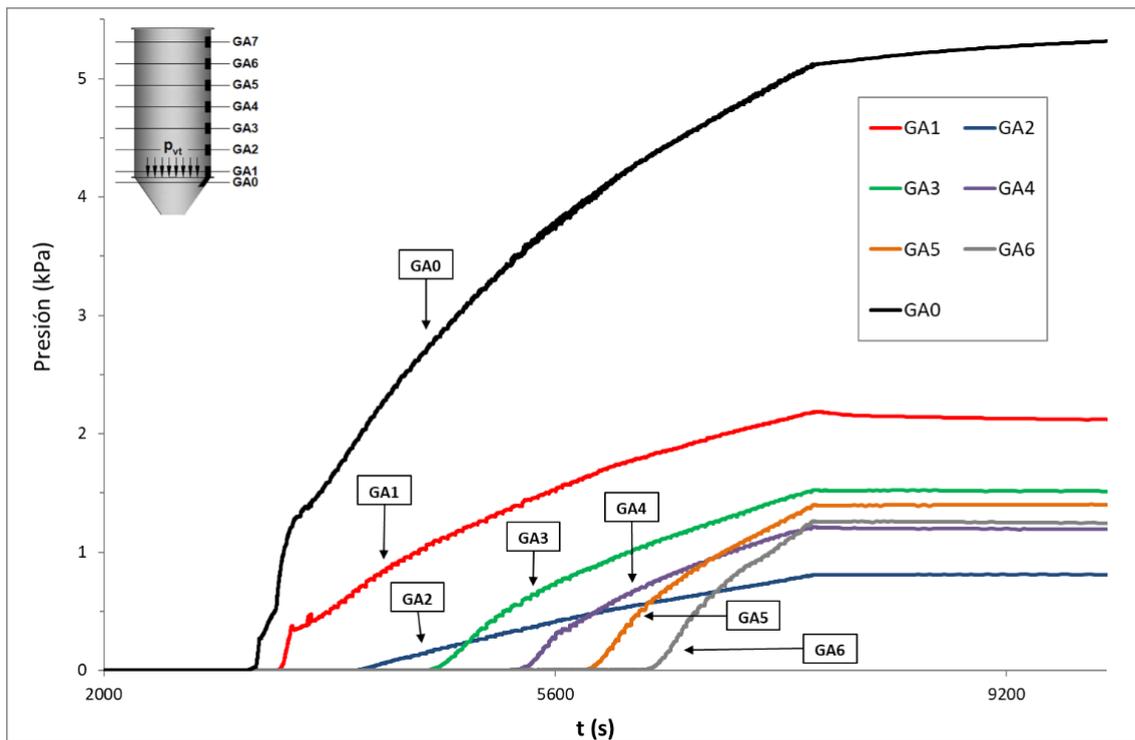


Gráfico 2: Empujes perpendiculares a la pared durante la fase de llenado en el ensayo 1º.

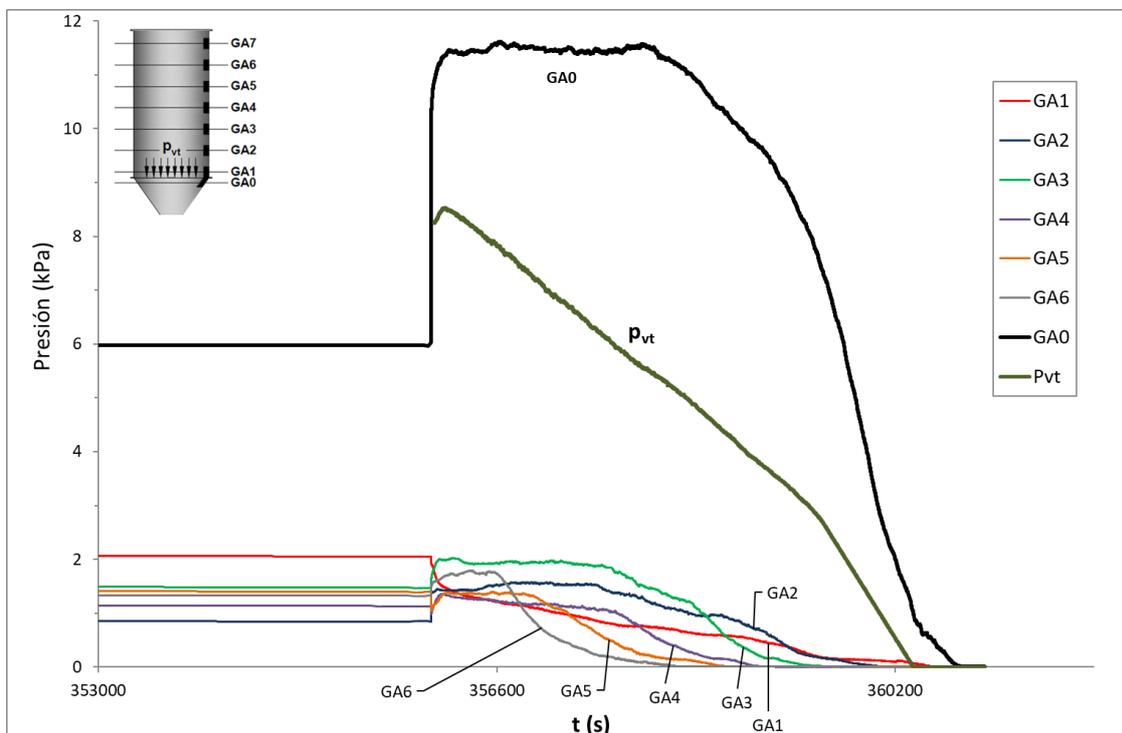


Gráfico 3: Empujes perpendiculares a la pared al final de la fase estática y durante la fase de descarga en el ensayo 1º.

E1	t (s)	P <sub>hGA7</sub>	P <sub>hGA6</sub>	P <sub>hGA5</sub>	P <sub>hGA4</sub>	P <sub>hGA3</sub>	P <sub>hGA2</sub>	P <sub>hGA1</sub>	P <sub>hGA0</sub>	n <sub>zsk</sub>	p <sub>vt,t</sub>	p <sub>w,t</sub>
Llenado (máx.)	7671	0,29	1,26	1,4	1,21	1,52	0,81	2,18	5,12	1,3	9	0,7
Estático (máx.)	348364	0,24	1,59	1,44	1,21	1,84	1,4	2,18	10,9	1,5	9,7	0,8
Estático (min)	348364	0,19	1,24	1,04	0,98	1,45	0,8	1,77	5,12	1,1	8,1	0,6
Descarga (máx.)	4978,8	0,19	1,8	1,4	1,36	2,03	1,58	1,76	11,6	1,5	8,5	0,8

Tabla 7: Valores extremos registrados en el ensayo 1º.

Donde, en la tabla 7:

- $P_{hGAi}$ : Presión horizontal máxima en la célula de carga “i” (kN/m<sup>2</sup>).
- $n_{zsk}$ : Valor máximo de la tensión vertical de compresión por unidad de longitud del perímetro del silo (kN/m).
- $p_{vt}$ : Valor máximo del empuje vertical en la transición cilindro-tolva (kN/m<sup>2</sup>).
- $p_w$ : Valor máximo de la fuerza por unidad de superficie de la pared del cilindro (kN/m<sup>2</sup>).

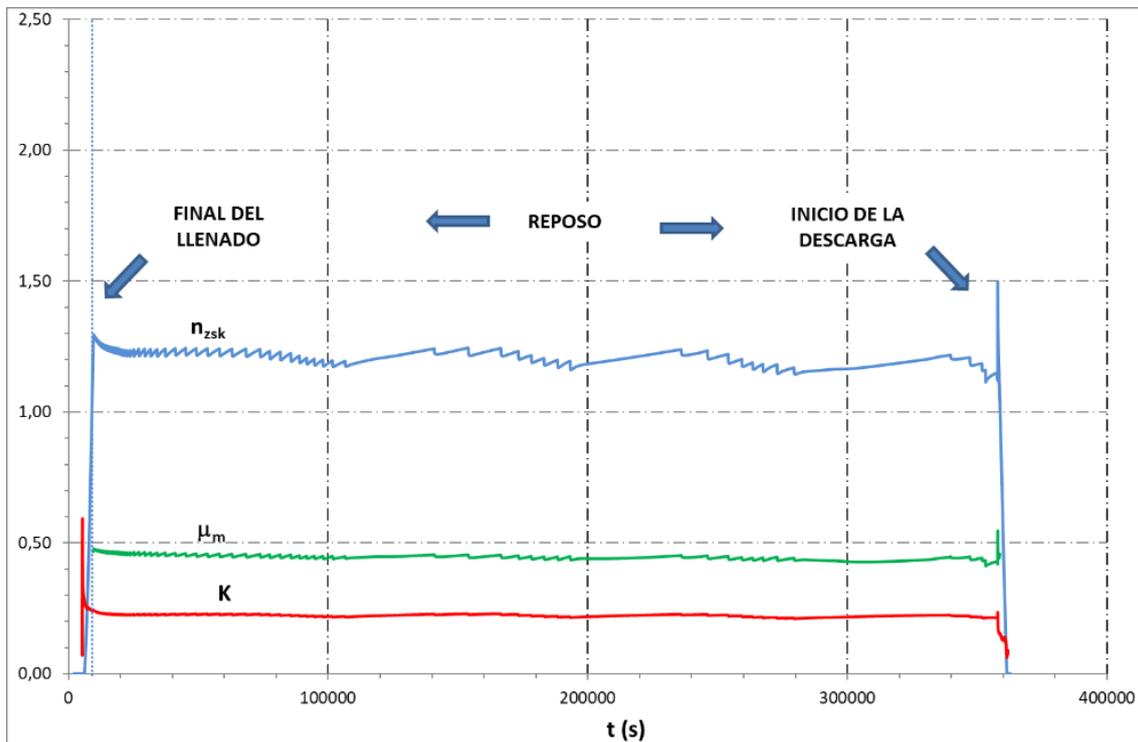


Gráfico 4: Valores de la constante “K”, el coeficiente de rozamiento con la pared ( $\mu_m$ ) y de la tensión vertical de compresión por unidad de longitud del perímetro del silo ( $n_{zsk}$  en kN/m<sup>2</sup>) del ensayo 1º.

A continuación, se muestran los valores que se han considerado de “K” y del coeficiente de rozamiento ( $\mu_m$ ), se han descartado los valores extremos observados durante

el llenado y el vaciado que se corresponden con fenómenos puntuales en los que la relación entre empujes horizontales y verticales varía no solo debido a “K”, sino a otros fenómenos sobre los que actualmente todavía se está trabajando en la línea de investigación y que, por tanto no se explican aún en la presente tesis doctoral.

E1	t (s)	K	$\mu_m$
Llenado (máx.)	7671	0,59	0,47
Estático (máx.)	348364	0,24	0,55
Estático (min)	348364	0,21	0,41
Descarga (máx.)	4978,8	0,21	0,51

Tabla 8: Valores considerados de “K” y del coeficiente de rozamiento ( $\mu_m$ ) para el ensayo 1º.

### 9.2.2.Resultado del segundo ensayo

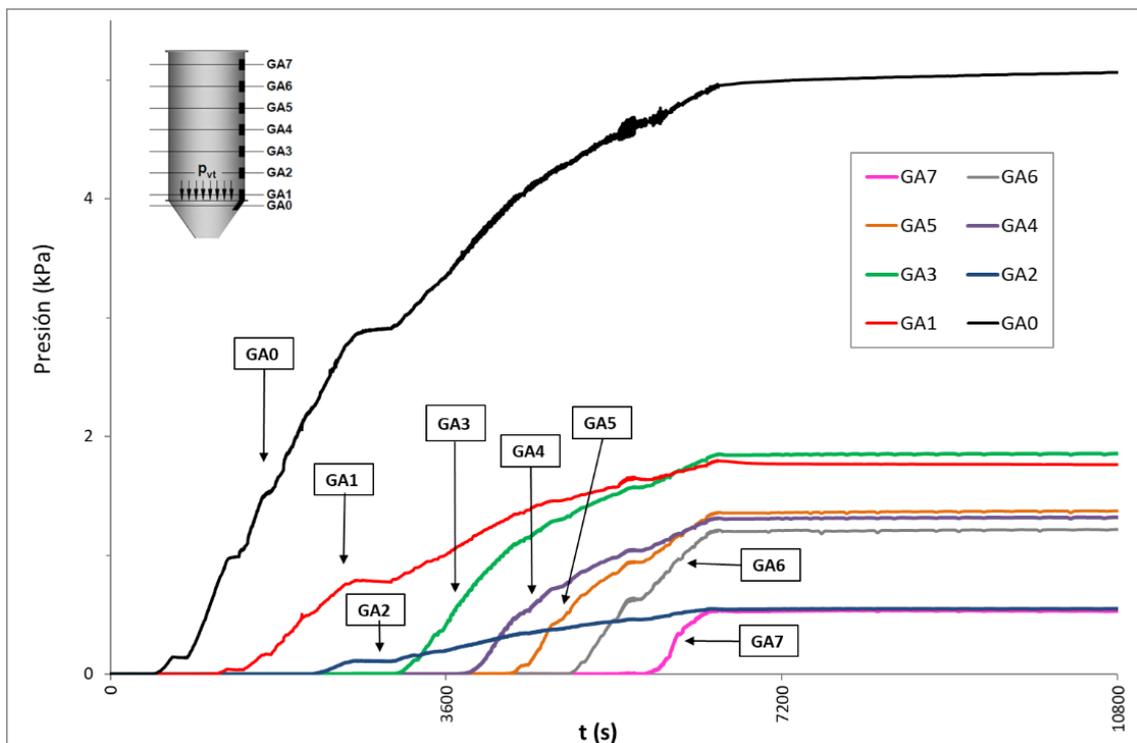


Gráfico 5: Empujes perpendiculares a la pared durante la fase de llenado en el ensayo 2º

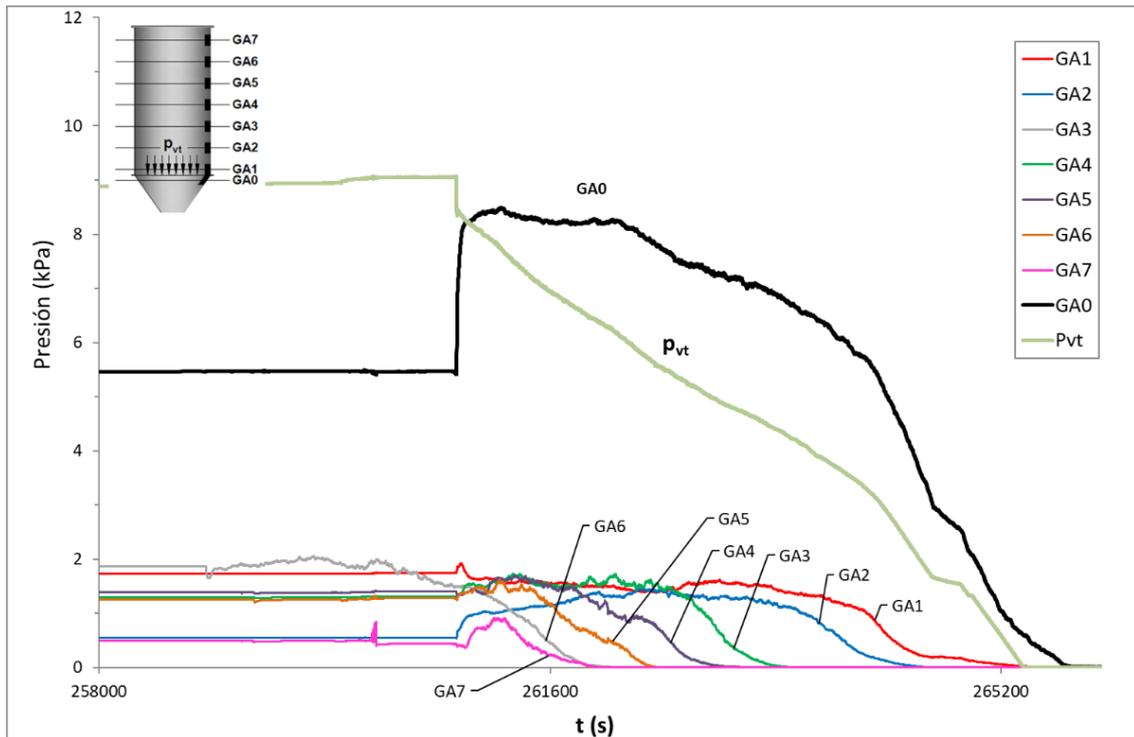


Gráfico 6: Empujes perpendiculares a la pared al final de la fase estática y durante la fase de descarga en el ensayo 2º.

E2	t (s)	$P_{hGA7}$	$P_{hGA6}$	$P_{hGA5}$	$P_{hGA4}$	$P_{hGA3}$	$P_{hGA2}$	$P_{hGA1}$	$P_{hGA0}$	$n_{zSk}$	$p_{vt,t}$	$p_{w,t}$
Llenado (máx.)	6385	0,54	1,19	1,34	1,3	1,82	0,55	1,77	4,93	1,4	8,7	0,7
Estático (máx.)	253458	0,54	1,26	1,39	1,32	1,87	0,55	1,8	5,49	1,4	9	0,7
Estático (min)	253458	0,46	1,18	1,34	1,27	1,82	0,54	1,72	4,91	1,3	8,6	0,7
Descarga (máx.)	6201,5	0,92	1,62	1,71	1,73	2,06	1,47	1,92	8,49	1,5	9,1	0,9

Tabla 9: Valores extremos registrados en el ensayo 2º.

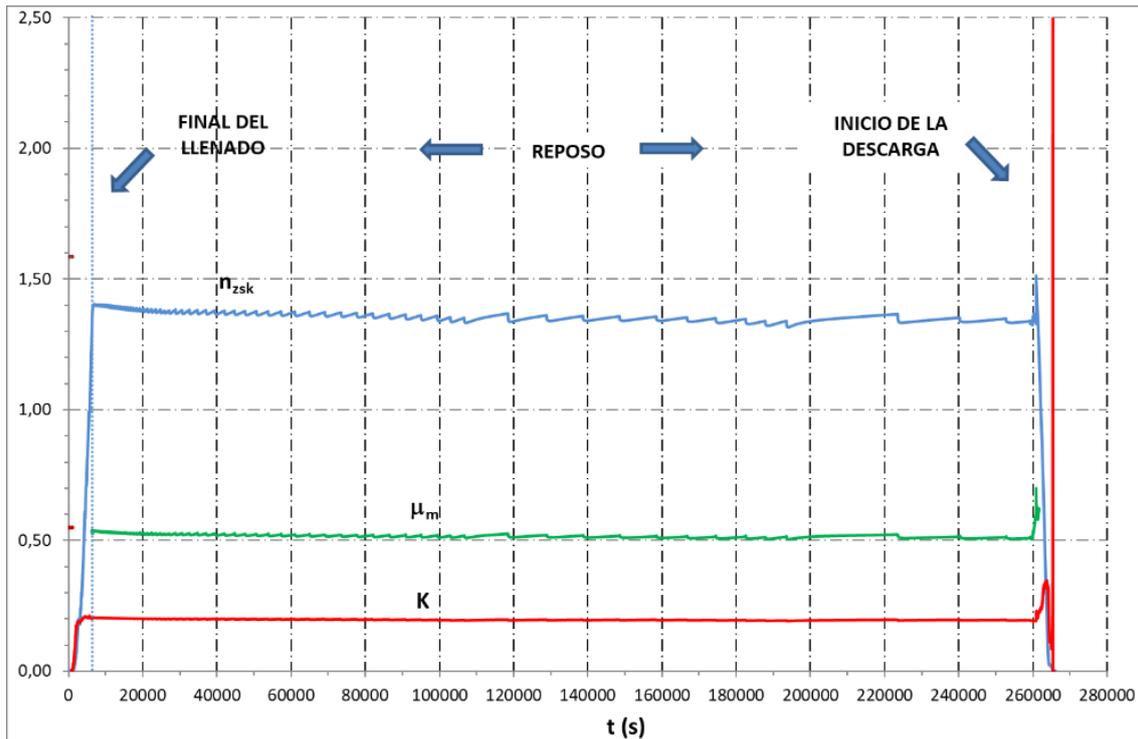


Gráfico 7: Valores de la constante “K”, el coeficiente de rozamiento con la pared ( $\mu_m$ ) y de la tensión vertical de compresión por unidad de longitud del perímetro del silo ( $n_{zsk}$  en  $kN/m^2$ ) del ensayo 2º.

E2	t (s)	K	$\mu_m$
Llenado (máx.)	6385,0	0,21	0,54
Estático (máx.)	253458,0	0,21	0,54
Estático (min)	253458,0	0,19	0,50
Descarga (máx.)	6201,5	0,34	0,70

Tabla 10: Valores de “K” y  $\mu_m$  para los diferentes estados en el ensayo 2º.

### 9.2.3. Resultados del tercer ensayo

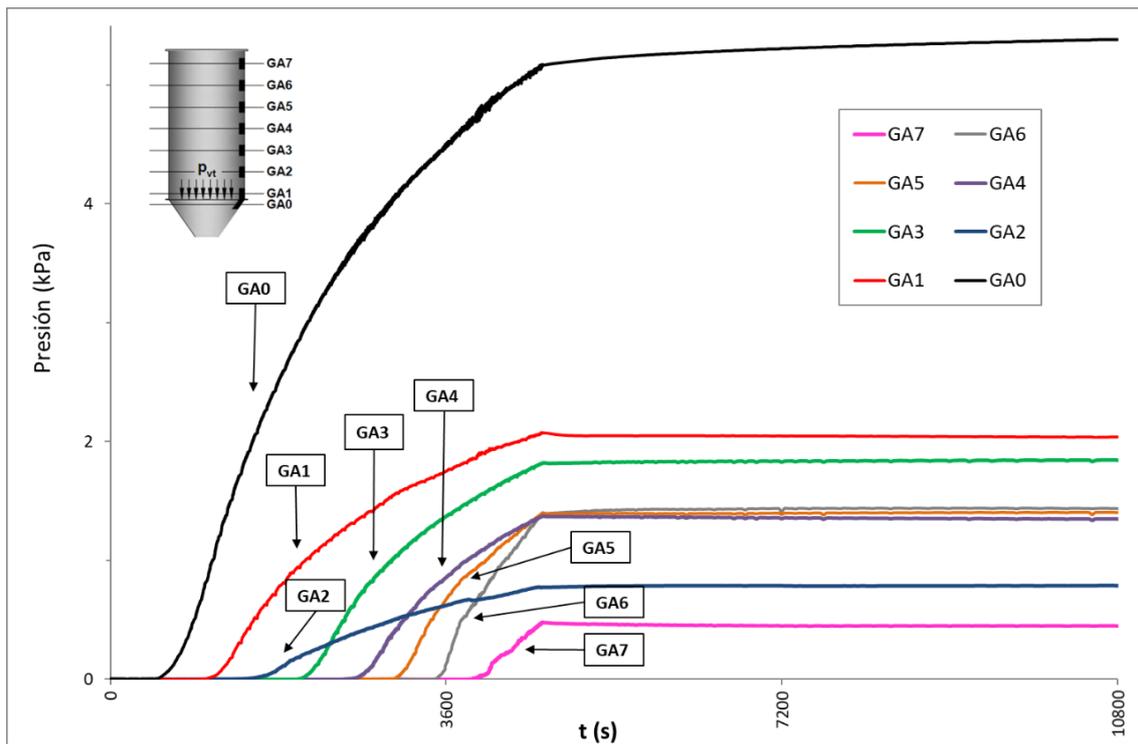


Gráfico 8: Empujes perpendiculares a la pared durante la fase de llenado en el ensayo 3º.

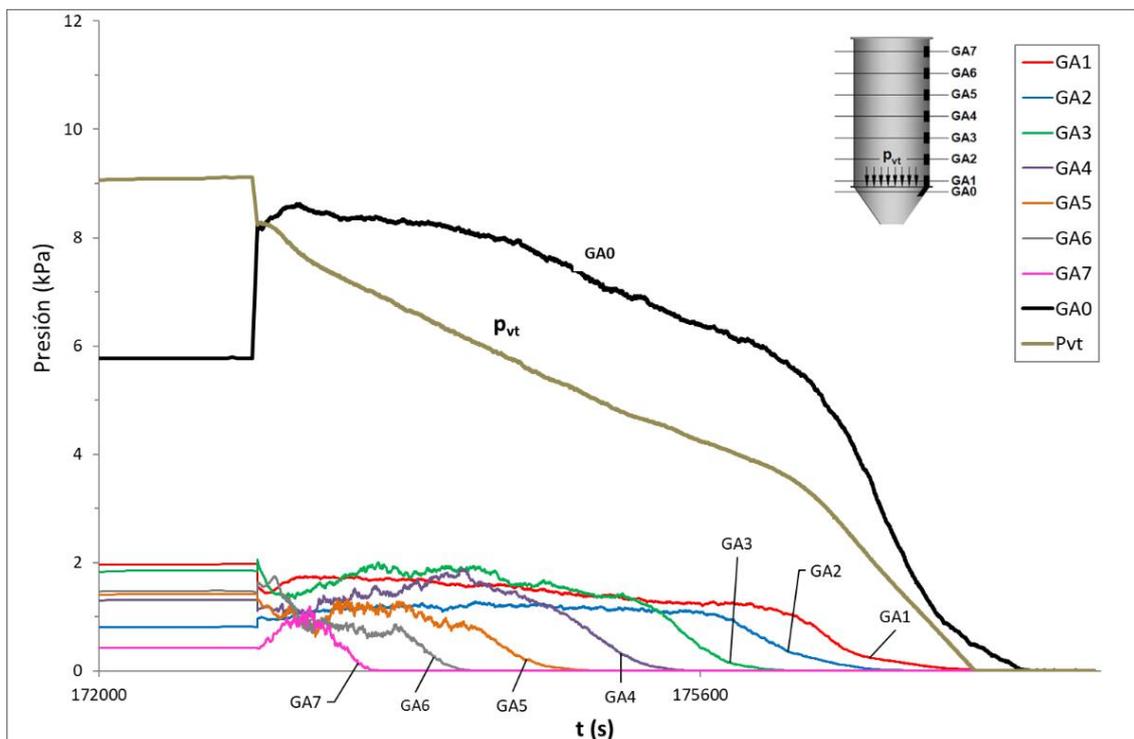


Gráfico 9: Empujes perpendiculares a la pared al final de la fase estática y durante la fase de descarga en el ensayo 3º.

E3	t (s)	P <sub>hGA7</sub>	P <sub>hGA6</sub>	P <sub>hGA5</sub>	P <sub>hGA4</sub>	P <sub>hGA3</sub>	P <sub>hGA2</sub>	P <sub>hGA1</sub>	P <sub>hGA0</sub>	n <sub>zsk</sub>	p <sub>vt,t</sub>	p <sub>w,t</sub>
Llenado (máx.)	4469,5	0,44	1,34	1,36	1,35	1,8	0,77	2,06	5,14	1,4	8,7	0,7
Estático (máx.)	167747	0,48	1,48	1,42	1,37	1,86	0,81	2,08	5,77	1,5	9,1	0,8
Estático (min)	167747	0,42	1,34	1,36	1,29	1,8	0,77	1,97	5,12	1,4	8,7	0,7
Descarga (máx.)	5614	1,19	1,75	1,42	1,89	2,06	1,28	1,97	8,62	1,6	9,1	0,9

Tabla 11: Valores extremos registrados en el ensayo 3º.

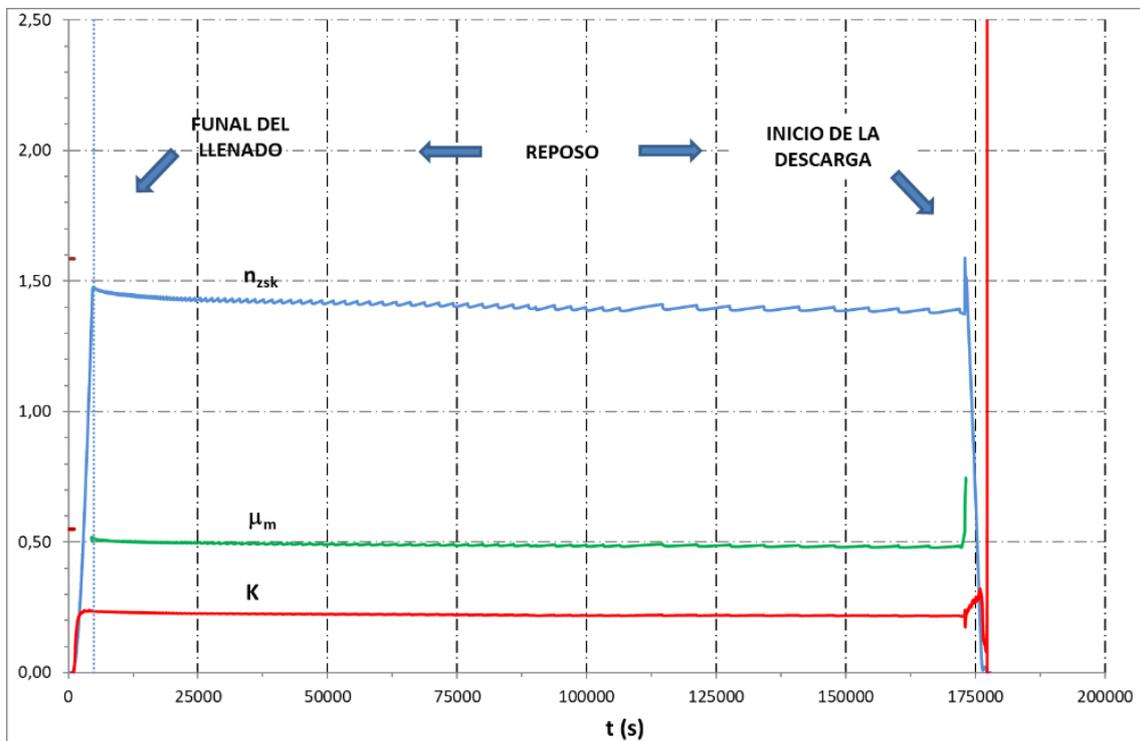


Gráfico 10: Valores de la constante "K", el coeficiente de rozamiento con la pared ( $\mu_m$ ) y de la tensión vertical de compresión por unidad de longitud del perímetro del silo ( $n_{zsk}$  en  $kN/m^2$ ) del ensayo 3º.

E3	t (s)	K	$\mu_m$
Llenado (máx.)	4469,5	0,24	0,52
Estático (máx.)	167746,5	0,24	0,52
Estático (min)	167746,5	0,22	0,48
Descarga (máx.)	5614,0	0,38	0,75

Tabla 12: Valores de "K" y  $\mu_m$  para los diferentes estados en el ensayo 3º.

### 9.2.4. Resultados del cuarto ensayo

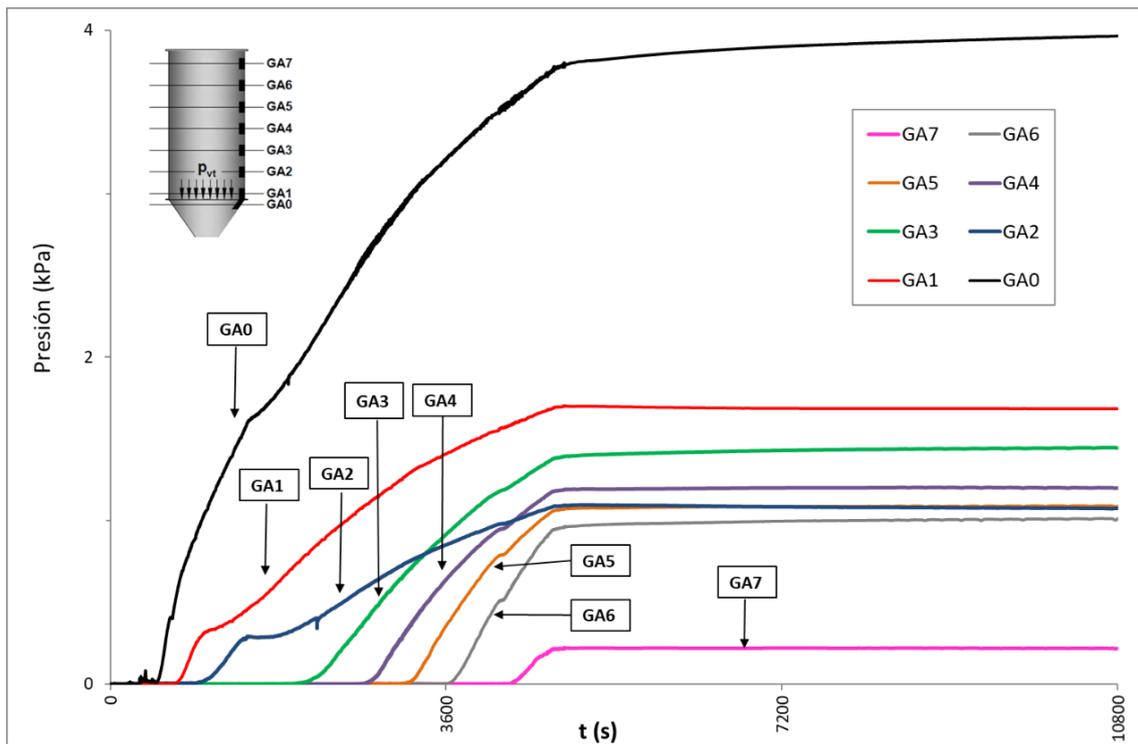


Gráfico 11: Empujes perpendiculares a la pared durante la fase de llenado en el ensayo 4º.

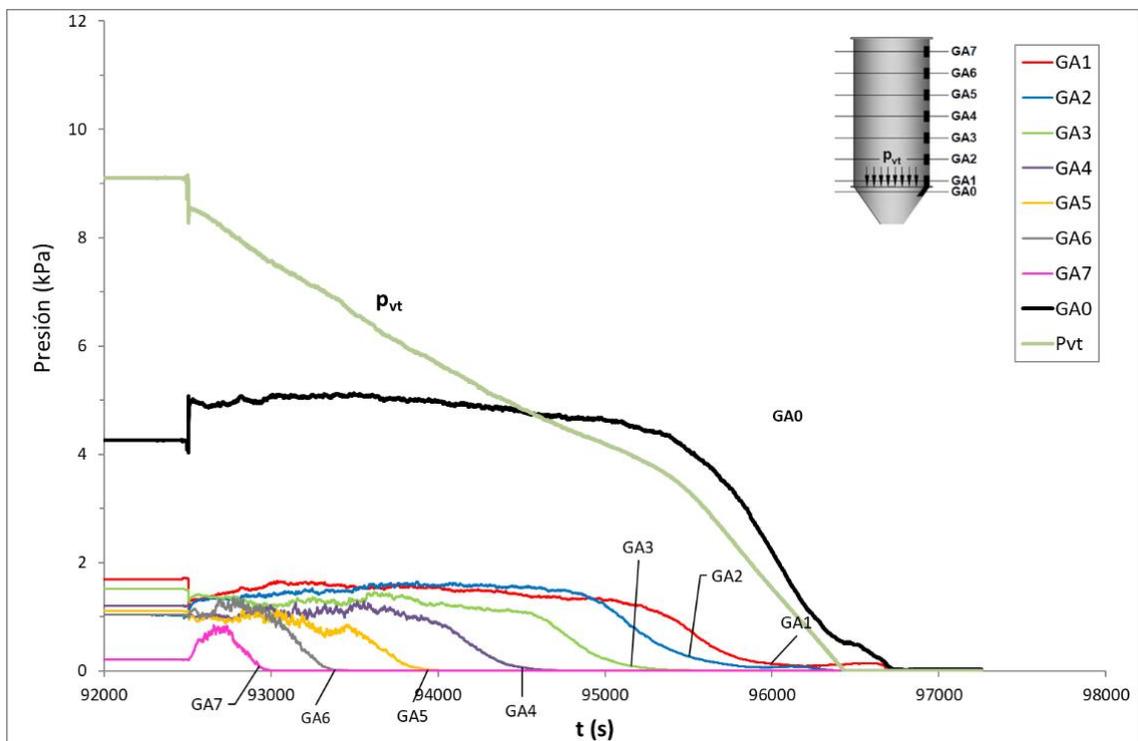


Gráfico 12: Empujes perpendiculares a la pared al final de la fase estática y durante la fase de descarga en el ensayo 4º.

E4	t (s)	P <sub>hGA7</sub>	P <sub>hGA6</sub>	P <sub>hGA5</sub>	P <sub>hGA4</sub>	P <sub>hGA3</sub>	P <sub>hGA2</sub>	P <sub>hGA1</sub>	P <sub>hGA0</sub>	n <sub>zsk</sub>	p <sub>vt,t</sub>	p <sub>w,t</sub>
Llenado (máx.)	4698,5	0,22	0,96	1,07	1,19	1,39	1,09	1,7	3,8	1,4	8,6	0,8
Estático (máx.)	87603	0,22	1,04	1,12	1,22	1,52	1,1	1,72	4,27	1,4	9,1	0,7
Estático (min)	87603	0,2	0,96	1,07	1,19	1,39	0,97	1,68	3,79	1,3	8,6	0,7
Descarga (máx.)	4659,5	0,85	1,35	1,16	1,28	1,51	1,65	1,72	5,13	1,5	9,2	0,8

Tabla 13: Valores extremos registrados en el ensayo 4º.

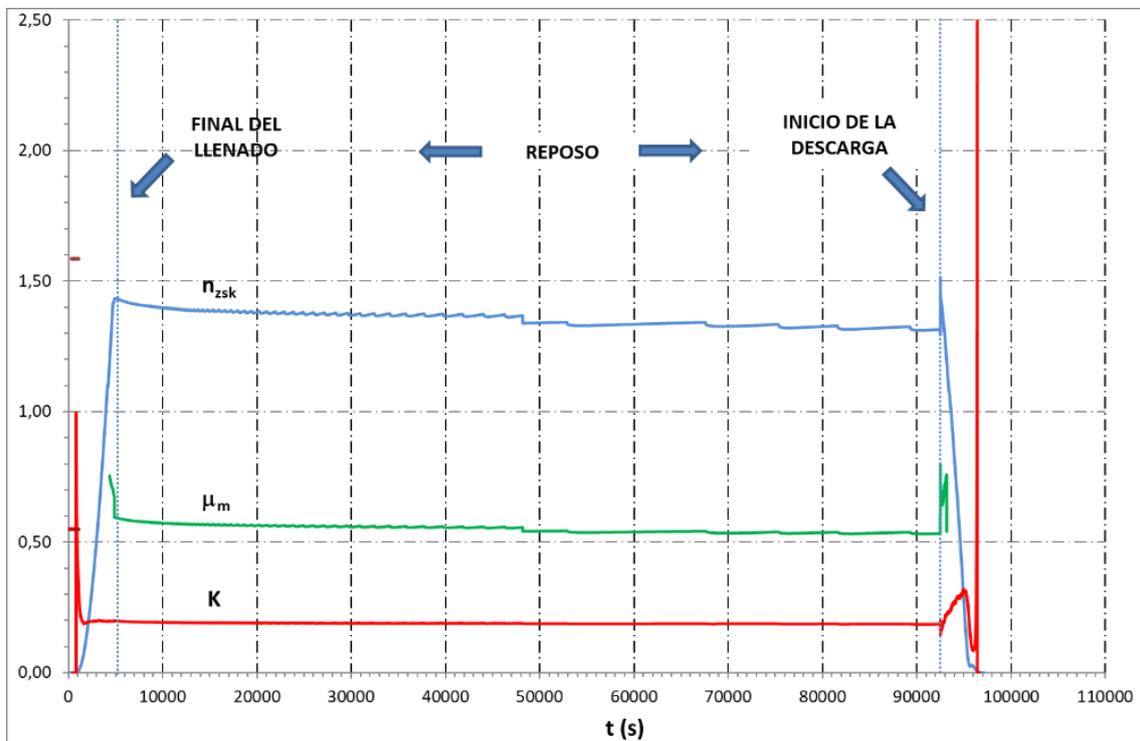


Gráfico 13: Valores de la constante "K", el coeficiente de rozamiento con la pared ( $\mu_m$ ) y de la tensión vertical de compresión por unidad de longitud del perímetro del silo ( $n_{zsk}$  en  $kN/m^2$ ) del ensayo 4º.

E4	t (s)	K	$\mu_m$
Llenado (máx.)	4698,5	1,00	0,75
Estático (máx.)	87602,5	0,20	0,61
Estático (min)	87602,5	0,19	0,53
Descarga (máx.)	4659,5	0,32	0,80

Tabla 14: Valores de "K" y  $\mu_m$  para los diferentes estados en el ensayo 4º.

### 9.2.5. Resultados del quinto ensayo

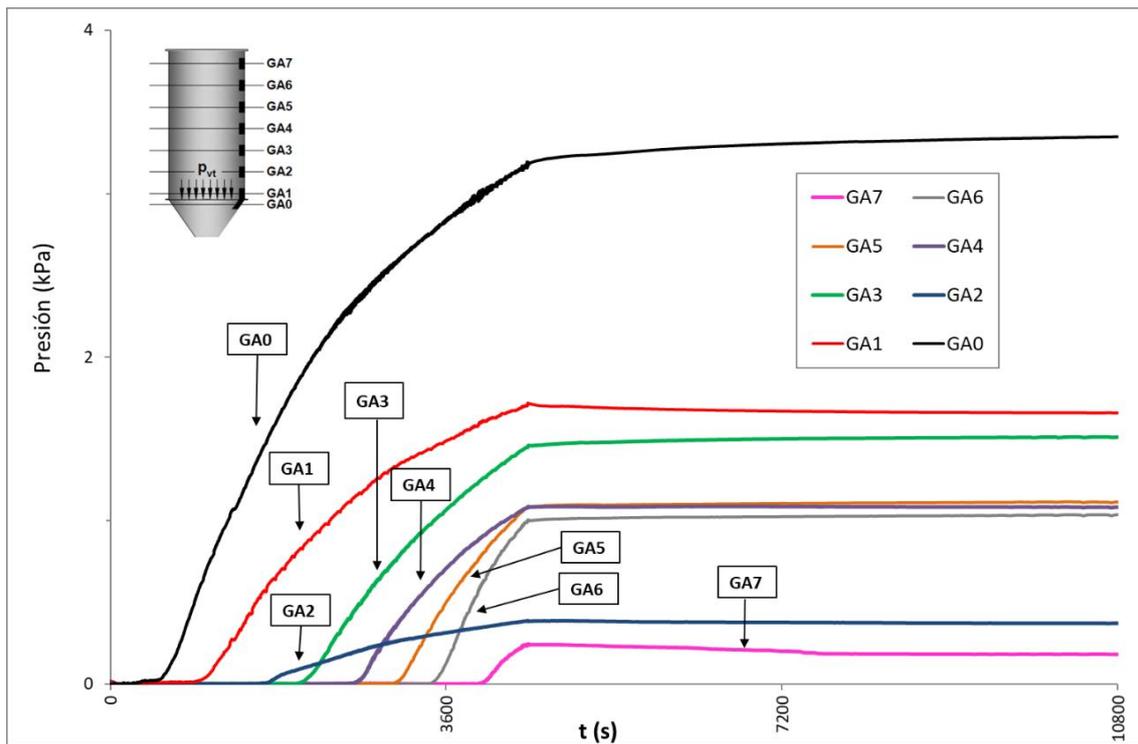


Gráfico 14: Empujes perpendiculares a la pared durante la fase de llenado en el ensayo 5º.

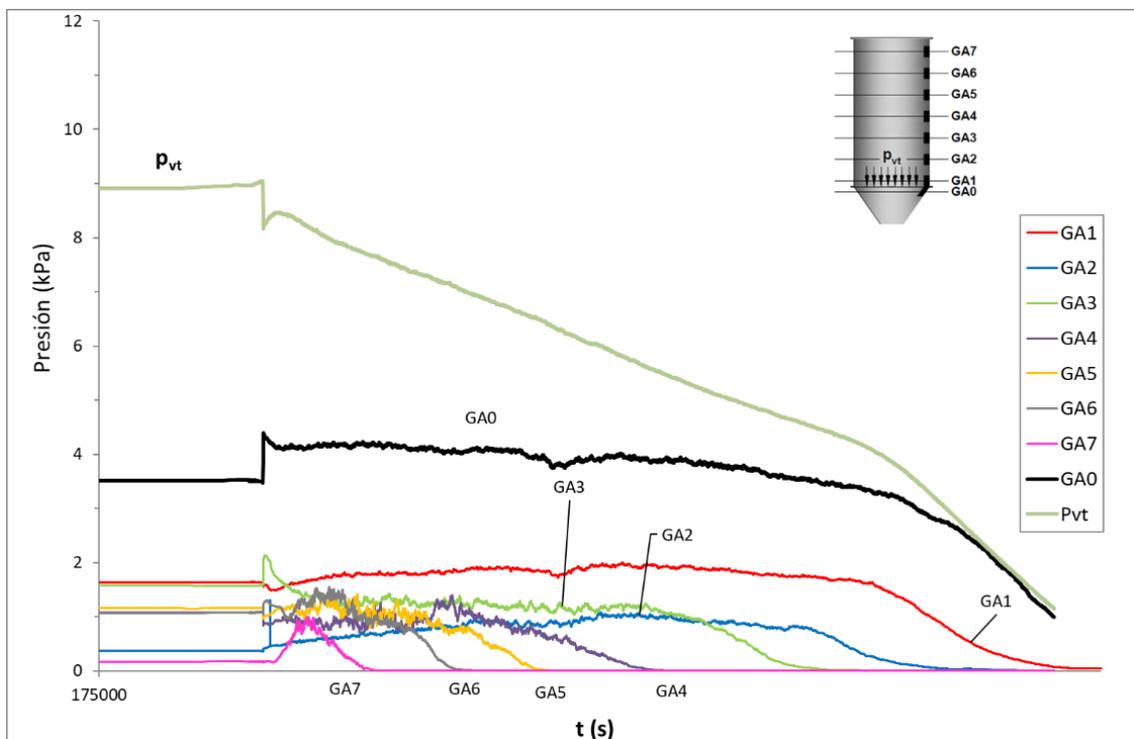


Gráfico 15: Empujes perpendiculares a la pared al final de la fase estática y durante la fase de descarga en el ensayo 5º.

E5	t (s)	P <sub>hGA7</sub>	P <sub>hGA6</sub>	P <sub>hGA5</sub>	P <sub>hGA4</sub>	P <sub>hGA3</sub>	P <sub>hGA2</sub>	P <sub>hGA1</sub>	P <sub>hGA0</sub>	n <sub>zsk</sub>	p <sub>vt,t</sub>	p <sub>w,t</sub>
Llenado (máx.)	12054	0,24	1,04	1,12	1,09	1,51	0,39	1,72	3,36	1,4	8,7	2,2
Estático (máx.)	163602	0,18	1,28	1,17	1,1	2,14	0,42	1,66	4,39	1,6	9,1	0,8
Estático (min)	163602	0,16	1,03	0,96	0,84	1,51	0,32	1,55	3,36	1,3	8,2	0,7
Descarga (máx.)	4345	1	1,55	1,43	1,41	2,13	1,31	153	4,31	1,5	8,5	0,8

Tabla 15: Valores extremos registrados en el ensayo 5º.

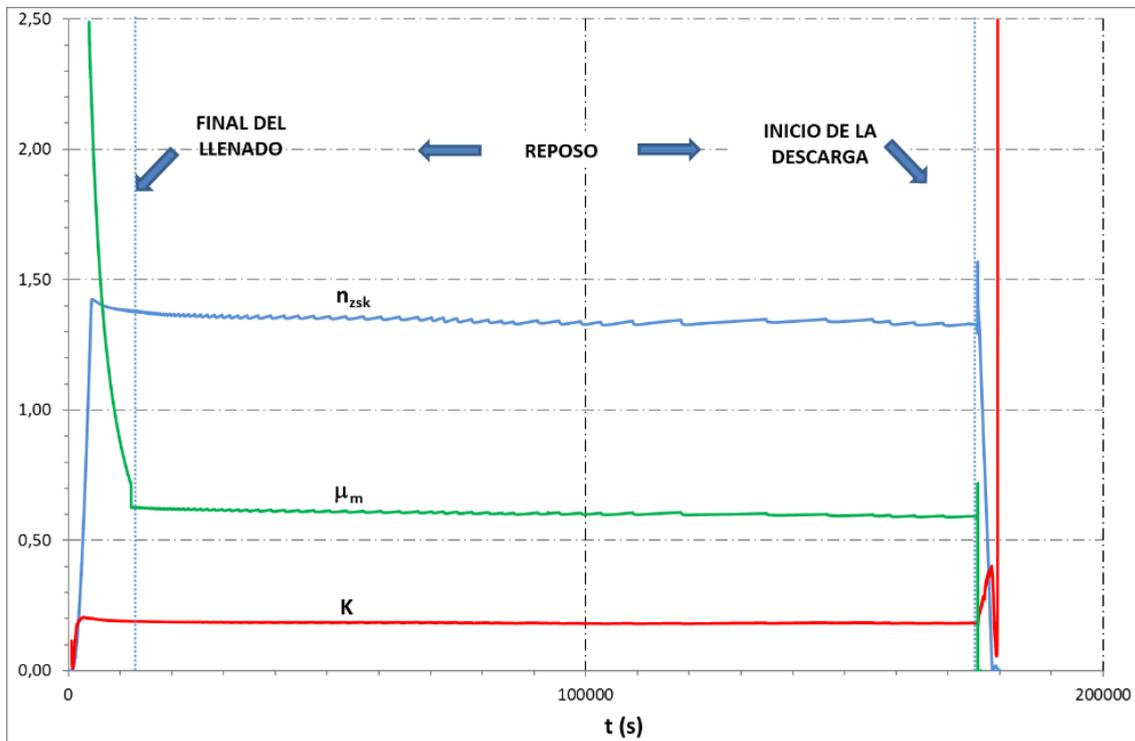


Gráfico 16: Valores de la constante “K”, el coeficiente de rozamiento con la pared ( $\mu_m$ ) y de la tensión vertical de compresión por unidad de longitud del perímetro del silo ( $n_{zsk}$  en  $kN/m^2$ ) del ensayo 5º.

E5	t (s)	K	$\mu_m$
Llenado (máx.)	12054,0	0,21	2,49
Estático (máx.)	163601,5	0,19	0,72
Estático (min)	163601,5	0,18	0,58
Descarga (máx.)	4345,0	0,38	0,63

Tabla 16: Valores de “K” y  $\mu_m$  para los diferentes estados en el ensayo 5º.

### 9.3. Parámetros de los ensayos de laboratorio a nivel de partícula

Los resultados son los obtenidos en el trabajo realizado en la Universidad Politécnica de Madrid, en el que se ha participado dentro de los trabajos realizados en la presente tesis doctoral y que se corresponde con el artículo publicado en la dirección: <https://doi.org/10.31545/intagr/130634>.

## 10. Discusión de los resultados

### 10.1. Discusión de los resultados

#### 10.1.1. Comparación de empujes con otros materiales y con Eurocódigo

En el gráfico nº 23 se muestran los valores de los empujes perpendiculares a la pared máximos en el llenado del silo y en la fase de reposo antes de la descarga, obtenidos en los ensayos y con el Eurocódigo 1, parte 4, en este último los valores adoptados para el cálculo y explicados en metodología son los siguientes:

Propiedad	Valor
Coefficiente de presiones laterales "K"	0,50
Ángulo de rozamiento interno " $\phi_i$ " (°)	39,16
Coefficiente de rozamiento con la pared " $\mu$ "	0,44
Densidad aparente " $\gamma$ " (kN/m <sup>3</sup> )	7,09

Tabla 4: Valores de los parámetros usados para el cálculo de empujes

Como se puede observar los valores del Eurocódigo son ligeramente superiores a los de los ensayos, pero próximos a ellos, solamente un ensayo (ensayo 1) da un valor superior por debajo de la transición (unión de la pared vertical y la tova). En el sensor GA2 la diferencia es mayor debido a que las fórmulas del Eurocódigo no detectan el descenso de empujes que en los ensayos se produce por encima de la transición. Este descenso de presiones ya se ha observado para otros materiales en diferentes ensayos (Ruiz 2012). Por tanto, el cálculo con el Eurocódigo y los valores usados parece adecuado para usarlo en el dimensionamiento de los silos.

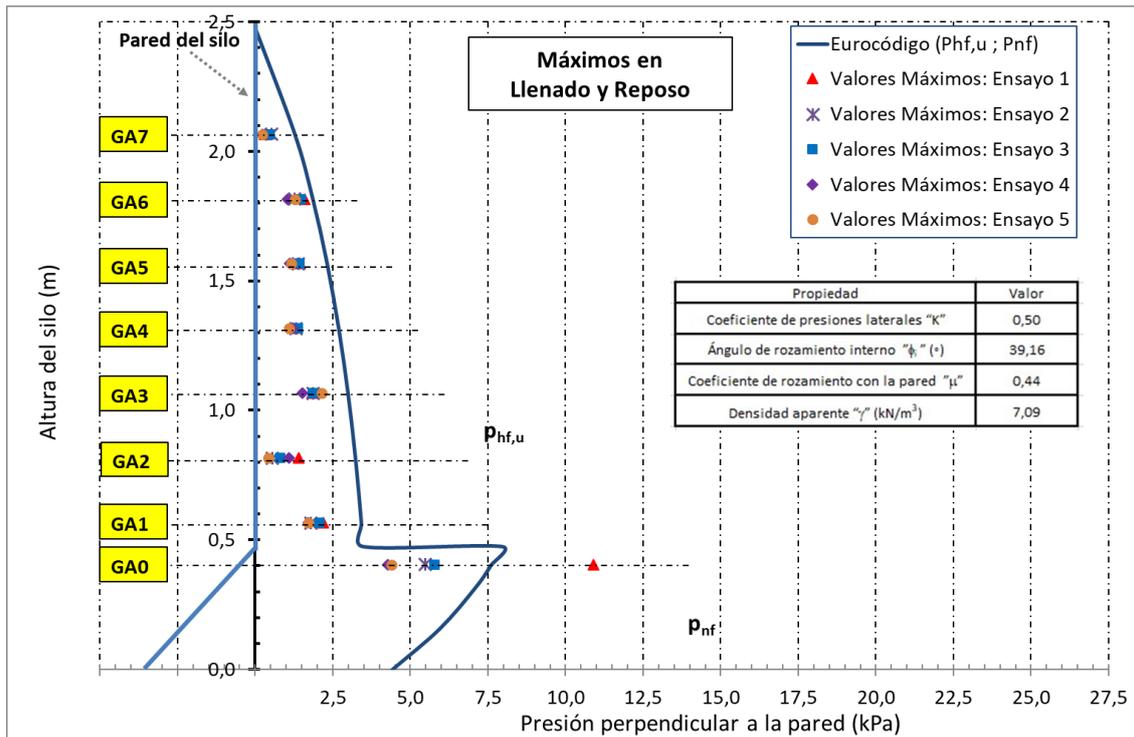


Gráfico 17: Empujes perpendiculares a la pared máximos en el llenado del silo y en la fase de reposo antes de la descarga, obtenidos en los ensayos y con el Eurocódigo 1, parte 4.

En el gráfico siguiente se muestran los valores de los empujes perpendiculares a la pared máximos en el vaciado, obtenidos en los ensayos y con el Eurocódigo 1, parte 4, para los valores de las propiedades del material anteriores.

Como se puede observar los valores del Eurocódigo son superiores a los de los ensayos en la pared vertical. En el sensor situado por debajo de la transición, en un ensayo (ensayo 1) el valor es muy próximo al del Eurocódigo, siendo superior este último a los valores del resto de los ensayos. Por tanto, el cálculo con el Eurocódigo y los valores usados parece adecuado para usarlo en el calcular los empujes por debajo de la transición, pero se sobredimensiona demasiado en el caso de la pared vertical.

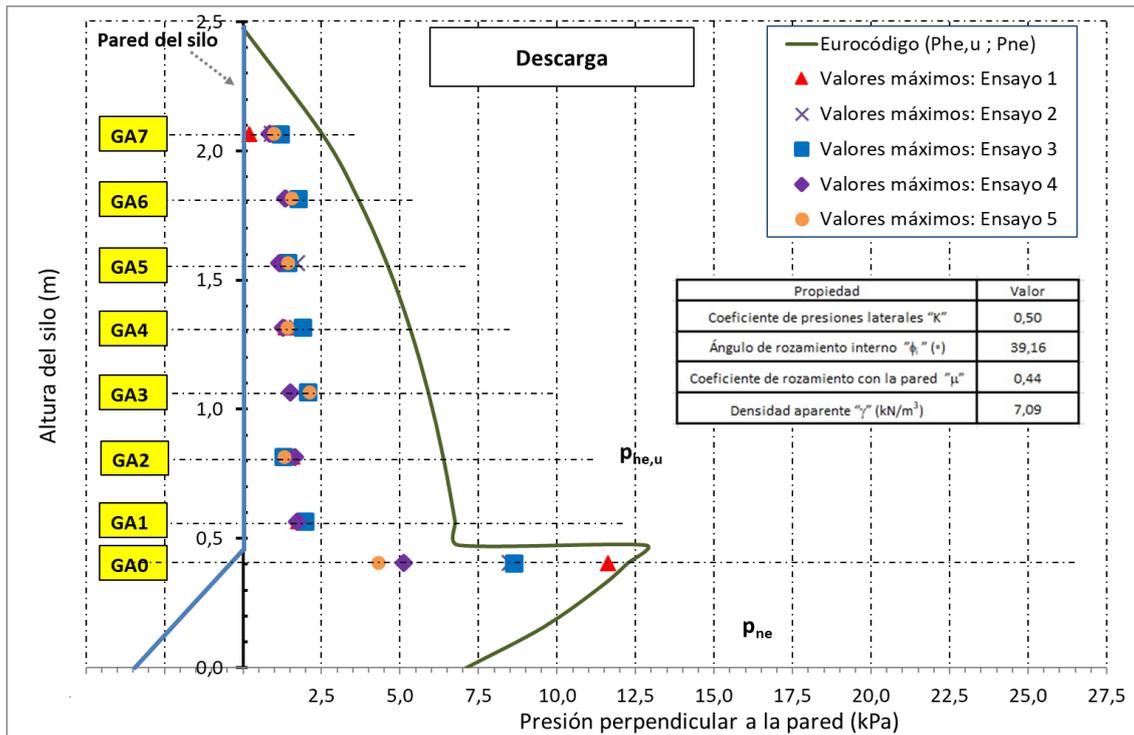


Gráfico 18: Empujes perpendiculares a la pared máximos en el vaciado, obtenidos en los ensayos y con el Eurocódigo 1, parte 4.

Como ya se comentó en metodología, se ha considerado la carga concentrada tanto al final del llenado " $p_{pf}$ ", como en la descarga " $p_{pe}$ ", sin embargo, al ser un silo de clase de evaluación de acciones 1, esta carga puede ignorarse. En el caso de ignorarse los resultados se muestran en las figuras siguientes:

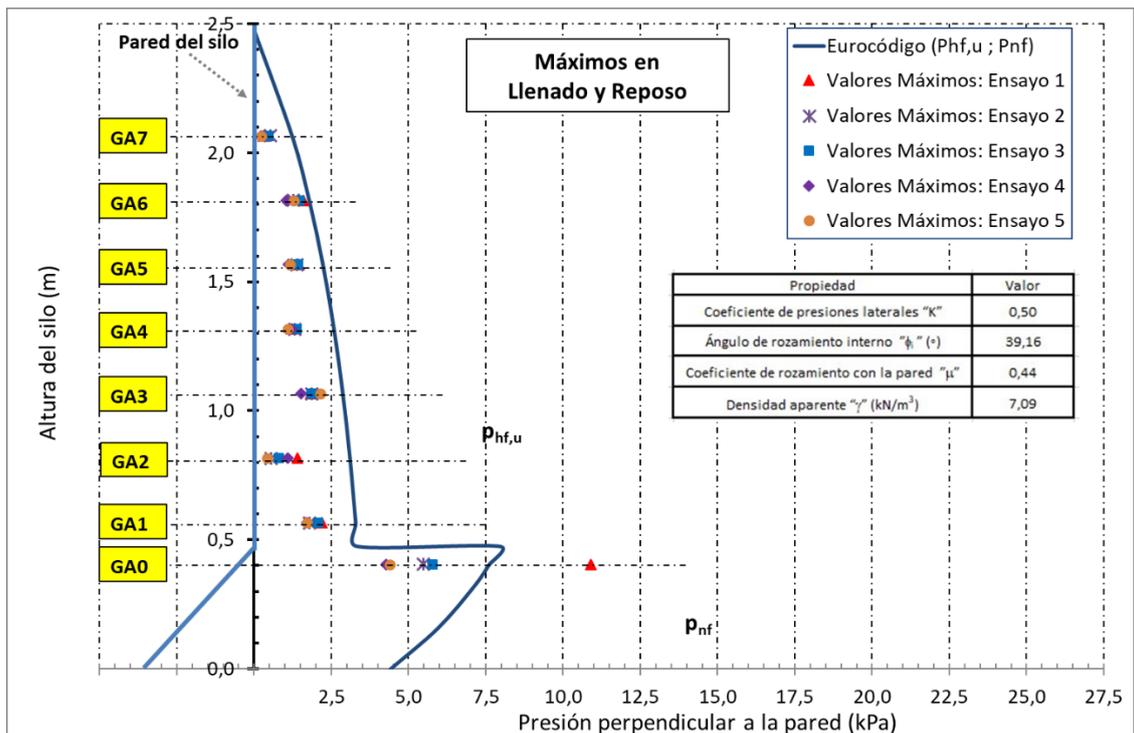


Gráfico 19: Empujes perpendiculares a la pared máximos en el llenado del silo y en la fase de reposo antes de la descarga, obtenidos en los ensayos y con el Eurocódigo 1, parte 4, sin considerar la carga concentrada.

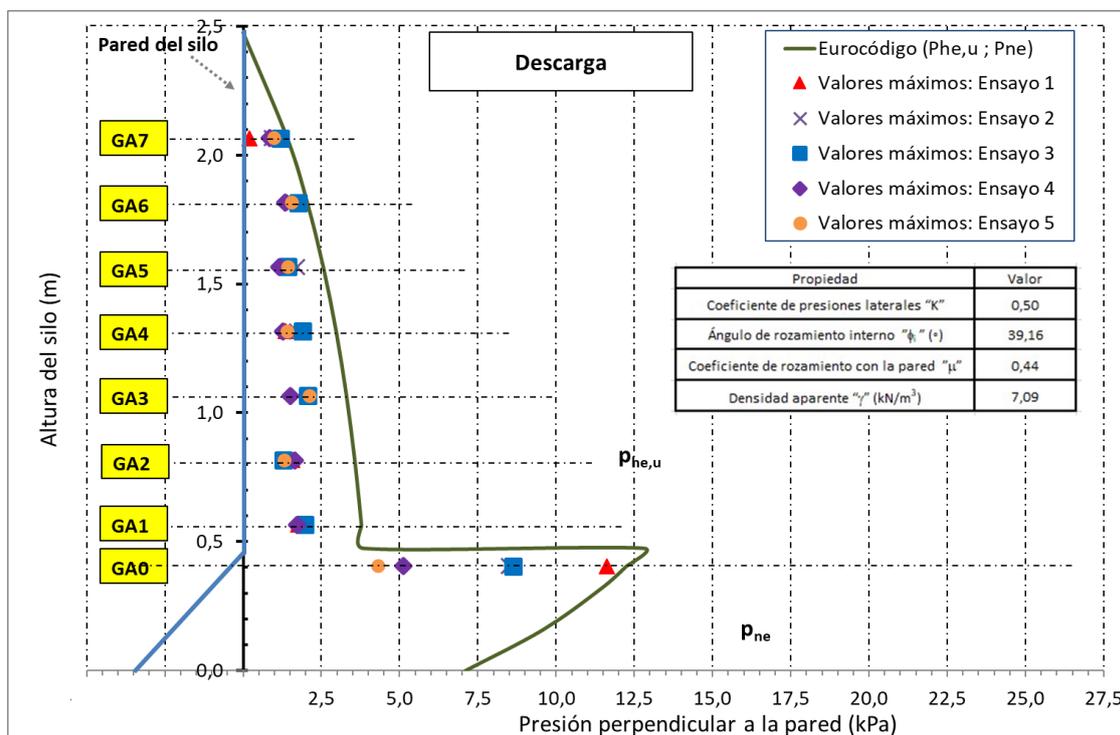


Gráfico 20: Empujes perpendiculares a la pared máximos en el vaciado, obtenidos en los ensayos y con el Eurocódigo 1, parte 4, sin considerar la carga concentrada.

Como se puede observar, al final del llenado no se observan grandes diferencias entre usar la carga concentrada o no, sin embargo, en la descarga, al no considerar la carga concentrada los valores son mucho más próximos a los de los ensayos. Por tanto, se puede deducir que los sobreempujes que se pretende prever con este tipo de carga no se han producido en el silo de ensayo. Hay que tener en cuenta que es un silo de clase de evaluación de acciones 1, es decir, el más sencillo de los posibles, por lo que sería conveniente hacer ensayos en silos de las otras clases.

El valor usado del coeficiente de rozamiento con la pared, " $\mu = 0,44$ ", se ha obtenido de datos experimentales de otros autores, que es lo recomendado por el Eurocódigo. En el caso de que no se pueda obtener experimentalmente, el Eurocódigo presenta también valores en la misma tabla (tabla E.1 del Eurocódigo 1, parte 4). En dicha tabla no hay valores para pellets de madera, lo más parecido son los "piensos en pellets" con valores de  $\mu = 0,23$  para paredes tipo D1 (deslizantes) y  $\mu = 0,28$  para paredes tipo D2 (lisas) y la "remolacha azucarera en pellets" con valores de  $\mu = 0,35$  para paredes tipo D1 (deslizantes) y  $\mu = 0,44$  para paredes tipo D2 (lisas). En metodología se indicó que se habían comparado los resultados obtenidos con los valores de la tabla del Eurocódigo. En concreto se ha hecho los

cálculos con  $\mu = 0,44$ , que son los mostrados en las figuras anteriores, con  $\mu = 0,35$  y con  $\mu = 0,23$ , estos dos últimos se presentan en las figuras siguientes.

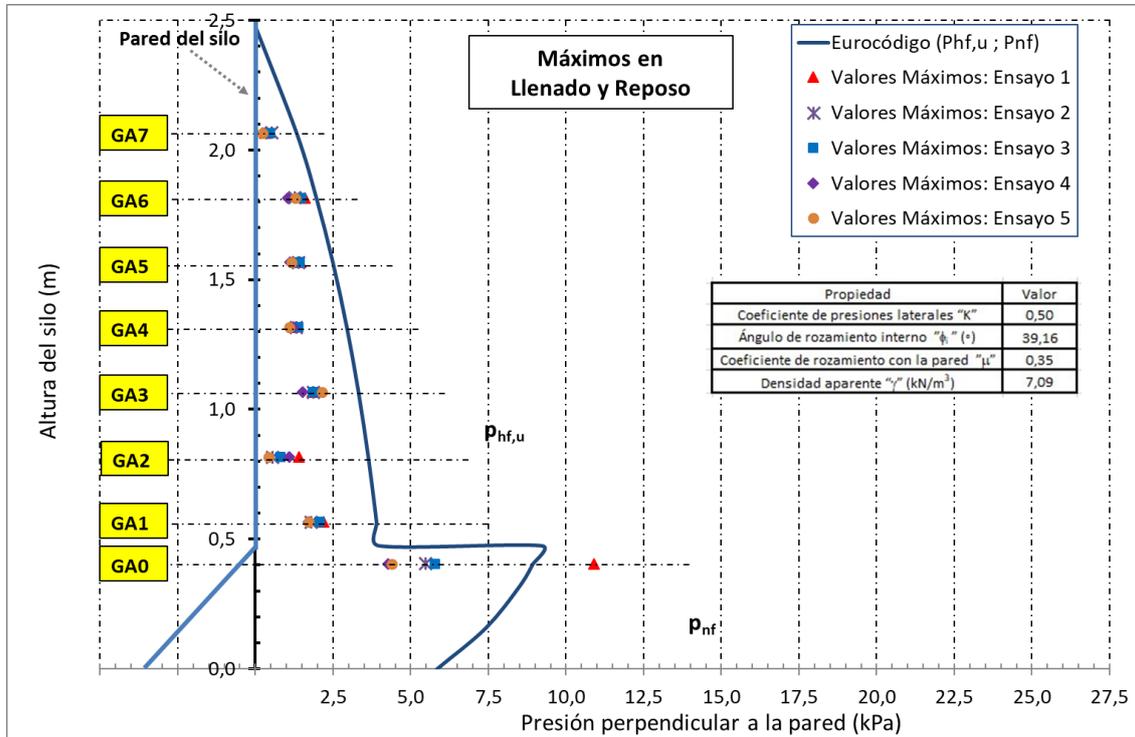


Gráfico 21: Empujes perpendiculares a la pared máximos en el llenado del silo y en la fase de reposo antes de la descarga, obtenidos en los ensayos y con el Eurocódigo 1, parte 4, con coeficiente de rozamiento de la pared igual a 0,35.

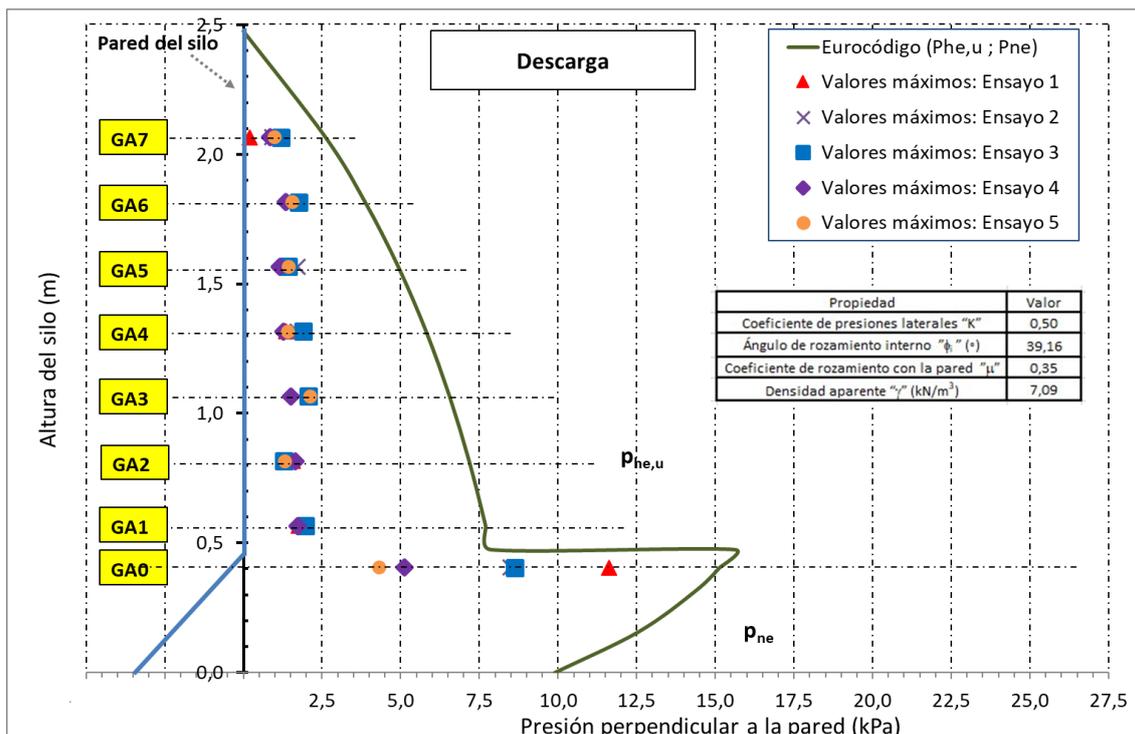


Gráfico 22: Empujes perpendiculares a la pared máximos en el vaciado, obtenidos en los ensayos y con el Eurocódigo 1, parte 4, con coeficiente de rozamiento de la pared igual a 0,35.

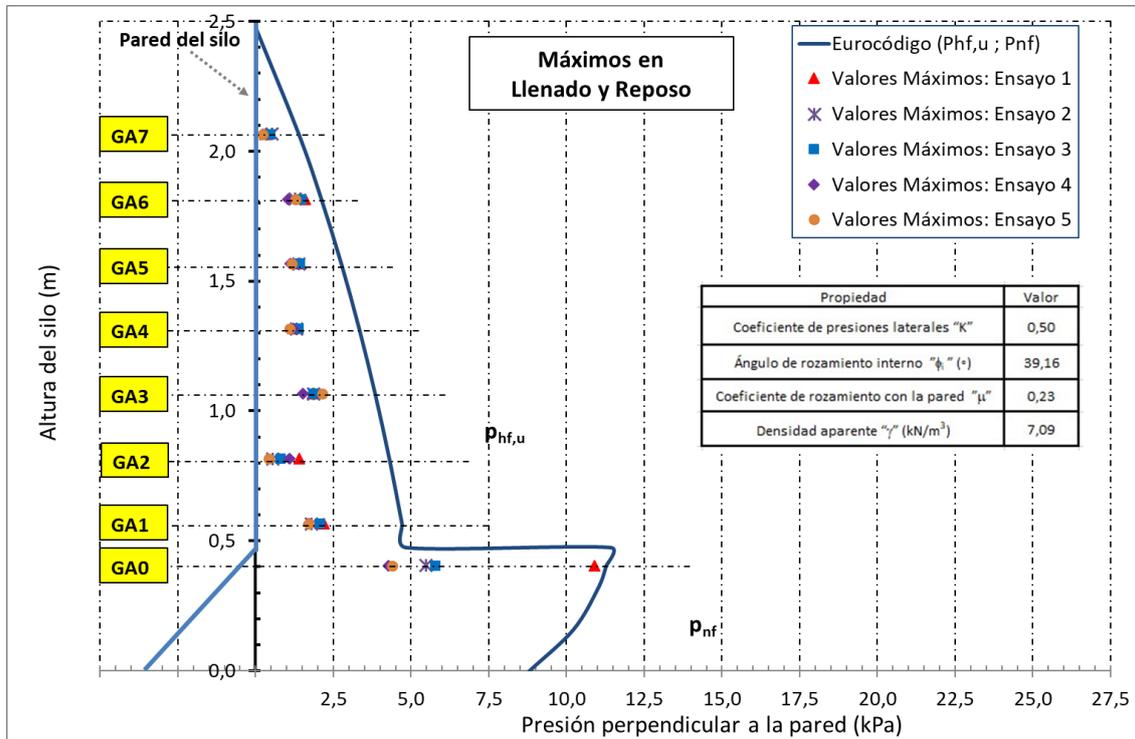


Gráfico 23: Empujes perpendiculares a la pared máximos en el llenado del silo y en la fase de reposo antes de la descarga, obtenidos en los ensayos y con el Eurocódigo 1, parte 4, con coeficiente de rozamiento de la pared igual a 0,23.

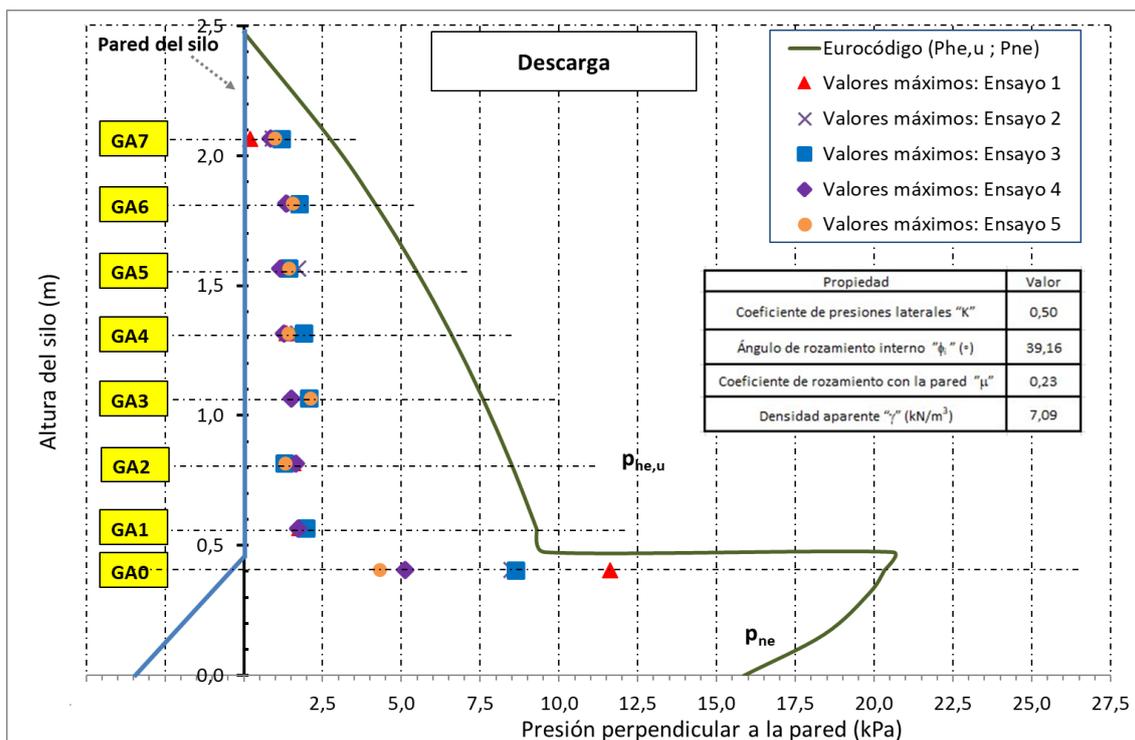


Gráfico 24: Empujes perpendiculares a la pared máximos en el vaciado, obtenidos en los ensayos y con el Eurocódigo 1, parte 4, con coeficiente de rozamiento de la pared igual a 0,23.

Como se puede observar, a medida que disminuye el rozamiento, el peso transferido a la pared vertical es menor y, como consecuencia, es mayor el empuje vertical que llega a las partes más bajas. Al ser este mayor, también es mayor el empuje perpendicular a la pared. En general los empujes perpendiculares a la pared más similares a los ensayos son los de  $\mu = 0,44$ , solo hay un valor, por debajo de la transición, en la hipótesis de llenado, que supera los empujes obtenidos con  $\mu = 0,44$  y con  $\mu = 0,35$ , estando ligeramente por debajo para  $\mu = 0,23$ . Sin embargo, puesto que los valores de diseño de la estructura del silo son los de vaciado, por ser mayores, siempre que se consideren estos no supondrá un riesgo usar valores con  $\mu = 0,44$  en el llenado.

En cuanto a la comparación con otros materiales, pero en ensayos realizados en el mismo silo en que se han analizado los pellets (Silo de la Universidad de León), se pueden comparar los resultados con los publicados en el año 2013 por el equipo investigador (Couto 2013) usando maíz.

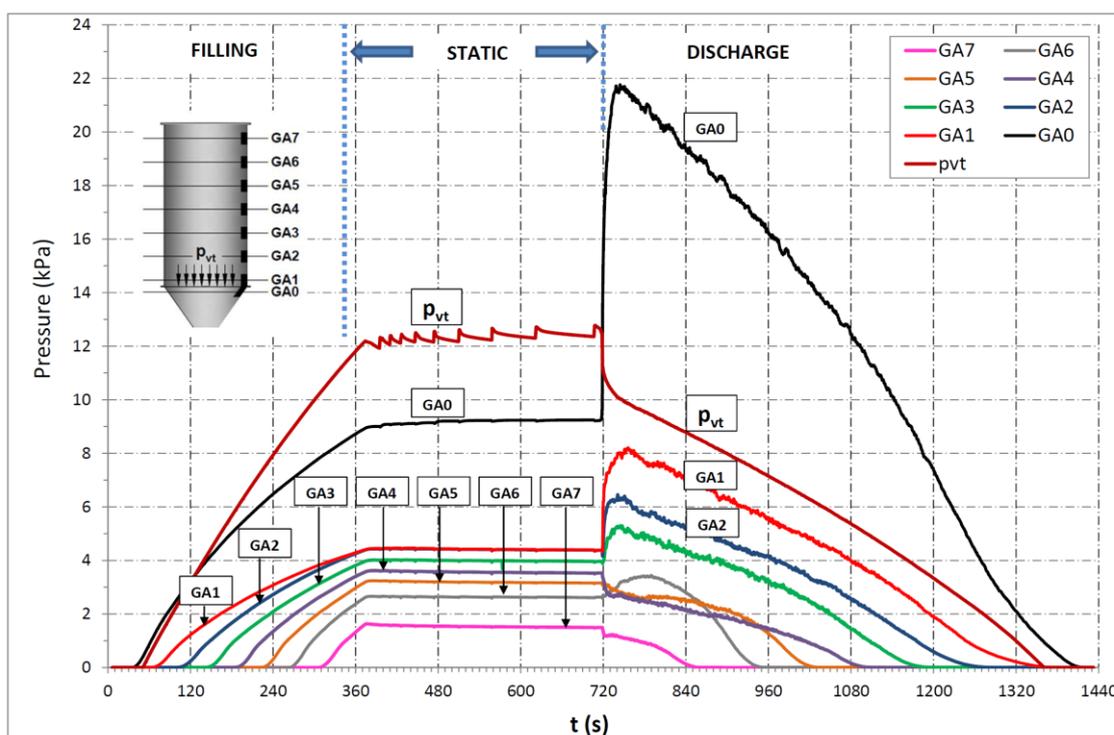


Gráfico 25: Empujes perpendiculares a la pared en las fases de llenado, estática y descarga en el silo de ensayo de la Universidad de León usando maíz.

Representando los resultados en forma de tabla, nos arroja los siguientes resultados:

TEST 6	t (s)	f (kg/s)	Normal wall pressures (kPa)								(kN/m)		(kPa)		Gate (PIII)
			P <sub>hGA7</sub>	P <sub>hGA6</sub>	P <sub>hGA5</sub>	P <sub>hGA4</sub>	P <sub>hGA3</sub>	P <sub>hGA2</sub>	P <sub>hGA1</sub>	P <sub>hGA0</sub>	n <sub>zsk</sub>	p <sub>vt,t</sub>	K	μ <sub>m</sub>	
Filling	367,7	4,12	1,62	2,62	3,2	3,58	3,97	4,39	4,4	8,94	1,18	12,19	0,4	0,19	(max. values)
Static	342,8	0	1,63	2,66	3,24	3,62	4,02	4,44	4,46	9,24	1,25	12,78	0,37	0,19	(max. values)
			1,48	2,59	3,13	3,5	3,69	4,35	4,35	8,95	1,04	11,93	0,34	0,16	(min. values)
Discharge	715,3	2,12	1,5	3,44	3,18	3,53	5,3	6,45	8,2	21,76	1,56	12,53	0,83	0,22	(max. values)
Weight after filling (kN)	14,87														

Tabla nº 22: Resultados del gráfico 31 representados en formato tabla

Comparándolo con las siguientes gráficas del ensayo 2 realizado en los pellets:

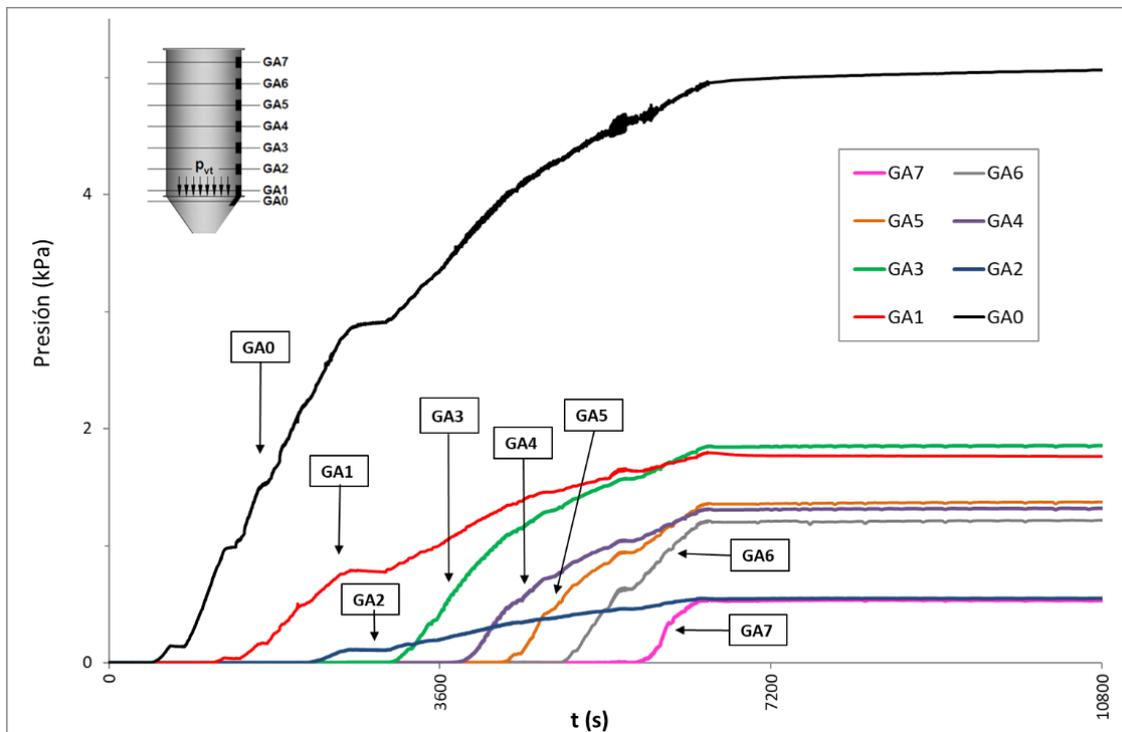


Gráfico 5: Empujes perpendiculares a la pared en la fase de llenado en el ensayo 2º.

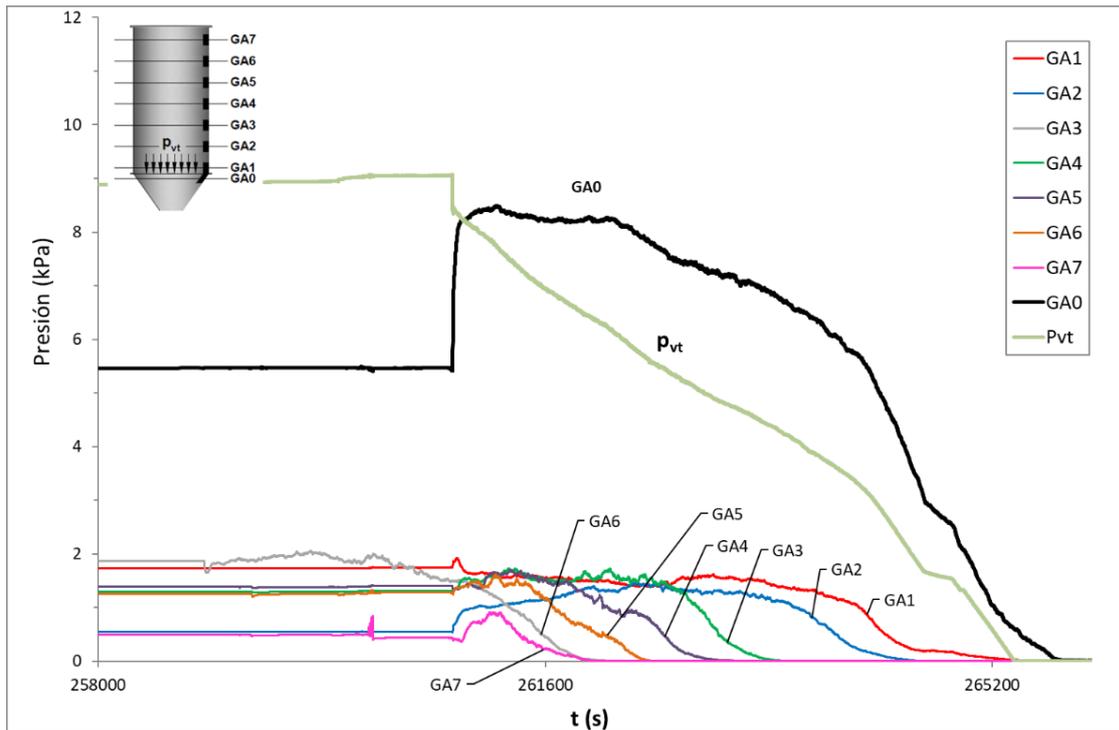


Gráfico 6: Empujes perpendiculares a la pared en la fase de descarga en el ensayo 2º

E2	t (s)	P <sub>hGA7</sub>	P <sub>hGA6</sub>	P <sub>hGA5</sub>	P <sub>hGA4</sub>	P <sub>hGA3</sub>	P <sub>hGA2</sub>	P <sub>hGA1</sub>	P <sub>hGA0</sub>	n <sub>zsk</sub>	p <sub>vt,t</sub>	p <sub>w,t</sub>
<b>Llenado (máx.)</b>	6385	0,54	1,19	1,34	1,3	1,82	0,55	1,77	4,93	1,4	8,7	0,7
<b>Estático (máx.)</b>	253458	0,54	1,26	1,39	1,32	1,87	0,55	1,8	5,49	1,4	9	0,7
<b>Estático (min)</b>	253458	0,46	1,18	1,34	1,27	1,82	0,54	1,72	4,91	1,3	8,6	0,7
<b>Descarga (máx.)</b>	6201,5	0,92	1,62	1,71	1,73	2,06	1,47	1,92	8,49	1,5	9,1	0,9

Tabla 9: Valores extremos registrados en el ensayo 2º

E2	t (s)	K	μ <sub>m</sub>
<b>Llenado (máx.)</b>	6385,0	0,21	0,54
<b>Estático (máx.)</b>	253458,0	0,21	0,54
<b>Estático (min)</b>	253458,0	0,19	0,50
<b>Descarga (máx.)</b>	6201,5	0,34	0,70

Tabla 10: Valores de “K” y μ<sub>m</sub> para los diferentes estados en el ensayo 2º

Comparando los resultados de los pellets con los del maíz, se observa que los del maíz producen empujes mayores, lo que es lógico pues el peso específico del maíz usado es 7,36 kN/ m<sup>3</sup> mientras que el de los pellets es de 7,06 kN/ m<sup>3</sup>. Sin embargo, esta diferencia no explica que sean prácticamente el doble en el maíz que, en los pellets, lo que se explica por una mayor transferencia del peso a los empujes horizontales que se manifiesta en la K obtenida, que es muy superior en el caso del maíz. Este resultado es lógico, ya que, los granos de pellets son mayores y más angulosos y, por tanto, el ángulo de rozamiento interno es mayor. Al ser el rozamiento mayor se transfiere menos empuje a los laterales.

Se puede también comprobar que durante el llenado las curvas de los distintos sensores se cruzan, es decir, un sensor que está por debajo acaba dando valores inferiores a otro que está por encima. Esto vuelve a ocurrir en los pellets y se confirma como un resultado presente en distintos materiales.

En la descarga, en ambos ensayos se observa un aumento súbito de las presiones justo en el sensor por debajo de la transición, confirmando esta tendencia para distintos materiales, siendo mucho mayor el efecto en el caso del maíz, lo que parece lógico, pues, al ser el ángulo de rozamiento menor, la transferencia de peso a la parte inferior del silo es mayor.

Todo ello parece confirmar la validez de los resultados obtenidos con los pellets.

## **10.2. Comparación de parámetros en el silo con los del Eurocódigo y con los de los ensayos experimentales.**

Como se ha indicado anteriormente, los valores del Eurocódigo adoptados han sido los de pellets de remolacha, dado que no incluye valores para pellets de remolacha, dichos valores son los siguientes:

<b>Parámetro</b>	<b>Límite</b>	<b>Valor</b>
Coeficiente de presiones laterales "K"	Superior	0,50
Coeficiente de rozamiento con la pared "μ"	Inferior	0,44

Tabla nº 23: Valores de "K" y "μ" del eurocódigo

Los Valores que se recogen en el artículo publicado por Moya, Sánchez y Villar-García (Moya 2022):

El valor del coeficiente de rozamiento con la pared obtenido en dicho trabajo fue de 0,52 con una desviación estándar de ± 0,06.

El valor característico del coeficiente de presiones laterales (K) no se presenta en dicho artículo, aunque si se obtiene el Coeficiente de Poisson (Tabla nº 22)

Material	Coeficiente de Poisson ( $\nu$ )		
	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Pellets de madera	0,13 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,12 ± 0,02

Tabla nº 24: Valores del coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) a diferentes presiones. (Moya 2022).

El ensayo es un ensayo tipo  $K_0$  (Aguado 1997) realizado en un aparato triaxial. Como ya indicó (Aguado 1997), el Coeficiente de Poisson y K están relacionados mediante la siguiente expresión:

$$K_0 = \frac{\nu}{1 - \nu}$$

Por tanto, los valores de K serán los siguientes:

Material	K		
	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Pellets de madera	0,15	0,14	0,14

Tabla nº 25: Valores de “K” para diferentes presiones

Para el tamaño de silo utilizado en los ensayos, el valor más adecuado es el de  $K = 0,15$  porque las presiones de confinamiento en los ensayos realizados son inferiores a 100 kPa.

#### Ensayo 1

E1	t (s)	K	$\mu_m$
Llenado (máx.)	7671	0,59	0,47
Estático (máx.)	348364	0,24	0,55
Estático (min)	348364	0,21	0,41
Descarga (máx.)	4978,8	0,21	0,51

Tabla nº 8: valores de “K” y “ $\mu_m$ ” para el ensayo 1º

#### Ensayo 2

E2	t (s)	K	$\mu_m$
Llenado (máx.)	6385,0	0,21	0,54
Estático (máx.)	253458,0	0,21	0,54

<b>Estático (min)</b>	253458,0	0,19	0,50
<b>Descarga (máx.)</b>	6201,5	0,34	0,70

Tabla nº 10: valores de “K” y “ $\mu_m$ ” para el ensayo 2º

Ensayo 3

<b>E3</b>	<b>t (s)</b>	<b>K</b>	<b><math>\mu_m</math></b>
<b>Llenado (máx.)</b>	4469,5	0,24	0,52
<b>Estático (máx.)</b>	167746,5	0,24	0,52
<b>Estático (min)</b>	167746,5	0,22	0,48
<b>Descarga (máx.)</b>	5614,0	0,38	0,75

Tabla nº 12: valores de “K” y “ $\mu_m$ ” para el ensayo 3º

Ensayo 4

<b>E4</b>	<b>t (s)</b>	<b>K</b>	<b><math>\mu_m</math></b>
<b>Llenado (máx.)</b>	4698,5	1,00	0,75
<b>Estático (máx.)</b>	87602,5	0,20	0,61
<b>Estático (min)</b>	87602,5	0,19	0,53
<b>Descarga (máx.)</b>	4659,5	0,32	0,80

Tabla nº 14: valores de “K” y “ $\mu_m$ ” para el ensayo 4º

Ensayo 5

<b>E5</b>	<b>t (s)</b>	<b>K</b>	<b><math>\mu_m</math></b>
<b>Llenado (máx.)</b>	12054,0	0,21	2,49
<b>Estático (máx.)</b>	163601,5	0,19	0,72
<b>Estático (min)</b>	163601,5	0,18	0,58
<b>Descarga (máx.)</b>	4345,0	0,38	0,63

Tabla nº 16: valores de “K” y “ $\mu_m$ ” para el ensayo 5º

Como se puede observar el valor del coeficiente de rozamiento con la pared es similar tanto en los ensayos de laboratorio (Moya 2022), como en el silo de ensayo (descartando valores extremos en llenado y descarga), por tanto, podemos concluir que el efecto de escala no influye en esta propiedad, lo cual es lógico pues depende exclusivamente de la rugosidad y naturaleza de los materiales en contacto en el rozamiento. El valor oscila

entre 0,47 y 0,58. Estos valores son ligeramente superiores a los del Eurocódigo (0,44), aunque hay que tener en cuenta que en dicha norma no hay valores para pellets de madera sino para pellets de remolacha. Como consecuencia debería incorporarse nuevos valores para pellets de madera en el Eurocódigo.

Sin embargo, el valor de K si es muy diferente, en los ensayos de laboratorio el valor obtenido es 0,15, mientras que, en los ensayos realizados en el silo, descartando valores extremos en llenado y descarga, los valores oscilan entre 0,18 y 0,24, lo cual quiere decir que los ensayos a nivel de laboratorio no reproducen adecuadamente el comportamiento de este parámetro en un silo real. Puede haber dos causas posibles, la influencia del tamaño de la partícula con respecto a la masa total ensayada (factor de escala) y la influencia de la proximidad de las paredes. Dado que es un parámetro esencial en la determinación de los empujes horizontales y, por tanto, en el dimensionamiento del silo, debería usarse valores obtenidos en ensayos realizados en silos de tamaño real. Por otro lado, estos valores son muy inferiores a los del Eurocódigo (0,50), aunque hay que tener en cuenta que en dicha norma no hay valores para pellets de madera sino para pellets de remolacha, por tanto, también se hace necesario incorporar a dicha norma valores más ajustados a los pellets de madera.

### 10.3. Comparación de parámetros en el silo con los de los ensayos experimentales para pellets a nivel de partícula.

Los coeficientes de rozamiento partícula - partícula ( $\mu_p$ ) y partícula - pared ( $\mu_w$ ) y de los ángulos de rozamiento correspondientes ( $\varphi_p$  y  $\varphi_w$ ) obtenidos son los siguientes:

Parámetro	partícula - partícula		partícula - pared	
	$\mu_p$	$\varphi_p$	$\mu_w$	$\varphi_w$
m = Valor medio de $e_{p,i}$	0,49	26,21	0,34	18,62
$\sigma$ = Desviación Estándar	0,07	3,24	0,05	2,59
CV = Coeficiente de variación (%)	14,1	12,4	15,1	13,9
n = número de muestras	3	3	3	3

Tabla nº 26: Valores de “ $\Phi$ ” y “ $\mu$ ” en los ensayos de laboratorio

El valor de rozamiento con la pared (0,34) es muy inferior al obtenido con el silo experimental (entre 0,47 y 0,58) y con los ensayos de laboratorio de pellets a granel (0,52) (Moya 2022), ello es debido a que siempre el material a granel es más rugoso, al estar compuesto de partículas en diferentes direcciones, también es inferior al del Eurocódigo

(0,44), aunque hay que tener en cuenta que en dicha norma no hay valores para pellets de madera sino para pellets de remolacha.

El ángulo de rozamiento interno obtenido en ensayos de laboratorio a granel (Moya 2022), fue de 40,7º para los pellets de madera, muy superior por las mismas razones antes mencionadas.

Los valores del módulo de elasticidad partícula a partícula para cada humedad son los siguientes:

Parámetro	w = Humedad (%)			
	2,5	5	10	15
m = Valor medio (MPa)	73,33	48,50	33,64	14,14

Tabla nº 27: Valores del módulo de elasticidad en función de la humedad.

La humedad de los pellets en los ensayos de Moya (Moya 2022) fue del 6,38%, y los valores del módulo de elasticidad entre 20 y 100 veces superior a los valores partícula a partícula, lo cual es lógico porque la masa a granel tiene huecos (poros) que permiten que el material se comprima con mayor facilidad (módulos de elasticidad mayores). Hay que tener en cuenta que el Módulo de Elasticidad o Módulo de Young mide la deformación ( $\epsilon$ ) cuando al material se le aplica una tensión ( $\sigma$ ):  $E = d\sigma / d\epsilon$

Como consecuencia se puede concluir que los valores a granel no son los adecuados en técnicas de cálculo que utilicen algoritmos que simulen cada partícula, por ejemplo, el método de los elementos discretos. De la misma forma tampoco se pueden usar los datos obtenidos a nivel de partícula para realizar simulaciones de la masa a granel o cálculos con el Eurocódigo.

## 11. Conclusiones:

### 11.1. Entre empujes de pellets y el Eurocódigo

Como se puede observar en los gráficos la curva resultante, calculada con el Eurocódigo, en la fase de llenado, se comporta como una envolvente dejando dentro de sí las tensiones registradas en la pared del silo. Con la excepción del valor de un ensayo que se origina en la zona de transición, que se sale de la envolvente.

En la fase de descarga ocurre lo mismo, la curva que nos arroja los valores del Eurocódigo son muy superiores a los registrados por las células de carga, siendo esta

diferencia mucho mayor en la pared vertical que en la tolva. En ambas gráficas los valores del Eurocódigo han sido calculados considerando el coeficiente de carga concentrada, y se observa que los valores en la pared vertical distan mucho de los valores registrados en el silo ensayado.

Cuando se considera la hipótesis en la que se obvia la carga concentrada “Ct”, tanto para la fase de carga como para la fase de descarga, las curvas arrojadas por los cálculos del Eurocódigo se ciñen mucho mejor a los valores registrados por las células de carga en la pared vertical, siendo más patente este ajuste en la fase de descarga que en la fase de carga.

Las presiones horizontales anteriores del Eurocódigo, han sido calculadas con un coeficiente de rozamiento de pared  $\mu = 0,44$ . Las presiones teóricas obtenidas con el Eurocódigo para  $\mu = 0,23$  y  $\mu = 0,35$  son incrementadas o disminuidas de forma inversamente proporcional al coeficiente de rozamiento. Cuanto más bajo es “ $\mu$ ” mayor será la tensión horizontal transmitida a la pared del cilindro, ya que al disminuir el rozamiento según la siguiente relación,  $Ph = Pw / \mu$ , la pared soporta menos peso debido al rozamiento y se transmite más a la partes bajas obteniendo presiones horizontales mayores según la siguiente relación:  $Ph = Pv \cdot K$

Como conclusión de este apartado, se desprende que con los datos obrantes en la norma del Eurocódigo las tensiones obtenidas son muy superiores a las realmente registradas para pellets de madera y un silo de acciones tipo 1. Lo cual repercute en un sobredimensionado de la estructura que es totalmente innecesario y un incremento de los costes de fabricación. Por otro se puede considerar adecuado para este tipo de cálculos un coeficiente de rozamiento  $\mu = 0,44$ .

### **11.2. Comparación de pellets con maíz**

En este caso se observa que los empujes experimentados por el silo con el maíz son casi el doble que con los pellets. Esto se debe, más que al mayor peso específico, a la mayor transferencia de cargas horizontales. Es decir, a una mayor constante K. La “K” obtenida con el maíz es muy superior a la obtenida con los pellets, esto se debe a que el los pellets tienen un mayor ángulo de rozamiento interno, por lo que mayor capacidad de transferir la carga a la pared vertical del silo.

La conclusión que podemos obtener es que a mayor ángulo de rozamiento mayor será la capacidad de transformar las presiones horizontales “Ph” en presiones verticales Pv y por ende, mayor serán las presiones trasferidas a la pared del silo Pw.

### **11.3. Comparación con el Eurocódigo y los ensayos de laboratorio**

En este caso los valores de los ensayos para “ $\mu$ ” (0,47-0,58), son semejantes al usado para con el Eurocódigo  $\mu = 0,44$ , teniendo en cuenta que este coeficiente usado se corresponde con pellets de remolacha, por no estar contemplado en la norma los pellets de madera.

En cuanto a “ $k$ ” los valores, descartando los extremos, distan bastante de los obtenidos en los ensayos, oscilando entre 0,18-0,24 y, el obtenido en el laboratorio  $K=0,15$ . Esto nos indica que este parámetro a nivel de laboratorio, no es fiel a la realidad y, siendo muy inferior a la “ $k$ ” contemplada por el Eurocódigo para los pellets de remolacha. Es por ello, que se hace necesario ampliar la norma e incorporar estos parámetros para la casuística de los pellets de madera.

### **11.4. Comparación de parámetros en el silo con los de los ensayos experimentales para pellets a nivel de partícula**

El valor de rozamiento obtenido entre una partícula y la pared ( $\mu_p = 0,34$ ) es muy inferior al obtenido con el silo experimental (entre 0,47 y 0,58), con los ensayos de laboratorio de pellets a granel (0,52) (Moya 2022) y con el Eurocódigo (0,44). Ello es debido a que la superficie de contacto del material a granel es más rugosa, al estar compuesto de partículas en diferentes direcciones. Lo mismo ocurre, por idénticas razones, con el ángulo de rozamiento interno.

En cuanto al módulo de elasticidad, los valores obtenidos a granel son muy superiores a los valores partícula a partícula, lo cual es lógico porque la masa a granel tiene huecos (poros) que permiten que el material se comprima con mayor facilidad (módulos de elasticidad mayores).

Por tanto, los valores a granel no son adecuados para técnicas de cálculo que utilicen algoritmos que simulen cada partícula, por ejemplo, el método de los elementos discretos, pero sí para otros que simulen el material a granel como el método de los elementos finitos. De la misma forma tampoco se pueden usar los datos obtenidos a nivel de partícula para realizar simulaciones de la masa a granel o cálculos con el Eurocódigo.

## **12. Investigaciones futuras**

Como se ha podido apreciar en el desarrollo de este trabajo en el que se ha puesto de manifiesto el cálculo de parámetros para el dimensionado de silos de acciones tipo 1 y

pared tipo D1. Para completar la norma adecuadamente habría que realizar estudios de silos con evaluación de acciones tipo 2 y 3, y paredes tipo D2y D3.

Por otra parte, se han apreciado en la fase de descarga que las líneas de tensiones se llegan a entrecruzar las de las células superiores con las de las de las células superiores, sobre todo, en el instante de la descarga; generando picos de tensión como si de un golpe de ariete se tratase llegando a comportarse el material en movimiento como si de un fluido se tratase.

Es por ello que se ve necesario ahondar más en el estudio de este tipo de comportamiento.

### **13. Bibliografía:**

1. A. Couto , A. Ruiz, P.J. Aguado. (2012) Design and instrumentation of a mid-size test station for measuring static and dynamic pressures in silos under different conditions – Part I: Description. Computers and Electronics in Agriculture 85 (2012) p.p. 164–173
2. A. Couto; A. Ruiz; L. Herráez; J. Morán; P. J. Aguado. "Measuring pressures in a slender cylindrical silo for storing maize. Filling, static state and discharge with different material flow rates and comparison with Eurocode 1 part 4." August 2013, pp. 40 - 56. Computers and Electronics in Agriculture, 08/2013.
3. Aguado P.J. (1997) "Métodos avanzados de cálculo de presiones en silos agrícolas mediante la técnica de elementos finitos. El vaciado de silos y las paredes de chapa ondulada". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
4. A. Ruiz, A. Couto , P.J. Aguado (2012) Design and instrumentation of a mid-size test station for measuring static and dynamic pressures in silos under different conditions – Part II: Construction and validation. Computers and Electronics in Agriculture 85 (2012) p.p. 174–187
5. Angel Couto; Angel Ruiz; Pedro Aguado. "Experimental study of the pressures exerted by wheat stored in slender cylindrical silos varying the flow rate of material during discharge. Comparison with Eurocode 1, part 4." Powder Technology Powder Technology, 2013.
6. American Concrete Institute (1997). Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials (ACI 313-97)
7. American Society of Agricultural and Biological Engineers. (2011) NSI/ASAE EP433 DEC1988 Loads Exerted by Free-Flowing Grain on Bins.

8. American Society of Testing Materials (2010) Standard Test Method for Total Moisture in Coal (ASTM D3302)
9. ASAE S368.4, 2006. Compression Test of Food Materials of Convex Shape. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE).Asociación Española de Normalización (2019) Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles Parte 1: Requisitos generales (ISO 17225-1:2014)
10. Asociación Española de Normalización (2021) Biocombustibles sólidos Especificaciones y clases de combustibles Parte 2: Clases de pellets de madera (ISO 17225-2:2021)
11. Asociación Española de Normalización (2023) UNE-EN ISO 5370:2023 Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de finos en pellets. (ISO 5370:2023).
12. Asociación Española de Normalización (2015) UNE-EN ISO 17828:2016. Biocombustibles sólidos. Determinación de la densidad a granel. (ISO 17828:2015).
13. Ayuga, F. (2008). Some unresolved problems in the design of steel cylindrical silos. In International conference on structures and granular solids-from scientific principles to engineering applications. The Royal society of Edinburgh, Scotland, UK (pp. 123-133).
14. Ayuga, F. (2015). Present and future of the numerical methods in buildings and infrastructures areas of biosystems engineering. *Journal of Agricultural Engineering*, 46(1), 1-12.
15. Barletta, D., Berry, R. J., Larsson, S. H., Lestander, T. A., Poletto, M., & Ramírez-Gómez, Á. (2015). Assessment on bulk solids best practice techniques for flow characterization and storage/handling equipment design for biomass materials of different classes. *Fuel Processing Technology*, 138, 540-554.
16. Bedford A. and Fowler W., 2008. *Engineering mechanics statics & dynamics*. Prentice Hall.
17. Britton M.G. and Moysey E.B., 1986. Grain properties in the proposed new engineering practice on bin loads. ASAE Paper No. 86-4502, St. Joseph, MI, USA.
18. CEN, (2006) EN 1991-4:2006. Eurocode 1: Actions on Structures. Part 4: Silos and Tanks. European Committee for Standardization, Brussels.
19. Couto, A., Ruiz, A., Herráez, L., Moran, J., & Aguado, P. J. (2013). Measuring pressures in a slender cylindrical silo for storing maize. Filling, static state and discharge with different material flow rates and comparison with Eurocode 1 part 4. *Computers and electronics in agriculture*, 96, 40-56.
20. Chen, J.F., Rotter, J.M., Ooi, J.Y., Zhong, Z., 2005. Flow pattern measurement in a full scale silo containing iron ore. *Chemical Engineering Science* 60, 3029–3041.

21. Chen, J.F., Rotter, J.M., Ooi, J.Y., Zhong, Z., 2007. Correlation between the flow pattern and wall pressures in a full scale experimental silo. *Engineering Structures* 29, 2308–2320.
22. Gallego, E.; Fuentes, J. M. ; Ruiz, A. ; Hernández-Rodrigo, G; Aguado, P.; Ayuga, F. (2020) Determination of mechanical properties for wood pellets used in DEM simulations. *International Agrophysics*, 2020, 34, 485-494
23. González-Montellano C., Fuentes J. M., Ayuga-Téllez E., Ayuga F. (2012). Determination of the mechanical properties of maize grains and olives required for use in DEM simulations. *Journal of Food Engineering*, 111(4): 553-562
24. Hlosta J., Žurovec D., Rozbroj J., Ramírez-Gómez A., Nečas J., and Zegzulka J., 2018. Experimental determination of particle-particle restitution coefficient via double pendulum method. *Chemical Eng. Res. Design*, 135, 222-233.
25. Hlosta J., Jezerská L., Rozbroj J., Žurovec D., Nečas J., and Zegzulka J., 2020a. DEM investigation of the influence of particulate properties and operating conditions on the mixing process in rotary drums: Part 1 Determination of the DEM Parameters and Calibration Process. *Processes*, 8,222.
26. Hlosta J., Jezerská L., Rozbroj J., Žurovec D., Nečas J., and Zegzulka J., 2020b. DEM Investigation of the influence of particulate properties and operating conditions on the mixing process in rotary drums: Part 2 – Process validation and experimental study. *Processes*, 8, 184.
27. ISO 18134-2, 2017. Solid biofuels – Determination of moisture content – Oven dry method – Part 2: Total moisture – Simplified method. International Organization for Standardization (ISO). <https://doi.org/10.3403/30198053>
28. ISO 18847, 2016. Solid biofuels – Determination of particle density of pellets and briquettes. International Organization for Standardization (ISO).
29. Juan, A.; Moran, J.M.; Guerra, M.I.; Couto, A.; Ayuga, F.; Aguado, P.J. "Establishing stress state of cylindrical metal silos using finite element method: comparison with ENV 1993". 44 - Issue 11, pp. 1192 - 1200. *Thin-Walled Structures*, 2006.
30. Morán, J.; Aguado, P.; Ayuga, F.; Guaita, M.; Juan, A. "Analysis of Thermal Loads Calculus in Steel Silos: A comparison of Eurocode 1, Classical Methods, and F.E.M.". 48 - 4, pp. 1483 - 1490. *Transactions of the ASAE*. Transactions of the ASAE, 2005.
31. Moya M., Aguado P.J., Ayuga F. (2013). Mechanical properties of some granular agricultural materials used in silo design. *International Agrophysics*, 27, 181-193
32. Moya, M., Sánchez, D. y Villar-García, J.R. (2022) "Values for the Mechanical Properties of Wheat, Maize and Wood Pellets for Use in Silo Load Calculations Involving Numerical Methods." *Agronomy* 12, 1261

33. M. Moya; P.J. Aguado; F. Ayuga. "Mechanical properties of some granular agricultural materials used in silo design". <http://dx.doi.org/10.2478/v10247-012-0084-9>. Volume 27, Issue 2, pp. 181 - 193. International Agrophysics, 2013.
34. Molenda M. and Horabik J., 2004. On applicability of a direct shear test for strength estimation of cereal grain. Part. Part. Sys. Charact., 21, 310-315.
35. Molenda M., Horabik J., Ross I.J., and Montross M.D., 2002a. Friction of wheat: grain-on-grain and on corrugated steel. Trans. ASAE, 45(2), 415-420.
36. Molenda M., Montross M.D., Horabik J., and Ross I.J. 2002b. Mechanical properties of corn and soybean meal. Trans. ASAE, 45(6), 1929-1936.
37. Molenda M. and Stasiak M., 2002. Determination of the elastic constants of cereal grains in a uniaxial compression test. Int. Agrophysics, 16, 61-65.
38. Molenda M., Stasiak M., Moya M., Ramirez A., Horabik J., and Ayuga F., 2006. Testing mechanical properties of food powders in two laboratories – degree of consistency of results. Int. Agrophysics, 20, 37-45.
39. Molenda M., Thompson S.A., and Ross I.J., 2000. Friction of wheat on corrugated and smooth galvanized steel surfaces. J. Agric. Eng. Res., 77(2), 209-219.
40. Moya, M.; Ayuga, F.; Guaita, M.; Aguado, P. J. "Mechanical properties of granular agricultural materials. Part 2". 49 - 2, pp. 479 - 489. Transactions of the ASABE. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006.
41. O'Sullivan C., Bray J.D., and Riemer M., 2004. Examination of the response of regularly packed specimens of spherical particles using physical tests and discrete element simulations. J. Eng. Mechanics, 130(10), 1140-1150.
42. Ramírez-Gómez Á., Gallego E., Fuentes J.M., González- Montellano C., and Ayuga F., 2014. Values for particle-scale properties of biomass briquettes made from agroforestry residues. Particuology, 12, 100-106. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2013.05.007>
43. Ramírez A., Gallego E., Fuentes J. M., González-Montellano C., Ayuga F. (2014). Values for particle-scale properties of biomass briquettes made from agroforestry residues. Particuology, 12 (1): 100-106
44. Ramírez-Gómez, Á. (2016). Research needs on biomass characterization to prevent handling problems and hazards in industry. Particulate Science and Technology, 34(4), 432-441.
45. Rotter, J.M., Brown, C.J., Lahlouh, E.H., 2002. Patterns of wall pressure on filling a square planform steel silo. Engineering Structures 24, 135–150.
46. Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials (ACI 313-97)

47. Stasiak M., Molenda M., and Horabik J., 2007. Determination of modulus of elasticity of cereals and rapeseeds using acoustic method. *J. Food Eng.*, 82, 51-57.
48. Salehi H., Poletto M., Barletta D., and Larsson S., 2019. Predicting the silo discharge behavior of wood chips - A choice of method. *Biomass Bioenergy*, 120, 211-218. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.023>
49. Schott D., Tans R., Dafnomilis I., Hancock V., and Lodewijks G., 2016. Assessing a durability test for wood pellets by discrete element simulation. *FME Trans.*, 44, 279-284.
50. Stasiak M., Molenda M., Bańda M., Wiącek J., Parafiniuk P., Lisowski A., Gancarz M., and Gondek E., 2019. Mechanical characteristics of pine biomass of different sizes. *European J. Wood Wood Products*, 77, 593-608. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01415-w>
51. Schurich, T., Füll, C., Enstad, G.G., 2001. Full scale silo tests and numerical simulations of the “cone in cone” concept for mass flow. In: Kalman, A.L.a.H. (Ed.), *Handbook of Powder Technology*. Elsevier Science B.V., pp. 75–180.
52. Teng, J.G., Lin, X., 2005. Fabrication of small models of large cylinders with extensive welding for buckling experiments. *Thin-Walled Structures* 43, 1091–1114.
53. Teng, J.G., Lin, X., Rotter, J.M., Ding, X.L., 2005. Analysis of geometric imperfections in full-scale welded steel silos. *Engineering Structures* 27, 938–950.
54. Teng, J.G., Zhao, Y., Lam, L., 2001. Techniques for buckling experiments on steel silo transition junctions. *Thin-Walled Structures* 39, 685–707.
55. WPMPS. Standart Shear Testing Technique for Particulate Solids Using the Jenike Shear Cell; IChemE:Warwickshire, UK, 1989.
56. Wu, M.R., D.L. Schott, G. Lodewijks. (2011). Physical properties of solid biomass. *Biomass and Bioenergy*, 35: 2093-2105
57. Wu, J., Binbo, J., Chen, J., Yang, Y., 2009. Multi-scale study of particle flow in silos. *Advanced Powder Technology* 20, 62–73.
58. Wu, Y.H., Schmidt, L.C., 1992. A boundary element method for prediction of silo pressures. *Computers and Structures* 45, 315–323.
59. Yang, S.-C., Hsiau, S.-S., 2001. The simulation and experimental study of granular materials discharged from a silo with the placement of inserts. *Powder Technology* 120, 244–255.
60. Zhao, Y., Teng, J.G., 2004. Buckling experiments on steel silo transition junctions – I: experimental results. *Journal of Constructional Steel Research* 60, 1783–1801.
61. Zhong, Z., Ooi, J.Y., Rotter, J.M., 2001. The sensitivity of silo flow and wall stresses to filling method. *Engineering Structures* 23, 756–767.

A 23 de octubre de 2023

Fdo. D. Gerardo Hernández Rodrigo