

COMPARACIÓN DE TIPOLOGÍAS DE SILOS PARA ALMACENAMIENTO DE GRANOS
SEGÚN LA NORMA IRAM 8150-1Godoy, María Laura^a; Arauz Legnazzi, Joaquín^a;Pico, Leonel Osvaldo^b, Peralta, María Haydée^a^aÁrea Estructuras, Facultad de Ingeniería, UNICEN, mgodoy@fio.unicen.edu.ar^bÁrea Mecánica, Facultad de Ingeniería, UNICEN, lpico@fio.unicen.edu.ar**Palabras clave:** silos, almacenamiento de granos, normativa.**RESUMEN**

El almacenamiento de granos requiere estructuras seguras y eficientes que garanticen la conservación del material y la estabilidad estructural del sistema. La norma argentina IRAM 8150-1 establece los criterios de cálculo para silos metálicos aéreos destinados al almacenamiento de cereales y oleaginosas, considerando las particularidades de las cargas generadas por el grano y las acciones externas.

En el presente trabajo se comparan tipologías de silos de baja esbeltez (relación $H/D < 0,8$) y silos esbeltos ($0,8 < H/D < 2,5$).

Se discuten las implicancias estructurales de cada tipología en relación con la distribución de presiones del grano. El análisis permite identificar criterios de diseño relevantes para la selección y dimensionamiento de silos metálicos según la normativa vigente.

El aporte del trabajo consiste en realizar un análisis paramétrico sistemático de la influencia de la relación H/D sobre las principales acciones generadas por el grano, manteniendo constantes el diámetro y las propiedades del material almacenado. Esto permite identificar tendencias y cambios en el mecanismo de transferencia de cargas que no resultan evidentes de la aplicación aislada de las expresiones normativas

ABSTRACT

Grain storage requires safe and efficient structures that ensure both the preservation of the stored material and the structural stability of the system. The Argentine standard IRAM 8150-1 establishes the design calculation criteria for aerial steel silos intended for the storage of cereals and oilseeds, taking into account the specific characteristics of loads generated by the stored grain as well as external actions.

This paper compares different silo typologies, specifically low-slenderness silos ($H/D \leq 0.8$) and slender silos ($0.8 < H/D \leq 2.5$).

Structural implications of each typology are discussed in relation to the distribution of grain pressures. The analysis makes it possible to identify relevant design criteria for the selection and dimensioning of steel silos in accordance with the current standard.

The contribution of this work consists of performing a systematic parametric analysis of the influence of the H/D ratio on the main actions generated by the grain, keeping the diameter and the properties of the stored material constant. This allows for the identification of trends and shifts in the load transfer mechanism that are not evident from the isolated application of normative expressions.

INTRODUCCIÓN

El almacenamiento de granos constituye una de las etapas fundamentales dentro de la cadena agroindustrial, debido a su influencia directa sobre la conservación del producto, la logística de transporte y la eficiencia operativa de las plantas de acopio. En este contexto, los silos metálicos aéreos representan una de las soluciones más utilizadas para el almacenamiento de cereales y oleaginosas, principalmente por su capacidad de adaptación a diferentes escalas productivas, rapidez constructiva y eficiencia funcional^{1,2}.

El diseño estructural de este tipo de sistemas presenta particularidades que lo diferencian de otras estructuras metálicas convencionales, debido a la interacción compleja entre el material almacenado y la envolvente resistente. Las presiones ejercidas por el grano sobre las paredes y el fondo del silo dependen no solo de las propiedades físicas del material almacenado, sino también de la geometría de la estructura, de las condiciones de descarga y de las acciones externas actuantes, tales como viento y sismo. En consecuencia, el análisis estructural de silos requiere metodologías específicas capaces de representar adecuadamente el comportamiento mecánico del sistema^{1,3}. Particularmente, Reimbert⁴ advirtió que las presiones originadas en un silo no obedecían a un comportamiento hidrostático.

Numerosas son las normativas de base para diseñar silos^{5,6,7,8}. En Argentina, la norma IRAM 8150-1:2019⁹ establece los criterios de cálculo para silos metálicos aéreos destinados al almacenamiento de granos, contemplando las condiciones particulares de utilización y las acciones características asociadas a este tipo de estructuras. Entre los aspectos más relevantes introducidos por la norma se encuentra la diferenciación entre silos de baja esbeltez y silos esbeltos, clasificación que modifica el tratamiento de las presiones internas y de las cargas transmitidas a los elementos resistentes.

El presente trabajo desarrolla un análisis comparativo entre distintas tipologías de silos metálicos comprendidas dentro de los rangos de esbeltez establecidos por la normativa vigente. Se evalúa la evolución de las presiones horizontales, las cargas verticales por rozamiento y las solicitaciones estructurales asociadas, con el objetivo de identificar los parámetros de mayor influencia sobre el comportamiento resistente del sistema. Asimismo, se analizan las implicancias estructurales derivadas de la geometría del silo y de las condiciones de funcionamiento, aportando criterios de diseño útiles para el dimensionamiento y selección de estas estructuras en aplicaciones industriales y agropecuarias.

Si bien la IRAM 8150-1 establece las expresiones necesarias para determinar las acciones producidas por el grano, resulta de interés analizar de manera conjunta cómo dichas acciones evolucionan al modificarse sistemáticamente la esbeltez del silo. En

particular, la comparación entre diferentes relaciones H/D permite reconocer tendencias, máximos y cambios en los mecanismos de transferencia de carga que no se evidencian mediante el análisis aislado de una única configuración.

En este contexto, el objetivo del trabajo es evaluar la influencia de la relación H/D sobre las presiones horizontales, las presiones verticales, las cargas verticales por rozamiento y las solicitaciones asociadas, identificando sus tendencias, valores máximos y cambios de comportamiento dentro del rango de aplicación de la IRAM 8150-1.

FUNDAMENTOS DEL COMPORTAMIENTO DE SILOS

Los silos metálicos aéreos son estructuras destinadas al almacenamiento de materiales granulares, principalmente cereales y oleaginosas, cuya función principal consiste en preservar el producto almacenado y garantizar condiciones adecuadas de carga y descarga. Desde el punto de vista estructural, estas construcciones presentan características particulares debido a la interacción existente entre la estructura resistente y el comportamiento mecánico del material granular contenido.

A diferencia de los líquidos, los granos almacenados generan distribuciones de presiones no hidrostáticas, influenciadas por fenómenos de rozamiento interno y fricción con las paredes del silo. Como consecuencia, las cargas verticales y horizontales no evolucionan linealmente con la profundidad, especialmente en estructuras de elevada esbeltez. El comportamiento de los materiales granulares difiere sustancialmente del comportamiento hidrostático clásico, ya que parte del peso del material es transferido hacia las paredes mediante esfuerzos de rozamiento, reduciendo así la carga transmitida al fondo^{3,4,10}.

Uno de los modelos teóricos más importantes para describir este fenómeno es la teoría desarrollada por H. A. Janssen¹⁰ a fines del siglo XIX. Janssen observó experimentalmente que, en silos esbeltos, las presiones verticales no aumentan indefinidamente con la profundidad, sino que tienden a estabilizarse debido al efecto de fricción entre el grano y las paredes del silo. Este fenómeno, conocido como “efecto Janssen”, implica que una parte significativa del peso del material almacenado es soportada lateralmente por la envolvente estructural.

El modelo de Janssen establece que las presiones verticales y horizontales dependen de parámetros como el peso específico del material granular, el coeficiente de rozamiento grano-pared, la geometría del silo y la relación entre presión horizontal y presión vertical^{1,2}. Como resultado, en silos esbeltos las cargas laterales adquieren gran relevancia estructural y las presiones dejan de presentar una evolución lineal con la profundidad. Este comportamiento constituye una de las bases conceptuales

utilizadas por las normas modernas de diseño de silos.

PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

La norma IRAM 8150-1:2019 establece los criterios de cálculo estructural para silos metálicos aéreos de acero destinados al almacenamiento de granos⁹, considerando relaciones de esbeltez $H/D \leq 2,5$. La normativa diferencia dos grandes tipologías estructurales: silos de baja esbeltez ($H/D \leq 0,8$) y silos esbeltos ($0,8 < H/D \leq 2,5$), donde H es la altura del cuerpo cilíndrico y D es su diámetro. Esta clasificación resulta relevante debido a que modifica la formulación de las presiones horizontales y de las cargas verticales por rozamiento aplicadas sobre la estructura.

La figura 1 muestra el esquema de silo adoptado por la norma para el procedimiento de cálculo informado en las figuras 2 a 5 (silos de baja esbeltez) y 6 a 9 (silos esbeltos).

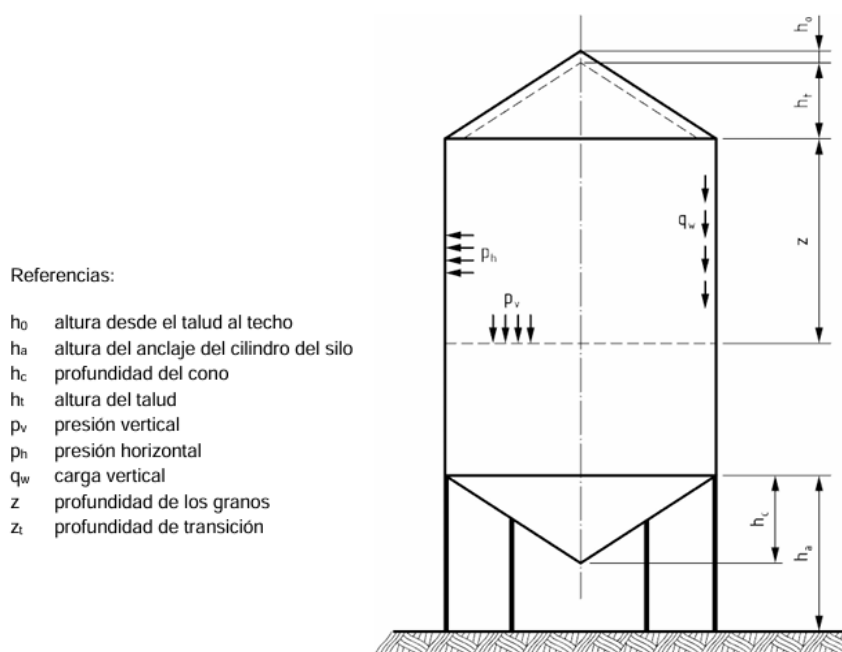


Figura 1. Parámetros geométricos del silo. IRAM 8150-1:2019.

4 ESFUERZOS RELATIVOS A LA ACCIÓN DE LOS GRANOS

El cálculo de la acción de los granos sobre las paredes de los silos se debe realizar de la manera descrita en 4.1 y 4.2.

4.1 Cálculo de la acción de los granos para silos de baja esbeltez

4.1.1 Cálculo de la presión horizontal a aplicar (p_{hb})

Para calcular la presión horizontal en el punto de aplicación ver la fórmula (1).

$$p_{hb} = p_{hb0} \cdot C_h + J \cdot z^2 \quad (1)$$

$$p_{hb0} = K_b \cdot \gamma \cdot z \quad (2)$$

siendo:

- K_b la relación (p_h/p_v) para silos de baja esbeltez igual a 0,355;
- γ el peso específico del grano igual a 8,5 kN/m³;
- z la profundidad, de los granos medida a partir del aro superior del cilindro, expresada en metros;
- C_h el coeficiente de sobrecarga horizontal igual a 1,15;
- J factor de presión debido a la aireación (igual a 0,0009 kN/m⁴).

Fuerza de tracción sobre las chapas en el nivel z (T_{hz}), en Newton, está dada por la fórmula siguiente:

$$T_{hz} = p_{hb} \cdot \frac{D}{2} \cdot h_{vir} \quad (3)$$

siendo:

- p_{hb} la presión horizontal a aplicar;
- h_{vir} la altura de la virola, en metros;
- D el diámetro del cilindro del silo, en metros.

Figura 2. Presión horizontal en silos de baja esbeltez. IRAM 8150-1:2019.

4.1.2 Carga vertical por rozamiento (q_{wb})

La carga vertical por rozamiento (q_{wb}) sobre la pared, se debe calcular de la manera siguiente:

$$q_{wb} = q_{wb0} \cdot C_w \quad (4)$$

siendo:

- C_w el coeficiente de sobrecarga vertical.

$$q_{wb0} = p_{hb0} \cdot z \cdot \frac{\mu}{2} \quad (5)$$

$$C_w = 1,1 + 0,38 \cdot \frac{h}{2,5 \cdot D} \quad (6)$$

siendo:

- q_{wb0} la carga vertical por rozamiento (de cálculo) por unidad de perímetro para silos de baja esbeltez;
- C_w el coeficiente, de sobrecarga vertical por rozamiento por unidad de perímetro;
- μ el coeficiente, de rozamiento grano-pared;
- h la profundidad de los granos para el cálculo de cargas, en metros.

La fuerza de compresión (P_{wbz}) sobre los montantes en el nivel z , en kilonewton, surge de la fórmula siguiente:

$$P_{wbz} = q_{wb} \cdot d_c \quad (7)$$

siendo:

- q_{wb} la carga vertical por unidad de perímetro a aplicar - silos de baja esbeltez;
- d_c la distancia entre montantes.

Figura 3. Carga vertical por rozamiento en silos de baja esbeltez. IRAM 8150-1:2019.

4.1.3 Cálculo de la presión vertical (p_{vb})

4.1.3.1 Presión vertical adyacente a la pared

Para calcular la presión vertical adyacente a la pared del silo (p_{vb}) se debe aplicar la fórmula siguiente:

$$p_{vb} = C_v \cdot p_{vb0} \quad (8)$$

$$p_{vb0} = \left[\frac{C_{vir} - p_{h0} \cdot \mu \cdot U \cdot h_{vir}}{A} + p_{vb0}(z-1) \right] \quad (9)$$

siendo:

C_{vir} la fuerza del peso del cereal de una virola, en kilonewton calculada de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$C_{vir} = A \cdot \gamma \cdot h_{vir} \quad (10)$$

p_{h0} la presión horizontal de cálculo, en kN/m^2 ;

U perímetro de la circunferencia del cilindro, en metros;

A Área transversal del cilindro, en metros;

C_v el coeficiente de sobrecarga vertical, igual a 1,2.

NOTA. La *virola* también se conoce como fila.

Figura 4. Presión vertical adyacente a la pared en silos de baja esbeltez. IRAM 8150-1:2019.

4.1.3.2 Presión vertical en el fondo (p_{vf})

Para calcular la presión en el fondo del silo, excepto la parte adyacente a la pared, se debe considerar su geometría:

a) para fondo plano

$$p_{vf} = p_{vb} + p_{talud} \quad (11)$$

b) para fondo no plano

$$p_{vf} = p_{vb} + p_{talud} + z_c \cdot \gamma \quad (12)$$

siendo:

p_{talud} la presión generada por el talud de granos, determinada por la fórmula siguiente:

$$p_{talud} = \lambda \cdot \gamma \cdot \frac{D}{6} \cdot 1,3 \quad (13)$$

z_c la profundidad de la tolva inferior en el punto de cálculo;

λ la pendiente del talud natural de los granos almacenados, en radianes;

1,3 el coeficiente de mayoración que contempla la mayor carga sobre el centro del silo.

Figura 5. Presión vertical en el fondo en silos de baja esbeltez. IRAM 8150-1:2019.

4.2 Acción del grano para silos esbeltos

4.2.1 Cálculo de la presión horizontal (p_{ha})

Para profundidades (z) menores o iguales al 80% del diámetro ($0,8 \cdot D$) se debe calcular de acuerdo con lo establecido en 4.1.1.

Para profundidades (z) mayores que el 80% del diámetro ($0,8 \cdot D$) se debe aplicar la formula siguiente:

$$p_{ha} = p_{ha0} \cdot C_h + J \cdot z^2 \quad (14)$$

$$p_{ha0} = \gamma \cdot \frac{D}{4 \cdot \mu} \cdot \left(1 - e^{\left(\frac{-(z + z_0)}{Z_0} \right)} \right) \quad (15)$$

siendo:

- e el número de Euler;
- z_0 la profundidad inicial para silos esbeltos, en metros, dada por la relación siguiente:
 $z_0 = 0,279 \cdot D$;
- z la profundidad del grano a partir del aro superior del cilindro;
- Z_0 la profundidad característica para silos esbeltos, en metros, dada por la relación siguiente:
 $Z_0 = 1,3127 \cdot D$;
- C_h el coeficiente, de sobrecarga horizontal igual a 1,15.

Fuerza de tracción sobre las chapas en el nivel z (T_{hz})

$$T_{hz} = p_{ha} \cdot \frac{D}{2} \cdot h_{vir} \quad (16)$$

siendo:

- p_{ha} la presión horizontal, a aplicar, en silos esbeltos.

Figura 6. Presión horizontal en silos esbeltos. IRAM 8150-1:2019.

4.2.2 Cálculo vertical por rozamiento (q_{wa})

Para profundidades (z) menores que el 80% del diámetro ($0,8 \cdot D$), se debe calcular de acuerdo con lo establecido en 4.1.2.

Para profundidades (z) iguales o mayores que el 80% del diámetro ($0,8 \cdot D$) se debe calcular de la manera siguiente:

$$q_{wa} = C_w \cdot q_{wa0} \quad (17)$$

$$q_{wa0} = \left[\left(\gamma \cdot \frac{A}{U} \right) \cdot \left((z + z_0) - Z_0 \cdot e^{\left(\frac{-(z + z_0)}{Z_0} \right)} \right) - q_{wa0zt} + q_{wb0zt} \right] \quad (18)$$

$$q_{wa0zt} = \left(\gamma \cdot \frac{A}{U} \right) \cdot \left((z_t + z_0) - Z_0 \cdot e^{\left(\frac{-(z_t + z_0)}{Z_0} \right)} \right) \quad (19)$$

$$q_{wb0zt} = p_{hb} \cdot z_t \cdot \frac{\mu}{2} \quad (20)$$

siendo:

- q_{wa0zt} el valor que arroja el cálculo en la profundidad de transición para silos altos;
- q_{wb0zt} el valor que arroja el cálculo en la profundidad de transición para silos bajos;
- q_{wa} la carga vertical por unidad de perímetro a aplicar para silos esbeltos, en kilonewton por metro;
- q_{wa0} la carga vertical (de cálculo) por unidad de perímetro para silos esbeltos, en kilonewton por metro;
- z_t la altura de transición, en metros, calculada por la relación siguiente: $z_t = 0,8 \cdot D$;
- C_w el coeficiente, de sobrecarga vertical por unidad de perímetro calculado de acuerdo con la fórmula 6.

La fuerza de compresión sobre el montante (P_{waz}) se calcula por medio de la fórmula siguiente:

$$P_{waz} = q_{wa} \cdot d_c + P_{wa(z-1)} \quad (21)$$

siendo:

- q_{wa} la carga vertical, a aplicar, en silos esbeltos;
- d_c la distancia entre montantes.

Figura 7. Carga vertical por rozamiento en silos esbeltos. IRAM 8150-1:2019.

4.2.3 Presión vertical (p_{va})

4.2.3.1 Cálculo de la presión vertical adyacente a la pared (p_{va})

Para profundidades menores que el 80% del diámetro ($0,8 \cdot D$), se debe calcular de acuerdo con lo establecido en 4.1.3.1.

Para profundidades (z) iguales o mayores que el 80% del diámetro (D) se debe calcular de la manera siguiente:

$$p_{va} = C_v \cdot p_{va0} \quad (22)$$

$$p_{va0} = \left[\frac{C_{vir} \cdot p_{ha0} \cdot \mu \cdot U \cdot h_{vir}}{A} + p_{va0(z-1)} \right] \quad (23)$$

siendo:

- C_v el coeficiente de sobrecarga vertical considerado, en este caso: $C_v = 1,2$.

Figura 8. Presión vertical adyacente a la pared en silos esbeltos. IRAM 8150-1:2019.

4.2.3.2 Cálculo de la presión vertical en el fondo (p_{vf})

La presión vertical en el fondo se debe calcular con la fórmula siguiente:

a) para fondo plano

$$p_{vf} = p_{va} + p_{talud} \quad (24)$$

b) para fondo no plano

$$p_{vf} = p_{va} + p_{talud} + z_c \cdot \gamma \quad (25)$$

siendo:

p_{talud} la presión generada por el talud de grano, en kN/m^2 , calculada según la fórmula 13;

z_c la profundidad del cono en el punto de cálculo, en metros.

Figura 9. Presión vertical en el fondo en silos esbeltos. IRAM 8150-1:2019.

En silos de baja esbeltez, las presiones horizontales sobre la pared presentan una evolución aproximadamente lineal respecto de la profundidad del grano, debido a que el efecto de transferencia de cargas hacia las paredes resulta relativamente reducido^{5,6,12}. En cambio, en silos esbeltos, la norma introduce una profundidad de transición equivalente al 80% del diámetro del silo, a partir de la cual las presiones comienzan a responder a un comportamiento no lineal asociado al efecto de saturación de cargas generado por el rozamiento grano-pared. Este fenómeno produce una redistribución de esfuerzos que incrementa las cargas transmitidas hacia las paredes y los montantes.

La acción de los granos sobre el silo se manifiesta principalmente mediante tres solicitaciones: presiones horizontales sobre la envolvente cilíndrica, cargas verticales por rozamiento transmitidas a los montantes y presiones verticales actuantes sobre el fondo. Estas acciones dependen de variables geométricas y mecánicas tales como el diámetro del silo, la altura de almacenamiento, el peso específico del material, el coeficiente de rozamiento grano-pared y la geometría del fondo.

Asimismo, el comportamiento estructural del silo se encuentra influenciado por las condiciones de operación. Durante el proceso de descarga pueden producirse estados tensionales significativamente distintos de los desarrollados durante el llenado^{12,13}. Particularmente, las descargas excéntricas generan distribuciones asimétricas de presión capaces de inducir momentos de vuelco, incrementos localizados de compresión en montantes y fenómenos de abolladura en las chapas.

Además de las acciones internas producidas por el material almacenado, la estructura debe verificarse frente a acciones externas, entre las que se destacan viento y sismo. Estas solicitaciones adquieren especial importancia en silos esbeltos debido a su elevada relación altura-diámetro y a la reducción relativa de rigidez lateral. Por este motivo, las verificaciones de estabilidad global, pandeo y rigidización constituyen

aspectos fundamentales dentro del diseño estructural de este tipo de construcciones^{1,2}. Estos aspectos de cargas externas no se han considerado en el presente artículo.

Desde el punto de vista resistente, los elementos principales de un silo metálico aéreo están constituidos por chapas conformadas, uniones abulonadas, montantes verticales y sistemas de rigidización. El diseño de estos componentes debe contemplar fenómenos de tracción, compresión, corte y pandeo local, especialmente en estructuras esbeltas donde las acciones de rozamiento adquieren mayor importancia relativa^{14,15}.

En consecuencia, el análisis estructural de silos metálicos requiere considerar simultáneamente aspectos geométricos, mecánicos y operativos, ya que pequeñas variaciones en la esbeltez o en las condiciones de descarga pueden modificar significativamente el comportamiento global de la estructura.

METODOLOGÍA

El presente trabajo se desarrolló mediante una metodología de análisis comparativo basada en los criterios de cálculo establecidos por la norma IRAM 8150-1 para silos metálicos aéreos destinados al almacenamiento de granos. El estudio se enfocó en evaluar el comportamiento estructural de distintas tipologías de silos comprendidas dentro de los rangos de esbeltez definidos por la normativa vigente.

En primer lugar, se realizó una revisión bibliográfica y normativa orientada al estudio del comportamiento mecánico de materiales granulares y de los modelos teóricos aplicados al diseño de silos metálicos, particularmente aquellos derivados de la teoría de Janssen. Posteriormente, se analizaron los criterios de cálculo establecidos por la IRAM 8150-1, identificando las expresiones correspondientes a presiones horizontales, cargas verticales por rozamiento y presiones verticales en el fondo para silos de baja esbeltez y silos esbeltos^{1,3,9}.

A partir de estos lineamientos se desarrollaron planillas de cálculo destinadas a modelar el comportamiento estructural de distintas configuraciones geométricas. Para ello se definieron casos representativos correspondientes a silos de baja esbeltez y silos esbeltos, utilizando parámetros geométricos y mecánicos compatibles con las condiciones establecidas por la norma.

Las planillas desarrolladas permitieron calcular la evolución de las presiones horizontales sobre las paredes, las cargas verticales por rozamiento transmitidas a los montantes y las presiones verticales sobre el fondo en función de la profundidad del material almacenado. Asimismo, se incorporaron las expresiones normativas asociadas a la profundidad de transición para silos esbeltos, permitiendo analizar el

cambio de comportamiento resistente característico de este tipo de estructuras.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos, se elaboraron conclusiones orientadas a identificar los parámetros de mayor incidencia en el diseño estructural de silos metálicos y las principales diferencias mecánicas entre las tipologías analizadas. El estudio se planteó como un análisis paramétrico determinista, manteniendo constantes el diámetro del silo y las propiedades del material almacenado y variando la altura del cuerpo cilíndrico. Se adoptaron las propiedades y coeficientes establecidos por la IRAM 8150-1 para el material granular considerado. Las configuraciones se analizaron bajo las hipótesis inherentes al procedimiento normativo, sin considerar en esta etapa acciones externas de viento y sismo, efectos dinámicos ni situaciones particulares de descarga excéntrica.

TIPOLOGÍAS ANALIZADAS Y CARACTERÍSTICAS DE SILOS ESTUDIADOS

Para el desarrollo del presente trabajo se analizaron distintas tipologías de silos metálicos aéreos comprendidas dentro de los rangos de aplicación establecidos por la norma IRAM 8150-1. El estudio se enfocó principalmente en la comparación entre silos de baja esbeltez y silos esbeltos, considerando las diferencias estructurales y mecánicas asociadas a cada configuración.

Las tipologías evaluadas corresponden a silos cilíndricos metálicos destinados al almacenamiento de granos a granel, constituidos por una envolvente de chapas de acero conformadas y rigidizadas mediante montantes verticales y uniones abulonadas. Se consideraron configuraciones típicas utilizadas en instalaciones agroindustriales y plantas de acopio, con geometrías compatibles con los límites normativos de esbeltez ($H/D \leq 2,5$).

En particular, se analizaron los casos de:

- **Silos de baja esbeltez**, definidos por una relación altura-diámetro igual o menor que 0,8. En este tipo de estructuras, el comportamiento de las presiones internas presenta una evolución aproximadamente lineal con la profundidad, predominando una distribución relativamente uniforme de las solicitaciones.
- **Silos esbeltos**, definidos por relaciones de esbeltez comprendidas entre 0,8 y 2,5. Estas configuraciones presentan una mayor influencia del rozamiento grano-pared y del efecto de saturación de presiones, generando un comportamiento estructural más complejo y mayores exigencias sobre chapas, montantes y uniones.

Dentro de cada grupo se consideraron modelos representativos con diferentes relaciones altura-diámetro H/D , permitiendo analizar la evolución de las presiones

horizontales, las presiones verticales, las cargas verticales por rozamiento y las sollicitaciones estructurales en función de la esbeltez del sistema.

Para todos los análisis se tuvo en cuenta el diámetro $D = 10$ m, variándose la altura H entre 6 m y 24 m y obteniéndose en consecuencia las relaciones que se muestran en la tabla 1. Para todos los casos, se consideró una tolva con altura de cono $z_c = 7$ m (fondo no plano) y $z_c = 0$ m (fondo plano).

El intervalo de alturas $H = 6\text{--}24$ m fue seleccionado para cubrir, con un diámetro constante $D = 10$ m, relaciones H/D comprendidas entre 0,6 y 2,4. De esta manera se incluyen tanto el régimen de baja esbeltez como el régimen esbelto definidos por la IRAM 8150-1, incluyendo el límite $H/D = 0,8$ y aproximándose al límite superior $H/D = 2,5$. Los casos considerados tienen carácter representativo desde el punto de vista paramétrico y permiten analizar sistemáticamente la influencia de la esbeltez manteniendo constantes los restantes parámetros geométricos principales.

Tabla 1. Tipologías de silos estudiadas.

H (m)	Relación H/D	Tipo de silo
6	0,6	De baja esbeltez
8	0,8	
10	1,0	Esbelto
12	1,2	
14	1,4	
16	1,6	
18	1,8	
20	2,0	
22	2,2	
24	2,4	

En relación con la geometría del fondo, se contemplaron configuraciones compatibles con las definiciones establecidas por la norma, incluyendo silos con fondo plano y silos con fondo cónico. La consideración de estas variantes permitió evaluar la influencia de la geometría inferior sobre las presiones verticales transmitidas al fondo y sobre las condiciones de descarga del material almacenado.

En cuanto al material almacenado, se adoptó un comportamiento representativo de cereales y oleaginosas en estado granular seco, utilizando los parámetros establecidos por la IRAM 8150-1. Se consideró un peso específico del grano de $8,5 \text{ kN/m}^3$, un coeficiente de rozamiento grano-pared de 0,49 y los coeficientes normativos asociados a sobrecargas horizontales y verticales.

Los modelos analizados fueron evaluados mediante las expresiones de cálculo definidas por la normativa para presiones horizontales, cargas verticales por rozamiento y presiones verticales en el fondo. En el caso de los silos esbeltos, se incorporó además el análisis de la profundidad de transición y del comportamiento no lineal asociado al efecto de saturación de cargas derivado de la teoría de Janssen.

La selección de estas tipologías y parámetros de cálculo permitió desarrollar una comparación representativa entre diferentes configuraciones de silos metálicos utilizados en aplicaciones agroindustriales, identificando las principales diferencias estructurales derivadas de la esbeltez y de la geometría del sistema.

RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSIÓN

Para relaciones H/D entre 1 y 1,8 (figura 10) se observa que las presiones horizontales p_h máximas ocurren en proximidades del fondo del silo, en correspondencia con el inicio de la tolva de descarga. Sin embargo, para relaciones H/D entre 1,8 y 2,4, las presiones horizontales máximas ocurren por encima del inicio de la tolva. Es notable que en estos casos, en proximidades del inicio de la tolva, las presiones disminuyen luego de alcanzar esos máximos. Esto se debe principalmente al efecto friccional que ejerce la carga vertical por rozamiento q_w .

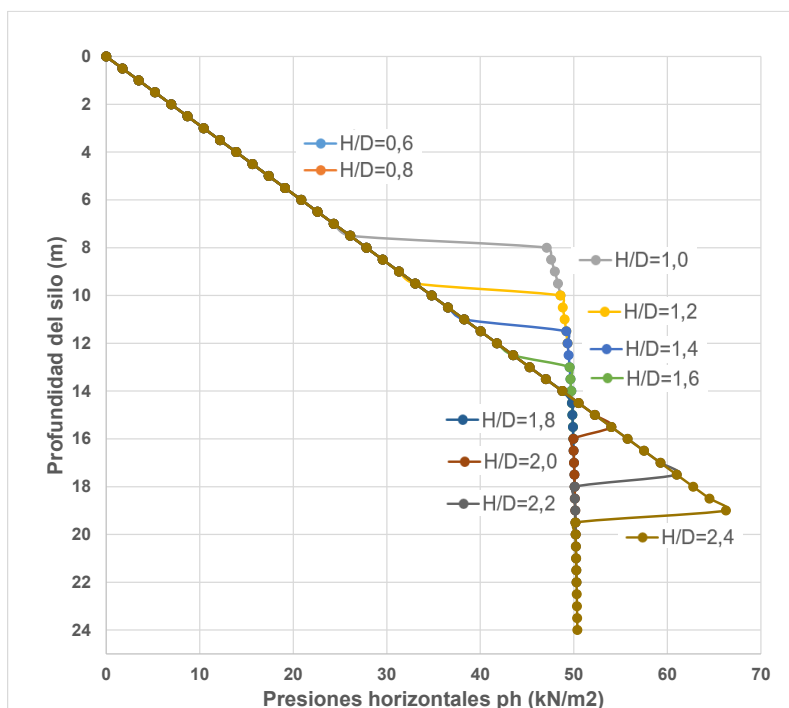


Figura 10. Presiones horizontales en función de la profundidad z del silo para diferentes relaciones H/D .

Algo similar ocurre para las presiones verticales adyacentes a la pared p_v (figura 11), pues para relaciones H/D entre 1 y 1,8, los valores máximos se encuentran en el fondo

de la envolvente cilíndrica del silo y en el comienzo de la tolva de descarga. Por su parte, para relaciones H/D superiores a 1,8, los valores máximos de estas presiones se sitúan por encima de la tolva, disminuyendo hacia el inicio de ésta. De manera análoga a lo observado en las figuras 10 y 11, las presiones verticales de fondo p_{vf} tienen sus valores máximos dependiendo de la relación H/D (figura 12). Lógicamente, las fuerzas de tracción T_{hw} (figura 13), por depender directamente de las presiones horizontales, exhiben comportamiento análogo a ellas. Por su parte, la carga de rozamiento q_w tiene crecimiento bastante pronunciado con el aumento de la profundidad y experimenta saltos en correspondencia con el cambio de régimen de cálculo, al pasar a silos esbeltos.

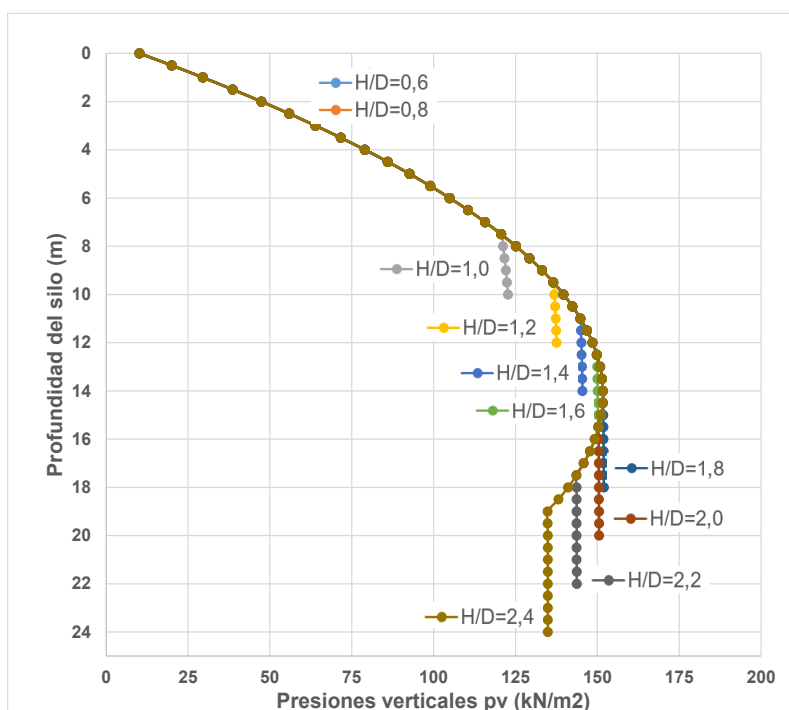


Figura 11. Presiones verticales adyacentes a la pared en función de la profundidad z del silo para diferentes relaciones H/D .

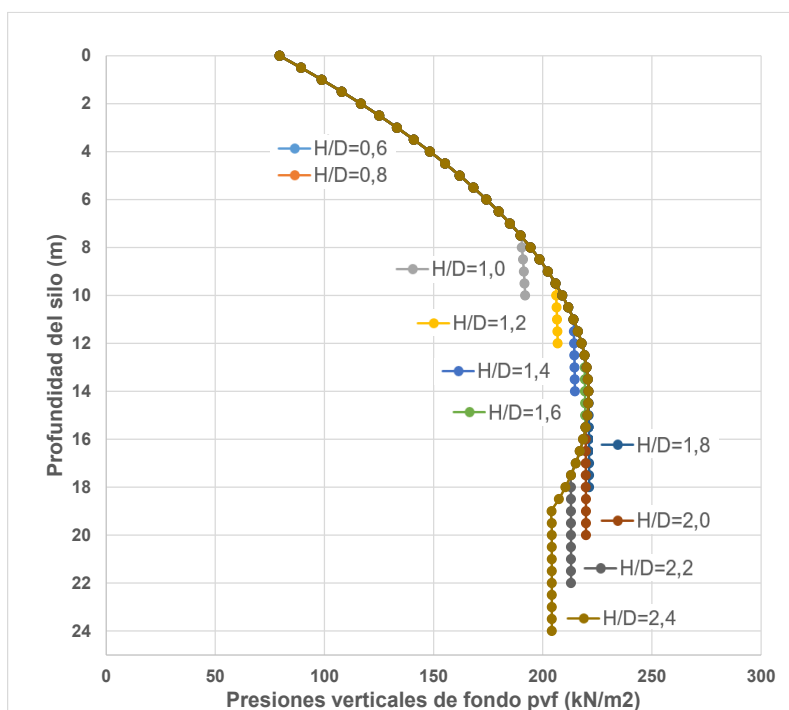


Figura 12. Presiones verticales de fondo en función de la profundidad z del silo para diferentes relaciones H/D .

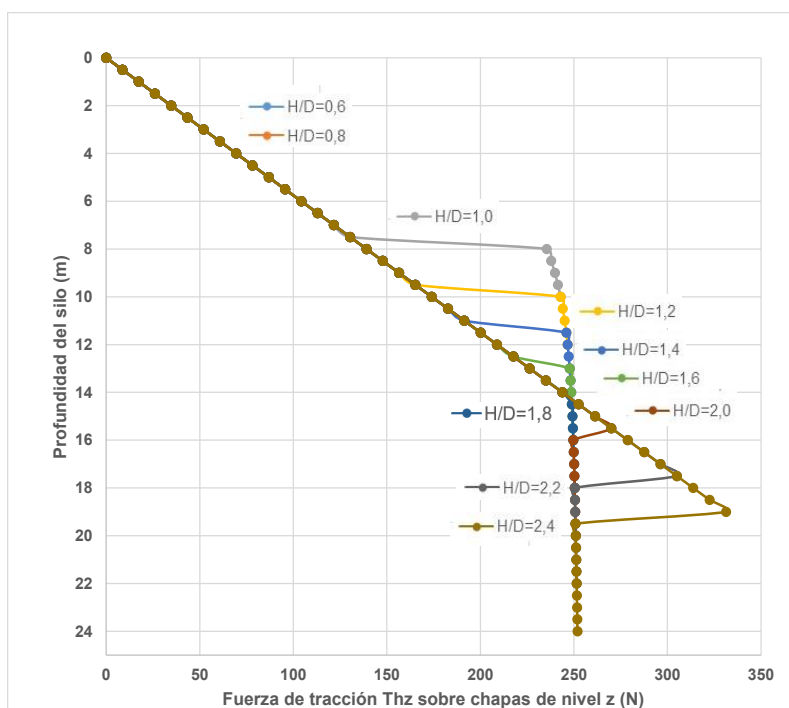


Figura 13. Fuerzas de tracción sobre chapas de nivel z en función de la profundidad z del silo para diferentes relaciones H/D .

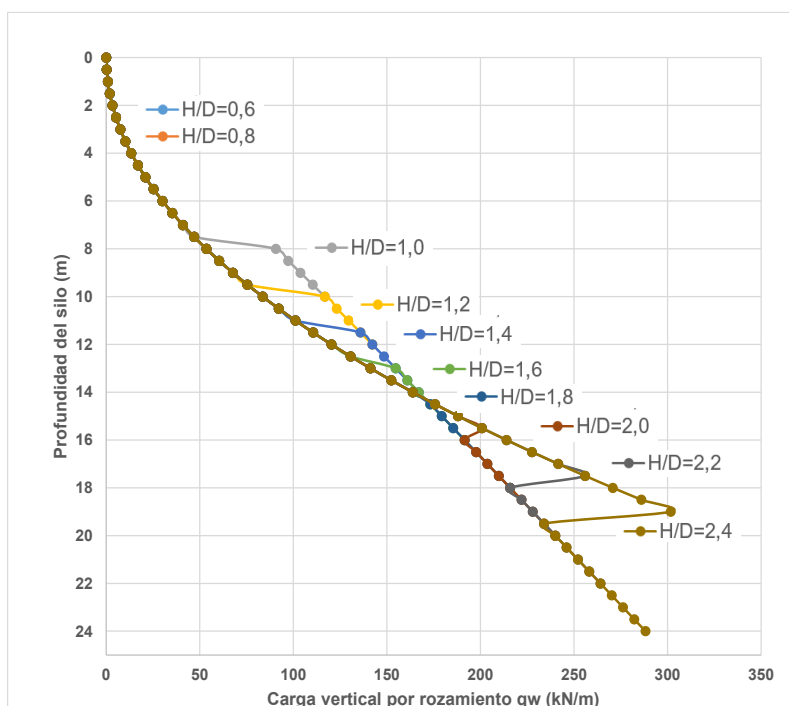


Figura 14. Cargas verticales por rozamiento en función de la profundidad z del silo para diferentes relaciones H/D .

En términos cuantitativos: la presión horizontal máxima pasa de 48 kN/m² para $H/D = 1$ a 67 kN/m² para $H/D = 2,4$, lo que representa una variación en más del 39,5 %; las presiones verticales adyacentes a la pared pasan de 124 kN/m² para $H/D = 1$ a 151 kN/m² para $H/D = 2,4$, lo que representa una variación en más del 18 %; las presiones verticales de fondo pasan de 185 kN/m² para $H/D = 1$ a 220 kN/m² para $H/D = 2,4$, lo que representa una variación en más del 19 % y las cargas verticales por rozamiento pasan de 123 kN/m para la configuración $H/D = 1$ a 310 kN/m para $H/D = 2,4$ lo que representa una variación en más del 152 %. Estos valores confirman cuantitativamente las tendencias observadas en las Figuras 10 a 14.

La presión de talud es 9,76 kN/m² en todos los casos, dado que depende directamente del diámetro D fijo y del ángulo de talud del material, también fijo. Por su parte, dado que se han contemplado dos situaciones extremas, una con fondo plano ($z_c = 0$ m) y fondo no plano ($z_c = 7$ m), la presión vertical de fondo pasa a depender directamente de si hay cono o no. En el caso plano, es la suma de la presión p_v más la presión de talud. En el caso no plano, es decir, con tolva cónica, debe agregarse el término del efecto del cono o tolva.

El resultado más importante de todo el análisis es que la geometría gobierna casi por completo el reparto de cargas. La norma IRAM 8150 distingue entre silos de baja esbeltez y silos esbeltos y además introduce la profundidad de transición $z_t = 0,8 D$,

donde cambia el modelo de cálculo para las presiones y el rozamiento. Eso hace que el comportamiento estructural no sea una simple extrapolación de un caso a otro, sino un cambio de régimen.

En la baja esbeltez, los perfiles de presiones p_h , p_v y p_{vf} crecen de manera bastante regular con la profundidad. Algo similar ocurre con la tracción T_{hw} . En el caso de la carga de rozamiento q_w , su crecimiento es bastante pronunciado. En líneas generales se puede decir que los resultados indican estados tensionales donde el silo trabaja con una distribución relativamente uniforme de acciones sobre la envolvente y con menores concentraciones locales. En términos prácticos, la chapa y los montantes reciben una demanda creciente, pero todavía bastante homogénea.

Cuando el sistema entra en régimen esbelto, la respuesta cambia claramente. En la comparativa ampliada, la presión horizontal p_h y la carga de tracción T_{hw} exhiben saltos pronunciados debido al cambio de régimen de cálculo. Por su parte, la carga vertical por rozamiento q_w también experimenta un incremento notable. Esos saltos constituyen los aspectos más relevantes: el silo deja de estar controlado principalmente por la presión lateral p_h y pasa a quedar fuertemente condicionado por la transferencia de carga a través de la pared y los montantes. La teoría de Janssen explica justamente esa tendencia a la saturación de presiones y al traslado de peso hacia la envolvente.

Otro punto interesante es que la presión vertical adyacente a la pared p_v y la presión vertical en el fondo p_{vf} no crecen indefinidamente con la esbeltez. En el análisis comparativo, ambas alcanzan un máximo intermedio y luego tienden a estabilizarse o incluso a bajar levemente para relaciones H/D más altas. Eso es totalmente coherente con el efecto Janssen: a medida que aumenta la altura, una parte creciente del peso del grano se desvía hacia las paredes por rozamiento, de modo que el fondo no siempre absorbe la mayor carga en el caso más esbelto.

Desde el punto de vista estructural, eso tiene varias consecuencias. En las chapas, aumentan la tracción circunferencial, la sollicitación en las juntas y la demanda sobre los agujeros y bulones; por eso, en silos esbeltos, la continuidad de la envolvente y la calidad de las uniones pasan a ser decisivas. En los montantes, la carga por rozamiento se vuelve la acción más crítica: crece la compresión vertical, aumenta el riesgo de pandeo local y se vuelve más importante la necesidad de rigidización. En el comportamiento global, el silo esbelto se vuelve más sensible a acciones laterales, a la descarga excéntrica y a la respuesta dinámica, con mayores exigencias sobre anclajes y elementos de arriostramiento.

En síntesis, los resultados muestran que al aumentar la esbeltez no solo aumenta la magnitud de algunas cargas, sino que cambia el mecanismo resistente dominante. En

silos bajos predomina una respuesta más distribuida; en silos altos, la pared y los montantes pasan a ser los elementos más comprometidos, mientras que el fondo no necesariamente es el sector más cargado.

Las tendencias obtenidas resultan consistentes con el comportamiento clásico descrito por Janssen y con los desarrollos posteriores de Brown y Nielsen y Rotter, según los cuales el incremento de la esbeltez favorece la transferencia de una mayor proporción del peso del material hacia las paredes mediante rozamiento. Este comportamiento constituye asimismo la base conceptual de diferentes reglamentos internacionales para silos, tales como DIN, Eurocode, ASAE y ACI, aunque existen diferencias entre ellos respecto de los coeficientes, hipótesis y procedimientos utilizados para determinar las acciones del material almacenado.

CONCLUSIONES

El análisis realizado sobre distintas tipologías de silos metálicos aéreos según la norma IRAM 8150-1 permitió identificar diferencias significativas en el comportamiento estructural de los sistemas en función de su relación de esbeltez. Los resultados obtenidos muestran que la geometría del silo constituye uno de los parámetros de mayor influencia sobre la distribución de presiones generadas por el grano y sobre la magnitud de las solicitaciones transmitidas a la estructura.

En los silos de baja esbeltez ($H/D \leq 0,8$), las presiones horizontales y las cargas verticales por rozamiento presentan una evolución relativamente gradual con la profundidad, evidenciando un comportamiento estructural más uniforme. En cambio, en los silos esbeltos ($0,8 < H/D \leq 2,5$), el incremento de la altura respecto del diámetro modifica significativamente el régimen de cargas, aumentando las acciones de rozamiento sobre las paredes y las fuerzas transmitidas a montantes y uniones. En este tipo de estructuras, la carga vertical por rozamiento adquiere una importancia determinante en el dimensionamiento estructural.

Asimismo, se observó que la profundidad de transición definida por la norma introduce un cambio relevante en el modelo de cálculo para silos esbeltos, reflejando la influencia del efecto de saturación de presiones característico de este tipo de almacenamiento. Esto implica que la esbeltez no solo incrementa las solicitaciones, sino que también modifica el mecanismo resistente predominante de la estructura.

Entre los parámetros de mayor incidencia sobre los resultados se destacan el diámetro del silo, la altura del cilindro, la profundidad del material almacenado, el peso específico del grano y el coeficiente de rozamiento grano-pared. Del mismo modo, la geometría del fondo influye directamente sobre las presiones verticales transmitidas hacia la base del silo.

Finalmente, la selección de la tipología estructural no debe responder únicamente a criterios de capacidad de almacenamiento, sino también al comportamiento mecánico esperado y a las exigencias estructurales derivadas de cada configuración.

Como aporte principal, el estudio permite visualizar de manera conjunta y sistemática la influencia de la esbeltez sobre las diferentes acciones contempladas por la IRAM 8150-1, identificando que el aumento de H/D no implica únicamente un incremento de las solicitaciones, sino también modificaciones en el mecanismo predominante de transferencia de cargas hacia la envolvente y el fondo del silo.

Los resultados deben interpretarse dentro de las hipótesis consideradas. El estudio se limita a un diámetro de 10 m, un conjunto determinado de propiedades del material almacenado y las geometrías de fondo analizadas. Asimismo, no se consideraron acciones externas de viento y sismo ni condiciones particulares de descarga, por lo que la extensión de las conclusiones a otras configuraciones requiere análisis complementarios

REFERENCIAS

1. Brown, C. J.; Nielsen, J. *Silos: Fundamentals of Theory, Behaviour, and Design*. Taylor & Francis Routledge. London. 1998.
2. Rotter, J. M. *Guide for the Economic Design of Circular Metal Silos*. Taylor & Francis Routledge. 2001.
3. Ayuga, F. *Los empujes del material almacenado en silos (loads of stored bulk solids in silos)*. Revista de informes de la construcción. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid. 1995.
4. Reimbert, M. *Recherches nouvelles sur les efforts exercés par les matières pulvérulentes ensilées sur les parois des silos*. Annales FTBTP n° 11 pp. 1-48 discusión, pp. 49-60. 1943.
5. DIN 1055 part 6. *Design loads for buildings. Loads in silo bins*. 1987.
6. ENV 1991-4. Eurocode 1. *Basis of design and actions on structures. Part 4: Actions on silos and tanks*.
7. ASAE Standard EP-433. *Loads exerted by free flowing grains on bins*. 1989.
8. ACI313-77. *Recommended practice for design and construction of concrete bins, silos, and bunkers for storing granular materials*. 1983.
9. IRAM 8150-1:2019. Norma Argentina. *Silos aéreos de acero para almacenamiento de granos. Parte 1 - Método de cálculo*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. 2019.
10. Janssen, H. A. *Versuch über Getreidedruck in Sillozellen*. Z. VDI. Vol. 39, pp. 1045-1049. 1895.

11. Gómez-Senent Martínez, E., González Cruz, M. C., Philippot, M. *Estudio comparativo de diversas normas para el cálculo de silos de almacenamiento de materiales granulares*. X Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. Valencia, 13-15 de septiembre de 2006.
12. Ravenet Catalán, J. *Sobrepresiones en las paredes de los silos debidas al vaciado*. Informes de la Construcción, Vol. 28, nº 272, Julio de 1975.
13. Bayona Carvajal, W. N. *Estimación de esfuerzos inducidos durante el llenado y vaciado de silos metálicos para almacenamiento de cemento*. Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería. Universidad Tecnológica de Bolívar. Cartagena de Indias. 2015.
14. CIRSOC 301/2005. *Reglamento argentino de estructuras de acero para edificios*. CIRSOC, Centro de Investigaciones de Reglamentos de Seguridad para las Obras Civiles. INTI, Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Buenos Aires, 2009.
15. CIRSOC 305/2007. *Recomendación para uniones estructurales con bulones de alta resistencia*. CIRSOC, Centro de Investigaciones de Reglamentos de Seguridad para las Obras Civiles. INTI, Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Buenos Aires, 2009.