

**MODELO NUMÉRICO DE UN SILO METALICO PARA ALMACENAMIENTO
DE CEMENTO: FLUJO, PRESIONES, ACCIONES Y ESFUERZOS**

**CAROLINA QUINTERO RAMÍREZ
INGENIERA CIVIL**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRIA EN INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2013**

**MODELO NUMÉRICO DE UN SILO METALICO PARA ALMACENAMIENTO
DE CEMENTO: FLUJO, PRESIONES, ACCIONES Y ESFUERZOS**

CAROLINA QUINTERO RAMÍREZ

**Trabajo de Grado para optar al título de
Magister en Ingeniería Civil**

Director

PH.D. OSCAR J. BEGAMBRE CARRILLO

Codirector

PH.D. CARLITO CALIL JUNIOR



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2013**

DEDICATORIA

A Dios.

A mi mamá, Manuela.

A mi hermanita, Susa.

A ti amor, Jesus.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero a Dios por la vida y la fuerza para realizar este trabajo. A mi familia, en especial a mi mamá Manuela y a mi hermana Susa por estar siempre apoyándome.

A ti Jesus, por el cariño, el amor y el apoyo en todo momento.

Un agradecimiento especial al Profesor Ricardo, por sus aportes, su guía y sobre todo por su amistad.

A mis amigos que de una u otra manera ayudaron a mantenerme firme: Yenny, Mario, Sergio, Pili, Beto. Mis compañeros de la UIS: Leito, Sergio, Jackson, Fredy. A mis compañeros de la USP: Fernando, Matheus, Carlinhos, Arthur, Paulo.

A mis orientadores los Profesores Oscar Begambre y Carlito Calil por el apoyo incondicional.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1 SILOS, PROPIEDADES FÍSICAS DEL PRODUCTO, FLUJO, ACCIONES (ANTECEDENTES)	19
1.1 Tipos de silos.....	22
1.2 Propiedades físicas del producto almacenado: cemento	23
1.3 Proyecto de flujo.....	25
1.4 Obstrucciones del tipo “Tubo”	27
1.5 Acciones y combinaciones de carga	31
1.6 Teorías y normas de presiones.	32
2 FUNDAMENTOS PARA LOS MODELOS DEL SILO	36
2.1 Características geométricas del silo	37
2.2 Caracterización del producto.....	37
2.3 Definición de acciones permanentes:.....	48
2.4 Determinación de Acciones variables.....	49
2.5 Combinaciones de cargas utilizadas en los modelos del silo	58
3 ANÁLISIS ESTÁTICO LINEAL MEDIANTE PROCEDIMIENTOS SIMPLIFICADOS	63
3.1 Esfuerzos en recipientes de paredes delgadas a presión	65
3.1.1 Recipientes cilíndricos.....	66
3.1.2 Recipientes cónicos	67
3.2 Deformaciones y esfuerzos principales obtenidos mediante el proceso simplificado	68
4 MODELO NUMÉRICO DE UN SILO ESBELTO. ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS -MEF	71
4.1 Calibración modelo: interacción carga-estructura.....	75
4.1.1 Resultados del modelo numérico, calibración	76
4.2 Modelamiento estructura: silo-base.....	80
4.2.1 Resultados del modelo numérico, estructura completa.....	82
5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	95
6 CONSIDERACIONES FINALES.....	100

BIBLIOGRAFIA.....	102
ANEXOS.....	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Patrones básicos de Flujo. Fuente: (Eurocódigo 2006a).....	26
Figura 2 Patrones de flujo mixto. Fuente: (Eurocódigo 2006a).....	26
Figura 3 Patrones de tubo de flujo. Fuente: (Eurocódigo 2006a)	27
Figura 4 Método gráfico para la determinación del tipo de flujo. Fuente: (Eurocódigo 2006a)	27
Figura 5 Comparación de los valores de K (Calmon Nascimento, 2008)	35
Figura 6 Estructura del Silo a través del Solidwork	36
Figura 7 Diagrama de flujo de la metodología para la caracterización del cemento	38
Figura 8 Nomenclatura para las muestras	38
Figura 9 Muestras debidamente pesadas, almacenadas y rotuladas.....	39
Figura 10 Equipo de corte directo, "Jenike Shear Cell"	41
Figura 11 Preparación previa de la probeta para el ensayo de corte directo.....	42
Figura 12 Diagrama de un montículo de material.....	45
Figura 13 Equipo para el ensayo de ángulo de reposo	46
Figura 14 Procedimiento del ensayo de ángulo de reposo.....	46
Figura 15 Determinación del tipo de Flujo Método gráfico	47
Figura 16 Acciones variables de un Silo: servicio normal.....	50
Figura 17 Acciones en la tolva.....	51
Figura 18 Presiones, fuerzas estáticas y dinámicas en el cuerpo del Silo.....	54
Figura 19 Esquema las presiones de viento actuando en una sección circular	57
Figura 20 Presiones debido al viento	58
Figura 21 Presiones y fuerzas calculadas de forma simplificada	65
Figura 22 Esfuerzos en una estructura cilíndrica	66
Figura 23 Círculo de Morh en un cilindro de pared delgada.....	67
Figura 24 Esfuerzos en una estructura cónica	67
Figura 25 Deformación elástica equivalente- Von Mises (mm/mm).....	69
Figura 26 Esfuerzos (MPa) circunferenciales, σ_t y meridionales, σ_l por el método simplificado SM. $\blacktriangleleft$ σ_t -phc, $\blacktriangleright$ σ_t -phc, $\times$ σ_l -pwc, $\times$ σ_l -pwd, $\bullet$ σ_e -Fc, $\bullet$ σ_e -Fd	70
Figura 27 Elemento finite tipo "Shell" (Sharhan, 2012).....	74
Figura 28 Silo, acciones de llenado para calibración.	76
Figura 29 Deformación elástica equivalente- Von Mises (mm/mm), modelo 1. $\blacksquare$ -phc. $\blacksquare$ phc_MS, $\blacktriangleleft$ pn, $\blacktriangleleft$ pn_MS, $\bullet$ phd, $\bullet$ Fd_MS, $\blacktriangleleft$ Fc_MS	77
Figura 30 A la izquierda, Esfuerzos equivalentes Von Mises, σ_e (MPa). Modelo 1. $\blacktriangleleft$ σ_e -phc, $\blacktriangleleft$ σ_e -pn, $\times$ σ_e -phd, $\blacktriangleleft$ σ_e -phc_MS, $\blacktriangleleft$ σ_e -phd_MS. A la derecha diferencias porcentuales entre los métodos.....	79
Figura 31 Vectores de los esfuerzos principales, modelo 1, bajo la acción de las presiones horizontales de descarga	80
Figura 32 Modelo 2. A la derecha, enmallado. A la izquierda, silo metálico.	81
Figura 33 Ubicación esfuerzos principales máximo, medio y mínimo. Fuente: Ansys®	82

Figura 34 Deformación elástica equivalente- Von Mises (mm/mm), en el apoyo (L1). ■ Fc, ■ C1, ★ C2, ▲ C3, ◆ C4, ◆ C5, ○ C6, ● C7, ✕ C8, ✕ C9, + C10, — C11, — C12, — C13, — C14, ✕ C15	83
Figura 35 Deformación elástica equivalente- Von Mises (mm/mm), entre apoyo (L2). ■ Fc, ■ C1, ★ C2, ▲ C3, ◆ C4, ◆ C5, ○ C6, ● C7, ✕ C8, ✕ C9, + C10, — C11, — C12, — C13, — C14, ✕ C15	84
Figura 36 Esfuerzos σ_{1max} (MPa), en el apoyo (L1) ■ C1, ■ C2, ★ C3, ▲ C4, ◆ C5, ◆ C6, ○ C7, ● C8, ✕ C9, ✕ C10, + C11, — C12, — C13, — C14 — C15	85
Figura 37 Esfuerzos σ_{1max} (MPa), entre apoyos (L2)) ■ C1, ■ C2, ★ C3, ▲ C4, ◆ C5, ◆ C6, ○ C7, ● C8, ✕ C9, ✕ C10, + C11, — C12, — C13, — C14 — C15...	86
Figura 38 Esfuerzos σ_{2med} (MPa), en el apoyo (L1) ■ C1, ■ C2, ★ C3, ▲ C4, ◆ C5, ◆ C6, ○ C7, ● C8, ✕ C9, ✕ C10, + C11, — C12, — C13, — C14 — C15	87
Figura 39 Esfuerzos σ_{2med} (MPa), entre apoyos (L2) ■ C1, ■ C2, ★ C3, ▲ C4, ◆ C5, ◆ C6, ○ C7, ● C8, ✕ C9, ✕ C10, + C11, — C12, — C13, — C14 — C15	88
Figura 40 Esfuerzos σ_{3min} (MPa), en el apoyo (L1) ■ C1, ■ C2, ★ C3, ▲ C4, ◆ C5, ◆ C6, ○ C7, ● C8, ✕ C9, ✕ C10, + C11, — C12, — C13, — C14 — C15	89
Figura 41 Esfuerzos σ_{3min} (MPa), entre apoyos (L2) ■ C1, ■ C2, ★ C3, ▲ C4, ◆ C5, ◆ C6, ○ C7, ● C8, ✕ C9, ✕ C10, + C11, — C12, — C13, — C14 — C15	90
Figura 42 Esfuerzos equivalentes Von Mises (MPa), en el apoyo (L1) ■ C1, ■ C2, ★ C3, ▲ C4, ◆ C5, ◆ C6, ○ C7, ● C8, ✕ C9, ✕ C10, + C11, — C12, — C13, — C14 — C15	91
Figura 43 Esfuerzos equivalentes Von Mises (MPa), entre apoyos (L2) ■ C1, ■ C2, ★ C3, ▲ C4, ◆ C5, ◆ C6, ○ C7, ● C8, ✕ C9, ✕ C10, + C11, — C12, — C13, — C14 — C15	92
Figura 44 Vectores de los esfuerzos principales debidos a las presiones horizontales de carga, <i>phc</i>	93
Figura 45 Vectores de los esfuerzos principales debidos a la combinación 1, C1.....	94
Figura 46 Relación porcentual entre los esfuerzos equivalentes por el MEF y el MS..	98
Figura 47 Formato para ensayo de cizallamiento - corte directo Jenike y de humedad	107
Figura 48 Formato para Ensayo de ángulo de reposo	107
Figura 49 Datos del ensayo JP-A1	108
Figura 50 Datos del ensayo JP-A2	108
Figura 51 Datos del ensayo JP-A3	109
Figura 52 Datos del ensayo JP-B1	109
Figura 53 Datos del ensayo JP-B2	110
Figura 54 Datos del ensayo JP-C1	110
Figura 55 Datos del ensayo JP-C2	111
Figura 56 Datos del ensayo de ángulo de reposo	111
Figura 57 Procesamiento de datos. JP-A1.....	112
Figura 58 Ángulo de fricción material- pared lisa. JP-A1.....	113
Figura 59 Ángulo de fricción material- pared rugosa. JP-A1	113

Figura 60 Procesamiento de datos. JP-A2.....	114
Figura 61 Ángulo de fricción material- pared lisa. JP-A2.....	114
Figura 62 Ángulo de fricción material- pared rugosa. JP-A2	115
Figura 63 Procesamiento de datos. JP-A3.....	115
Figura 64 Ángulo de fricción material- pared lisa. JP-A3.....	116
Figura 65 Ángulo de fricción material- pared rugosa. JP-A3	116
Figura 66 Procesamiento de datos. JP-B1.....	117
Figura 67 Ángulo de fricción material- pared lisa. JP-B1.....	117
Figura 68 Ángulo de fricción material- pared rugosa. JP-B1	118
Figura 69 Procesamiento de datos. JP-B2.....	118
Figura 70 Ángulo de fricción material- pared lisa. JP-B2.....	119
Figura 71 Ángulo de fricción material- pared rugosa. JP-B2	119
Figura 72 Procesamiento de datos. JP-C1.....	120
Figura 73 Ángulo de fricción material- pared lisa. JP-C1.....	120
Figura 74 Ángulo de fricción material- pared rugosa. JP-C2	121
Figura 75 Procesamiento de datos. JP-C2.....	121
Figura 76 Ángulo de fricción material- pared lisa. JP-C2.....	122
Figura 77 Ángulo de fricción material- pared rugosa. JP-C2	122

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Temas desarrollados por Francis y Nielsen (2008)	21
Tabla 2 Clasificación de Silos. Relación h_b/d_c	22
Tabla 3 Propiedades físicas del cemento según normas internacionales	23
Tabla 4 Tipos de acciones	31
Tabla 5 Límites apropiados para las propiedades físicas. Fuente: Norma Australiana (1996)	32
Tabla 6 Hipótesis de las teorías: Janssen y Köenen, los hermanos Reimbert	33
Tabla 7 Diseño experimental	40
Tabla 8 Propiedades físicas del Cemento	42
Tabla 9 Resultados del ensayo de humedad	44
Tabla 10 Resultados ensayo de ángulo de reposo del material	45
Tabla 11 Cálculo de cargas permanentes	48
Tabla 12 Límites para las propiedades físicas del cemento	54
Tabla 13 Presiones de llenado y descarga en el cuerpo del silo	63
Tabla 14 Presiones estáticas y dinámicas en la tolva	64
Tabla 15 Diferencias porcentuales entre el método simplificado (MS) y el Método de Elementos Finitos MEF, Modelo 2	97
Tabla 16 Relación entre los esfuerzos equivalentes de Von Mises, MEF/ MS	97
Tabla 17 Propiedades: densidad, cohesión, ángulo de fricción y factor flujo (FF)	123
Tabla 18 Propiedades: ángulo de fricción del material con pared lisa y rugosa	124
Tabla 19 Resultados del ensayo de humedad	125
Tabla 20 Resultados del ensayo de ángulo de reposo	126

LISTA DE ANEXOS

Anexo A Caracterización del producto	107
--	-----

TITULO: MODELO NUMÉRICO DE UN SILO METALICO PARA ALMACENAMIENTO DE CEMENTO: FLUJO, PRESIONES, ACCIONES Y ESFUERZOS¹

AUTOR: *Carolina Quintero Ramírez²*

PALABRAS CLAVES: Método de Elementos Finitos, Silo esbelto, Análisis estático lineal, Flujo Estado de esfuerzos

Los silos son estructuras de almacenamiento consideradas especiales en cuanto a su cálculo. La mayoría de los silos existentes no presentan condiciones ideales de operación pues generalmente en su diseño no se tienen en cuenta todas las variables que afectan su futuro desempeño estructural. Ya que para el diseñador no es factible simular la complejidad de los fenómenos que se presentan en los silos, la comunidad científica tiene la ardua tarea de traducir esa complejidad en procedimientos y recomendaciones claras de diseño. En este contexto, este trabajo tiene por finalidad modelar por el método de elementos finitos (MEF) un silo metálico esbelto de paredes flexibles, apoyado en cuatro columnas metálicas, para la estimación de los esfuerzos cuando el producto almacenado es cemento. Se presenta, la caracterización física del cemento y se aplican las teorías existentes para evaluar las presiones de llenado y descarga cuando el silo está sometido a cargas permanentes y de servicio. Finalmente los resultados numéricos arrojan una diferencia máxima de 93% entre los dos métodos para el estado de esfuerzos equivalentes de Von Mises y de 94% para deformaciones y se identifican algunos factores que explican estas diferencias. Esta estructura necesita un reforzamiento en su transición, cilindro tolva, para tener una buena distribución de esfuerzos sin concentraciones.

¹ Proyecto de Grado

² Facultad de Fisico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ph.D. Oscar J. Begambre. Codirector: Ph.D. Calil Calil Junior

TITLE: NUMERICAL MODEL OF A SILO FOR CEMENT STORAGE: FLOW, PRESSURES, ACTIONS AND THE STRESS STATE³

AUTHOR: *Carolina Quintero Ramírez⁴*

KEYWORDS: Finite Element Method, Slender Silo, linear Static Analysis, Flow, Stress state.

Silos are special storage structures. Most of them do not have ideal operating conditions, because there is no sufficient knowledge about the pressures, the flow regime and other factors that could affect its behavior. In this work, the stress state of a slender metal silo, with flexible walls, supported by four columns and under permanent and variables loads is obtained via Finite Element Method (FEM) when the product is cement. Presented physical characterization of cement and are apply existing theories to assess filling pressures and download when the silo is under permanent and service loads. The FEM results are compared to those calculated using standard simplified methods and finally, the differences of performance between these two methods are described and some design considerations are suggested. The structure was analyzed under different load combinations, considering the filling, discharge, and wind. Finally, the investigations suggest to use a special equipment for obtain fluxo and the numerical results showed for the state of equivalent (Von-Mises) stress a maximum difference of 93% between the two methods and for equivalent elastic strain of 94%. Additionally, some factors are identified to explain these differences. This structure need a reinforcement in its transition: cylinder-hopper to obtain a good distribution of stress and prevent stress concentrations.

³ Graduate proyect

⁴ Facultad de Fisico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ph.D. Oscar J. Begambre. Codirector: Ph.D. Calil Calil Junior

INTRODUCCIÓN

Los silos son contenedores, estructuras de distintas formas diseñadas para almacenar productos granulares y pulverulentos. Hoy en día su uso en la industria es masivo, con tendencia al aumento y con especificaciones de capacidad y altura aún mayores que las usuales. Se destacan dentro de la industria agrícola e industrial el uso de diferentes tipos de silos como: bajos, horizontales, de gran esbeltez, elevados, de fondo; y con diferentes configuraciones geométricas. En el caso de la industria, en particular de las cementeras colombianas, generalmente se utilizan de silos metálicos de sección circular elevados que trabajan con descarga por gravedad.

El almacenamiento en silos es una práctica muy frecuente y existen normativas internacionales que orientan a su diseño, sin embargo suelen presentarse accidentes de colapso y explosiones. De acuerdo al tipo de material ensilado el riesgo de producción de gases tóxicos y explosivos varia; los incendios y explosiones suelen presentarse al ensilarse productos pulverulentos. Muchos accidentes trágicos se han presentado en varias partes del mundo. Algunos de estos eventos: noviembre/2001 en Brasil por explosión (Itfuego 2013), Febrero/2013 en Panamá por colapso (Prensa 2013), Junio/2013 en Argentina por colapso (Diario Mercurio 2013). Fernández, Aguado y Ayuga (2001) presentaron un documento donde registran las explosiones de polvo en silos agrícolas, registran 13 explosiones por año en EE.UU durante el periodo comprendido entre 1987-1997. Este tipo de eventos suelen presentarse con mayor frecuencia en silos de gran capacidad, generalmente esbeltos, es decir una relación altura-diámetro mayor a 1.5 (ENV 2006).

Finalmente, en este trabajo se realiza un análisis estático lineal de una estructura de un silo mediante el Método de Elementos Finitos- MEF. El libro

está estructurado en seis capítulos. Capítulo 1, revisión de los antecedentes en cuanto a los silos, las propiedades físicas del producto a almacenar, el flujo, las acciones y combinaciones de carga. Capítulo 2, se presentan los fundamentos para la realización de los modelos del silo: características geométricas del silo, caracterización del producto, definición de acciones permanentes y variables y finalmente se establecen las combinaciones de carga. Capítulo 3, se realiza el análisis del silo mediante procedimientos simplificados. Capítulo 4, se efectúa el modelo numérico de un silo esbelto mediante el Método de Elementos Finitos – MEF. Capítulo 5, análisis y discusión de resultados y finalmente en el capítulo 6, consideraciones finales.

Justificación

Para el diseñador no es rentable manejar la complejidad de los fenómenos que se presentan en los silos. Por esto la comunidad científica, tiene la ardua tarea de transformar esa complejidad en modelos simplificados y de carga segura, que permitan proyectar las estructuras de forma segura y confiable.

El proceso de especificación de carga consiste en la evaluación y simplificación de muchos tipos diferentes de fenómenos que no están completamente comprendidos, las normas europeas orientan al cálculo de las acciones para los silos. Hoy en día las herramientas actuales permiten realizar un cálculo de los esfuerzos ante diferentes solicitaciones como: las cargas de llenado y descarga, viento, temperatura; esto para lograr simular situaciones más cercanas a las reales.

Debido al desarrollo industrial, la producción del cemento se ha mantenido en cifras considerables como lo indican las estadísticas del DANE de febrero de 2012 (Estadística 2012), desde el año 2009 la producción mensual de cemento en Colombia oscila entre 700000 y 1000000 toneladas. En agosto de 2013 la producción de cemento gris alcanzó las 941.1 mil

toneladas (DANE 2013). La distribución del cemento gris a granel es de alrededor del 28%, y empacado el 72% del producido, lo cual origina que los requerimientos de estructuras en cuanto a capacidad para almacenamiento se haga evidente y urgente. Hoy en día se requieren silos con mayores capacidades, por ello el uso de estructuras esbeltas de gran capacidad para almacenamiento de cemento son cada vez más utilizadas en nuestro país. Se tiene entonces la necesidad de caracterizar el producto a ensilar, de generar modelos numéricos más aproximados y de suministrar lineamientos a los proyectistas para el diseño de estas estructuras, pues nuestro país no cuenta con una norma para la proyección de las mismas.

Objetivo general

Modelar por el Método de Elementos Finitos un silo metálico esbelto con paredes flexibles para la estimación de los esfuerzos en la estructura cuando el material almacenado es cemento.

Objetivos específicos

- Realizar la caracterización del cemento: las propiedades físicas y de flujo en el laboratorio (LaMEM)
- Determinar los esfuerzos en las paredes del silo y la tolva, por el MEF y un procedimiento simplificado de norma.
- Comparar el estado de esfuerzos obtenido por el MEF y un procedimiento simplificado de norma

Resultados y/o productos resultantes

De acuerdo a los objetivos planteados, se tendrá finalmente:

- El estado del arte actualizado con respecto a modelos matemáticos para la evaluación de esfuerzos en una estructura tipo de un silo metálico, realizados por el Método de Elementos Finitos – MEF.
- La caracterización del cemento común, desarrollada en el laboratorio (LaMEM)
- El estado de esfuerzos para cada uno de los elementos de la estructura, por el MEF y un procedimiento simplificado de norma.
- La comparación y diferenciación entre los esfuerzos obtenidos mediante el MEF y por un procedimiento simplificado de norma.

Impacto

Proporcionar criterios y lineamientos específicos al proyectista para realizar un dimensionamiento y diseño seguro (confiable) para el correcto dimensionamiento ya que no existe una norma para la proyección de las estructuras tipo silo. El diseño depende directamente de la caracterización del producto, del cálculo de cargas y de su incidencia en cada uno de los miembros de la estructura debido a las condiciones de contorno. Este proyecto suministra una caracterización del producto a ensilar (cemento), un modelo numérico más aproximado y finalmente una comparación entre el cálculo de esfuerzos de forma analítica o métodos simplificados y a través del MEF, con el fin de determinar las diferencias más importantes.

1 SILOS, PROPIEDADES FÍSICAS DEL PRODUCTO, FLUJO, ACCIONES (ANTECEDENTES)

Existen tres líneas de investigación claramente definidas en cuanto a las estructuras de los silos, Calil (Batista Cheung 2007) las clasifica así: el estudio de las acciones y deformaciones en silos reales o modelos reducidos, el mejoramiento de los modelos de comportamiento de los materiales y el estudio de los esfuerzos estructurales, tanto estáticos como dinámicos, utilizando

herramientas como el MEF- Método de Elementos Finitos y MED – Método de Elementos Discretos.

Mahmoud y Bishara (1975) comenzaron a realizar aportes en el estudio de esfuerzos estructurales, incursionando en el análisis de nuevos fenómenos, como: la interacción entre el grano y la pared del silo, el pandeo, los efectos térmicos, la influencia del espesor de las paredes en las presiones y la aplicación de teorías de comportamiento elástica, elasto-plástica para los materiales en estudio.

La mayoría de los análisis utilizando el MEF que han sido realizados se concentran en la simulación del proceso de carga y descarga para estimar las presiones ejercidas por estos dentro de la estructura del silo. Mahmoud y Bishara, (1975) determinaron las presiones sobre las paredes en condiciones estáticas, teniendo en cuenta el efecto de fricción con el material almacenado. Gallego (2006), en su tesis de doctorado, muestra la evolución del uso del MEF para el análisis de silos, hasta el año 2004, del cual se resalta lo siguiente:

- “Se desconocen las causas por las cuales se producen deflagraciones en los silos o los motivos que inducen la aparición de los denominados efectos bóveda o vibraciones.”
- “No se ha abordado en profundidad el estudio sobre la importancia de ciertos parámetros en la generación de los modelos numéricos.”

Con relación a los diferentes fenómenos que se presentan en este tipo de estructuras, Francis y Nielsen (2008) realizaron un análisis entre la complejidad y la simplicidad de éstos a la hora de diseñar un Silo ver tabla 1, llegando a la conclusión general de la necesidad de investigar más alrededor de éstas y de transferir estos nuevos conocimientos a la ingeniería aplicada.

Tabla 1 Temas desarrollados por Francis y Nielsen (2008)

<i>A partir de los fenómenos a los modelos de silos de carga</i>	
J. Nielsen. Danish Building Research Institute, Aalborg University, Denmark	
<u><i>Fenómenos</i></u>	
- La historia de una partícula - Continuo versus el enfoque de las partículas discretas - Cargas en silos de acero versus de concreto. - Experimentos: Células de presión versus mediciones de deformación en la pared - Experimentos: modelo a escala versus escala real. - Redistribución de la presión durante el proceso de descarga.	
<u><i>Simplicidad: especificación de cargas</i></u>	
- Principios generales en la especificación de cargas. - Tratamiento estocástico versus determinístico para la determinación de cargas. - La variabilidad del material almacenado - Diseño por flujo versus diseño por fuerza. - Principios teóricos versus empíricos.	

De los temas abordados y considerados en la tabla 1, se destaca lo siguiente:

- La interacción carga-estructura es significativa cuando en los modelos se considera que las paredes del silo son flexibles.
- En cuanto a las cargas, si son deterministas o estocásticas. Se considera que en cierta medida deben ser estocásticas con una cierta probabilidad de desviación, pues los resultados de dos pruebas arrojan, en general, diferencias considerables debido a la forma en que la presión se desarrolla, sobre todo durante el proceso de descarga.

En el análisis se considera que para lograr que el diseño sea rentable y práctico, la componente estocástica debe representarse a través de coeficientes, en el cálculo determinístico de las cargas en las normas. Para el desarrollo de modelos de carga se deduce que los diseños económicos se pueden obtener, por ejemplo, considerando un nivel de seguridad adecuado, si se incluyen más fenómenos en la parte determinística y si se tiene control sobre las imperfecciones durante la construcción.

1.1 Tipos de silos

Los silos son generalmente de sección transversal cuadrada, rectangular o circular, siendo esta última la más adoptada para almacenamiento de cemento. Un silo de sección transversal circular puede ser de paredes delgadas, tipo lámina, sin ningún refuerzo.

Se tienen silos metálicos horizontales para el transporte del cemento; y elevados, trabajando a gravedad, para el suministro dentro de una planta de premezclado. Generalmente su clasificación es dada por normas internacionales, relacionando su altura (h_b) y su diámetro (d_c), ver tabla 2.

Tabla 2 Clasificación de Silos. Relación h_b/d_c

	AS3773	ENV1991 (2003)	DIN1055
Granero*		$h_b/d_c \leq 0,4$	
Esbeltez Baja	$h_b/d_c < 1.0$	$0.4 < h_b/d_c \leq 1.0$	$0.4 < h_b/d_c \leq 1.0$
Esbeltez media	$1.0 \leq h_b/d_c \leq 3.0$	$1.0 < h_b/d_c < 2.0$	$1.0 < h_b/d_c < 2.0$
Esbelto	$h_b/d_c > 3.0$	$h_b/d_c \geq 2.0$	$h_b/d_c \geq 2.0$

*Con entrada de aire

Dentro de la industria del cemento y el concreto prefabricado, la capacidad de los silos oscila normalmente entre 70 y hasta 500 toneladas, pero pueden ser mayores.

Por condiciones de espacio en la planta y de operación, los silos normalmente son de tipo esbelto. Palma (2005) propone el uso de la norma DIN 1055 (2000) para la validación de las presiones adicionales y el EUROCODE 1/Parte 4 (2006a) para el cálculo de las presiones de almacenamiento y descarga, pues concluye que:

- Son las normas más utilizadas para el cálculo de presiones debido a productos almacenados.

- Consideran las presiones asimétricas para el almacenamiento como para el proceso de descarga y éstas son conservadoras tanto para las presiones horizontales en el cuerpo del silo, como para las presiones en la tolva.

Palma (2005) considera las siguientes limitaciones: las cargas debido al impacto del producto deben ser mínimas, el diámetro de las partículas menor a 0,03 veces el diámetro del silo; y en cuanto a su geometría: relación altura/diámetro menor a 10, altura del silo menor a cien metros (100m), diámetro del silo menor a cincuenta metros (50 m) y cada silo será proyectado para un determinado grupo de productos.

1.2 Propiedades físicas del producto almacenado: cemento

El cemento es un producto pulverulento homogéneo, extremadamente fino, usualmente de color grisáceo no contaminante, hidráulicamente activo, obtenido en general a partir de la molienda de Clinker Portland, piedra caliza, yeso y aditivos químicos.

Las siguientes propiedades: peso específico, ángulo de fricción y coeficiente de fricción con la pared, son contempladas por diferentes normas internacionales, ver tabla 3.

Tabla 3 Propiedades físicas del cemento según normas internacionales

Producto: Cemento	IEA 1986	AS3774			ACI313	BMHB	SNBATI	DIN1055	ENV1991	CFBC
<i>Peso Específico (kN/m³)</i>	13	13	13	13,5	13	15	16	16	-	-
	16	16	16	16	16	15	16	16	-	-
<i>Ángulo de fricción Interno (grados)</i>	40	40	40	24	40	28	27	-	-	-
	50	50	50	30	45	28	27	-	-	-
<i>Coeficiente de fricción* con la Pared (x 10⁻²)</i>	20 25 30	20 23 28	36 47 58	36 30	40 45	46 43 -	50 45 40	- - -	40 50	40 50
	25 30 35	25 28 33	47 58 70	45 30	51 58	46 43 -	50 45 40	- - -	40 50	40 50

* Se presentan para tres tipos de paredes, D1, D2 y D3, de lisa a rugosa. Con un valor superior e inferior

Para la correcta proyección de una estructura de almacenamiento se recomienda realizar la caracterización del producto a almacenar en un laboratorio especializado. Las propiedades físicas son:

- Granulometría.
- Peso específico: mediante un ensayo de compresión simple para distintos niveles de presión. Este ensayo es necesario para determinar la masa total del grano que puede almacenarse.
- Coeficiente de rozamiento grano-pared: mediante un ensayo de corte directo. El fenómeno de rozamiento grano-pared provoca el denominado “efecto silo”: que es la absorción por la pared, en forma de rozamiento vertical, de una parte de la carga existente; luego las presiones laterales se reducen y presentan valores muy inferiores a los que corresponden en una situación de empuje hidrostático.
- Módulo de Elasticidad: mediante un ensayo de compresión unidireccional hecho en un edómetro.
- Coeficiente de Poisson: mediante la realización de un ensayo con un aparato triaxial.
- Ángulo de rozamiento interno: mediante un ensayo de corte directo o con un aparato triaxial.
- Cohesión: mediante un ensayo de corte directo.
- Ángulo de dilatación: mediante un ensayo de corte directo.

El procedimiento para la realización del ensayo de corte directo modificado por Jenike está determinado por el “Standart Shear Testing Technique for Particulate Solids Using the Jenike Shear Cell” (Engineers 1989) y es enunciado por diferentes normas internacionales (ENV 2006a; DIN 2000a). El laboratorio LaMEM, del Departamento de Estructuras, de la Escuela de Ingeniería de San Carlos, de la Universidad de San Paulo, cuenta con el equipo para la realización de ensayos de corte directo; y un software desarrollado por Diniz (2010) que permite la determinación de las propiedades del producto de interés.

1.3 Proyecto de flujo

El tipo de flujo determina las características de descarga del material, el tipo de segregación, la formación o no de zonas sin movimiento y la distribución de presiones en las paredes del silo, la fundación, la integridad, el costo de construcción y si el silo puede ser vaciado totalmente. (Carlitos Calil Junior, Wallace B. Do Nascimento, and Carlos de Araújo 1997)

Se considera que el flujo es estable porque se vacía a velocidad constante sin que existan interrupciones, para garantizarlo básicamente se trata de tener tolvas lo suficientemente lisas e inclinadas. El flujo másico y flujo de embudo son dos tipos de flujo estable. Cuando hay interrupciones en el vaciado, es decir que el material no se vacía a velocidad constante y llega incluso a atascarse, se presenta un flujo inestable.

Se tienen básicamente dos tipos de flujo: flujo másico y flujo canalizado o de embudo, ver Figura 1. El flujo de masa se caracteriza porque todas las partículas del producto almacenado entran en movimiento cuando se inicia el proceso de vaciado. En el flujo canalizado al iniciar el proceso de vaciado, se forman zonas dentro del silo donde no ocurre movimiento de las partículas, lo que forma un embudo: en este último se pueden tener flujo de tubo o flujo mixto. Ver Figura 2 y 3. Los tipos de flujo son enunciados por las diferentes normas internacionales, la australiana, la DIN y el eurocódigo (Australia 1996; Normung 2000; Standardization 2006). El tipo de flujo se determina mediante un método gráfico, el cual tiene en cuenta el coeficiente de fricción y el ángulo de inclinación de la tolva. Ver Figura 4.

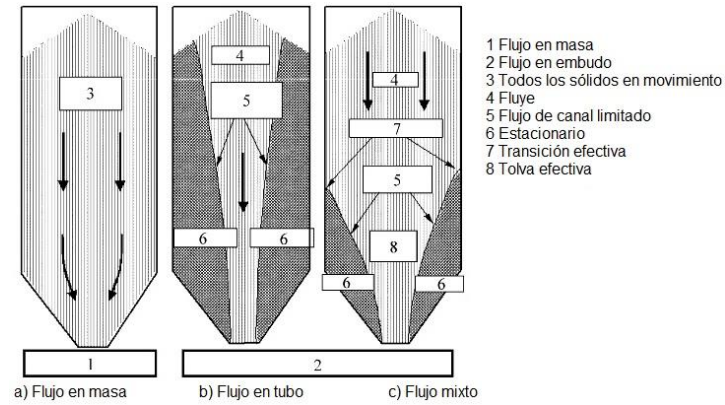


Figura 1 Patrones básicos de Flujo. Fuente: (Eurocódigo 2006a)

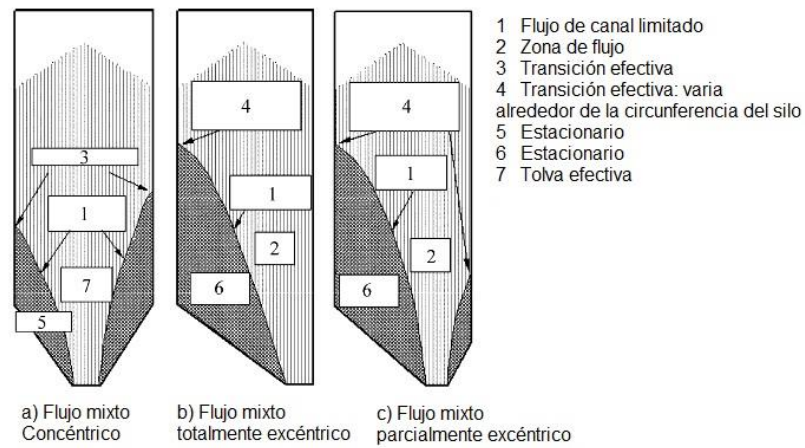


Figura 2 Patrones de flujo mixto. Fuente: (Eurocódigo 2006a)

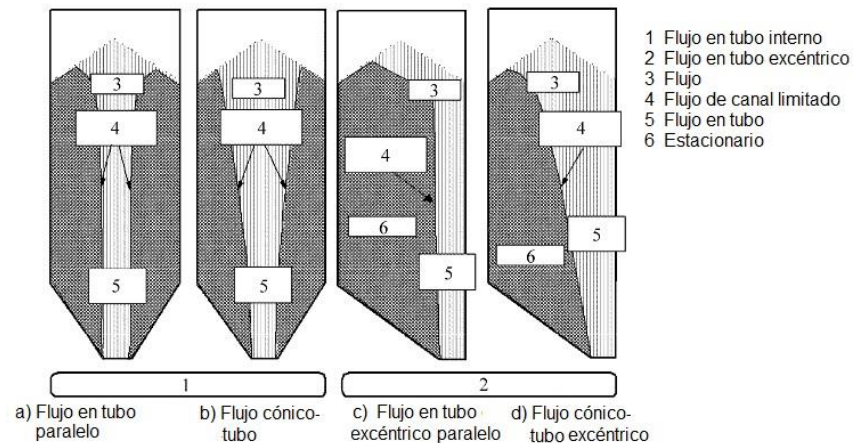


Figura 3 Patrones de tubo de flujo. Fuente: (Eurocódigo 2006a)

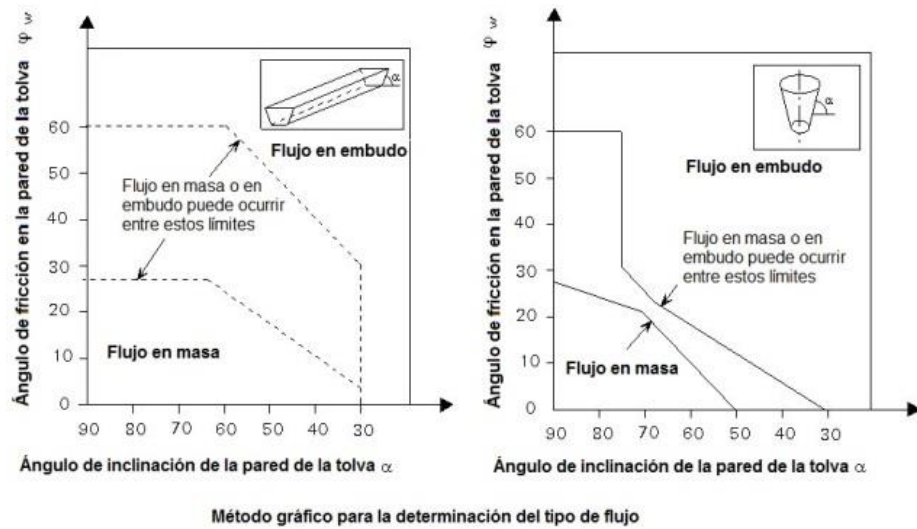


Figura 4 Método gráfico para la determinación del tipo de flujo. Fuente: (Eurocódigo 2006a)

1.4 Obstrucciones del tipo “Tubo”

Las obstrucciones son normales en silos con flujo tipo embudo que contienen productos cohesivos; y cómo afirma el profesor Calil (Batista Cheung 2007) , si la consolidación del producto aumenta con el tiempo de almacenaje la formación de obstrucciones también. Inicialmente ocurre descarga pero luego el flujo se interrumpe. Para entender la formación de este tipo de obstrucción es necesario conocer los factores que lo inducen.

Teóricamente existen dos indicadores para determinar la capacidad de fluir del producto: la función flujo (FF) y el factor flujo (ff). La FF se usa para caracterizar el comportamiento del flujo y se define por la ecuación (1). El ff depende del ángulo de fricción interno del producto, del ángulo de fricción del producto con la pared y del ángulo de inclinación de la tolva, ver ecuaciones (2), (3) y (5).

$$FF = \frac{\sigma_1}{\sigma_{1c}} \quad (1)$$

Donde,

σ_1 , presión principal de consolidación.

σ_{ic} , es la tensión de fluencia no confinada.

Un análisis rápido puede ser establecido de acuerdo a los límites propuestos por Jenike (1964):

$FF < 2$, Productos muy cohesivos no fluyen

$2 < FF < 4$, Productos cohesivos

$4 < FF < 10$, Productos que fluyen fácilmente

$FF > 10$, Productos de flujo libre

De acuerdo a los ensayos de laboratorio el 81% de los valores encontrados, FF presenta valores entre 2 y 4, ver Anexos, lo que indica que el producto es cohesivo. Para materiales muy finos, como es el caso del cemento, puede empeorar la condición de flujo al aumentar la humedad y el tiempo de almacenamiento; pues aumenta la posibilidad de que ocurran obstrucciones.

La teoría de Jenike (1964) introdujo el criterio de flujo y no flujo para estimar la dimensión mínima de salida de la tolva para evitar las obstrucciones por arcos cohesivos.

La abertura de salida de la tolva debe tener una dimensión mínima para prevenir la formación de tubos. Las teorías de Walker (1966), Enstad (1975), Haaker (1999) permiten determinar los factores de flujo (ff), ecuaciones (2), (3) y (5). Las funciones de flujo (FF) se determinan a partir de los ensayos de laboratorio. A partir de los ff y las FF se determinan los valores para las tensiones de fluencia no confinada críticas $\sigma_{ic,crit}$, siendo este el punto a partir del cual se dice que hay o no flujo. Las dimensiones mínimas de la boca de descarga pueden ser calculadas con las ecuaciones (4), (6), (7) y (8).

Teoría de Walker (1966):

$$si \begin{cases} \alpha + \phi_w \geq 45^\circ, & ff = \frac{1 + \sin \phi_e}{\Delta} \\ \alpha + \phi_w < 45^\circ, & ff = \frac{1 + \sin \phi_e}{\Delta} \sin 2(\alpha + \phi_w) \end{cases} \quad (2)$$

Donde,

ϕ_e , ángulo efectivo de fricción interno.

ϕ_w , ángulo de fricción con la pared.

α , ángulo de inclinación de la tolva con respecto a la vertical.

$$\Delta = 2 \sin \phi_e \sin 2(\alpha + \varepsilon) - \tan \alpha [1 - \sin \phi_e \cos 2(\alpha + \varepsilon)]$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left[\phi_w + \arcsin \left(\frac{\sin \phi_w}{\sin \phi_e} \right) \right]$$

Teoría de Enstad (1975):

$$ff = \frac{Y(1 + \sin \phi_{es})}{2(X - 1)F(\alpha) \sin \alpha} \quad (3)$$

Donde,

$$F(\alpha) = \left(\frac{65}{130 + \alpha} \right)^m \left(\frac{200}{200 + \alpha} \right)^{1-m}$$

$$2\beta = \phi_{w,s} + \arcsin \left(\frac{\sin \phi_{w,s}}{\sin \phi_{e,s}} \right)$$

$$\theta = \beta + \alpha$$

$$X = \frac{2^m \sin \phi_{e,s}}{1 - \sin \phi_{e,s}} \left[\frac{\sin \beta + \theta}{\sin \alpha} + 1 \right]$$

$$Y = \frac{[2(1 - \cos \theta)]^m \theta^{1-m} \sin \alpha + \sin \beta \sin \theta^{1+m}}{(1 - \sin \phi_{e,s}) \sin \theta^{2+m}}$$

$\phi_{e,s}$, valor superior del ángulo efectivo de fricción interno.

$\phi_{w,s}$, valor superior del ángulo de fricción con la pared.

Para tolvas de eje simétrico, $m = 1$

Haaker (1999) Límite inferior,

$$b_{fmin} = \frac{G(\phi_i) \sigma_{ic,crit}}{\gamma_i} \quad (4)$$

$$ff = \frac{(1 + \sin \phi_e) G(\phi_i)}{4 \sin \phi_e} \quad (5)$$

Mclean (1985), $G(\phi_i) = 0.7502e^{0.0387\phi_i}$

Rotter (1998) Límite superior, recomendaciones:

$$b_f = 0.71 \frac{G(\phi_i) e^{\left(\frac{\phi_e}{25}\right)}}{\gamma_i} \quad (6)$$

Teoría de la formación de arcos en silos,

$$b_{fmin} = \frac{\sigma_{ic,crit} H(\alpha)}{\gamma_i} \quad (7)$$

Publicación posterior Johanson (1971), para salidas circulares,

$$b_{fmin} = \frac{2.2 \sigma_{ic,crit}}{\gamma_i} \quad (8)$$

La función $H(\alpha)$ para tolvas cónicas se determina através de un método gráfico (Jenike 1964; Carlito Calil Junior y Batista Cheung 2007)

1.5 Acciones y combinaciones de carga

Las diferentes normas (Australia 1996; DIN 2000a; Eurocódigo 2006a) contemplan los tipos de acciones que se deben tener en cuenta a la hora de proyectar la estructura de un silo, en resumen son presentadas en la tabla 4.

Tabla 4 Tipos de acciones

Permanentes	
- <i>Peso propio de la estructura</i> - <i>Peso de equipos fijos</i> - <i>Peso de accesorios: escaleras, filtros.</i>	
Variables	
Servicio normal	- <i>Producto de almacenamiento</i> ◦ <i>Presiones de almacenamiento del producto.</i> ◦ <i>Presiones de descarga del producto.</i> ◦ <i>Acciones especiales: dilatación térmica.</i> ◦ <i>Hinchazón del sólido a granel almacenado.*</i> - <i>Acciones térmicas: Efectos del clima</i>
	- <i>Acciones del viento</i>
Poco frecuentes	- <i>Acciones del sismo</i>
	- <i>Debido a los asentamientos diferenciales en la fundación</i>
Accidentales	
- <i>Impacto de vehículos</i> - <i>Explosión del polvo</i>	

Para el cálculo de las presiones horizontal, vertical, fuerza máxima de fricción en la pared del silo y la tolva, la norma australiana (1996) propone límites apropiados para las propiedades físicas, ver tabla 5

Tabla 5 Límites apropiados para las propiedades físicas. Fuente: Norma Australiana (1996)

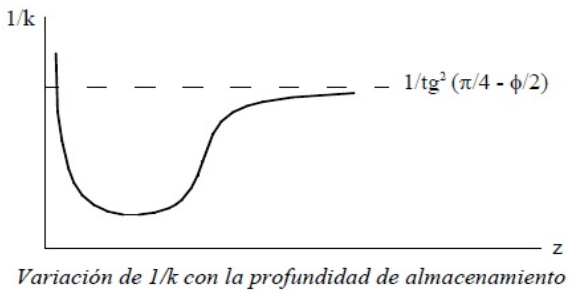
APLICACIÓN		Peso específico del producto, γ	Ángulo de fricción con la pared, ϕ_w	Ángulo efectivo de fricción interno, ϕ_e	Relación entre la presión horizontal y vertical, K
Tipo de flujo	Embudo	Inferior	Superior	Inferior	-
	Masa	Inferior	Inferior	Superior	-
Cálculo de la máxima presión horizontal en la pared, p_h		Superior	Inferior	Inferior	Superior
Cálculo de la máxima presión vertical, p_v		Superior	Inferior	Superior	Inferior
Fuerza máxima de fricción en la pared del silo, p_w		Superior	Superior	Inferior	Superior
Fuerza vertical máxima en la tolva		Superior	Inferior	Superior	Inferior

En las combinaciones de carga, las acciones permanentes son consideradas en su totalidad. Las variables de tal forma que produzcan los efectos más desfavorables. Al realizar cada combinación de carga se debe plantear según la norma Australiana (1996) y la norma colombiana (NSR-10 2010) junto con los valores de ponderación que propone Calil y Batista (2007).

1.6 Teorías y normas de presiones.

Para el diseño de los silos existen diferentes teorías desde finales de los años 70, de origen tanto analítico como experimental; una revisión de estas es realizada en la tesis de Gallego (2006). Las teorías de Jansen y Köenen son las más importantes por ser la referencia de las normativas vigentes de silos (DIN 2000a; Eurocodigo 2006a) ver tabla 6 , la contribución de los hermanos Reimbert (1956) para el cálculo del parámetro K, relación de presiones horizontales y verticales, también se muestra.

Tabla 6 Hipótesis de las teorías: Janssen y Köenen, los hermanos Reimbert

<u>Janssen y Köenen</u>	<u>Los hermanos Reimbert</u>
Las presiones verticales no varían en el caso de superficies horizontales	 Variación de $1/k$ con la profundidad de almacenamiento
El ángulo de rozamiento pared-material permanece constante.	
El peso específico del material permanece constante a lo largo del silo	
Considera la pared del silo, como completamente rígidas.	
EL parámetro K, relación entre presiones horizontales y verticales, es constante.	EL parámetro K, relación entre presiones horizontales y verticales, varía.

Uno de los principales parámetros a determinar es la relación de presiones horizontales y verticales, K . Nascimento (2008) determinó este parámetro teórica y experimentalmente, para tres productos específicos: maíz soya y alimentos para pollos, analizando la influencia de la relación altura/diámetro (h/d) y la rugosidad de la pared, llegando a las siguientes conclusiones:

- La rugosidad de la pared del silo y la relación altura/diámetro influyen en el cálculo del parámetro K , para productos granulares.
- La variabilidad de K es inversamente proporcional a la relación h/d y directamente proporcional a la rugosidad de la pared.
- Para el producto pulverulento no es posible calcularlo, pues no se identificó una lógica con respecto a la geometría en los ensayos realizados.
- Para los cálculos realizados la teoría de Jaky fue la que mejor se aproximó.
- Las teorías para determinar el parámetro K , se presentan en las ecuaciones del (9) al (14) y la variabilidad de las mismas en la Figura 5

Koenen (1985):
Presiones de
Rankine

$$k = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (9)$$

Pierperly Wenzel
(1963): relación
empírica. Jaky

$$k = 1 - \sin \varphi \quad (10)$$

Walker (1966)

$$k = \frac{1 + \sin \varphi^2 - 2\sqrt{\sin \varphi^2 - \mu^2 \cos \varphi^2}}{\cos \varphi^2 + 4\mu^2} \quad (11)$$

Walker (1973)

$$k = \frac{1 + \sin \varphi^2}{1 + \sin \varphi^2 + 4 \cos \varphi \left[\tan \varphi^2 - (\tan \varphi^2 - \mu^2)^{3/2} \right] / 3\mu^2} \quad (12)$$

Jenike et al.
(1973)

$$k = 0.40 \quad (13)$$

Homes (1972)

$$k = 0.45 \quad (14)$$

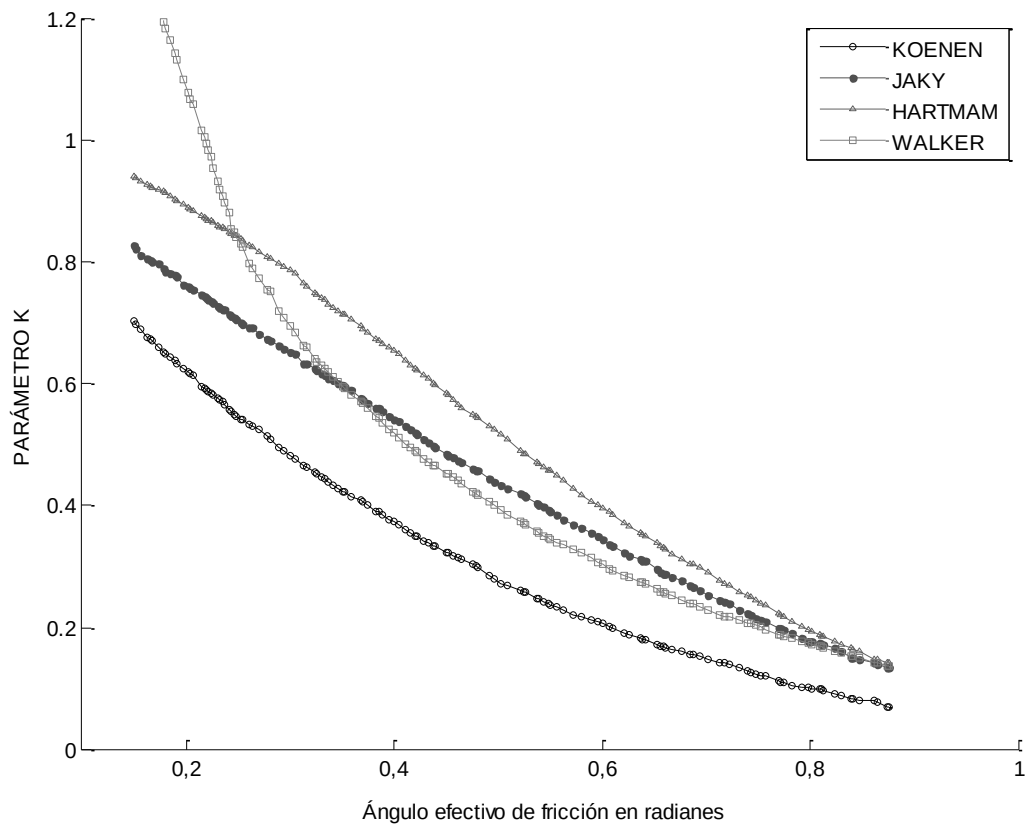


Figura 5 Comparación de los valores de K (Calmon Nascimento, 2008)

El Eurocódigo 1 – Parte 4 (2006a), tiene las expresiones para el cálculo de presiones de llenado y descarga para silos esbeltos y las expresiones para el cálculo de las presiones estáticas y dinámicas de una tolva cónica y la norma alemana (2000a) considera las sobrepresiones, como será visto más adelante en el capítulo 2.

2 FUNDAMENTOS PARA LOS MODELOS DEL SILO

En este capítulo se presentan las características geométricas del silo, la caracterización del producto, el tipo de flujo, la dimensión de la boca de descarga de la tolva para prevenir la formación de obstrucciones de flujo. Se muestran también, los cálculos de las acciones permanentes, variables y poco frecuentes; y finalmente las combinaciones de carga que se tuvieron en cuenta en los modelos numéricos.

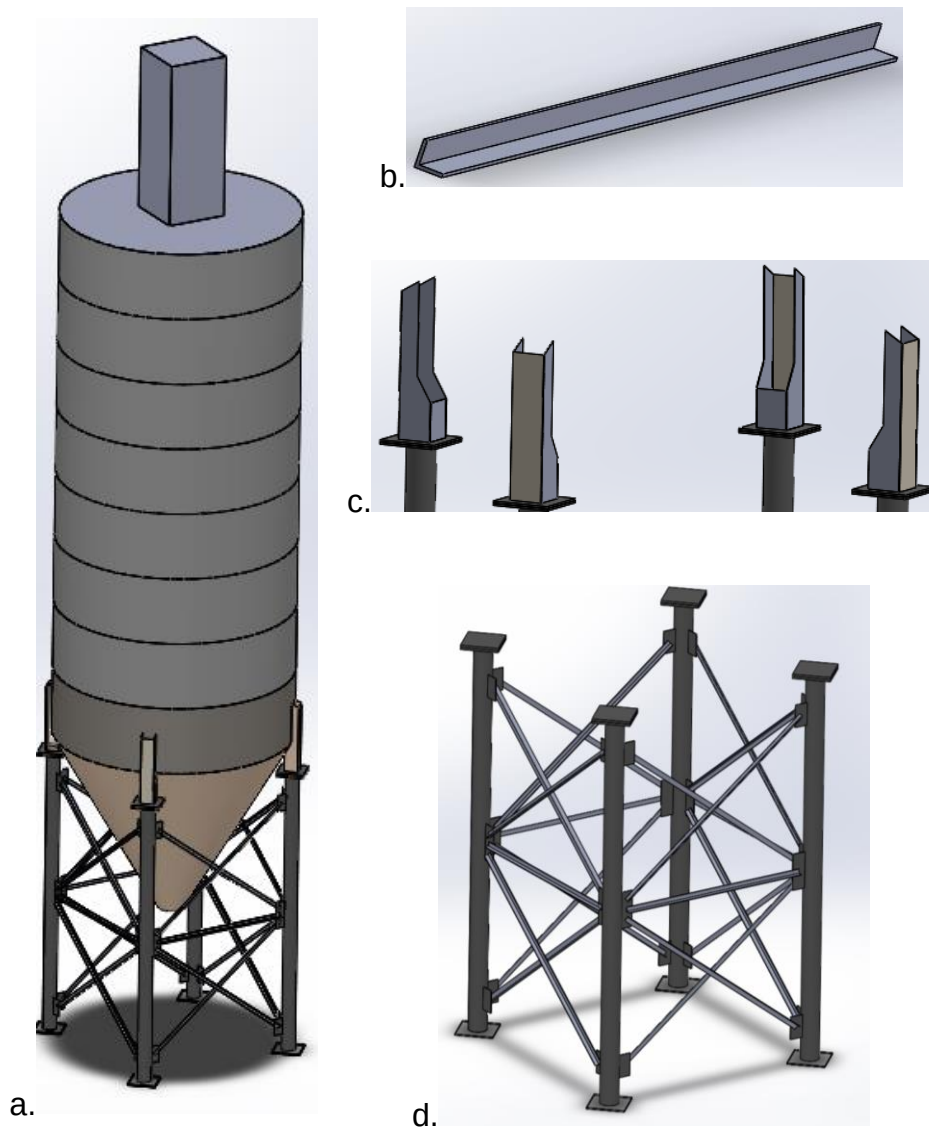


Figura 6 Estructura del Silo a través del Solidwork

2.1 Características geométricas del silo

Típico silo circular elevado compuesto de un cilindro y una tolva cónica soportado sobre columnas. El silo en total tiene 10.77 m de alto, donde la altura del cilindro (h_c) es de 8.06 m y la de la tolva (h_h) de 2.72 m, un diámetro (d_c) de 3.5 m y el ángulo de inclinación de la tolva (β) de 60° . La estructura de soporte está conformada por 4 columnas circulares de 200 mm de diámetro y 4.5 mm de espesor ; arriostrada lateralmente por sus cuatro caras con perfiles L 52.5x52.5x7, ver Figura 6 a,b, c y d.

2.2 Caracterización del producto

La metodología para la caracterización del cemento contempla tres etapas: la preparación de las muestras, realización de los ensayos propuestos y el procesamiento de datos, ver Figura 7.

Preparación de muestras: Se almacenaron aproximadamente 3.5 kg de cemento en bolsas plásticas debidamente marcadas para cada una de las muestras de acuerdo al diseño experimental, ver Figura 9. Para cada una de ellas se realiza un ensayo de corte directo, humedad y de ángulo de reposo. Ver nomenclatura en la Figura 8 y diseño experimental en la Tabla 7.

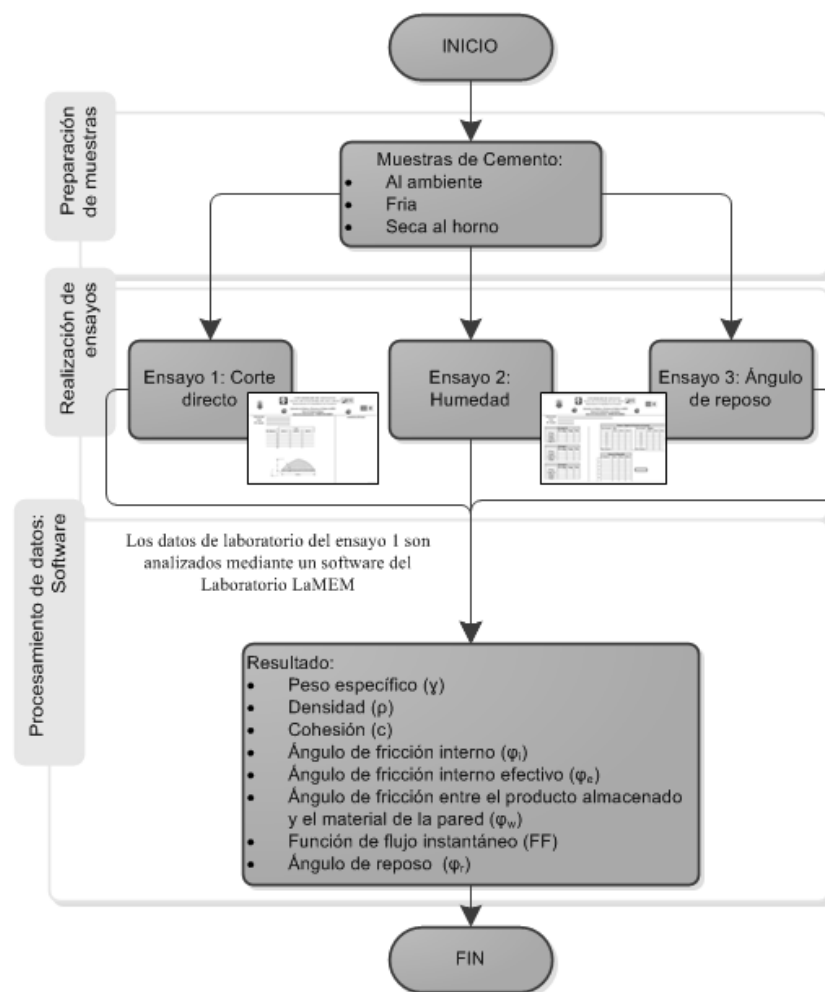


Figura 7 Diagrama de flujo de la metodología para la caracterización del cemento

JP_Xn	JP	Ensayo de Jenike
	X	Tipo de muestra
	n	Número de ensayo Jenike
H_Xnm	H	Ensayo de humedad
	X	Tipo de muestra
	n	Número de ensayo Jenike
	m	Número de ensayo de humedad
AR-Xnm	AR	Ensayo de ángulo de reposo
	X	Tipo de muestra
	n	Número de ensayo Jenike
	m	Número de ensayo de ángulo de reposo

Figura 8 Nomenclatura para las muestras



Figura 9 Muestras debidamente pesadas, almacenadas y rotuladas

Tabla 7 Diseño experimental

Ensayos Jenike, corte directo.		Ensayo de humedad		Ángulo de reposo	
JP_A	JP_A1	H_A1	H_A11	AR-A1	AR-A11
			H_A12		AR-A12
			H_A13		AR-A13
	JP_A2	H_A2	H_A21		AR-A14
			H_A22		AR-A15
			H_A23		AR-A16
	JP_A3	H_A2	H_A21		
			H_A22		
			H_A23		
JP_B	JP_B1	H_B1	H_B11	AR-B1	AR-B11
			H_B12		AR-B12
			H_B13		AR-B13
	JP_B2	H_B2	H_B21		AR-B14
			H_B22		AR-B15
			H_B23		AR-B16
JP_C	JP_C1	H_C1	H_C11	AR-C1	AR-C11
			H_C12		AR-C12
			H_C13		AR-C13
	JP_C2	H_C2	H_C21		AR-C14
			H_C22		AR-C15
			H_C23		AR-C16

Donde,

A, es la muestra almacenada al ambiente.

B, es la muestra seca en horno.

C, es la muestra almacenada en nevera.

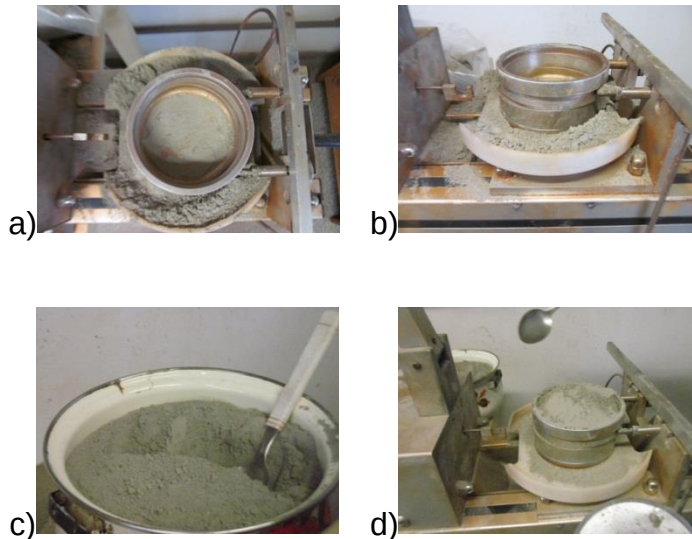
Ensayo de corte directo: Se realiza con el equipo de corte directo conocido como “Jenike Shear Cell”, ver Figura 10, usando el procedimiento descrito en el manual “Standart Shear Testing Technique for Particulate Solids Using the Jenike Shear Cell” (Engineers 1989), propuesto por la Federación Europea de Ingeniería Química. Básicamente se realiza una compactación con

treinta rotaciones con tres niveles de fuerza diferentes, para los cuales se realizan tres repeticiones.



Figura 10 Equipo de corte directo, "Jenike Shear Cell"

En la Figura 11 se puede apreciar la fabricación de la probeta de ensayo. Ubicación de los anillos en el equipo 5-a y 5-b, el material 5-c, durante la compactación 5-e y finalmente la muestra lista para ensayar 5-f.



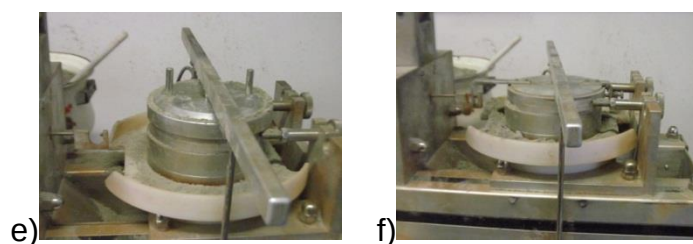


Figura 11 Preparación previa de la probeta para el ensayo de corte directo

El procesamiento de datos es realizado con una herramienta computacional desarrollada en el Laboratorio de Maderas y Estructuras de Madera - LaMEM, conocido como “Yield Locus” (Diniz 2010), ver Anexos. Los resultados obtenidos para: el peso específico (γ), cohesión (c), ángulo de fricción interno (ϕ_i), ángulo de fricción interno efectivo (ϕ_e), resistencia confinada (σ_1), resistencia inconfina (σ_{ic}) y factor de flujo (FF) son presentadas en la Tabla 8.

Tabla 8 Propiedades físicas del Cemento

<i>Resultados de los Ensayos de Laboratorio</i>	<i>Peso Específico (kN/m³)</i>	<i>Ángulo de fricción Interno (grados)</i>	<i>Coefficiente de fricción* con la Pared (x 10-2), ϕ_w</i>		
			<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D3</i>
<i>MIN</i>	12.60	26	40		38
<i>MAX</i>	15.85	37	56		54
<i>Media</i>	13.96	31	45		48
<i>Media Arit</i>	13.91	31	46		47
<i>Desviación estandar</i>	0.89	4	5		6

<i>Resultados de los Ensayos de Laboratorio</i>	<i>Ángulo de fricción* con la Pared (grados), ϕ_w</i>			<i>Ángulo de reposo (grados)</i>	<i>Ángulo de fricción Interno efectivo (grados)</i>	<i>K</i>
	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D3</i>			
<i>MIN</i>	22		21	43	36	0.32
<i>MAX</i>	29		28	48	45	0.45
<i>Media</i>				46	41	
<i>Media Arit</i>				45	40	
<i>Desviación estandar</i>				1	3	

Donde D1 y D2 corresponden a paredes lisa y rugosa respectivamente.

Ensayo de humedad (ASTM D2216 1998): Para conocer el grado de humedad del cemento se dispusieron tres muestras del material en recipientes limpios, secos, resistentes a la corrosión y debidamente enumerados, registrando su peso (peso-i). Luego se colocaron en un horno manteniendo la temperatura constante por aproximadamente 48 horas, después del cual se pesan para conocer su peso seco (peso-f). El cálculo del contenido de humedad se realiza con la ecuación (15). Ver resultados en la Tabla 9.

$$w(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c} * 100 \quad (15)$$

Donde,

w = Contenido de humedad, en %

W_1 = Masa del recipiente más la muestra húmeda, (gr)

W_2 = Masa de la muestra seca, (gr)

W_c = Masa del recipiente, (gr)

Tabla 9 Resultados del ensayo de humedad

Humedad - Cemento			Peso (g)			H (%)
Muestra	Ensayo #	ID	Inicial - W_1	Final - W_2	W_c	
JP-A1	1	H_A11	21.92	21.5	6.36	2.72%
	2	H_A12	23.83	23.5	6.37	
	3	H_A13	22.85	22.3	6.37	
JP-A2	1	H_A21	22.5	22.4	18.35	0.82%
	2	H_A22	20	20	18.34	
	3	H_A23	20.9	20.9	18.36	
JP-A3	1	H_A21	19.7	19.4	16.87	17.28%
	2	H_A22	22.7	22.6	16.05	
	3	H_A23	15.6	15.5	15.24	
JP-B1	1	H_B11	16.74	16.73	6.36	0.10%
	2	H_B12	16.2	16.19	6.37	
	3	H_B13	15.34	15.33	6.37	
JP-B2	1	H_B21	14.76	14.68	6.36	0.00%
	2	H_B22	17.24	14.2	6.37	
	3	H_B23	17.97	17.89	6.37	
JP-C1	1	H_C11	20.6	20.44	6.36	1.05%
	2	H_C12	20.1	19.83	6.37	
	3	H_C13	17.4	17.4	6.37	
JP-C2	1	H_C21	17.96	17.85	17.35	17.32%
	2	H_C22	15.67	15.58	15.24	
	3	H_C23	21.82	21.67	17.36	
MIN						0.00%
MAX						17.32%

Ensayo para el cálculo del ángulo de reposo: (ASTM 1444 2000): se realiza en un equipo de madera construido en el laboratorio LaMEM basado en los experimentos realizados por Kalman et al y Vallejo (Kalman et al. 1993; Chik and Vallejo 2005), quienes afirman que “la rugosidad de la base afecta más el ángulo de reposo para partículas gruesas. Cuando el porcentaje de finos es mayor o igual al 70% de la masa de la mezcla (predomina la fracción fina). La rugosidad de la base no influye”, con base en lo anterior se descartó la influencia de esta variable. Ver Figura 13. Este ensayo consiste en vaciar el material a través de una tolva piramidal con dimensiones específicas desde una altura de 0.19 m. Se posiciona la tolva con la salida del mismo previamente cerrada, se llena del material y se abre la compuerta para dejarlo caer libremente sobre una superficie redonda de diámetro definido. Ver Figura 14.

Se mide la altura del montículo obtenido Figura 14- e y por medio de la ecuación (16), se obtiene el ángulo de reposo, ver resultados en la Tabla 10.

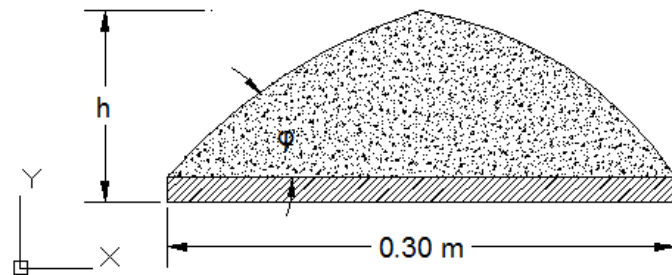


Figura 12 Diagrama de un montículo de material

$$\varphi_{rep} = \tan^{-1} \frac{h}{0.3/2} \quad (16)$$

Donde,

h, corresponde a la altura del material ver Figura 12

φ_{rep} , ángulo de reposo

Tabla 10 Resultados ensayo de ángulo de reposo del material

	$\Phi_{rep} (^{\circ})$
MIN	42.8
MAX	47.9
Media	45.7
Media Arit	45.4
Desviación estandar	1.4



Figura 13 Equipo para el ensayo de ángulo de reposo

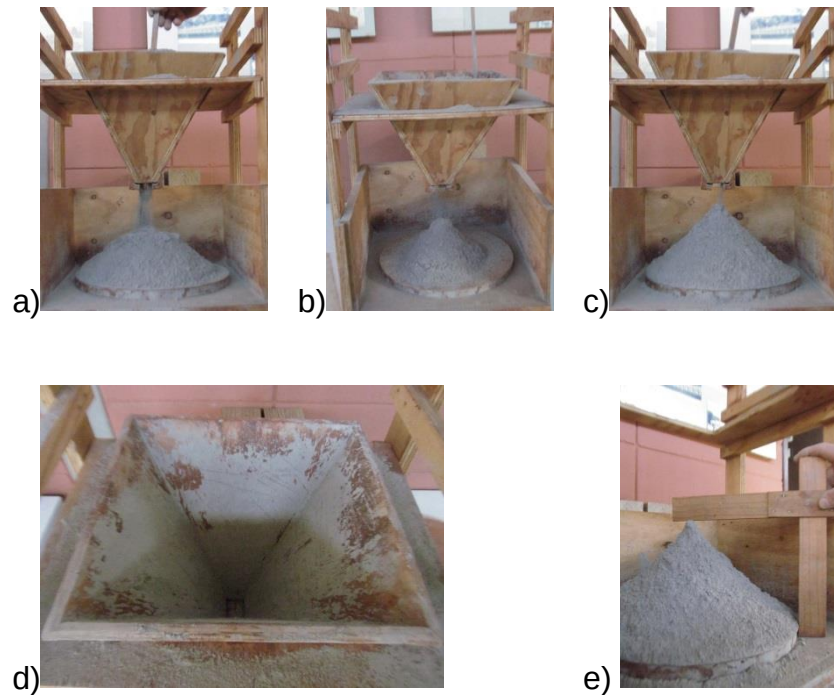


Figura 14 Procedimiento del ensayo de ángulo de reposo

Cálculo del tipo de flujo.

Se determinó el tipo de flujo de acuerdo a la norma Europea (2006a), con el método gráfico. Teniendo en cuenta la inclinación de la tolva de 30 grados con

respecto a la vertical y cada uno de los valores obtenidos para el ángulo de fricción con la pared tanto lisa como rugosa, se determina el tipo de flujo.

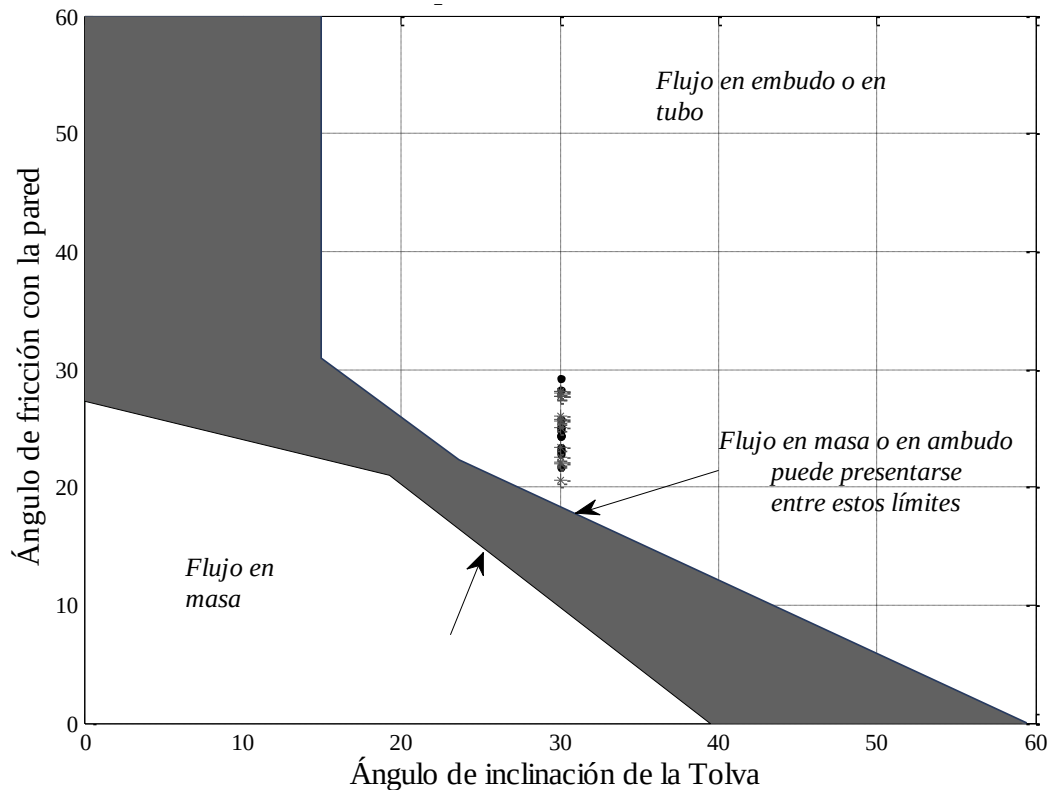


Figura 15 Determinación del tipo de Flujo Método gráfico

De acuerdo a la Figura 15 el tipo de Flujo que se obtiene, ver puntos (●, ✕) en el gráfico, bajo la configuración geométrica y las propiedades del material conocidas es de tipo embudo o tubo.

Durante el almacenamiento del cemento, producto muy fino, se produce gran cantidad de aire y el ángulo de rozamiento interno tiende a ser nulo y la masa tiende a comportarse como un fluido. Para este tipo de productos las sobrepresiones se producen durante el llenado y debido a sus características tienden a la formación de obstrucciones tipo arco a una cierta distancia de la boca de salida.

Teniendo en cuenta las teorías y ecuaciones del ítem Obstrucciones del tipo “Tubo” en el capítulo 1, se obtuvieron las siguientes dimensiones para la boca de descarga: 14.6 m, 7.85 m, 1.94 m y 3.71 m. Al ser un producto cohesivo es de flujo difícil y no es posible garantizar el vaciado por gravedad, por lo que para este silo se requiere el uso de equipos especiales para inducir el flujo. Como alternativa existen unos dispositivos que pueden ser colocados en el interior de la tolva para promover el flujo de masa: doble cono, cono en cono y el cono invertido llamados en inglés: *inserts*. En el libro “Confined Granular Flow in Silos” (Tejchman 2013) se afirma que la presencia de estos dispositivos influye fuertemente en el comportamiento del producto en los silos. Algunas investigaciones se han llevado a cabo alrededor del tema (Songwiong Ding et al. 2003; D. and M. 2008; S. Ding et al. 2011; Wöjck, Tejchman, and Enstad 2012), sin embargo no existen procedimientos normalizados para el diseño.

2.3 Definición de acciones permanentes:

Se consideran: el peso propio de la estructura, equipos fijos: filtros, peso de accesorios: escaleras, rampas de acceso, ductos de alimentación, sinfines. Ver Tabla 11.

Tabla 11 Cálculo de cargas permanentes

Filtro (kN)	3.23
Ducto de alimentación (kN)	2.4
Escaleras de acceso (kN)	2.55
<i>Peso_{Total - cubierta} (kN)</i>	8.18
Plataforma, pasarela y apoyo del sinfin (kN)	5.8
<i>Peso_{Total - estruct} (kN)</i>	5.8
1/2 tramo del Sinfin (kN)	9.2
<i>Peso_{Total - tolva} (kN)</i>	9.2
<i>Peso_{Total} (kN)</i>	23.18

2.4 Determinación de Acciones variables

- Servicio normal

Debido al producto de almacenamiento se tienen: presiones de llenado (presiones horizontales (p_{hf}), presiones verticales (p_{vf}) y presiones por fricción (p_{wf})), descarga (presiones horizontales (p_{hd}) y presiones por fricción (p_{wd})), y adicionales; y las acciones de origen térmico, debido a los efectos climáticos y de sólidos calientes.

Presiones de llenado en el cilindro:

$$p_{hf}(z) = \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{A}{U} \cdot C_z(z) \quad (17)$$

$$C_z(z) = 1 - e^{(-z/z_0)} \quad (18)$$

$$p_{vf}(z) = \frac{\gamma}{K_s \cdot \mu} \cdot \frac{A}{U} \cdot C_z(z) \quad (19)$$

$$p_{wf}(z) = \gamma \cdot \frac{A}{U} \cdot C_z(z) \quad (20)$$

El valor empírico para el parámetro K se determina de acuerdo a la siguiente expresión:

$$K = 1.1(1 - \sin \varphi_e) \quad (21)$$

Donde,

γ , es la densidad de la carga;

μ , es el coeficiente de rozamiento de la pared;

K , es la relación de presiones horizontal y vertical;

A , es el área de la sección transversal del cilindro;

U , es el perímetro interior;

z , es la profundidad.

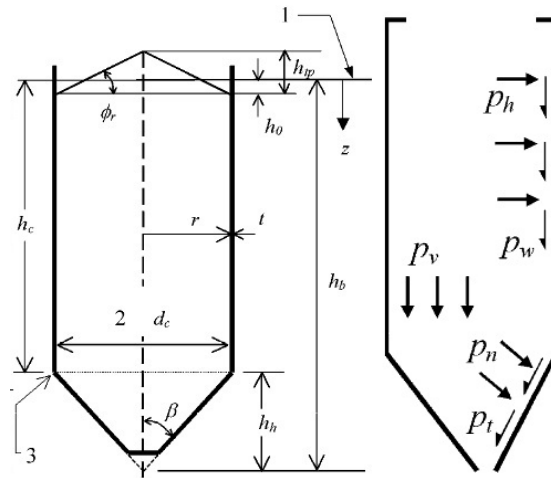


Figura 16 Acciones variables de un Silo: servicio normal

Esfuerzos de compresión en la pared son causados por la presión de fricción en la pared, la fuerza resultante sobre la pared por unidad de perímetro actuando en la profundidad del silo se obtiene así:

$$P_{wf}(z) = \mu \int p_{wf}(z) = \gamma \cdot \frac{A}{U} \cdot \left[z - \frac{A}{\mu K U} \left(1 - e^{-\mu K z U / A} \right) \right] = \frac{A}{U} (\gamma z - p_{vf}) \quad (22)$$

Presiones de vaciado en el cilindro (dinámicas):

$$p_{hd}(z) = C_h \cdot p_{hf} \quad (23)$$

$$p_{wd}(z) = C_w \cdot p_{wf} \quad (24)$$

Presiones en la tolva

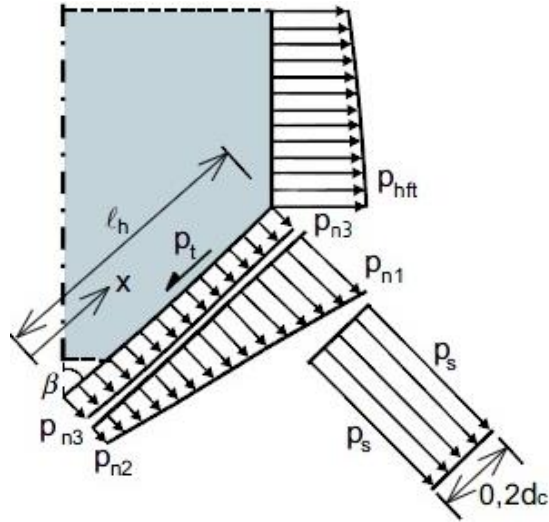


Figura 17 Acciones en la tolva

Presiones estáticas:

$$p_{n1} = p_{vo} \cdot (1,2 \sin \alpha^2 + \cos \alpha^2) \quad (25)$$

$$p_{n2} = 1,2 \cdot p_{vo} \cdot \sin \alpha^2 \quad (26)$$

$$p_{n3} = 3,0 \cdot \frac{A}{U} \cdot \frac{\gamma \cdot K}{\sqrt{\mu_{w,t}}} \cdot \cos \alpha^2 \quad (27)$$

$$p_n = p_{n3} + p_{n2} + (p_{n1} + p_{n2}) \cdot \frac{x}{l_h} \quad (28)$$

$$p_t = \mu \cdot p_n \quad (29)$$

Presiones dinámicas:

$$p_s = 2 \cdot p_{hc} \quad (30)$$

Donde,

p_{n1}, p_{n2} , es la presión debida al llenado de la tolva;

p_{n3} , es la presión debida a la presión vertical sobre el material almacenado directamente por encima de la transición;

p_{vo} , es la presión vertical actuante en la transición;

p_t , presión de rozamiento sobre la pared.

Presiones adicionales:

Las imperfecciones geométricas en las paredes del silo y la tolva, y la variación en las propiedades del producto almacenado generan presiones asimétricas que en general son inestables, debido a lo anterior se adoptan presiones adicionales.

Se puede considerar esta presión en cualquier parte del silo, durante el llenado y la descarga, de acuerdo a:

$$p_{ac} = 0.2\omega p_{hc} \quad (31)$$

$$p_{ad} = 0.2\omega p_{hd} \quad (32)$$

Donde ω ,

$$\omega = 1.0 + 4 \frac{e}{d_c} \quad (33)$$

$$e = \text{mayor valor entre } e_i \text{ y } e_o$$

Proceso simplificado

Existe una gran incertidumbre en cuanto a la ubicación de las cargas en la estructura, para contrarrestarla se afectan las presiones actuantes por un coeficiente de ponderación. Para silos de pared fina con sección circular, las presiones de carga y descarga pueden ser determinadas como se muestra a continuación:

$$p_{hc} = p_{hc}(1 + 0.2\omega) \quad (34)$$

$$p_{hd} = p_{hd}(1 + 0.2\omega) \quad (35)$$

$$p_{wc} = p_{wc}(1 + 0.2\omega) \quad (36)$$

$$p_{wd} = p_{wd}(1 + 0.2\omega) \quad (37)$$

Para el cálculo de las presiones horizontales y verticales, de la fuerza máxima de fricción en la pared del silo y la tolva, la norma australiana (1996) propone límites, ver Tabla 5, apropiados para las propiedades físicas, ver Tabla 12. En la Figura 18 se muestran las presiones horizontales y las fuerzas de fricción para el proceso de llenado y descarga, además de las presiones normales en la tolva las cuales fueron programadas en Mathematica 6.0. En la Figura 18 el eje vertical, $z(m)$ nos indica la altura a lo largo del silo, siendo el nivel 0 (cero) la ubicación de la transición cilindro-tolva.

Tabla 12 Límites para las propiedades físicas del cemento

APLICACIÓN		Peso específico del producto, γ (kN/m³)		Ángulo de fricción con la pared lisa (grados), φ_w		Ángulo efectivo de fricción interno (grados), φ_e		Relación entre la presión horizontal y vertical, K	
Tipo de flujo	Embudo	Inferior	13	Superior	29	Inferior	36	-	
	Masa	Inferior	13	Inferior	22	Superior	47	-	
Cálculo de la máxima presión horizontal en la pared, p_h		Superior	16	Inferior	22	Inferior	36	Superior	0.45
Cálculo de la máxima presión vertical, p_v		Superior	16	Inferior	22	Superior	47	Inferior	0.3
Fuerza máxima de fricción en la pared del silo, p_w		Superior	16	Superior	29	Inferior	36	Superior	0.45
Fuerza vertical máxima en la tolva		Superior	16	Inferior	22	Superior	47	Inferior	0.3

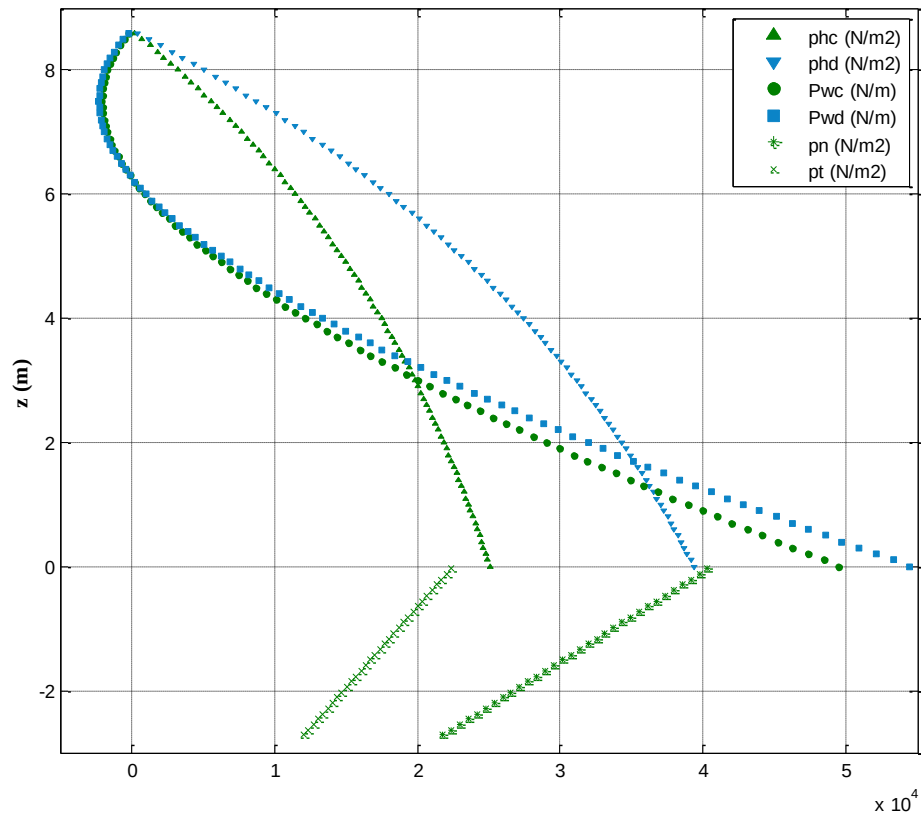


Figura 18 Presiones, fuerzas estáticas y dinámicas en el cuerpo del Silo

Acciones térmicas:

El cemento produce tensiones térmicas en las paredes de los silos las cuales se superponen a los máximos esfuerzos de tracción del Silo lleno. Se

deben a efectos climáticos y/o por los sólidos calientes que se almacenan. De acuerdo a Morán (2006): las presiones horizontales aumentan manteniéndose a lo largo de toda la pared y se presentan con mayor intensidad en la parte superior del silo; en el caso de las presiones verticales disminuyen con el descenso térmico de forma más evidente en la parte inferior del silo. Concluye además que a través de los métodos clásicos de: Ravenet, Theimer, Andersen, se obtienen mayores presiones que las obtenidas por el Método de Elementos Finitos, es decir son más conservadoras.

La norma europea (1999) considera los efectos térmicos debido a una diferencia de temperatura entre el material almacenado y la estructura y/o entre el ambiente externo y la estructura. Considera presiones adicionales cuando el silo se enfría en relación con el sólido almacenado, las cuales se determinan así:

$$p_{hT} = C_T \alpha_w \Delta T \frac{E_w}{\left[(r/t) + (1 - \nu) \left(E_w / E_{sU} \right) \right]} \quad (38)$$

Donde,

C_T , multiplicador de carga de temperatura.

α_w , coeficiente de expansión térmica de la pared del silo

ΔT , diferencial de temperatura

r , radio del silo

t , espesor de la pared

E_w , módulo de elasticidad de la pared del silo

ν , coeficiente de Poisson para el sólido particulado.

E_{sU} , módulo elástico efectivo de descarga del sólido almacenado en la profundidad z .

La estructura en el modelo de elementos finitos es sometida a un descenso térmico de 40°.

Poco frecuentes:

Se tiene en cuenta la acción del viento, un fenómeno natural que varía en intensidad y dirección aleatoriamente en el tiempo y el espacio; originando en las estructuras cargas de la misma naturaleza y por lo tanto de difícil tratamiento. En los Silos debe garantizarse en el diseño que no existirán estos dos tipos de fallas: desprendimiento de la cubierta, pandeo del cilindro y volcamiento del silo.

La norma europea (2006a), establece un procedimiento para el cálculo de la presión debido al viento en estructuras de sección transversal circular, ver esquema de la presión en la Figura 19; en general: la presión externa (w_e), e interna, (w_i). La fuerza global (F_w), la fuerza de rozamiento (F_{fr}), la presión media de la velocidad de referencia del viento (q_{ref}), y los coeficientes: topográfico (C_t), de exposición (C_e), de presión externa (C_{pe}); estos últimos de tablas. Para el cálculo de estas presiones se programó una rutina en Mathematica 6.0. Las presiones de viento para el silo de estudio se presentan en la Figura 20.

$$w_e = q_{ref} \cdot C_e(z_e) \cdot C_{pe} \quad (39)$$

$$w_i = q_{ref} \cdot C_e(z_i) \cdot C_{pi} \quad (40)$$

$$F_w = q_{ref} \cdot C_e(z_e) \cdot C_d \cdot C_f \cdot A_{ref} \quad (41)$$

$$F_{fr} = q_{ref} \cdot C_e(z_e) \cdot C_{fr} \cdot A_{fr} \quad (42)$$

$$q_{ref} = \frac{\rho}{2} \cdot v_{ref}^2 \quad (43)$$

$$v_{ref} = C_{DIR} \cdot C_{TEM} \cdot C_{ALT} \cdot v_{ref,0} \quad (44)$$

$$v_m(z) = C_r(z) \cdot C_t(z) \cdot v_{ref} \quad (45)$$

$$C_r(z) = k_t \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ cuando: } z_{min} \leq z \leq 200m \quad (46)$$

$$C_r(z) = C_r(z_{min}) \text{ cuando: } z \leq z_{min} \quad (47)$$

$$C_e(z) = C^2(z) \cdot C_t^2(z) \cdot [1 + 2g \cdot L_v(z)] \quad (48)$$

$$L_v(z) = \frac{k_T}{C_r(z) \cdot C_t(z)} \quad (49)$$

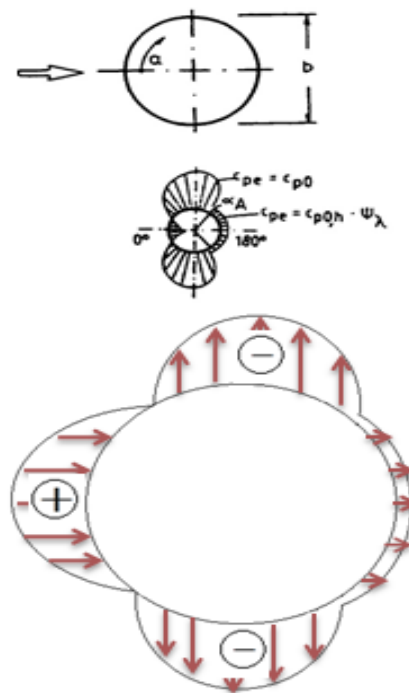


Figura 19 Esquema las presiones de viento actuando en una sección circular

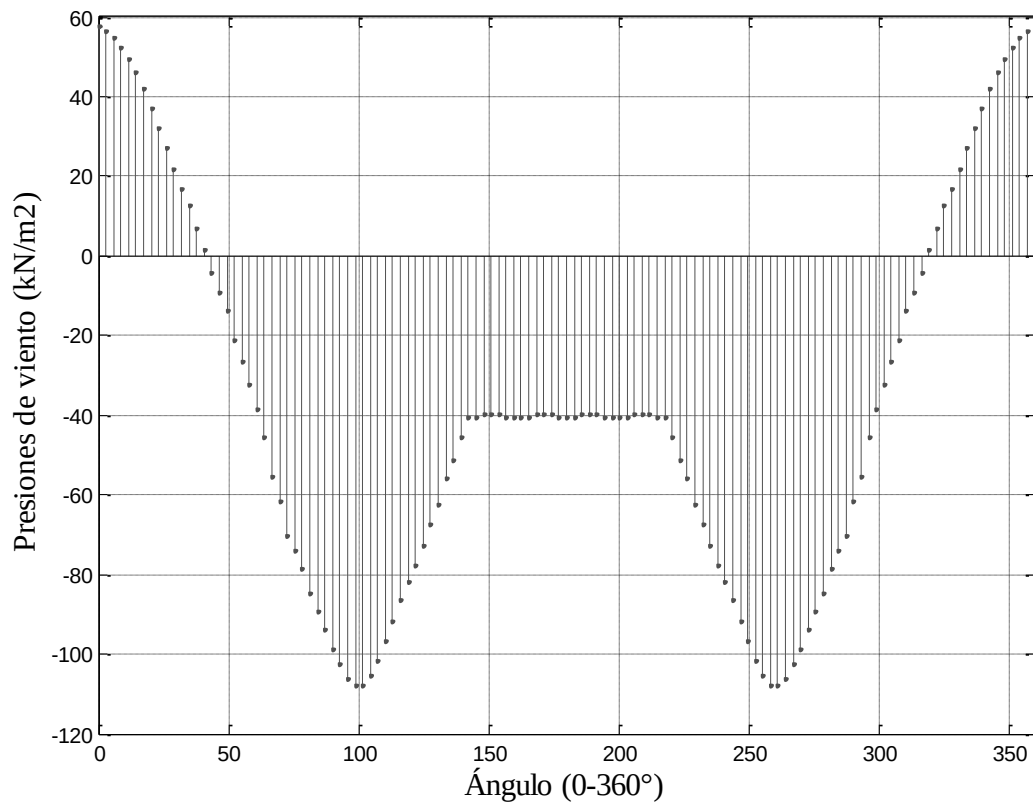


Figura 20 Presiones debido al viento

2.5 Combinaciones de cargas utilizadas en los modelos del silo

Las diferentes normas (Australia 1996; Normung 2000; Standardization 2006), contemplan los tipos de acciones que se deben tener en cuenta a la hora de proyectar la estructura de un silo, ver Tabla 4. Básicamente divididas en tres tipos: acciones permanentes (F_G), las cuales tienen en cuenta el peso propio de la estructura; acciones variables (F_Q), que consideran las presiones debido al producto almacenado, la variación de la temperatura e incluso el viento que es considerado como poco frecuente; acciones accidentales ($F_{Q,EXC}$), como el impacto de vehículos y explosiones de polvo; éstas últimas no son consideradas.

En las combinaciones de carga, las acciones permanentes son consideradas en su totalidad y las acciones variables de tal forma que produzcan los efectos más desfavorables. Se usa tanto la norma Australiana (1996) con los valores de ponderación que propone Calil y Batista (2007), como la norma colombiana (NSR-10 2010) para la determinación de las combinaciones de carga.

Se tienen combinaciones últimas normales y últimas especiales, de la siguiente manera:

Combinaciones de carga para el estado último:

- Combinaciones ultimas normales

$$\sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi}) + \gamma_{q1} F_{Qi} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qi} \psi_{0j} F_{Qj}) \quad (50)$$

ψ_0 , factor de combinación.

- Combinaciones últimas especiales o de construcción

$$\sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi}) + \gamma_{q1} F_{Qi} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qi} \psi_{0j,ef} F_{Qj}) \quad (51)$$

$\psi_{0,ef}$, factor de combinación efectivo de las otras acciones variables.

- Combinaciones últimas excepcionales

$$\sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi}) + F_{Q,EXC} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qi} \psi_{0j,ef} F_{Qj}) \quad (52)$$

Donde,

F_G , acciones permanentes.

F_{Q1} , acción variable principal en las combinaciones

F_Q , acciones permanentes.

$F_{Q,EXC}$, acción excepcional

γ_g , coeficiente de ponderación de las acciones permanentes.

γ_q , coeficiente de ponderación de las acciones variables.

De acuerdo a lo anterior se determinan las siguientes combinaciones de acciones:

Norma australiana:

$$\begin{array}{ll} \text{Combinación 1:} & 1.4F_G + 1.4(F_{phf} + F_{pn} + F_{Pwf}) + [1.4 \cdot 0.6F_V + 1.4 \cdot 1.0F_E] \end{array} \quad (53)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Combinación 2:} & 1.4F_G + 1.4(F_{phd} + F_{pn} + F_{Pwd}) + [1.4 \cdot 0.6F_V + 1.4 \cdot 1.0F_E] \end{array} \quad (54)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Combinación 3:} & 1.4F_G + 1.4F_V + 1.4 \cdot 1.0F_E \end{array} \quad (55)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Combinación 4:} & -0.9F_G + 1.4F_V - 0.9F_E \end{array} \quad (56)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Combinación 5:} & 1.4F_G + 1.2F_{TEM} + 1.4 \cdot 1.0(F_{phf} + F_{pn} + F_{Pw}) \end{array} \quad (57)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Combinación 6:} & 1.4F_G + 1.2F_{TEM} + 1.4 \cdot 1.0(F_{phd} + F_{pn} + F_{Pwd}) \end{array} \quad (58)$$

Donde,

F_G , Peso propio

$F_{phf} + F_{pn} + F_{Pw}$, acciones debido al material almacenado tanto en el cilindro como en la tolva

F_V , fuerza de viento

F_{TEM} , acción debido a la temperatura

F_E , acción de equipos fijos: pasarelas, escaleras de acceso, filtros.

Combinaciones provenientes de la norma colombiana, (NSR-10 2010)

$$\text{Combinación 1:} \qquad 1.4(D + F) \qquad (59)$$

$$\text{Combinación 2:} \qquad 1.2(D + F + T) + 1.6L + 0.5L_r \qquad (60)$$

$$\text{Combinación 3:} \qquad 1.2D + 1.6L_r + L \qquad (61)$$

$$\text{Combinación 4:} \qquad 1.2D + 1.6L_r + 0.8W \qquad (62)$$

$$\text{Combinación 5:} \qquad 1.2D + 1.6W + 1.0L + 0.5L_r \qquad (63)$$

$$\text{Combinación 6:} \qquad 1.2D + 1.0L \qquad (64)$$

$$\text{Combinación 7:} \qquad 0.9D + 1.6W \qquad (65)$$

Donde,

D , Peso propio

F , acciones debido al material almacenado tanto en el cilindro como en la tolva

W , fuerza de viento

T , acción debido a la temperatura

L , acción de cargas vivas debidos al uso

L_r , acción de cargas vivas sobre la cubierta

Finalmente, las combinaciones de carga para efectos del modelamiento bajo la nomenclatura de la norma colombiana, (NSR-10 2010) se presentan a

continuación. La nomenclatura asignada desde C1 hasta C5 es usada en los capítulos posteriores.

Nomenclatura

$$C1 \quad 1.4D_p + 1.4F_c + [1.4 \cdot 0.6W + 1.4 \cdot 1.0D] \quad (66)$$

$$C2 \quad 1.4D_p + 1.4F_d + [1.4 \cdot 0.6W + 1.4 \cdot 1.0D] \quad (67)$$

$$C3 \quad 1.4D_p + 1.4W + 1.4 \cdot 1.0D \quad (68)$$

$$C4 \quad -0.9D_p + 1.4W - 0.9D \quad (69)$$

$$C5 \quad 1.4D_p + 1.2T + 1.4 \cdot 1.0F_c \quad (70)$$

$$C6 \quad 1.4D_p + 1.2T + 1.4 \cdot 1.0F_d \quad (71)$$

$$C7 \quad 1.4(D + F_c) \quad (72)$$

$$C8 \quad 1.4(D + F_d) \quad (73)$$

$$C9 \quad 1.2(D + F_c + T) + 1.6L + 0.5L_r \quad (74)$$

$$C10 \quad 1.2(D + F_d + T) + 1.6L + 0.5L_r \quad (75)$$

$$C11 \quad 1.2D + 1.6L_r + L \quad (76)$$

$$C12 \quad 1.2D + 1.6L_r + 0.8W \quad (77)$$

$$C13 \quad 1.2D + 1.6W + 1.0L + 0.5L_r \quad (78)$$

$$C14 \quad 1.2D + 1.0L \quad (79)$$

$$C15 \quad 0.9D + 1.6W \quad (80)$$

3 ANÁLISIS ESTÁTICO LINEAL MEDIANTE PROCEDIMIENTOS SIMPLIFICADOS

En este capítulo se realiza el análisis mediante procedimientos o métodos simplificados (MS). Se determinan las presiones sobre la estructura del silo, los esfuerzos debido a la teoría de membrana y finalmente en los resultados, el estado de deformación, y esfuerzos principales.

Los esfuerzos en la estructura del silo, son determinados a partir de las presiones al nivel de cada uno de los anillos que conforman el cilindro y a lo largo de la altura de la tolva en 6 puntos. A partir de la ecuación (17) hasta la (20) se obtuvieron las presiones de llenado y descarga a la altura de los diferentes anillos de la estructura como normalmente se calculan en el diseño manual. Ver Tabla 13 y Figura 21.

Tabla 13 Presiones de llenado y descarga en el cuerpo del silo

<i>Llenado</i>					<i>Descarga</i>	
<i>Anillo</i>	<i>z (m)</i>	<i>p_{hf}(z) (MPa)</i>	<i>p_{vf}(z) (MPa)</i>	<i>P_{wf}(z) (N)</i>	<i>p_{he}(z) (MPa)</i>	<i>P_{We}(z) (N)</i>
	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1	0.008	0.019	0.000	0.012	0.001
7	2	0.011	0.028	0.001	0.018	0.001
6	3	0.015	0.036	0.006	0.023	0.006
5	4	0.017	0.043	0.012	0.027	0.013
4	5	0.020	0.049	0.020	0.031	0.022

3	6	0.022	0.054	0.029	0.034	0.032
2	7	0.024	0.058	0.039	0.037	0.043
1	8	0.025	0.061	0.050	0.039	0.054

A partir de las Eq. (25) a la (29) son calculadas las presiones estáticas y dinámicas en la tolva. Ver Tabla 14.

Tabla 14 Presiones estáticas y dinámicas en la tolva

x (m)	$p_{nt}(x)$ (MPa)	$p_t(x)$ (MPa)
0	0.022	0.012
0.54	0.025	0.014
1.08	0.028	0.016
1.62	0.031	0.017
2.16	0.035	0.019
2.7	0.038	0.021

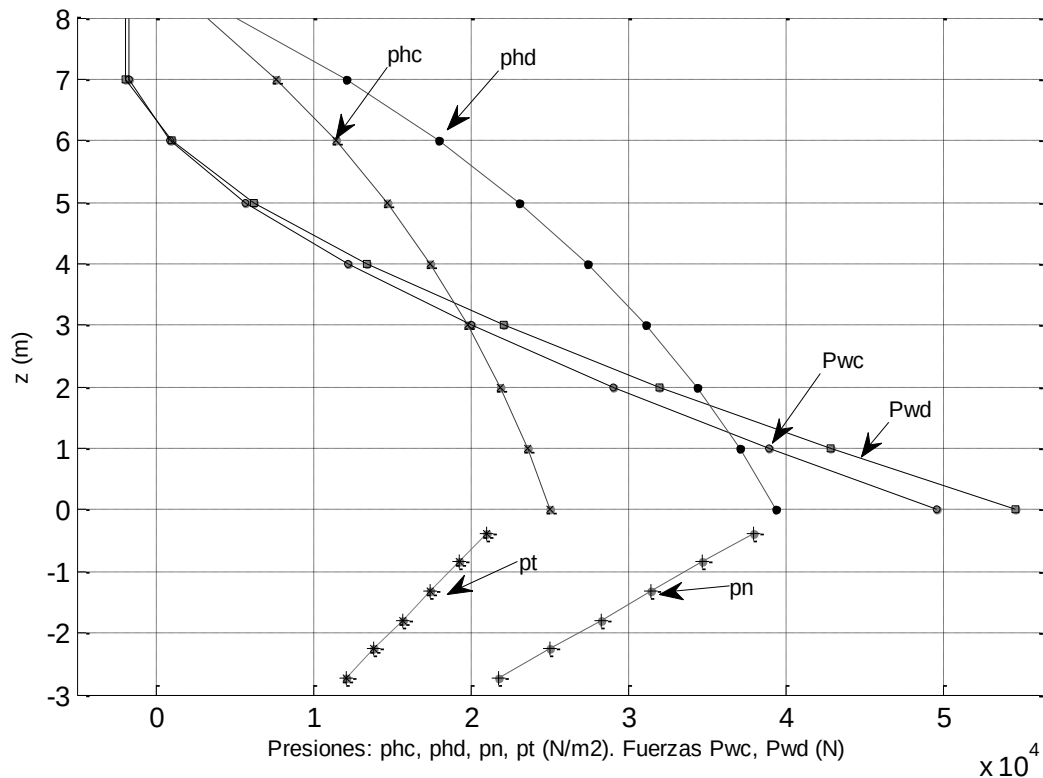


Figura 21 Presiones y fuerzas calculadas de forma simplificada

3.1 Esfuerzos en recipientes de paredes delgadas a presión

Los recipientes a presión son diseñados con ecuaciones que se basan en la teoría de los esfuerzos de membrana que se producen en las paredes del recipiente. Al estar sometido a presión soporta cargas en todas las direcciones, sin embargo según el código ASME, cuando el cociente entre el espesor de la pared y el diámetro interior del recipiente es igual o menor a 0,10 se habla de recipientes de pared delgada. El esfuerzo radial, resultado de la presión que actúa directamente en la pared, causa un esfuerzo compresivo; cuando se trata de recipientes de pared delgada este esfuerzo es muy pequeño comparado con los otros esfuerzos principales: circunferenciales y axiales, por lo que se ignora.

3.1.1 Recipientes cilíndricos

Considere un cilindro de radio R_c y de espesor t , bajo presión interna constante, p . Considere un elemento pequeño de la pared con lados paralelos y perpendiculares al eje del cilindro, ver Fig. Figura 22

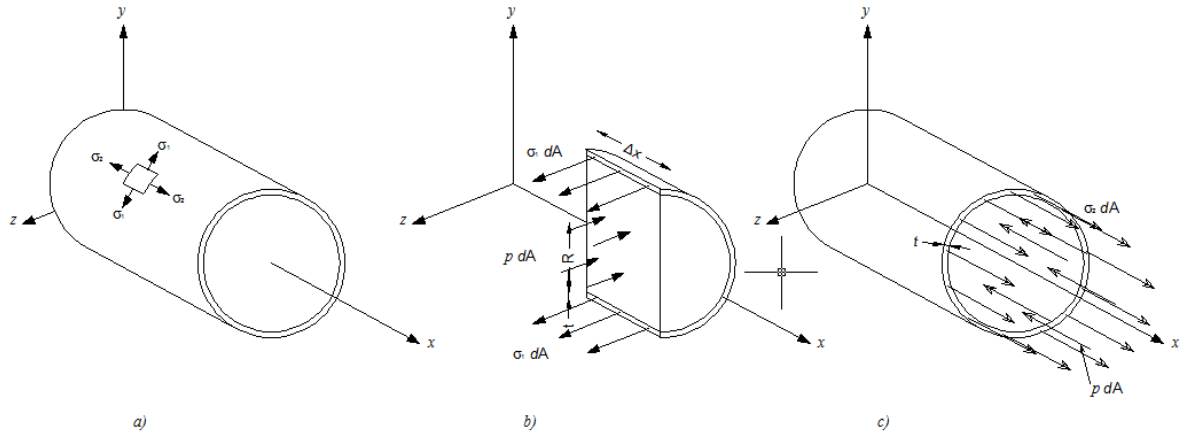


Figura 22 Esfuerzos en una estructura cilíndrica

El esfuerzo circunferencial o tangencial es representado por la Eq (81), es un esfuerzo normal en la dirección tangencial (azimut), ver Figura 22b

$$\sigma_t = \frac{p \cdot R}{t} \quad (81)$$

El esfuerzo axial o longitudinal es calculado a partir de la Eq. (82) , es un esfuerzo normal paralelo al eje simétrico del cilindro, cuando la estructura es sometida a una presión constante axial, ver Fig. Figura 22c

$$\sigma_l = \frac{p \cdot R}{2t} \quad (82)$$

De acuerdo a lo anterior el círculo de Mohr de tensiones en el cilindro de pared delgada estaría dado por:

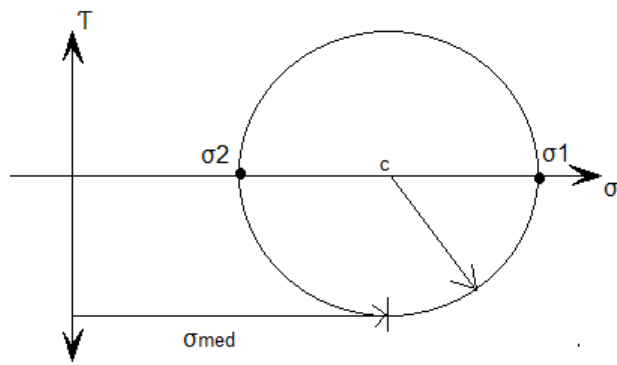


Figura 23 Círculo de Morh en un cilindro de pared delgada

3.1.2 Recipientes cónicos

Igualmente considere una estructura cónica de radio mayor R y espesor t bajo presión interna uniforme. p . Considere un elemento pequeño de lados paralelos, y perpendicular al eje del cono, ver Fig.(38) a

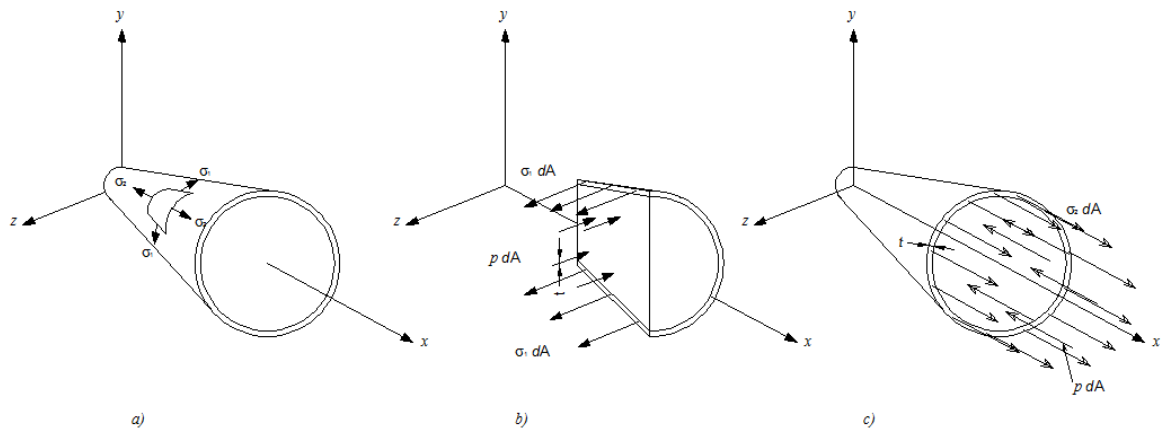


Figura 24 Esfuerzos en una estructura cónica

Similarmente, los esfuerzos circunferenciales y meridionales son presentados en las Eq. (83) y (84)

$$\sigma_t = \frac{p \cdot R}{t \cdot \cos \beta} \quad (83)$$

$$\sigma_l = \frac{p \cdot R}{2t \cdot \cos \beta} \quad (84)$$

Los esfuerzos y deformaciones equivalentes de von-mises se expresan a continuación teniendo en cuenta la existencia de sólo dos componentes, ver Eqs. (85), (86) y (87)

$$\sigma_e = \left(\frac{1}{2} [(\sigma_t - \sigma_l)^2 + \sigma_l^2 + \sigma_t^2] \right)^{1/2} \quad (85)$$

$$\varepsilon_e = \frac{1}{1 + \nu} \left(\frac{1}{2} [(\varepsilon_t - \varepsilon_l)^2 + \varepsilon_l^2 + \varepsilon_t^2] \right)^{1/2} \quad (86)$$

$$\sigma_e = E \varepsilon_e \quad (87)$$

3.2 Deformaciones y esfuerzos principales obtenidos mediante el proceso simplificado

De acuerdo a las acciones consideradas usualmente para determinar los esfuerzos en las paredes del silo y en función a las expresiones para determinar los esfuerzos en estructuras de paredes delgadas, ver ecuaciones. (81) a la (84), se presentan los resultados obtenidos por medio del método manual. Ver Figura 25 y Figura 26.

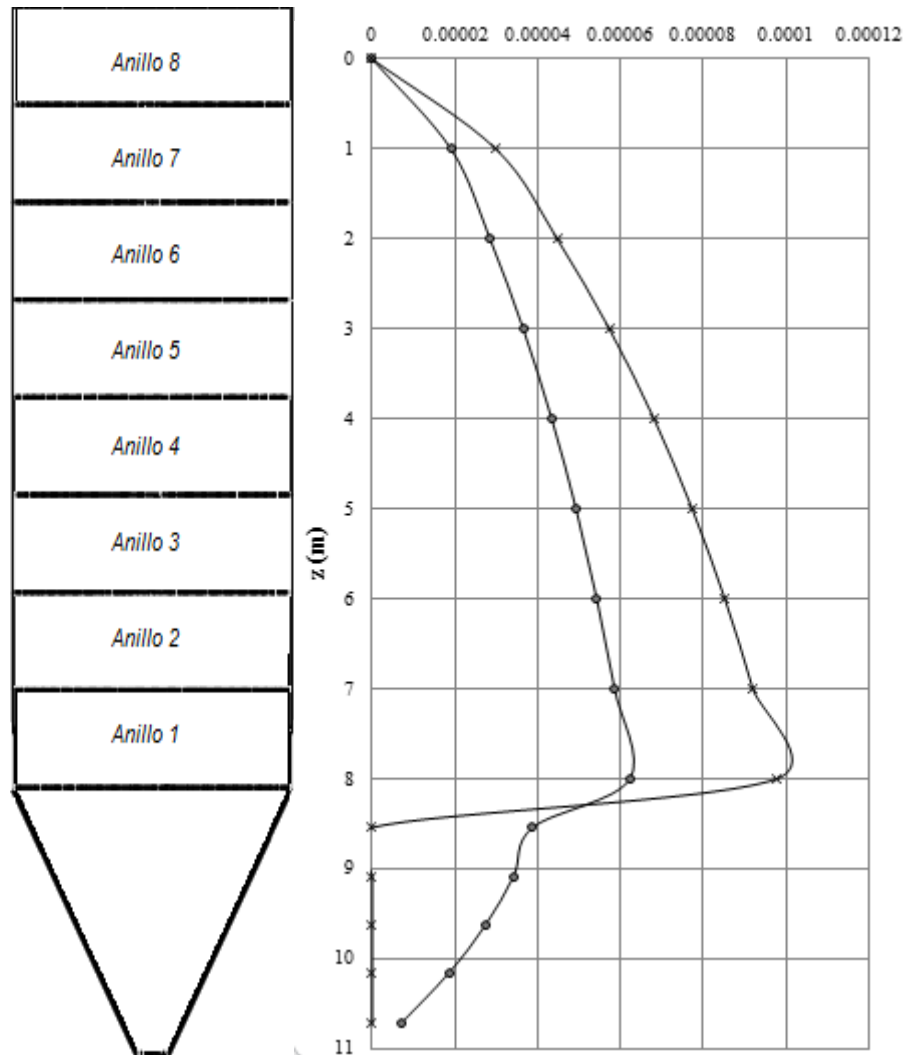


Figura 25 Deformación elástica equivalente- Von Mises (mm/mm)

● $\epsilon_e\text{-}F_c\text{-}MS$, × $\epsilon_e\text{-}F_d\text{-}MS$

A partir de las dos componentes de los esfuerzos principales se determinaron los esfuerzos equivalentes, ver Ec, (85), a lo largo del silo y a partir de ellos la deformación elástica equivalente de Von Mises, ver Ecs (86) y (87), como se muestra en la Figura 25.

Los esfuerzos circunferenciales y meridionales por el método simplificado o manual se calcularon para las cargas de llenado(F_c) y para las de descarga

(F_d); éstas son las consideradas usualmente para el diseño de la estructura del silo: cilindro y tolva.

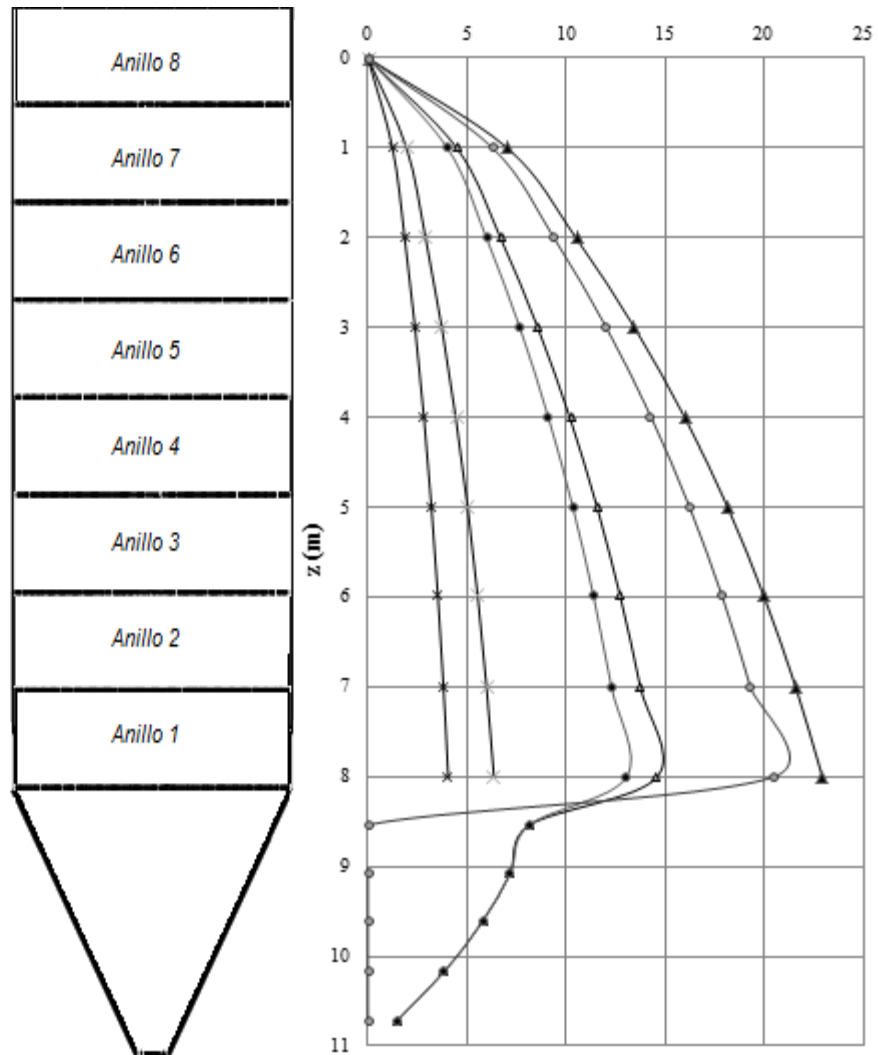


Figura 26 Esfuerzos (MPa) circunferenciales, σ_t y meridionales, σ_l por el método simplificado SM. $\blacktriangle$ σ_t -phc, $\blacktriangle$ σ_t -phc, $\times$ σ_l -pwc, $\times$ σ_l -pwd, $\bullet$ σ_e -Fc, $\circ$ σ_e -Fd

4 MODELO NUMÉRICO DE UN SILO ESBELTO. ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS -MEF

En las estructuras de los silos, al realizar un análisis del comportamiento mecánico de los sólidos almacenados se pueden considerar dos escalas principales. En relación al flujo del silo y a los problemas de interacción grano-pared relacionados con el modelamiento numérico mediante el Método de Elementos Discretos - MED y de Elementos Finitos – MEF.

El MED, a una escala microscópica es útil en el análisis para la compresión de los fenómenos fundamentales que intervienen en el comportamiento de los sólidos y de sus efectos sobre el flujo del silo y las presiones de la pared; pues, el material se considera como un conjunto discontinuo, es decir se considera la interacción entre partículas individuales.

En el MEF, en una escala macroscópica, se considera que el material es continuo y homogéneo; siendo esta la forma más escala más tradicional de análisis, ya que está más cerca de la escala de la estructura general y más directamente relacionada con problemas prácticos.

La diferencia entre las dos escalas no es solo geométrica si no conceptual, pues se considera que el medio es discreto o que es continuo, lo que conduce a hacer consideraciones matemáticas diferentes para representar el concepto adoptado.

Martinez y Masson (1998) afirman que el MEF es ideal para tratar con geometrías complejas y para obtener información de fondo del comportamiento estructural; en el caso del MED es útil para estudiar efectos discretos como propiedades de las partículas, en cuanto al flujo por ejemplo, la segregación, entre otros.

Mahmoud y Bishara (1975) empiezan a desarrollar el estudio del estado de esfuerzos en este tipo de estructuras por el Método de Elementos Finitos - MEF. Dadas las facilidades tecnológicas actuales, es posible realizar un

análisis estructural adecuado para este tipo de estructuras con herramientas como el Ansys® incluso considerando geometrías en tres dimensiones.

El MEF ha incursionado fuertemente en el análisis de las estructuras tipo silo, en el mejoramiento de los modelos de comportamiento de los productos y en el estudio de los esfuerzos estructurales; lo que la convierte en una línea de investigación como lo afirma Calil, Junior y Batista (2007). Desde sus inicios, con el MEF, se realizan modelos numéricos para simular los tipos de flujo, y con estas estimar las cargas de llenado y vaciado de acuerdo al tipo de producto almacenado.

Con el MEF se han desarrollado modelos para determinar tipo de flujo en un silo. El cálculo de esfuerzos en este tipo de estructuras también ha comenzado a tomar importancia, haciendo evaluaciones estructurales mejores teniendo en cuenta cargas como: las de llenado y vaciado, de viento, accidentales y el sismo; y condiciones geométricas, como las tolvas excéntricas (Yang et al. 2011) (J. Sadowski and J. Michael 2012).

Sanad et al. (2001), concluye que el proceso de carga modelado con el MEF de cualquier silo debe realizarse por capas y no llenarlo completamente, para que las tensiones dependientes de las deformaciones puedan desarrollarse. En cuanto al pico de presión que se presenta en la transición del cilindro y la tolva, determinaron que depende en gran escala de: el número de elementos, de la redondez del vértice (transición) y de la relación tensión-deformación elegida.

Otros modelos desarrollados con el MEF (Vidal et al. 2007), permiten determinar las presiones en las paredes durante el llenado, cuando la tolva es excéntrica al tener condiciones de contorno, como el apoyo en la transición o las columnas discretas de apoyo de la estructura. La distribución de la presión en silos bajo diferentes condiciones de contorno: apoyado en la transición, en columnas discretas fue estudiado por Vidal, Gallego et al. (2007). Concluyen que ésta se ve afectada por la rigidez local de las columnas. La deformación de la pared se vio fuertemente influenciada por la presencia de las columnas. Los

momentos de flexión y meridionales resultantes de membrana de tensión en la tolva, se hicieron evidentes en los primeros 35% de la altura.

Sharhan (2012) adelantó un estudio de las concentración de esfuerzos en la unión de estructuras laminares cilindro-cono (cuerpo del silo con la tolva) utilizando el MEF. Las superficies cilíndricas y cónicas fueron modeladas con alta precisión y apoyadas en un elemento rígido, una viga perimetral. El autor también concluye que la discontinuidad geométrica en la unión provoca concentraciones de esfuerzo así como de flexión; y que estas pueden reducirse aumentando el ángulo de inclinación de la tolva o mediante la implementación de un reforzamiento perimetral más cercano a la unión.

Sharhan (2012) adoptó para las paredes un elemento “Shell” de 4 nodos de esquina y cinco grados de libertad en cada nodo, desarrollado por Sharhan 1989. Para el cilindro, utilizó un elemento desarrollado por Ashwell y Sabir 1972, el cual tiene solo los grados de libertad esenciales en cada uno de los cuatro nodos de esquina. Ver figura 6.

Los principales problemas en el diseño de silos de acero son: garantizar un adecuado desarrollo de las fuerzas de membrana y evitar el pandeo local de la estructura del depósito a causa de la compresión (Song, Teng, and Rotter 2004). Componentes no simétricas de las cargas son de interés por la relación con la evaluación de su contribución adicional a las fuerzas de compresión de membrana las cuales pueden llevar a pandeo. Por lo tanto, para estructuras de acero la pregunta de preocupación es la magnitud de la presión horizontal, en el lado seguro como lo asegura Gillie y Rotter (2002)

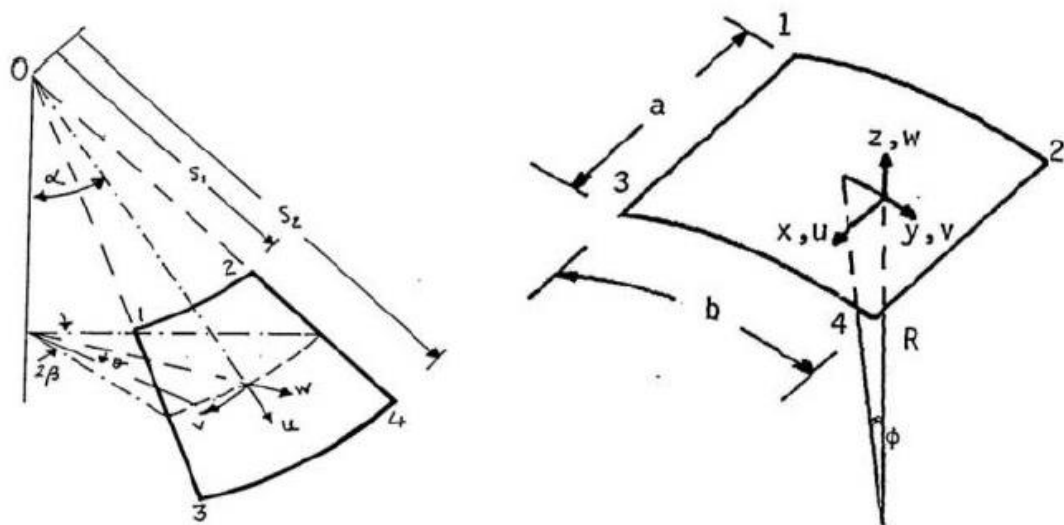


Figura 27 Elemento finite tipo "Shell" (Sharhan, 2012)

En este trabajo se usa el Método de elementos finitos – MEF para realizar un análisis estático lineal. Las paredes del silo son modeladas a través de elementos tipo SHELL181, apropiados para el análisis de estructuras laminares de espesor delgados a moderado. SHELL 181 es un elemento de 4-nodos con 6 grados de libertad. La base metálica del silo fue modelada con elementos tipo SOLID187, 3D, definido por 10-nodos con 3 grados de libertad en cada uno de ellos. Es adecuado para el modelamiento de mallas irregulares producidas desde varios sistemas tipo CAD. Los contactos son modelados con elementos CONTA174 y CONTA175; TARGET170 es usado para representar la asociación de los elementos de contacto mencionados, en estructuras tridimensionales.

Diferentes refinamientos son usados: en los bordes del filtro, en la transición del cilindro-tolva y en los contactos entre el cilindro y las columnas. La densidad de la malla se incrementa en la base de la estructura al igual que en la transición cilindro-tolva.

Se abordan dos modelamientos, uno para la calibración en donde se verifica el estado de esfuerzos y deformación en la estructura del silo teniendo en cuenta la interacción carga-estructura; y otro para la estructura completa, es

decir el silo con su estructura base, donde el objetivo principal es proporcionar el estado de deformación y esfuerzos principales en la estructura del silo bajo diferentes combinaciones de carga.

Se consideró un acero A36 para la estructura del silo, F_y : 250 MPa y F_u :460 MPa, por tratarse del material de la estructura existente. Las características geométricas de la estructura y del producto a almacenar son presentadas las secciones 2.1 y 2.2.

4.1 Calibración modelo: interacción carga-estructura

Con el fin de verificar la interacción carga-estructura es decir determinar la diferencia entre los esfuerzos obtenidos por el MS y el MEF sin condiciones de contorno sobre el cilindro y la tolva se determinan el estado de esfuerzos y deformaciones.

Se impone una restricción en el techo como única condición de contorno para determinar el estado de esfuerzos y deformaciones en la estructura del silo, considerando las siguientes acciones:

- Modelo 1A: Silo aislado bajo presiones horizontales en el cilindro – p_h . Ver Fig. Figura 28 b.
- Modelo 1B: Silo aislado bajo presiones normales en la pared de la tolva - p_n . Ver Fig. Figura 28 c.
- Modelo 1C: Silo aislado bajo todas las presiones de llenado, F_c , evaluadas anteriormente, p_{hc} , p_n , p_w , p_t . Ver Figura 28 b,c,d y e.

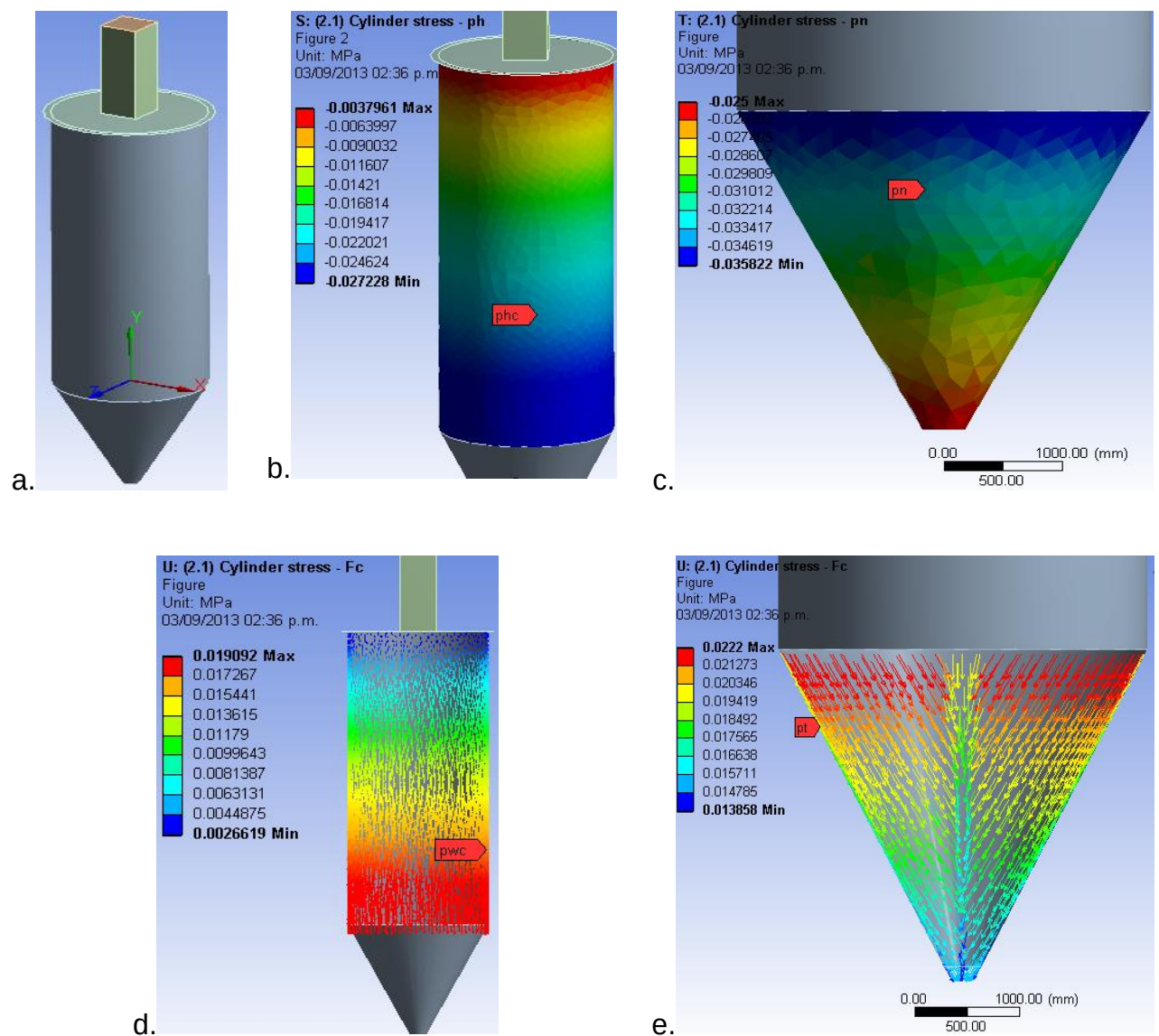


Figura 28 Silo, acciones de llenado para calibración.

4.1.1 Resultados del modelo numérico, calibración

A continuación se presentan el estado de deformaciones - Von Mises y los esfuerzos equivalentes- Von Mises, σ_e para la estructura del silo (modelo 1) por el MEF con respecto a los calculados por el método simplificado (MS)

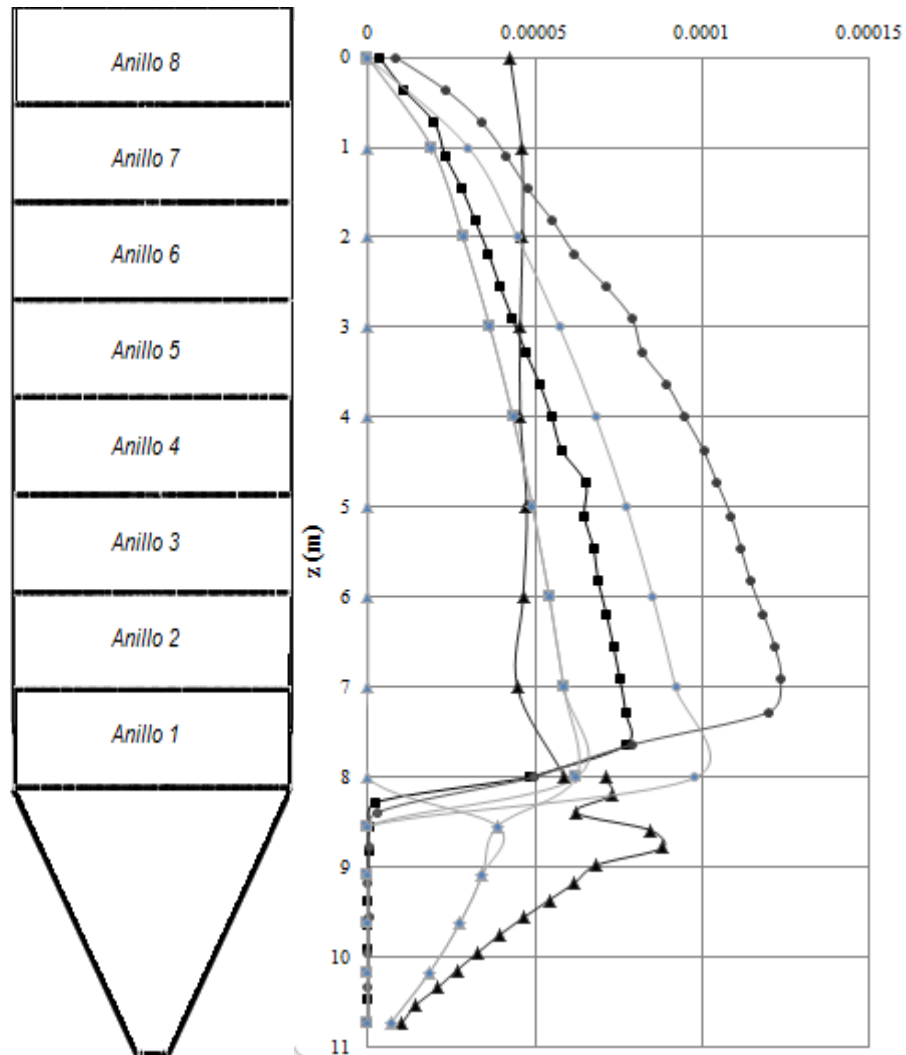


Figura 29 Deformación elástica equivalente- Von Mises (mm/mm), modelo 1. —■— -phc.

—■— phc_MS⁵, —▲— pn, —▲— pn_MS, —●— phd, —●— Fd_MS, —●— Fc_MS

Deformación elástica equivalente – Modelo 1

- Modelo 1A: A lo largo del cilindro se presentan diferencias entre el MS y el MEF para la acción de las presiones *phc* de hasta 26% . Las mayores diferencias, del 20-26%, se identifican en los primeros cuatro anillos del cilindro, cerca de la transición cilindro-tolva.
- Modelo 1B: A lo largo del cilindro se presentan diferencias entre el MS y el MEF para la acción de las presiones *phd* de hasta 48%. Sin embargo

⁵ MS, Método simplificado

solo en el primer anillo se presentan las máximas diferencias, es decir cerca de la transición. En los anillos del 2do al 8vo se presentan diferencias promedio de alrededor del 30% entre los dos métodos.

- Modelo 1C: Se presenta un valor máximo de diferencia entre los dos métodos para las presiones p_n de hasta el 28% en el área cercana a la transición. Al alejarse de la transición cilindro-tolva se tienen diferencias del 8%, 5% y en la zona de descarga del 1%. Las diferencias se presentan básicamente porque las p_n consideran una componente vertical, luego los esfuerzos que se obtienen se ven afectados directamente por la condición de contorno impuesta.

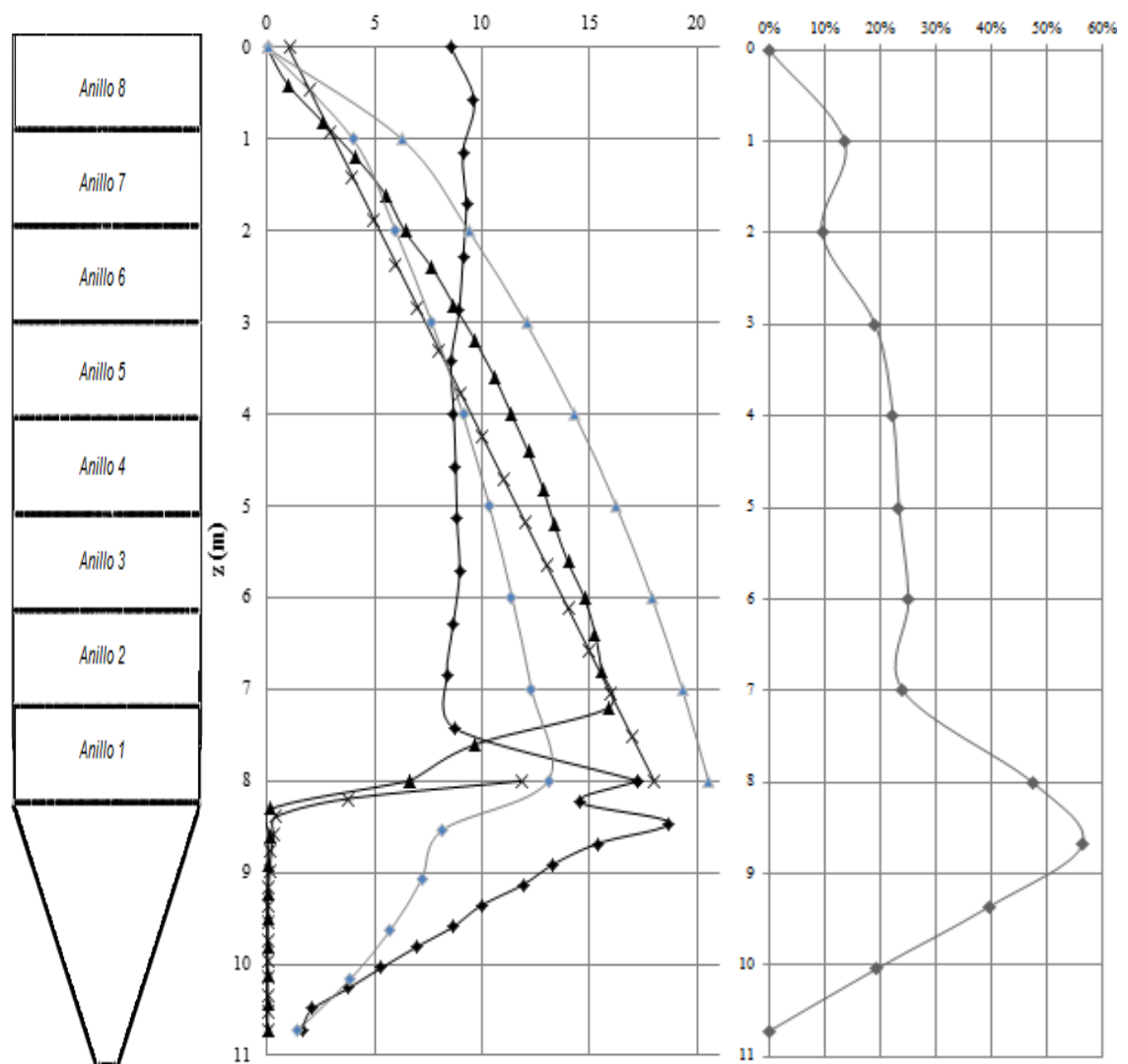


Figura 30 A la izquierda, Esfuerzos equivalentes Von Mises, σ_e (MPa). Modelo 1. $\blacktriangle$ σ_e -phc, $\blacklozenge$ σ_e -pn, $\times$ σ_e -phd, $\blacklozenge$ σ_e -phc_MS, $\blacktriangle$ σ_e -phd_MS. A la derecha diferencias porcentuales entre los métodos

Esfuerzos σ_e – esfuerzos equivalentes Von Mises:

- Diferencia máxima entre los dos métodos para los esfuerzos equivalentes de hasta el 47% en la región de la transición. valores inferiores al 25% de diferencia a partir del anillo 2 hasta el 5. Apartir del anillo 5 hasta el 8 se presentan diferencias menores al 10%.
- En la tolva, la diferencia máxima es de hasta el 56% debajo del área de la transición. En la cota 9 m, diferencias de hasta el 40% y a partir de los 10 m diferencias inferiores al 19%.

A continuación se presentan los vectores de esfuerzos principales bajo la acción de las presiones horizontales, como verificación de la dirección de los mismos con respecto al método simplificado (teoría de membrana), ver Figura 31.

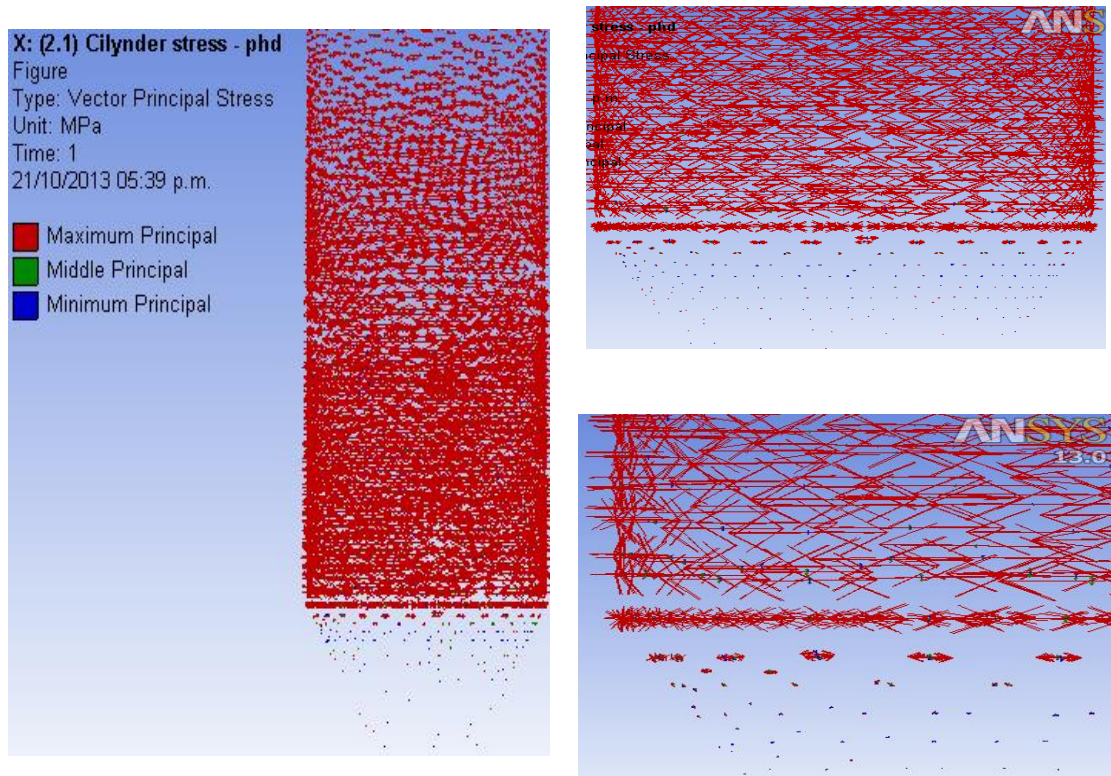


Figura 31 Vectores de los esfuerzos principales, modelo 1, bajo la acción de las presiones horizontales de descarga

4.2 Modelamiento estructura: silo-base

Se desarrolla el modelo completo gracias a la integración de los programas como Solidwork (Solidworks® 2013), Mathematica (Mathematica 6.0®) y Ansys-Workbench_WB (Ansys13®), para la geometría, cálculo de cargas y procesamiento respectivamente. La interfaz del Workbench permite la importación de archivos del Solidwork reconociendo cada una de las partes por separado, manteniendo el ensamble de la estructura completa; además de generar contactos para cada superficie, línea que interactúe. La asignación de

las propiedades del material, cargas externas, contactos, enmallado se realizan directamente en el WB.

Modelo 2: Estructura del silo soportado en una estructura metálica, ver Figura 32, para determinar el estado de los esfuerzos principales en la estructura del silo bajo las diferentes combinaciones de carga mencionadas.

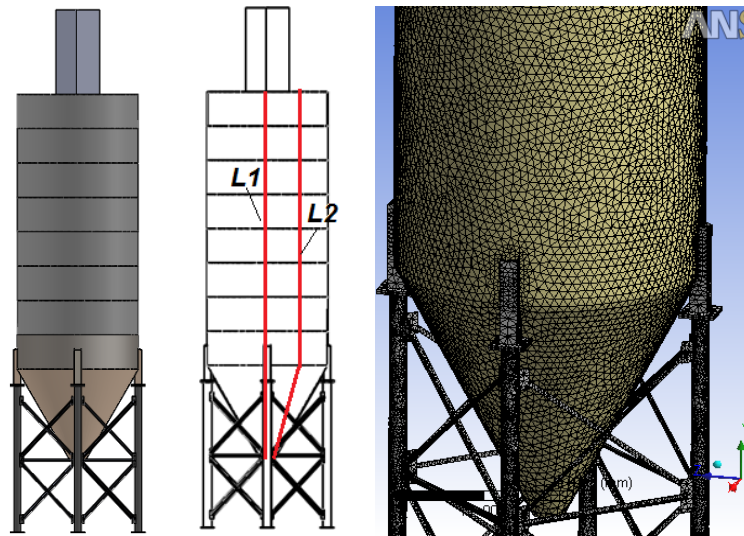


Figura 32 Modelo 2. A la derecha, enmallado. A la izquierda, silo metálico.

Los resultados por el MEF son presentados seleccionando dos puntos sobre la pared del silo, desde la parte superior del cilindro hasta el extremo inferior de la tolva; para formar dos líneas verticales en la estructura; en el eje medio de uno de los apoyos ($L1$) y otro entre los mismos ($L2$), ver Figura 32. A continuación se presentan los resultados de los esfuerzos principales máximo, medio y mínimo para el modelo 2B.

Esfuerzos máximos, medios y mínimos principales: Según la teoría de la elasticidad, un volumen infinitesimal en un punto arbitrario del sólido puede ser girado tal que solo existan las tensiones normales. Las tres componentes se

llaman esfuerzos principales: σ_1 – Máximo, σ_2 – Medio y σ_3 – Mínimo, donde siempre $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

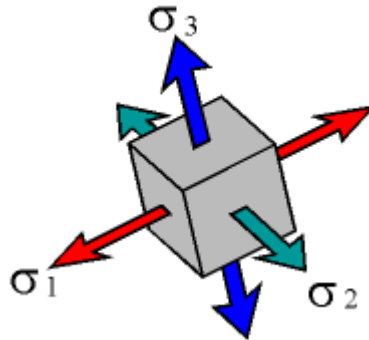


Figura 33 Ubicación esfuerzos principales máximo, medio y mínimo. Fuente: Ansys®

4.2.1 Resultados del modelo numérico, estructura completa

Para la estructura completa son presentados el estado de deformaciones elásticas de Von Mises, los esfuerzos principales máximos, medio y mínimos, y los esfuerzos equivalentes de Von Mises tanto para la línea vertical L1 (en el apoyo) como para la L2 (entre los apoyos).

En cada gráfica z en metros representa la cota medida desde la parte superior del silo, es decir donde termina el anillo 8.

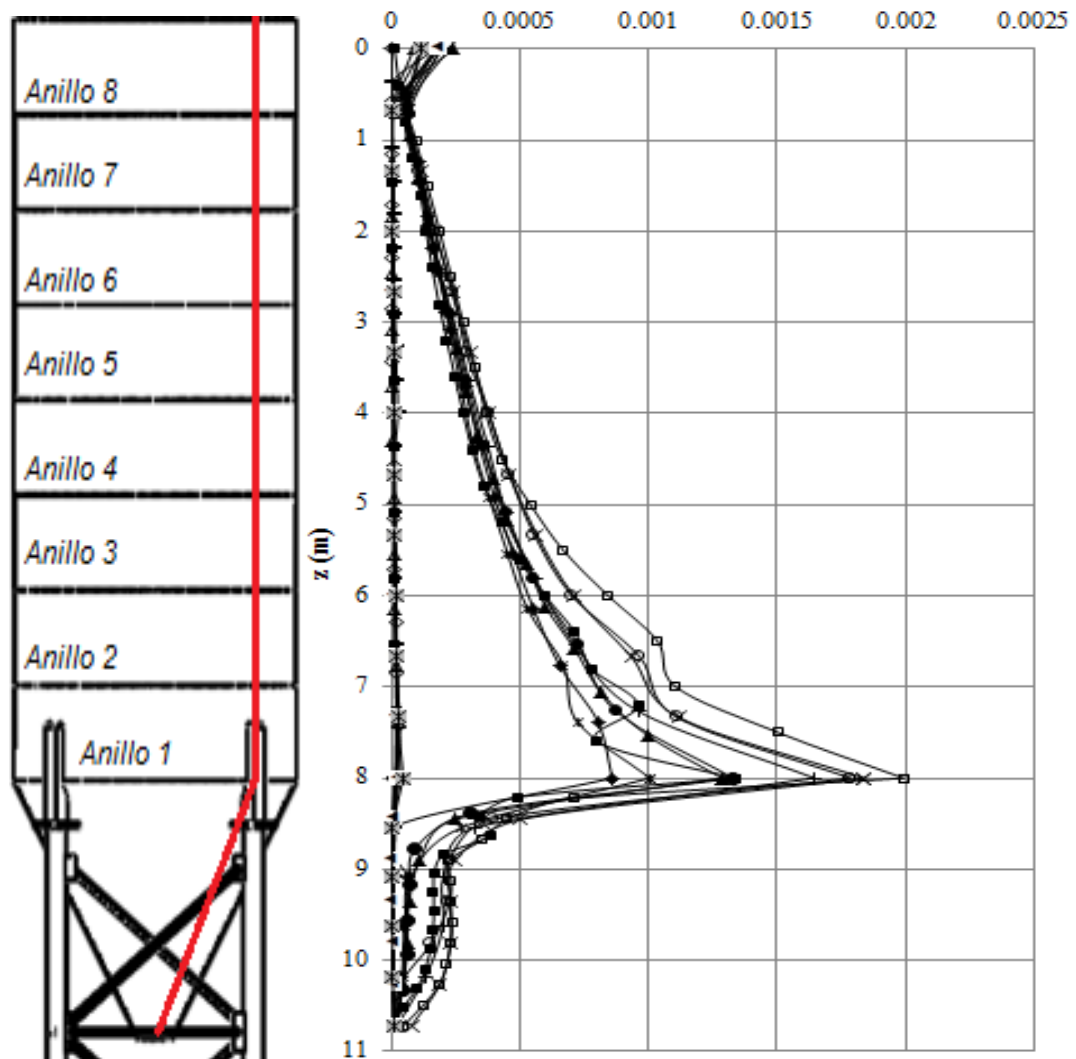


Figura 34 Deformación elástica equivalente- Von Mises (mm/mm), en el apoyo (L1). —■— Fc, —□— C1, —▲— C2, —△— C3, —◇— C4, —◆— C5, —◊— C6, —●— C7, —×— C8, —*— C9, —+— C10, —— C11, —— C12, —■— C13, —- - C14, —*— C15

Deformación elástica equivalente en el apoyo— Modelo 2B

- El máximo valor de deformación se registra justo sobre el apoyo con un valor de 0.002 mm/mm.
- A partir del anillo 2 se tienen deformaciones de 0.001 mm/mm y a partir del 4to anillo valores inferiores a 0.0005 mm/mm

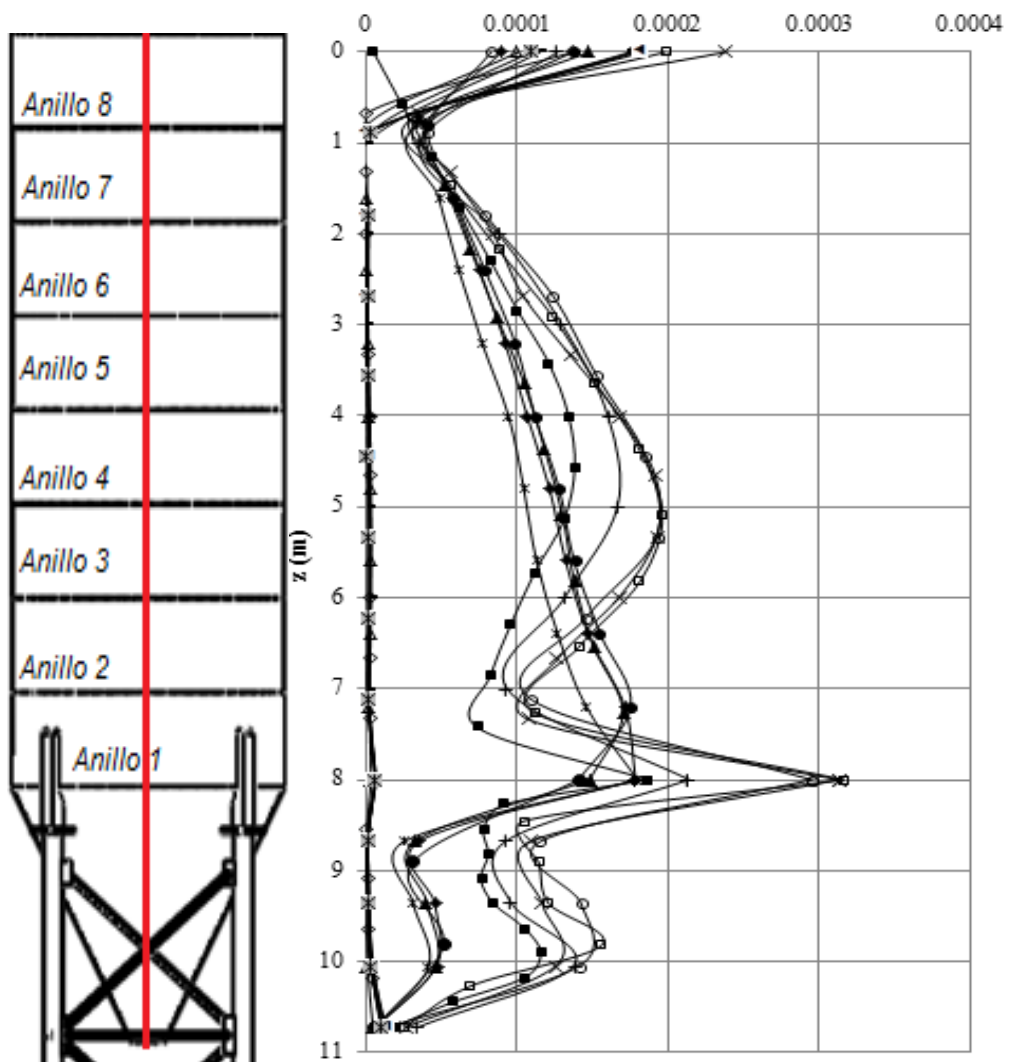


Figura 35 Deformación elástica equivalente- Von Mises (mm/mm), entre apoyo (L2). —■— Fc, —□— C1, —▲— C2, —△— C3, —◇— C4, —◆— C5, —◊— C6, —●— C7, —×— C8, —✱— C9, —+— C10, —— C11, —— C12, —■— C13, —+— C14, —✱— C15

Deformación elástica equivalente entre apoyos– Modelo 2B

- El máximo valor de deformación se registra justo en la transición cilindro-tolva con un valor de 0.00032 mm/mm.
- En la unión del anillo 3 y 4 se tienen deformaciones máximas de 0.0002 mm/mm y en la región de la tolva cerca a los 10 m (z) valores de 0.00015 mm/mm

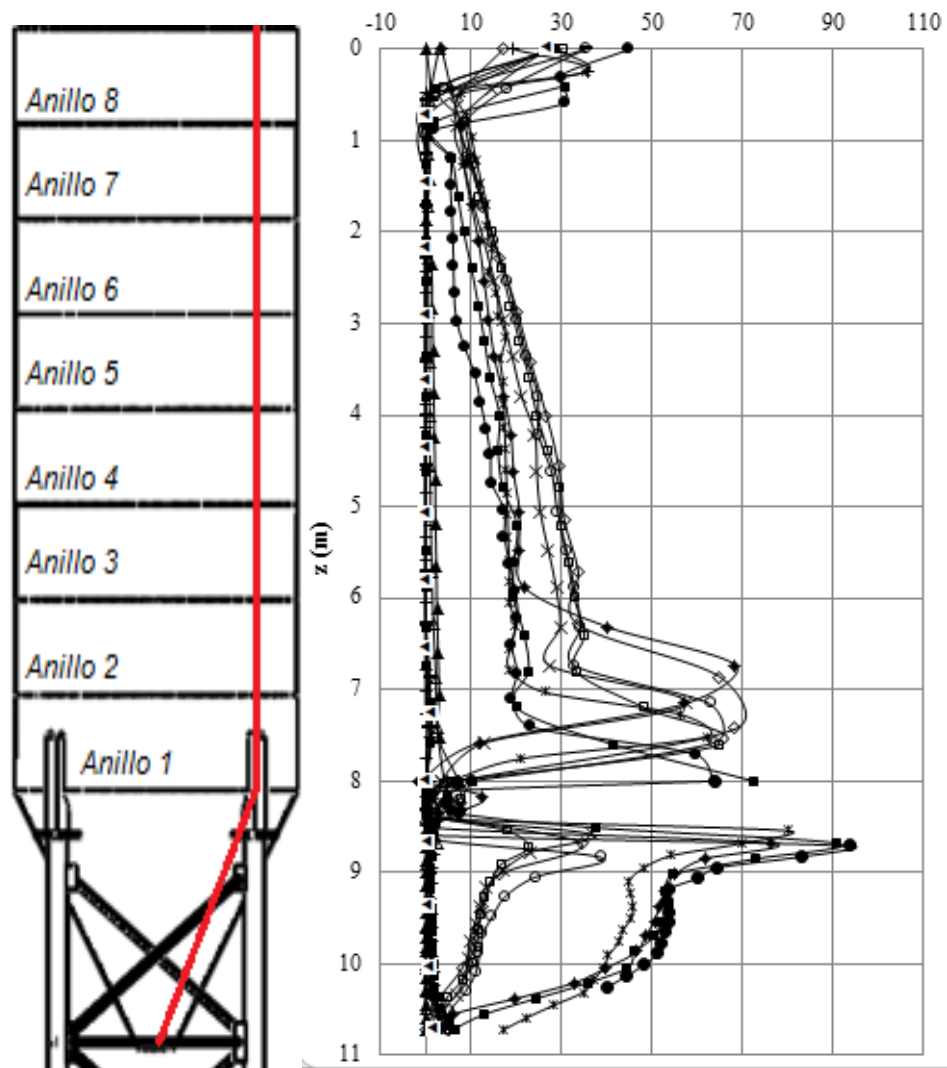


Figura 36 Esfuerzos $\sigma_{1\max}$ (MPa), en el apoyo (L1) —■— C1, —□— C2, —▲— C3, —☆— C4, —◇— C5, —◆— C6, —○— C7, —●— C8, —×— C9, —*— C10, —+— C11, —— C12, —— C13, —■— C14 —+— C15

Esfuerzos principales máximos en el apoyo, Figura 36:

- Esfuerzos de hasta 70 MPa en el anillo 1, área de apoyo, y parte del anillo 2. Esfuerzos menores a 30 MPa se presentan a partir del anillo 3 hasta el séptimo. En las zonas extremas del octavo anillo, exactamente en el área de la cubierta se pueden presentar esfuerzos de hasta 45 MPa, las cuales obedecen al tipo de contacto que tiene.
- Valores de hasta 94 MPa se presentan en la parte inferior de la región del apoyo. Para niveles de z (m) entre 9m y 10 m se presentan valores

promedio de 50 MPa. A partir de los 10m hasta los 10.72 m, es decir hasta la boca de descarga, se presentan valores inferiores a los 50 MPa.

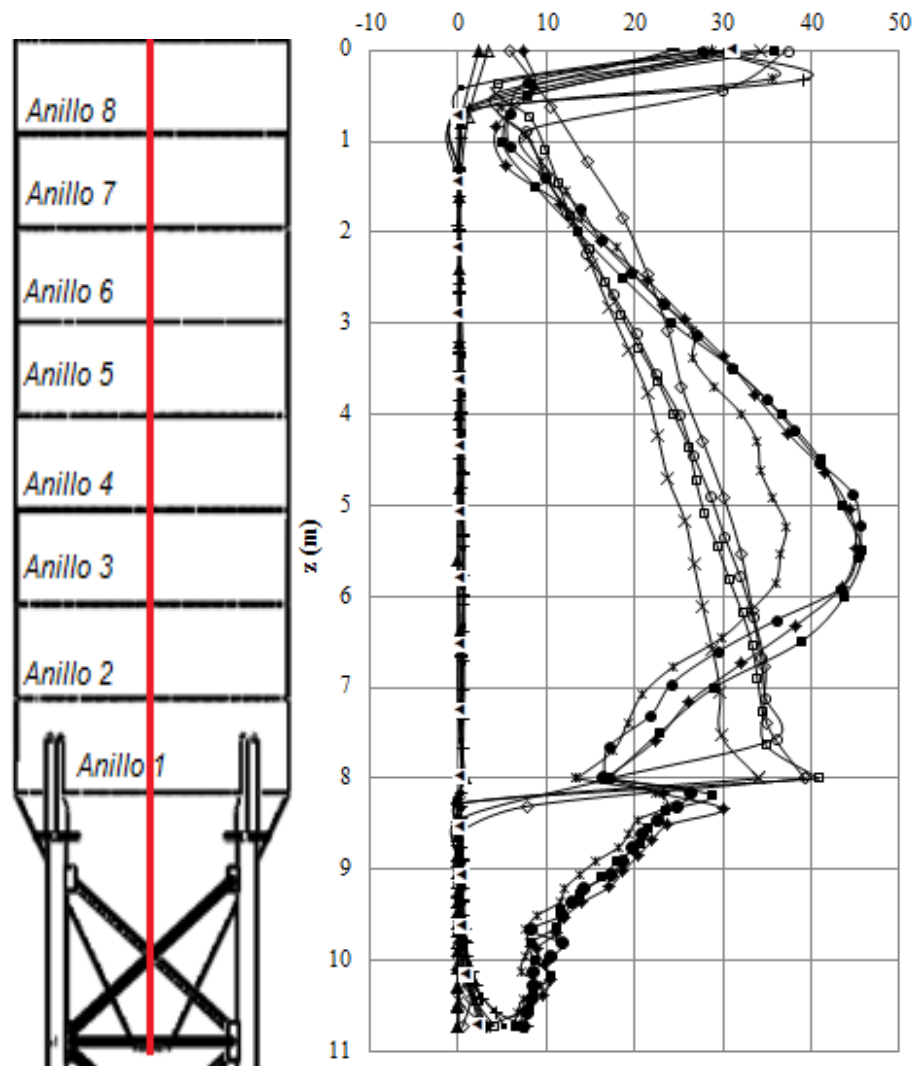


Figura 37 Esfuerzos σ_{1max} (MPa), entre apoyos (L2)) —■— C1, —□— C2, —▲— C3, —☆— C4, —◇— C5, —◆— C6, —○— C7, —●— C8, —×— C9, —*— C10, —+— C11, —— C12, —— C13, —■— C14 —+— C15

Esfuerzos principales máximos entre apoyos, Figura 37:

- Esfuerzos de hasta 40 MPa en el área de transición. Se observa una disminución en la medida que se pasa del anillo 1 al 2, pero a mediados del 2 comienza a incrementarse hasta llegar a valores máximos de 45 MPa aproximadamente en la mitad del anillo 3. A partir del anillo 3 hasta el 8 se obtienen valores inferiores a los mencionados anteriormente,

exceptuando el área cercana a la cubierta donde se muestran valores de hasta 40 MPa.

- En la región cercana a los apoyos, en la zona de la tolva, se presenta un valor máximo de 30 MPa y valores inferiores hasta la zona de descarga donde llegan a ser alrededor de 8 MPa.

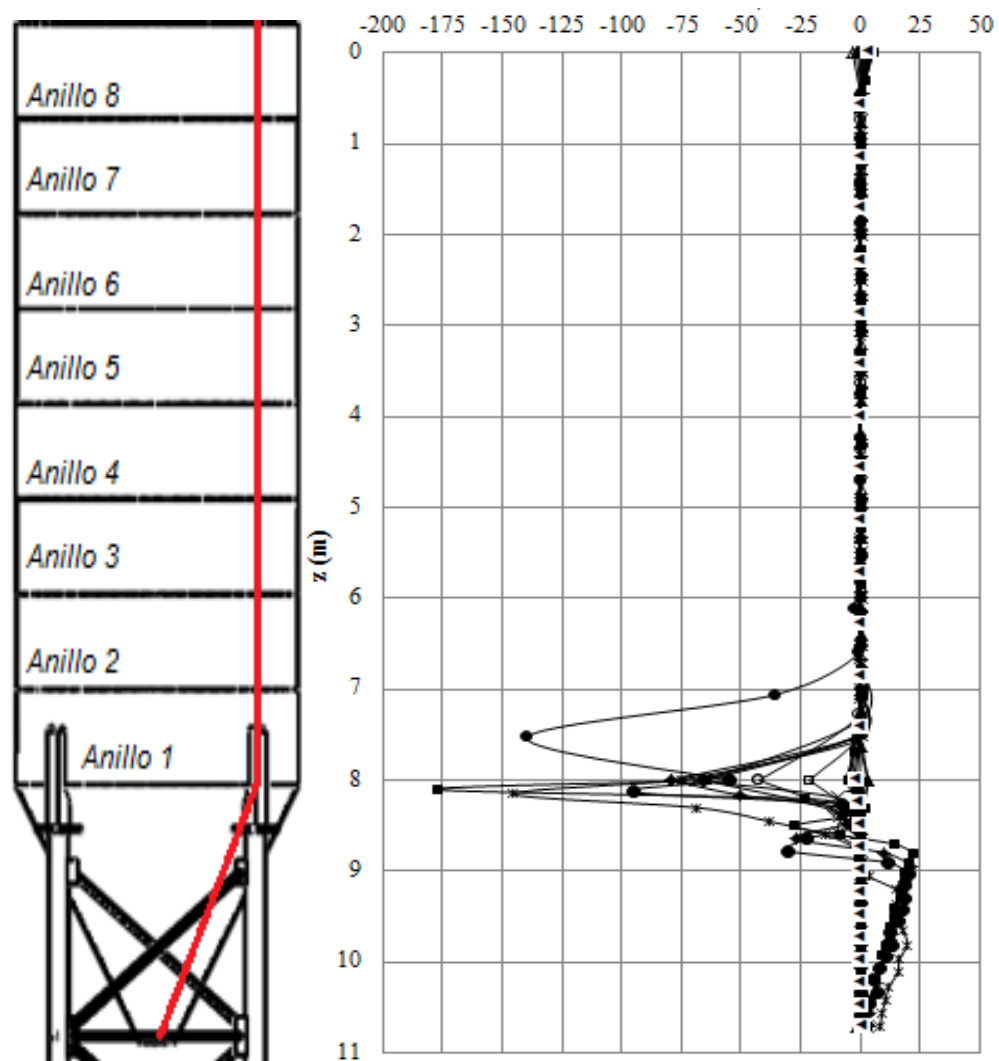


Figura 38 Esfuerzos σ_{2med} (MPa), en el apoyo (L1) —■— C1, —□— C2, —★— C3, —☆— C4, —◇— C5, —◆— C6, —⊖— C7, —●— C8, —×— C9, —✱— C10, —+— C11, —— C12, —— C13, —■— C14, —+— C15

Esfuerzos principales medios -L1, Figura 38:

- Esfuerzos de hasta (-) 145 MPa en el área média del anillo 1, región aun del apoyo. A partir del anillo 2 se presentan valores inferiores a (-) 25

Mpa hasta la región media del mismo, a partir de la cual los esfuerzos son prácticamente nulos hasta el anillo 8.

- En la región de la tolva valores máximos de 25 MPa en zonas aledañas al apoyo.
- En la región de la tolva valores máximos de 25 MPa en zonas aledañas al apoyo.

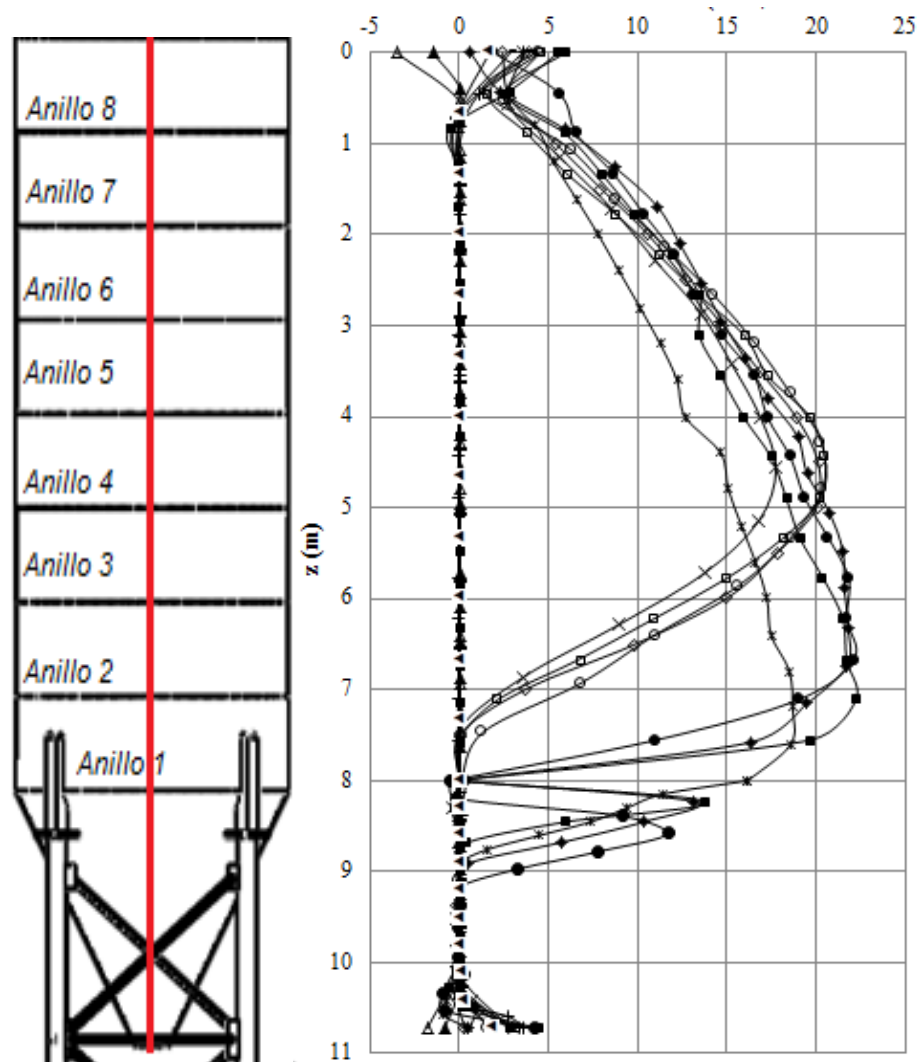


Figura 39 Esfuerzos σ_{2med} (MPa), entre apoyos (L2) —■— C1, —□— C2, —★— C3, —☆— C4, —◇— C5, —◆— C6, —○— C7, —●— C8, —×— C9, —✱— C10, —+— C11, —— C12, —— C13, —■— C14 —+— C15

Esfuerzos principales medios -L2, Figura 39:

- Valores entre 20-23 MPa se presentan entre los anillos 1 y 4. A partir del 5to se presentan valores entre 5-20 MPa.

- En regiones inferiores de la transición, en la tolva, se presentan valores máximos de 22 MPa y a partir de aproximadamente los 9m (z) se presentan valores prácticamente nulos, excepto en la boca de descarga donde llegan a ser de 5 MPa.

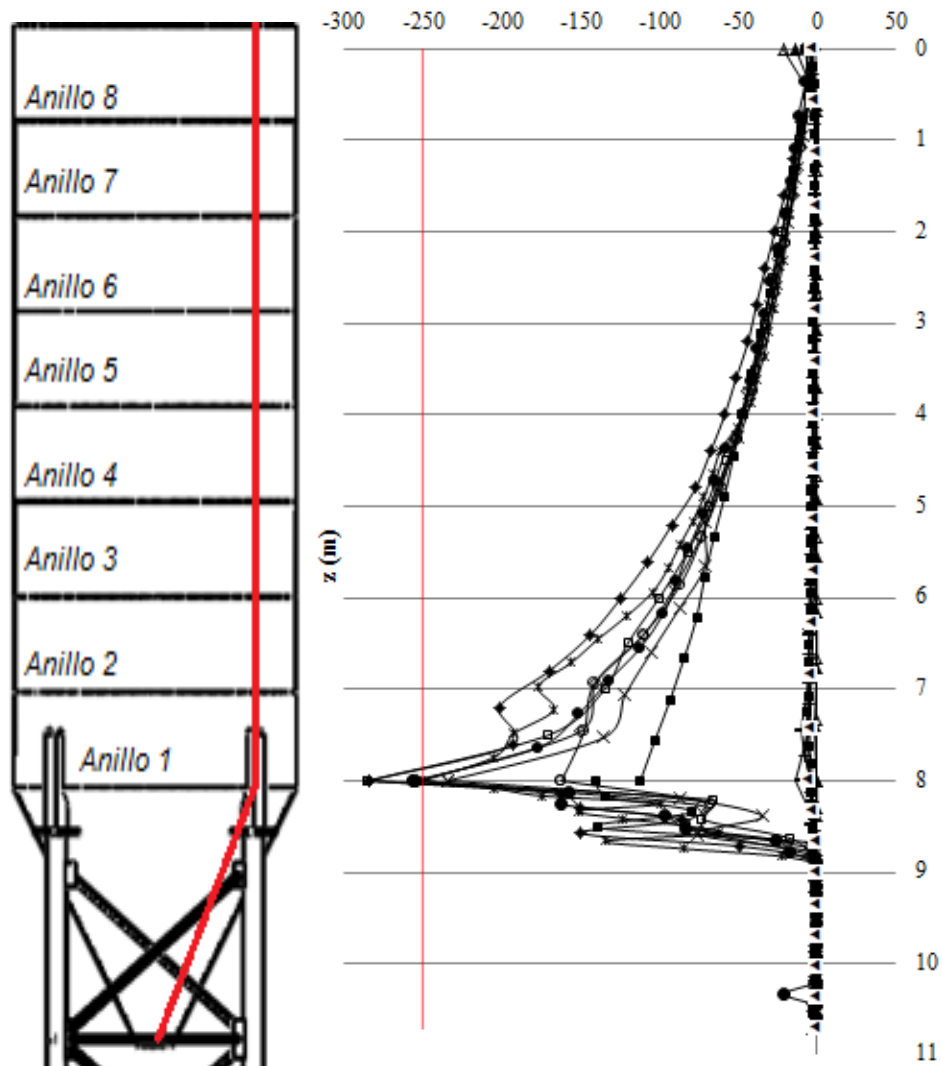


Figura 40 Esfuerzos σ_{3min} (MPa), en el apoyo (L1) —■— C1, —□— C2, —★— C3, —☆— C4, —◇— C5, —◆— C6, —○— C7, —●— C8, —×— C9, —✱— C10, —+— C11, —— C12, —— C13, —■— C14 —■— C15

Esfuerzos principales mínimos -L1, Figura 40:

- Esfuerzos de hasta (-) 283 MPa se presentan en la transición, región del apoyo. A el área del anillo 1 se presentan valores promedio de (-) 200 MPa y a partir de este empiezan a disminuir rápidamente hasta el anillo

8 donde son prácticamente nulos. A partir del anillo 4 se presentan esfuerzos por debajo de los (-) 50 MPa.

- En la tolva entre los 8m y 9m (z) se presentan esfuerzos alrededor de los (-) 100 MPa, a partir de este nivel hasta la zona de descarga son prácticamente nulos.

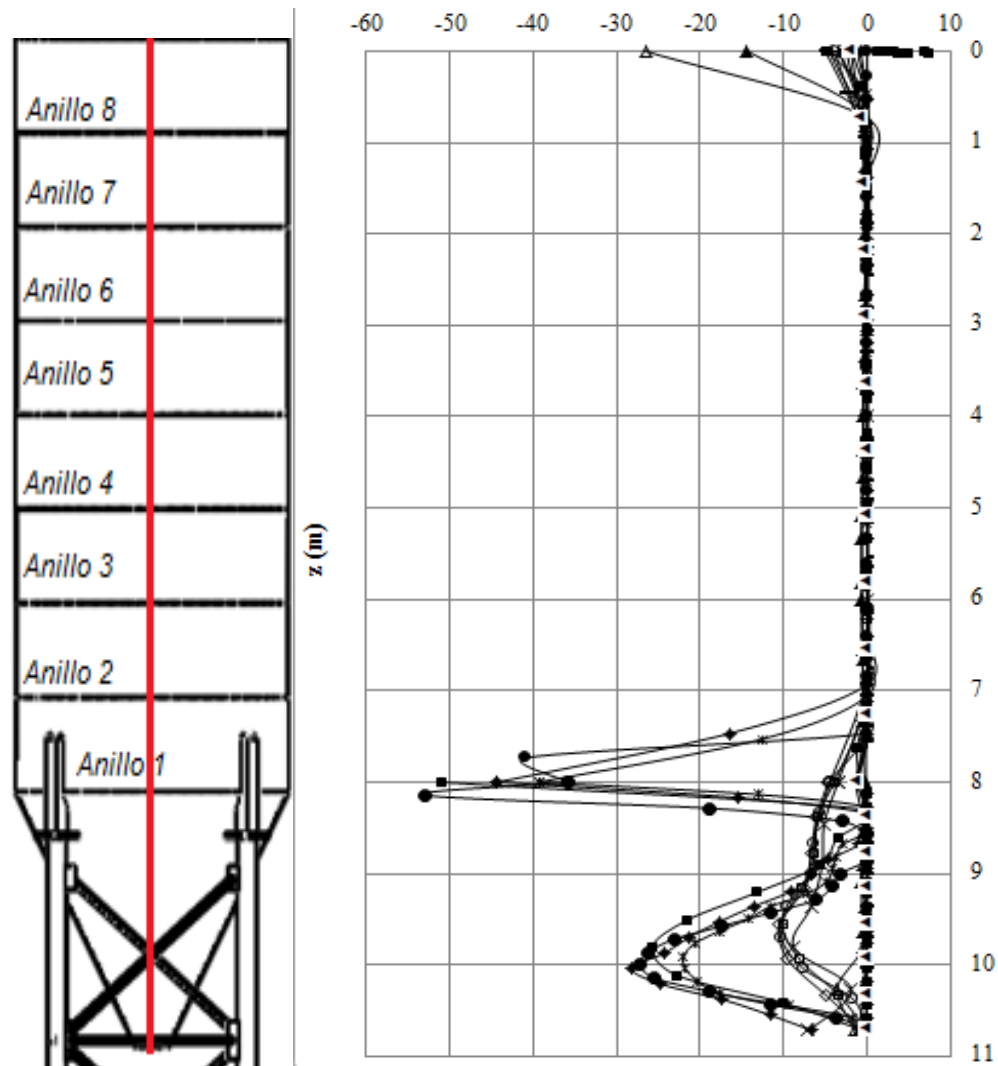


Figura 41 Esfuerzos σ_{3min} (MPa), entre apoyos (L2) ■ C1, □ C2, ★ C3, ▲ C4, ◆ C5, ◆ C6, ◇ C7, ● C8, ✕ C9, ✖ C10, + C11, — C12, — C13, — C14 — C15

Esfuerzos principales mínimos - L2, Figura 41:

- Esfuerzos de hasta (-) 53 MPa en el área de transición, a partir del cual empiezan a disminuir rápidamente hasta ser prácticamente nulos

cuando inicia el anillo 2. Se registra un valor máximo de (-) 30 MPa en la zona de la cubierta, al final del anillo 8.

- En la tolva en el área cercana a la transición se presentan valores de hasta (-) 53 MPa y a los 10 m (z) se presentan valores máximos de aproximadamente (-) 28 MPa. En la boca de descarga los valores registrados son de máximo (-) 10 MPa.

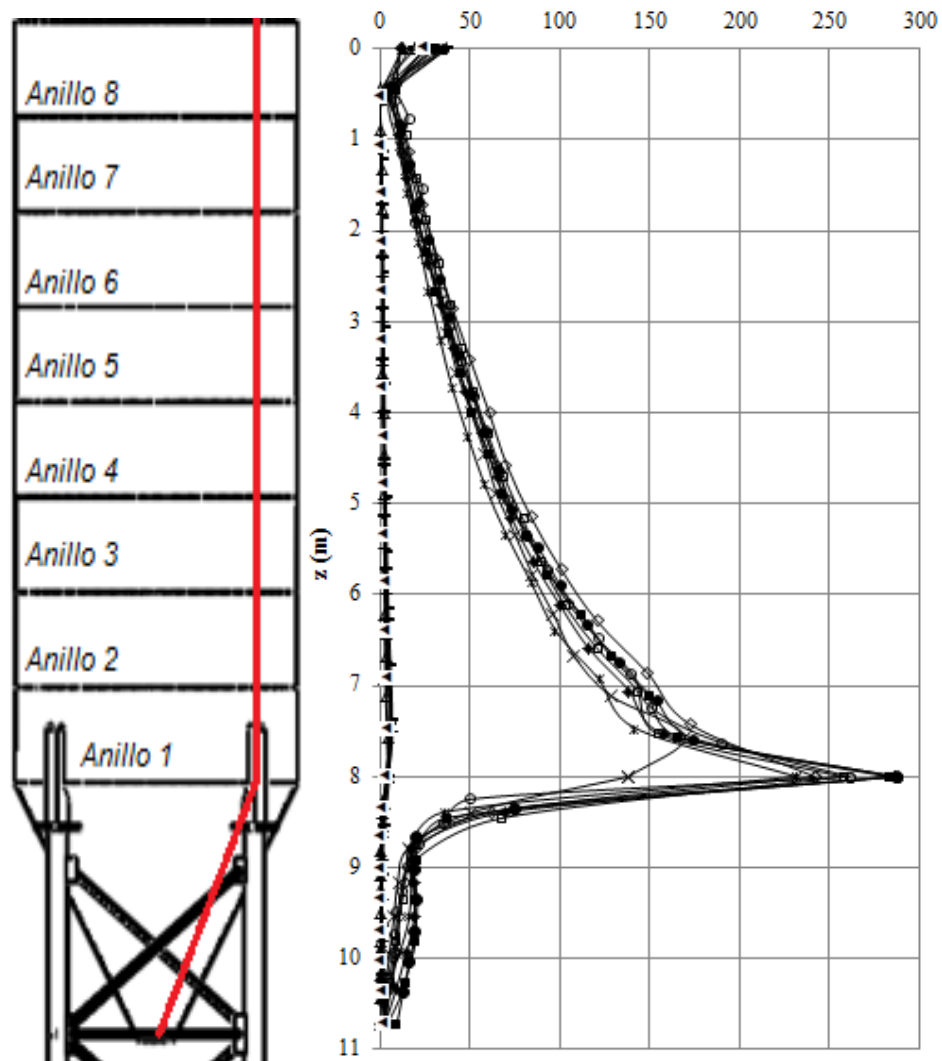


Figura 42 Esfuerzos equivalentes Von Mises (MPa), en el apoyo (L1) —■— C1, —□— C2, —▲— C3, —△— C4, —◇— C5, —◆— C6, —◊— C7, —●— C8, —×— C9, —*— C10, —+— C11, —-— C12, —-— C13, —■— C14 —+— C15

Esfuerzos equivalentes *Von Mises*, Figura 42:

- Esfuerzos de hasta 287 MPa se presentan en la transición, región del apoyo. A partir del anillo 2, se presentan valores inferiores a 150 MPa. A partir del anillo 4 se presentan esfuerzos por debajo de los 65 MPa.
- En la tolva entre los 8m y 9m (z) se presentan esfuerzos entre los 50 y 100 MPa, a partir de este nivel hasta la zona de descarga los valores registrados son inferiores a 25 MPa.

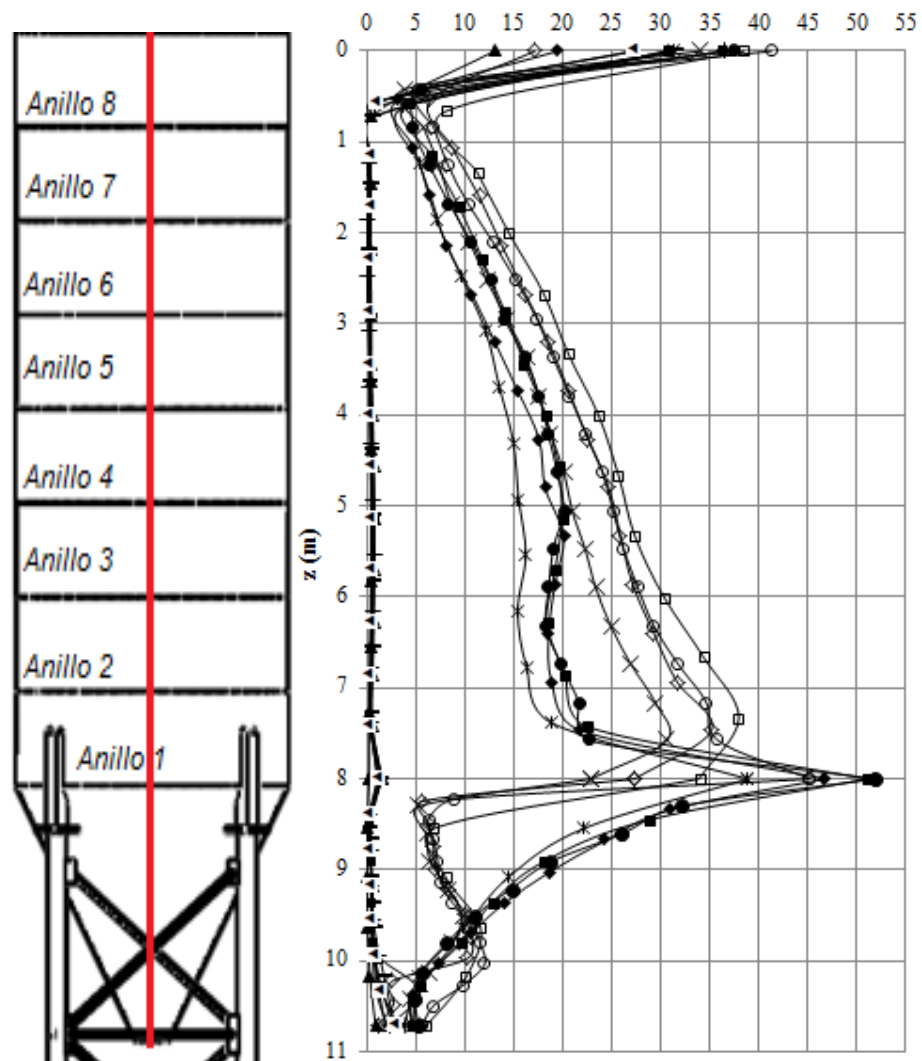


Figura 43 Esfuerzos equivalentes Von Mises (MPa), entre apoyos (L2) —■— C1, —□— C2, —▲— C3, —△— C4, —◇— C5, —◆— C6, —◊— C7, —●— C8, —×— C9, —*— C10, —+— C11, —— C12, —— C13, —■— C14 —+— C15

Esfuerzos equivalentes *Von Mises*, Figura 43:

- Esfuerzos de hasta 53 MPa en el área de transición, a partir del cual empiezan a disminuir rápidamente hasta 10 MPa; sin embargo se registra un valor máximo de 42 MPa en la zona de la cubierta, al final del anillo 8.
- En la tolva en el área cercana a la transición se presentan valores de hasta 35 MPa y a los 10 m (z) se presentan valores máximos de aproximadamente 13 MPa. En la boca de descarga los valores registrados son máximo de 6 MPa.

Los vectores principales de esfuerzos, en el modelo 2, sufren un cambio de dirección con respecto a los observados sobre la estructura sin condiciones de contorno, ver Figura 44, Figura 45. El comportamiento anterior no permite una comparación coherente con los resultados obtenidos mediante el método simplificado para estos esfuerzos. Se usan entonces los esfuerzos equivalentes de Von Mises para determinar las diferencias porcentuales entre los dos métodos empleados, como se muestra en el Capítulo 5.

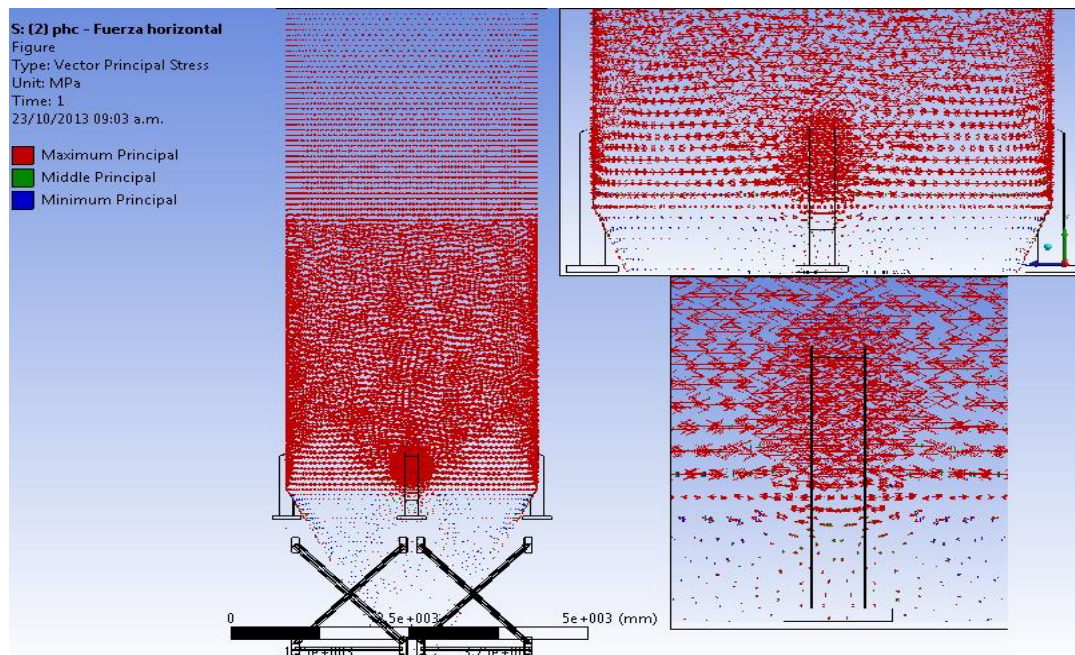


Figura 44 Vectores de los esfuerzos principales debidos a las presiones horizontales de carga, *phc*

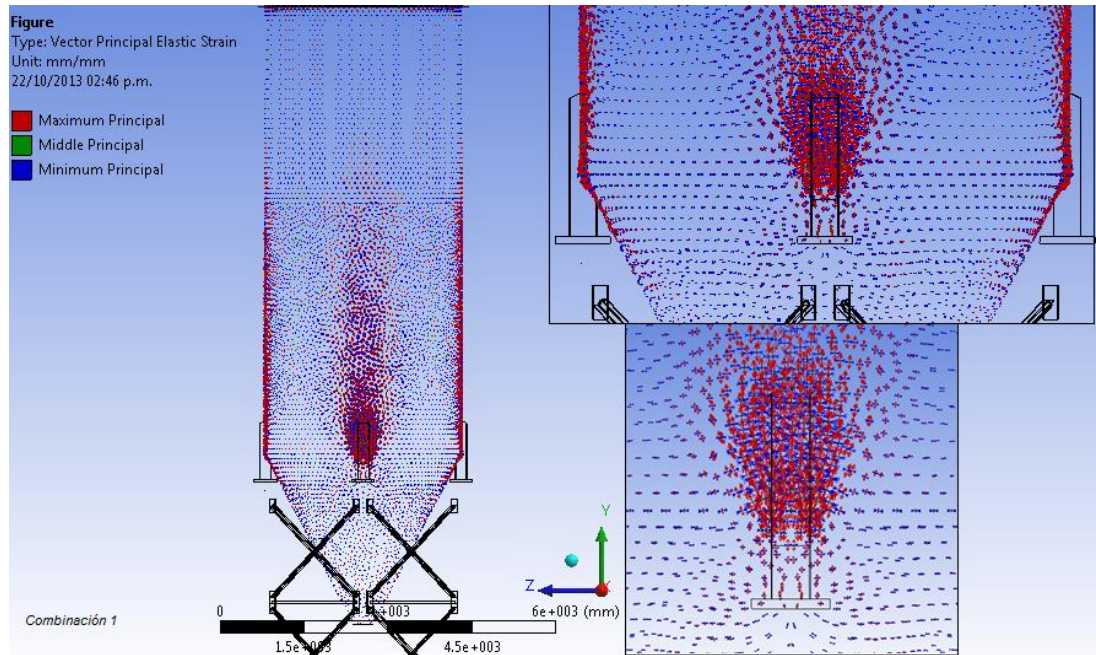


Figura 45 Vectores de los esfuerzos principales debidos a la combinación 1, C1

5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En cuanto a los fundamentos: caracterización y flujo.

Las propiedades del cemento encontradas experimentalmente, ver Tabla 8, presentan pequeñas variaciones con respecto a las normas internacionales, ver Tabla 3. Se observa una diferencia máxima en el coeficiente de fricción con la pared del 10%. El valor mínimo del peso específico es del 3% por debajo de los límites de las normas. El valor mínimo del ángulo de fricción interno es 4% menor que los de la mayoría de las normas, exceptuando a la norma ACI313. El valor mínimo del coeficiente de fricción con la pared es 10% mayor con respecto a los valores registrados en las normas, ver página 37. El ángulo de reposo del cemento no presenta variaciones significativas, al usar una muestra seca o al ambiente durante el ensayo. Durante la realización del mismo se observó que el cemento fluye más rápidamente cuando la muestra está seca.

Según el ítem 2.2, para la determinación del tipo de flujo, se encuentra que el producto presenta flujo tipo embudo. Los cálculos para determinar la dimensión mínima de la boca de descarga indicaron que este silo, por sus características geométricas y por las propiedades del cemento, necesita un dispositivo especial para que ocurra flujo sin interrupción.

En el capítulo dos, fundamentos para los modelos, se efectuaron los cálculos de las acciones considerando los resultados experimentales para la caracterización del producto. El modelo de la estructura del silo se calculó a partir de las teorías de membrana del eurocódigo en el MS y también por el MEF con el programa Ansys®.

En cuanto a los modelos:

Las diferencias observadas entre el MS y el Modelo 1 se deben básicamente a la discontinuidad geométrica en la transición cilindro-tolva. Estas variaciones también se deben a que en el MS las cargas fueron calculadas cada metro, es decir para cada uno de los anillos; en cambio las utilizadas en el modelo de elementos finitos en el Ansys® fueron calculadas cada 0.10 m, con lo que se logra una mejor uniformidad en su distribución.

A partir de los resultados de los capítulos 3 y 4 se presentan en la Tabla 15 las diferencias en porcentajes encontradas entre el MS y el MEF en el Modelo 2. La comparación se realizó para los esfuerzos equivalentes de Von-Mises (σ_e) tanto para la línea *L1* como para la *L2*, con relación a 1.4 (FS=Factor de servicio=1.4) veces el esfuerzo por el MS. encontrando lo siguiente:

- En la tolva se presenta una diferencia máxima del 80%, sin embargo el esfuerzo Von-Mises máximo es de 20 MPa, lo que es considerado un valor bajo con relación al F_y .
- En la transición cilindro tolva, cota 8 m, se presenta una diferencia máxima del 90% y los esfuerzos Von-Mises alcanzan un valor máximo de 283 MPa, el cual supera el límite de fluencia, F_y .
- Entre el anillo 1 y 2 se presenta una diferencia máxima del 85% y los esfuerzos Von-Mises llegan a ser superiores a 110 MPa.
- A partir del anillo 3 y hasta el 8 se presenta una diferencia máxima del 77% y los esfuerzos de Von-Mises son inferiores a 80 MPa.
- Las diferencias porcentuales para el caso de la línea *L2* son mucho menores que los de la línea *L1*; lo anterior demuestra una fuerte influencia de las condiciones de apoyo o de contorno de la estructura.

Como he de esperarse la línea *L2* presenta menores diferencias con respecto al MS que la línea *L1*. En la estructura del silo, en la línea *L2* se encontraron diferencias máximas del 27% en los anillos 1 y 2, a partir del anillo 3 las diferencias son menores al 20%. Ver Tabla 15.

Tabla 15 Diferencias porcentuales entre el método simplificado (MS) y el Método de Elementos Finitos MEF, Modelo 2

Cota z (m)	Anillo	Esfuerzos Equivalentes Von Mises (MPa)			$\frac{\sigma_{MEFLi} - \sigma_{MS}}{\sigma_{MEFLi}}$	
		1.4MS	L1 - max	L2 - max	%Dif (L1max-MS)	%Dif (L2max-MS)
0	8	0.00	40	42	100%	100%
1		8.80	18	8	51%	9%
2	7	13.14	30	15	56%	12%
3	6	16.85	45	18	63%	6%
4	5	20.02	62	23	68%	13%
5	4	22.73	80	27	72%	16%
6	3	25.05	110	31	77%	19%
7	2	27.03	158	37	83%	27%
7.5	1	27.88	183	38	85%	27%
8		28.72	283	52	90%	45%
9	TOLVA	10.1	20	19	50%	47%
10		6.8	20	12	66%	44%
10.72		2.0	10	7	80%	71%

Tabla 16 Relación entre los esfuerzos equivalentes de Von Mises, MEF/ MS

Cota z (m)	Anillo	Esfuerzos Equivalentes Von Mises (MPa)			$\frac{\sigma_{MEFLi}}{\sigma_{MS}} * 100\%$	
		1.4MS	L1 - max	L2 - max	L1/MS	L2/MS
0	8	0.00	40	42		
1		8.80	18	8	204%	91%
2	7	13.14	30	15	228%	114%
3	6	16.85	45	18	267%	107%
4	5	20.02	62	23	310%	115%
5	4	22.73	80	27	352%	119%
6	3	25.05	110	31	439%	124%
7	2	27.03	158	37	585%	137%
7.5	1	27.88	183	38	656%	136%
8		28.72	283	52	985%	181%
9	TOLVA	10.1	20	19	199%	199%
10		6.8	20	12	199%	199%
10.72		2.0	10	7	199%	199%

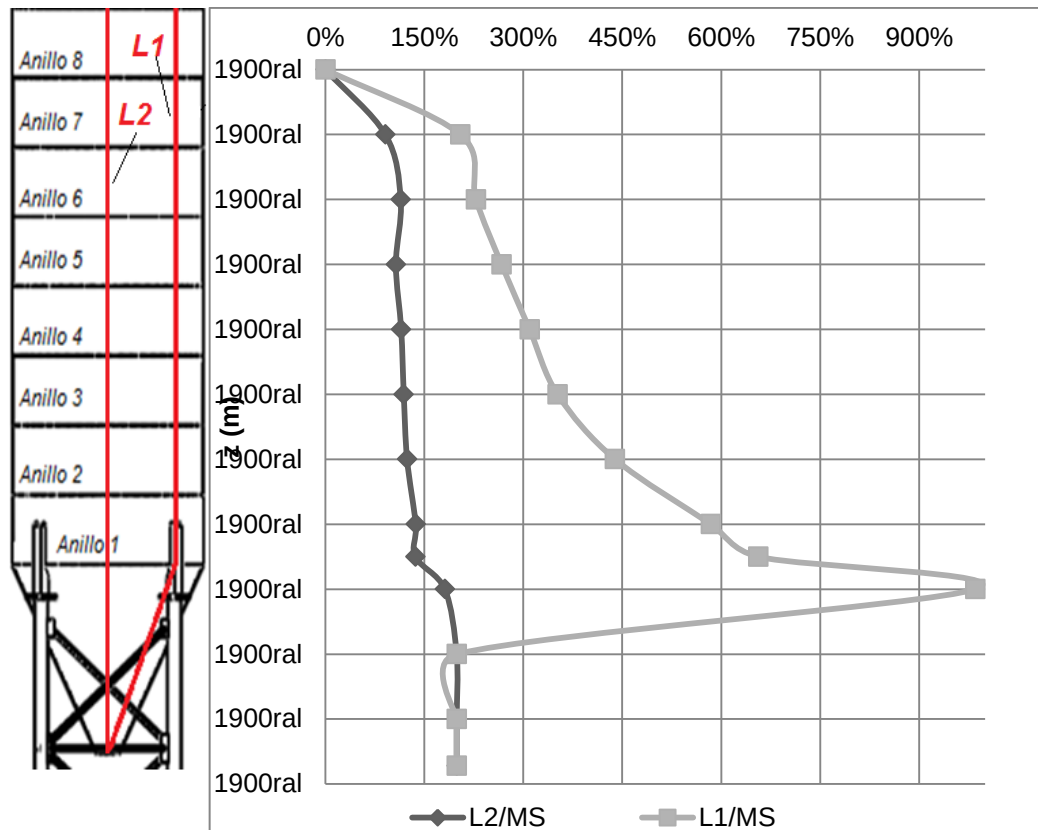


Figura 46 Relación porcentual entre los esfuerzos equivalentes por el MEF y el MS

En el modelo dos, de acuerdo a lo anterior y considerando todas las acciones mencionadas en el capítulo 2, se evidencia que debido a las condiciones de contorno del silo se originan concentraciones de esfuerzos y una distribución no uniforme de los mismos; situación que no puede determinarse con el MS.

Estos resultados nos indican que se hace necesario el uso de un cinturón de refuerzo en la transición, cilindro-tolva. Éste reforzamiento permitiría la transmisión adecuada de las cargas del silo a la estructura base, es decir se tendría una distribución de uniforme de esfuerzos. El elemento de refuerzo es considerado normalmente en estructuras de mayor capacidad, por ejemplo aquellas que almacenan 500 ton, sin embargo el modelamiento muestra la necesidad de su implementación incluso en esta estructura que es de menor capacidad (almacena máximo 130 ton y en operación maneja alrededor de 75 ton)

De acuerdo a la tabla 16 en la transición, los esfuerzos calculados por el MEF en la línea L2 son 1.9 veces que los calculados por el MS. En el caso de la línea L1 son hasta 9.85 veces que los calculados por el MS. Ver Figura 46.

6 CONSIDERACIONES FINALES

Se modeló por el Método de Elementos Finitos un silo metálico esbelto con paredes flexibles para la estimación de los esfuerzos en la estructura cuando el material almacenado es cemento.

- Se realizó el estado del arte sobre modelos numéricos de estructuras tipo silo, ver capítulo 4.
- Se realizó la caracterización del cemento, producto a almacenar, en el laboratorio LAMEM y se determinó que el flujo que se presenta en este silo es tipo embudo. De acuerdo a los cálculos de la dimensión de la boca de descarga, se tiene que siempre existirán obstrucciones de flujo y por tanto se hace necesario el uso de equipos especiales para garantizar el flujo por gravedad, ver ítem 2.2
- Se determinaron los esfuerzos en las paredes del silo y la tolva por un procedimiento simplificado y por el MEF. Se determinaron y analizaron las diferencias entre los dos métodos, ver capítulos 3 y 4, a partir de lo cual se concluye que:

Los resultados indican que al evaluar la estructura completa bajo las diferentes combinaciones de carga, se tienen valores superiores que en las teorías clásicas (MS) lo que influye directamente en el diseño.

En el modelo 2 se observa la influencia de las condiciones de contorno, proporcionadas por la estructura base, en el estado de esfuerzos y deformaciones. Al analizar la estructura bajo las combinaciones de carga se encontraron esfuerzos equivalentes de Von Mises de hasta 283 MPa, en la transición, lo que supera el límite elástico, F_y . Esto puede ocasionar acumulación de deformaciones en el área de apoyo de la estructura del silo, es decir sobre la transición; fenómeno que no podría determinarse con el MS.

Al comparar el estado de esfuerzos obtenido por el MS y por el MEF se tiene que debe incorporarse un cinturón de refuerzo que permita la distribución más uniforme de esfuerzos entre el silo y la estructura base.

BIBLIOGRAFIA

Ansyst13®. "ANSYS 13 Versión Educativa."

ASTM 1444. 2000. "Standard Test Method for Measuring the Angle of Repose of Free-Flowing Mold Powders."

ASTM D2216. 1998. "ASTM D 2216 Contenido de Humedad."

Australia, Standards Association of. 1996. "Loads on Bulk Solids Containers." AS 3774.

Calil Junior, Carlito, and Andrés Batista Cheung. 2007. *Silos: Pressões, Fluxo, Recomendações Para o Projeto e Exemplos de Cálculo*.

Calil Junior, Carlitos, José Wallace B. Do Nascimento, and Ernani Carlos de Araújo. 1997. *Silos Metálicos Multicelulares*.

Calmon Nascimento, Fernanda. 2008. "A Relação Entre as Pressões Horizontais e Verticais Em Silos Elevados: Parâmetro K." *Departamento de Estruturas*. Universidade de São Paulo.

Chik, and Vallejo. 2005. "Characterization of the Angle of Repose of Binary Granular Materials." In *Can. Geotech.*, 683–692.

D., Matuszed, and Tukiendorf M. 2008. "Application of Roof Shaped and Double Cone Inserts in Mixing of Granular Elements in the Flow Process." *International Agrophysics* 22 (22): 147–150.

DANE, Departamento Administrativo Nacional de Estadística. 2013. "Estadísticas de Cemento Gris. Agosto 2013."

Diario Mercurio - Argentina. 2013. "Accidente En Guaminí: Silo Aplastó a Camión ..." 15/06/2013. <http://www.diariomercurio.com.ar/> .

- Ding, S., A. Dyroy, M. Karlsen, G.G. Enstad, and M. Jecmenica. 2011. "Experimental Investigation of Load Exerted on a Double-Cone Insert and Effect of the Pressure Along Walls of a Large-Scale Axi-Symmetrical Silo." *Particulate Science and Technology: An International Journal* 29 (2).
- Ding, Songwiong, Michal Wójcik, Mladen Jecmenica, and Sunil R. de Silva. 2003. "Loads on Walls and Inserts in Mass-Flow Silos." *Task Quarterly* 7: 525–538.
- Diniz, Luis Gustavo. 2010. "Desenvolvimento de Um Programa Para Cálculo Das Propriedades Dos Produtos Armazenados Em Silos." *Departamento de Estructuras - SET*. Universidade de São Paulo.
- Engineers, Institution of Chemical. 1989. "Standart Shear Testing Technique for Particulate Solids Using the Jenike Shear Cell". England UK.
- Enstad, G. 1975. "On the Teory of Arching in Mass Flow Hoppers." *Chemical Engineering Science* 30: 1273–1283.
- Estadística, Dirección de Metodología y producción. 2012. "No Title". Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).
- Francis, Taylor &, and J Nielsen. 2008. *Structures and Granular Solids*. doi:10.1201/9780203884447.ch4.
- Gallego Vázquez, Eutiquio. 2006. "Numerical Simulation of Loads Exerted by Stored Materials in Silos with Non-Elastic Material Models." *Department of Construction and Rural Roads*. Polytechnic University of Madrid.
- García, J. Fernandez, P. J. Aguado Rodríguez, and F. Ayuga Téllez. 2001. "Las Explosiones de Polvo En Silos Agrícolas." *MAPFRE SEGURIDAD*. http://www.mapfre.com/documentacion/publico/i18n/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1021783.
- Gillie, M., and J.M Rotter. 2002. "The Effects of Patch Loads on Thin-Walled Steel Silos." *Thin-Wlalled Structures* 40 (10): 835–852.

Haaker, G. 1999. *An Introduction to the Storage of Bulk Solids in Silos*.

Itfuego. 2013. "Explosión En Silo En Paranaguá Brasil." 16/11/2001.

http://www.itfuego.com/risk_news_explosion_en_silo.htm.

J. Sadowski, Adam, and Rotter J. Michael. 2012. "Slender Thin Cylindrical Shells Under Unsymmetrical Strip Loads." *Thin-Walled Structures* 61: 169–179.

Jenike, A.W, and University of Utah. 1964. *Storage and Flow of Solids*. 123rd ed. Salt Lake.

Kalman, Goder, Rivkin, and Ben-Dor. 1993. "The Effect of the Particle-Surface Friction Coefficient on the Angle of Repose." In *Bulk Solids Handling*, 123–128.

Mahmoud, M H, and A G Bishara. 1975. "Finite Element Anlysis of Deformation and Stress Histories in Farma Silos." *ASAE Paper No 75-451*.

Martinez, J, and S Masson. 1998. "Relatinship Between Finite Element and Distinct Element Simulations." In *SILOS Fundamentals of Theory, Behaviour and Design*, 564–579.

Mathematica 6.0®. "Mathematica 6.0."

Morán, Julia M, Andrés Juan, Rita Robles, and Pedro J Aguado. 2006. "Effects of Environmental Temperature Changes on Steel Silos". Biosystems Engineering: Elsevier Ltd.

Normung, D I N - Deutsches Institut für. 2000. "Basis of Design and Actions on Structures." *DIN 1055-6: Design Loads for Buildings and Loads in Silo Bins*.

NSR-10. 2010. "Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente."

Palma, Giovano. 2005. "Pressões e Fluxo Em Silos Esbeltos ($h/d \geq 1,5$)."
Departamento Do Estruturas. Uiversidade de São Paulo.

- Prensa- Panamá. 2013. "Colapso de Silo Paraliza La Cosecha de Maiz." 09/02/2013. <http://www.prensa.com/impreso/nacionales/colapso-de-silo-paraliza-la-cosecha-de-maiz/155923>.
- Reimbert, M., and A. Reimbert. 1956. *Silos-Traité Theorique et Pratique*.
- Rotter, J.M. 1998. "Properties of the Stored Granular Material." In *SILOS Fundamentals of Theory, Behaviour and Design*, 650–664.
- Sanad, A, J Ooi, J Holst, and J Rotter. 2001. "Computations of Granular Flow and Pressures in a Flat Bottomed Silo." *Journal of Engineering Mechanics*: 1033–1050.
- Sharhan, Hazim. 2012. "Stress Concentrations in Elevated Steel Storage Tanks and Silos." *Structures Congress ASCE 2012*.
- Solidworks®. 2013. "Solidwork."
- Song, C.y, J.G Teng, and J.M Rotter. 2004. "Imperfection Sensitivity of Thin Elastic Cylindrical Shells Subject to Partial Axial Compression." *International Journal Solids Structures* 41: 7155–7180.
- Standardization, European Committee for. 2006. "Eurocode 1:Basis of Design and Actions on Structures." *Part 4: Actions in Silos and Tanks*.
- Standardization, European Committee for. 1999. "Eurocode 3." *Part 4.1 Design of Steel Structures: Silos*.
- Tejchman, Jacek. 2013. "Introduction." In *Confined Granular Flow in Silos. Experimental and Numerical Investigations*, 1–3. Poland.
- Vidal, P, E Gallego, M Guaita, and F Ayuga. 2007. "Finite Element Analysis Under Different Boundary Conditions of the Filling of Cylindrical Steel Silos Having an Eccentric Hopper." *Journal of Constructional Steel Research*: 480–492.

Walker, D. M. 1966. "An Approximate Theory for Pressures and Arching in Hoppers." *Chemical Engineering Science* 21: 975–997.

Wöjck, M, J. Teichman, and G.G. Enstad. 2012. "Confined Granular Flow in Silos with Inserts- Full Scale Experiments." *Powder Technology* 222 (5): 15–36.

Yang, Yunming, Jin Ooi, Micheal Rotter, and Yin Wang. 2011. "Numerical Analysis of Silo Behavior Using Non-Coaxial Models." *Chemical Engineering Science* 66: 1715–1727.

ANEXOS

Anexo A Caracterización del producto

Datos de laboratorio: caracterización del material. A continuación los formatos usados para la recolección de datos en el laboratorio:

																																																																																											
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS Departamento de Engenharia de Estruturas Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira LaMEM Ensayo de Cizallamiento - Corte directo Material de almacenamiento: CEMENTO COMÚN																																																																																											
Laboratorista: _____ Fecha: _____ ID. Muestra: _____																																																																																											
Ensayo: Ángulo de Fricción con la pared <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Tipo de pared: Liso</th> <th colspan="4">Tipo de pared: Rugoso</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Test 1</th> <th>Test 2</th> <th>Test 3</th> <th></th> <th>Test 1</th> <th>Test 2</th> <th>Test 3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>50</td><td></td><td></td><td></td><td>50</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>40</td><td></td><td></td><td></td><td>40</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>30</td><td></td><td></td><td></td><td>30</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>20</td><td></td><td></td><td></td><td>20</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td></td><td></td><td></td><td>10</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td>Peso Muestra:</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Peso Muestra:</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Tipo de pared: Liso				Tipo de pared: Rugoso					Test 1	Test 2	Test 3		Test 1	Test 2	Test 3	50				50				40				40				30				30				20				20				10				10				0				0				Peso Muestra:				Peso Muestra:				Ensayo de Humedad <table border="1"> <thead> <tr> <th>Id. Muestra</th> <th>Peso-i</th> <th>Peso-f</th> <th>Hora-i</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>		Id. Muestra	Peso-i	Peso-f	Hora-i	1				2				3			
Tipo de pared: Liso				Tipo de pared: Rugoso																																																																																							
	Test 1	Test 2	Test 3		Test 1	Test 2	Test 3																																																																																				
50				50																																																																																							
40				40																																																																																							
30				30																																																																																							
20				20																																																																																							
10				10																																																																																							
0				0																																																																																							
Peso Muestra:				Peso Muestra:																																																																																							
Id. Muestra	Peso-i	Peso-f	Hora-i																																																																																								
1																																																																																											
2																																																																																											
3																																																																																											
Precarga 10 <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Pre-carga</th> <th>Carga</th> <th>Peso</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>P Test</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Carga 7</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Carga 5</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Carga 3.5</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>			Pre-carga	Carga	Peso	P Test				Carga 7				Carga 5				Carga 3.5																																																																									
	Pre-carga	Carga	Peso																																																																																								
P Test																																																																																											
Carga 7																																																																																											
Carga 5																																																																																											
Carga 3.5																																																																																											
Precarga 7 <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Pre-carga</th> <th>Carga</th> <th>Peso</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>P Test</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Carga 5</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Carga 3.5</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Carga 2</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>			Pre-carga	Carga	Peso	P Test				Carga 5				Carga 3.5				Carga 2																																																																									
	Pre-carga	Carga	Peso																																																																																								
P Test																																																																																											
Carga 5																																																																																											
Carga 3.5																																																																																											
Carga 2																																																																																											
Precarga 5 <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Pre-carga</th> <th>Carga</th> <th>Peso</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>P Test</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Carga 3.5</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Carga 2</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Carga 1</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>			Pre-carga	Carga	Peso	P Test				Carga 3.5				Carga 2				Carga 1																																																																									
	Pre-carga	Carga	Peso																																																																																								
P Test																																																																																											
Carga 3.5																																																																																											
Carga 2																																																																																											
Carga 1																																																																																											

Figura 47 Formato para ensayo de cizallamiento - corte directo Jenike y de humedad

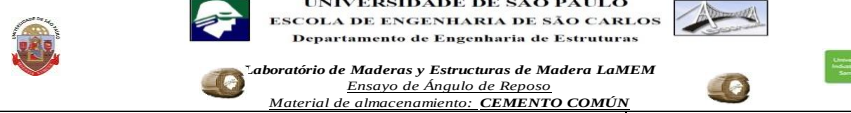
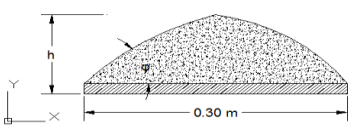
																																		
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS Departamento de Engenharia de Estruturas Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira LaMEM Ensayo de Ángulo de Reposo Material de almacenamiento: CEMENTO COMÚN																																		
Laboratorista: _____ Fecha: _____ ID. Muestra: _____		Comentarios del ensayo _____ _____ _____																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Id. Muestra</th> <th colspan="3">h (m)</th> </tr> <tr> <th>AR-A1</th> <th>AR-B1</th> <th>AR-C1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>				Id. Muestra	h (m)			AR-A1	AR-B1	AR-C1	1				2				3				4				5				6			
Id. Muestra	h (m)																																	
	AR-A1	AR-B1	AR-C1																															
1																																		
2																																		
3																																		
4																																		
5																																		
6																																		
																																		

Figura 48 Formato para Ensayo de ángulo de reposo

Resultados de laboratorio: Para cada ensayo, de acuerdo a la metodología descrita en cada uno de los ensayos, se obtuvieron los siguientes datos:

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
Departamento de Engenharia de Estruturas

Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira LaMEM
Ensayo de Cizallamiento - Corte directo
Material de almacenamiento: CEMENTO COMÚN

Laboratorista: Silvio

Fecha: 26/02/2013

ID. Muestra: JP - A1

Precarga 10			
	Pre-carga	Carga	Peso
P Test	100		530
Carga 7	96	77	535
Carga 5	105	69	545
Carga 3.5	102	57	540

Precarga 7			
	Pre-carga	Carga	Peso
P Test	71		525
Carga 5	80	57	545
Carga 3.5	75	48	535
Carga 2	64	34	525

Precarga 5			
	Pre-carga	Carga	Peso
P Test	57		535
Carga 3.5	60	48	535
Carga 2	59	36	535
Carga 1	60	30	535

Ensayo: Ángulo de Fricción con la pared							
Tipo de pared:	Liso			Tipo de pared:	Rugoso		
	Test 1	Test 2	Test 3		Test 1	Test 2	Test 3
50	25	35	33	50	33	33	
40	21	28	27	40	27	26.5	
30	16	22	21	30	22	21	
20	12	17	17	20	16	16	
10	8	12	11	10	11	11	
0	5	7	6	0	6	6.3	
Peso Muestra:	1090	1090	1090	Peso Muestra:	1085	1080	

Ensayo de Humedad				
Id. Muestra	Peso-i	Peso-f	Hora-i	
1	T-96	19.7	19.4	10 h
	T-97	22.7	22.6	
	T-98	15.6	15.5	
2				
3				

Figura 49 Datos del ensayo JP-A1

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
Departamento de Engenharia de Estruturas

Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira LaMEM
Ensayo de Cizallamiento - Corte directo
Material de almacenamiento: CEMENTO COMÚN

Laboratorista: Silvio

Fecha: 01/03/2013

ID. Muestra: JP - A2

Precarga 10			
	Pre-carga	Carga	Peso
P Test	94		545
Carga 7	90	73	540
Carga 5	92	58	540
Carga 3.5	94	47	550

Precarga 7			
	Pre-carga	Carga	Peso
P Test	71		540
Carga 5	66	55	535
Carga 3.5	73	49	550
Carga 2	70	35	545

Precarga 5			
	Pre-carga	Carga	Peso
P Test	44		520
Carga 3.5	47	36	530
Carga 2	60	36	545
Carga 1	49	23	535

Ensayo: Ángulo de Fricción con la pared						
Tipo de pared: Liso		Tipo de pared: Rugoso				
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3
50	30	28		50	27	30
40	24	22		40	21	24
30	19	18		30	17	20
20	14	13		20	12	14
10	9	9		10	8	10
0	5	5		0	4.5	5
Peso Muestra:	1095	1095		Peso Muestra:	1085	1085

Ensayo de Humedad			
Id. Muestra	Peso-i	Peso-f	Hora-i
T-4	22.5	22.4	
T-62	20	20	
T-99	20.9	20.9	
1			
2			
3			

Figura 50 Datos del ensayo JP-A2




UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
Departamento de Engenharia de Estruturas



Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira LaMEM
Ensayo de Cizallamiento - Corte directo
Material de almacenamiento: **CEMENTO COMÚN**







Laboratorista: Silvio
Fecha: 25/09/2013
ID. Muestra: JP - A3

Precarga 10			
	Pre-carga	Carga	Peso
P Test	95		530
Carga 7	93.2	76	530
Carga 5	98	66	540
Carga 3.5	107	57	540

Precarga 7			
	Pre-carga	Carga	Peso
P Test	68		525
Carga 5	70	56	530
Carga 3.5	64	46	520
Carga 2	68	37	525

Precarga 5			
	Pre-carga	Carga	Peso
P Test	55		529
Carga 3.5	55	46	525
Carga 2	52	35	525
Carga 1	52	28	525

Ensayo: Ângulo de Fricção com a parede							
Tipo de pared: Liso				Tipo de pared: Rugoso			
	Test 1	Test 2	Test 3		Test 1	Test 2	Test 3
50	31	28.5		50	33	31	
40	25	23		40	27	26	
30	20	19		30	22	20	
20	15	14.5		20	16	15.5	
10	10	10		10	11.5	10.4	
0	5.4	5.6		0	6.3	5.2	
Peso Muestra:	1090	1085		Peso Muestra:	1085	1085	

Ensayo de Humedad				
	Id. Muestra	Peso-i	Peso-f	Hora-i
1	T-6	94.5	94.1	
	T-28	107.2	106.7	
	T-45	97.4	97	
2				
3				

Figura 51 Datos del ensayo JP-A3




UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
Departamento de Engenharia de Estruturas



Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira LaMEM
Ensayo de Cizallamiento - Corte directo
Material de almacenamiento: CEMENTO COMÚN

Laboratorista: Silvio
Fecha: 06/05/2013
ID. Muestra: JP - B1

Precarga 10			
	Pre-carga	Carga	Peso
P Test	75		495
Carga 7	74.8	64	495
Carga 5	83	52	505
Carga 3.5	74.42	43	495

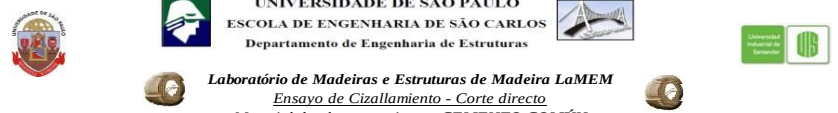
Precarga 7			
	Pre-carga	Carga	Peso
P Test	59		500
Carga 5	57.4	47	500
Carga 3.5	56.4	40	500
Carga 2	57	31	505

Precarga 5			
	Pre-carga	Carga	Peso
P Test	44		505
Carga 3.5	44	36	500
Carga 2	44	29	505
Carga 1	43	22.5	505

Ensayo: Ángulo de Fricción con la pared								
Tipo de pared: Liso					Tipo de pared: Rugoso			
	Test 1	Test 2	Test 3		Test 1	Test 2	Test 3	
50	28	30		50	27	26		
40	22	24		40	22	21		
30	17.5	18		30	18	17		
20	12.5	14		20	13	11		
10	8.5	9.5		10	9	9		
0	4.7	4.9		0	5	4.7		
Peso Muestra:	1075	1080		Peso Muestra:	1075	1075		

Ensayo de Humedad				
	Id. Muestra	Peso-i	Peso-f	Hora-i
1	T-96	16.74	16.73	
	T-97	16.2	16.19	
	T-98	15.34	15.33	
2	T-4	14.76	14.68	
	T-62	17.24	17.2	
	T-99	17.97	17.89	
3				

Figura 52 Datos del ensayo JP-B1



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
 Departamento de Engenharia de Estruturas

Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira LaMEM
Ensaio de Cisalhamento - Corte directo
 Material de armazenamento: **CEMENTO COMÚN**

Laboratorista: Silvio
Fecha: 07/05/2013
ID. Muestra: JP - B2

Precarga 10			
	Pre-carga	Carga	Peso
P Test	81		495
Carga 7	80	67	495
Carga 5	80	55	500
Carga 3.5	79	45	500

Precarga 7			
	Pre-carga	Carga	Peso
P Test	58		495
Carga 5	58	48	495
Carga 3.5	56	40	495
Carga 2	58	33	505

Precarga 5			
	Pre-carga	Carga	Peso
P Test	45		505
Carga 3.5	43	36	505
Carga 2	44	28	500
Carga 1	43	23	505

Ensaio: Ângulo de Fricção con la pared						
Tipo de pared:	Liso			Rugoso		
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3
50	29	27		50	26	27
40	23.5	21.5		40	21	22
30	19	17		30	16	18
20	14.5	13		20	12	14
10	10	9		10	8.3	9
0	5.5	5.1		0	4.3	5
Peso Muestra:	1080	1075		Peso Muestra:	1070	1075

Ensaio de Humedad			
Id. Muestra	Peso-i	Peso-f	Hora-i
1	T-4	14.76	14.68
	T-62	17.24	14.2
	T-99	17.97	17.89
2			
3			

Figura 53 Datos del ensayo JP-B2



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
 Departamento de Engenharia de Estruturas

Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira LaMEM
Ensaio de Cisalhamento - Corte directo
 Material de armazenamento: **CEMENTO COMÚN**

Laboratorista: Silvio
Fecha: 29/04/2013
ID. Muestra: JP - C1

Precarga 10			
	Pre-carga	Carga	Peso
P Test	85		525
Carga 7	80	65	520
Carga 5	88	56	520
Carga 3.5	83	48	525

Precarga 7			
	Pre-carga	Carga	Peso
P Test	57		515
Carga 5	60	50	515
Carga 3.5	62	41	520
Carga 2	65	31	525

Precarga 5			
	Pre-carga	Carga	Peso
P Test	50		520
Carga 3.5	46	39	520
Carga 2	44	29	520
Carga 1	37	24	515

Ensaio: Ângulo de Fricção con la pared						
Tipo de pared:	Liso			Rugoso		
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3
50	30	32		50	32	31
40	25	26.5		40	24.5	26
30	19	21		30	19	21
20	15	16.4		20	14.5	16.5
10	9	11.8		10	10	11.5
0	5	7		0	5.5	7
Peso Muestra:	1085	10.85		Peso Muestra:	1075	1075

Ensaio de Humedad			
Id. Muestra	Peso-i	Peso-f	Hora-i
1	T-96	20.6	20.44
	T-97	20.1	19.83
	T-98	17.4	17.4
2			
3			

Figura 54 Datos del ensayo JP-C1





UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
Departamento de Engenharia de Estruturas






Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira LaMEM
Ensayo de Cizallamiento - Corte directo
Material de almacenamiento: CEMENTO COMÚN



Laboratorista: Silvio
Fecha 02/04/2013
ID. Muestra JP - C2

Precarga 10

	Pre-carga	Carga	Peso
P Test	83		525
Carga 7	81	62	525
Carga 5	82	55	525
Carga 3.5	80	45	525

Precarga 7

	Pre-carga	Carga	Peso
P Test	61		520
Carga 5	60	51	520
Carga 3.5	61	45	525
Carga 2	61	34	520

Precarga 5

	Pre-carga	Carga	Peso
P Test	46		515
Carga 3.5	45	39	515
Carga 2	42	32	515
Carga 1	46	24	515

Ensayo: Ángulo de Fricción con la pared

Tipo de pared: Liso				Tipo de pared: Rugoso			
	Test 1	Test 2	Test 3		Test 1	Test 2	Test 3
50	33	28	28	50	32	30	
40	26	22	22	40	27	24	
30	21.5	18	17.5	30	22	20	
20	16.5	13	13	20	16	14	
10	11.5	9.2	9	10	11	10	
0	7	4.5	4.5	0	6.5	5.8	
Peso Muestra:	1090	1090	1090	Peso Muestra:	1080	10.75	

Ensayo de Humedad

Id. Muestra	Peso-i	Peso-f	Hora-i
T-4	17.96	17.85	
T-62	15.67	15.58	
T-99	21.82	21.67	
1			
2			
3			

Figura 55 Datos del ensayo JP-C2

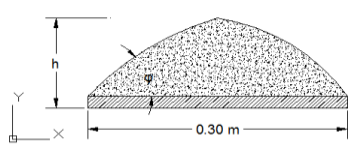
																																		
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS Departamento de Engenharia de Estruturas Laboratório de Madeiras y Estructuras de Madera LaMEM Ensayo de Ángulo de Reposo Material de almacenamiento: CEMENTO COMÚN																																		
Laboratorista: Silvio Fecha: 6/05/2013 y 7/05/2013		Comentarios del ensayo																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Id. Muestra</th><th colspan="3">h (m)</th></tr> <tr> <th>AR-A1</th><th>AR-B1</th><th>AR-C1</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td><td>0.144</td><td>0.157</td><td>0.153</td></tr> <tr> <td>2</td><td>0.166</td><td>0.139</td><td>0.158</td></tr> <tr> <td>3</td><td>0.157</td><td>0.149</td><td>0.154</td></tr> <tr> <td>4</td><td>0.165</td><td>0.157</td><td>0.158</td></tr> <tr> <td>5</td><td>0.145</td><td>0.151</td><td>0.157</td></tr> <tr> <td>6</td><td>0.143</td><td>0.144</td><td>0.147</td></tr> </tbody> </table>		Id. Muestra	h (m)			AR-A1	AR-B1	AR-C1	1	0.144	0.157	0.153	2	0.166	0.139	0.158	3	0.157	0.149	0.154	4	0.165	0.157	0.158	5	0.145	0.151	0.157	6	0.143	0.144	0.147		
Id. Muestra	h (m)																																	
	AR-A1	AR-B1	AR-C1																															
1	0.144	0.157	0.153																															
2	0.166	0.139	0.158																															
3	0.157	0.149	0.154																															
4	0.165	0.157	0.158																															
5	0.145	0.151	0.157																															
6	0.143	0.144	0.147																															

Figura 56 Datos del ensayo de ángulo de reposo

Procesamiento de datos: Se realiza en el software desarrollado por el laboratorio LaMEM, “Yield Locus”

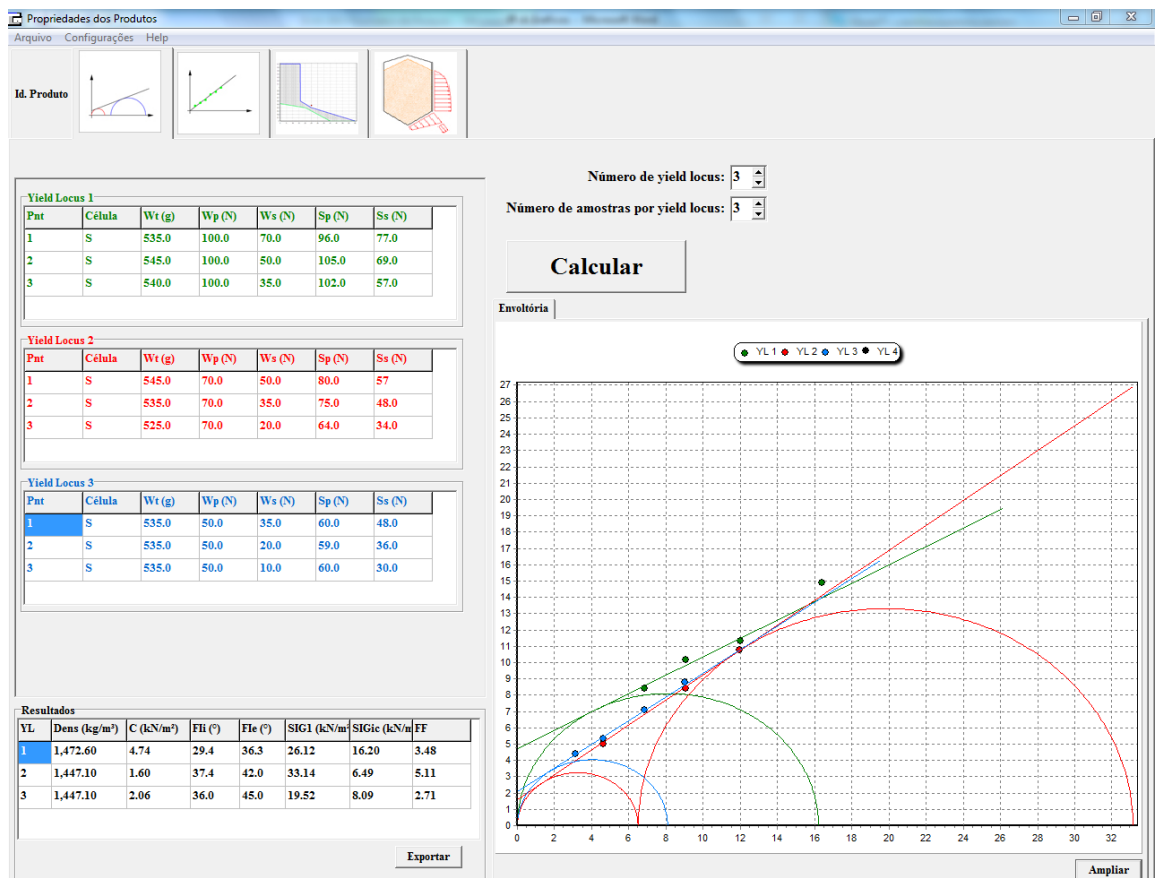


Figura 57 Procesamiento de datos. JP-A1

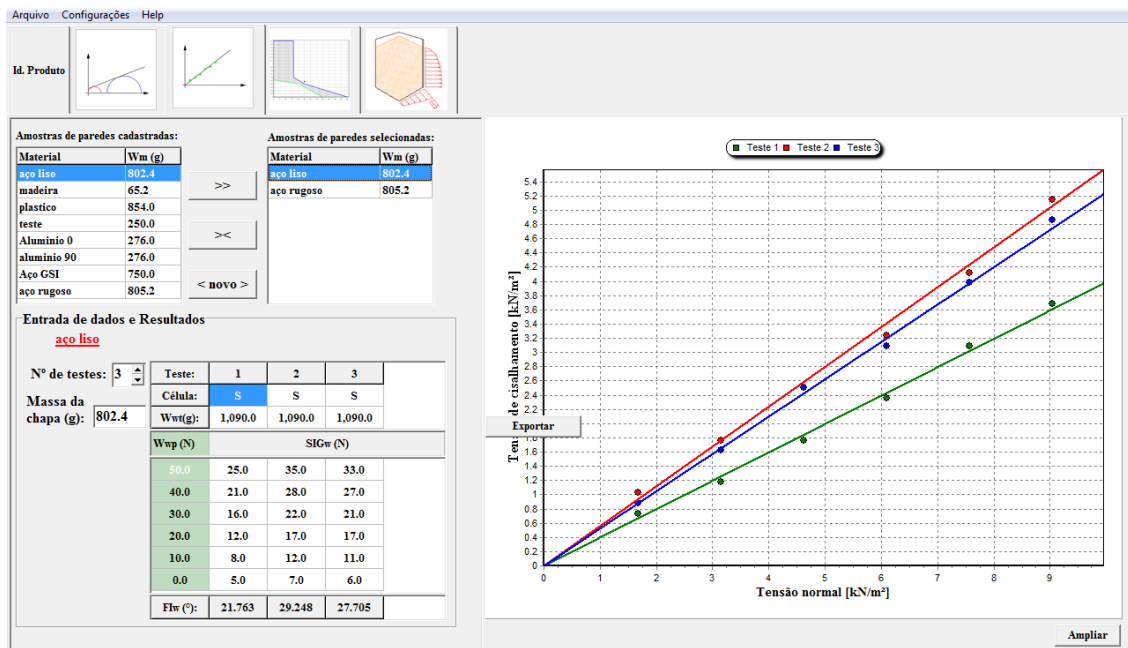


Figura 58 Ângulo de fricção material- pared lisa. JP-A1

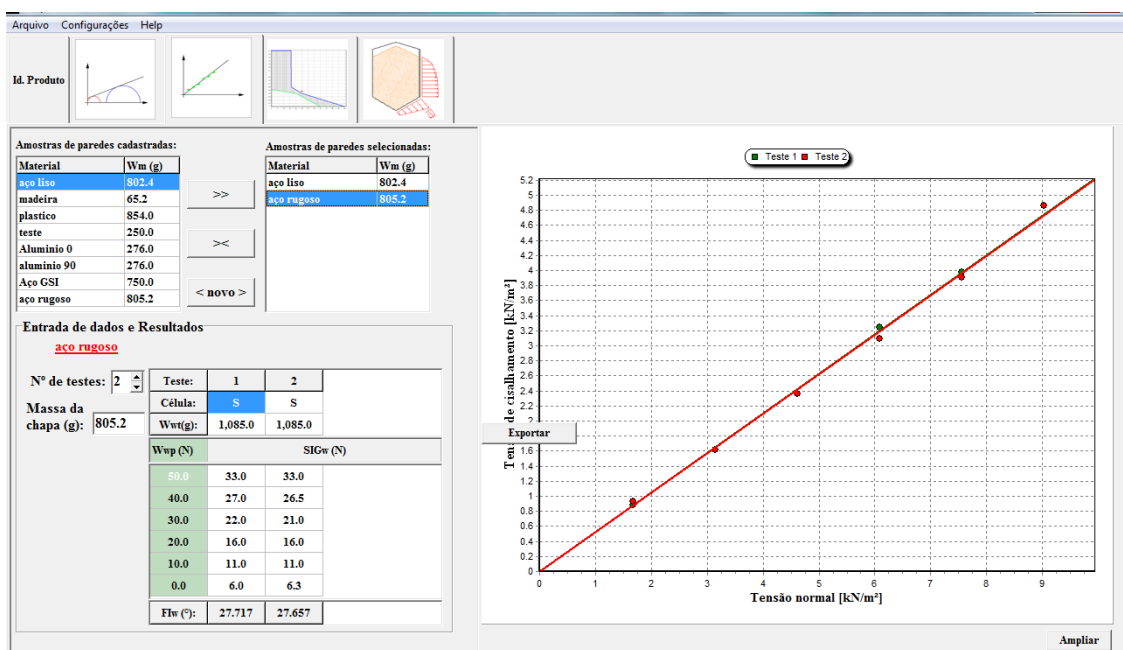


Figura 59 Ângulo de fricção material- pared rugosa. JP-A1

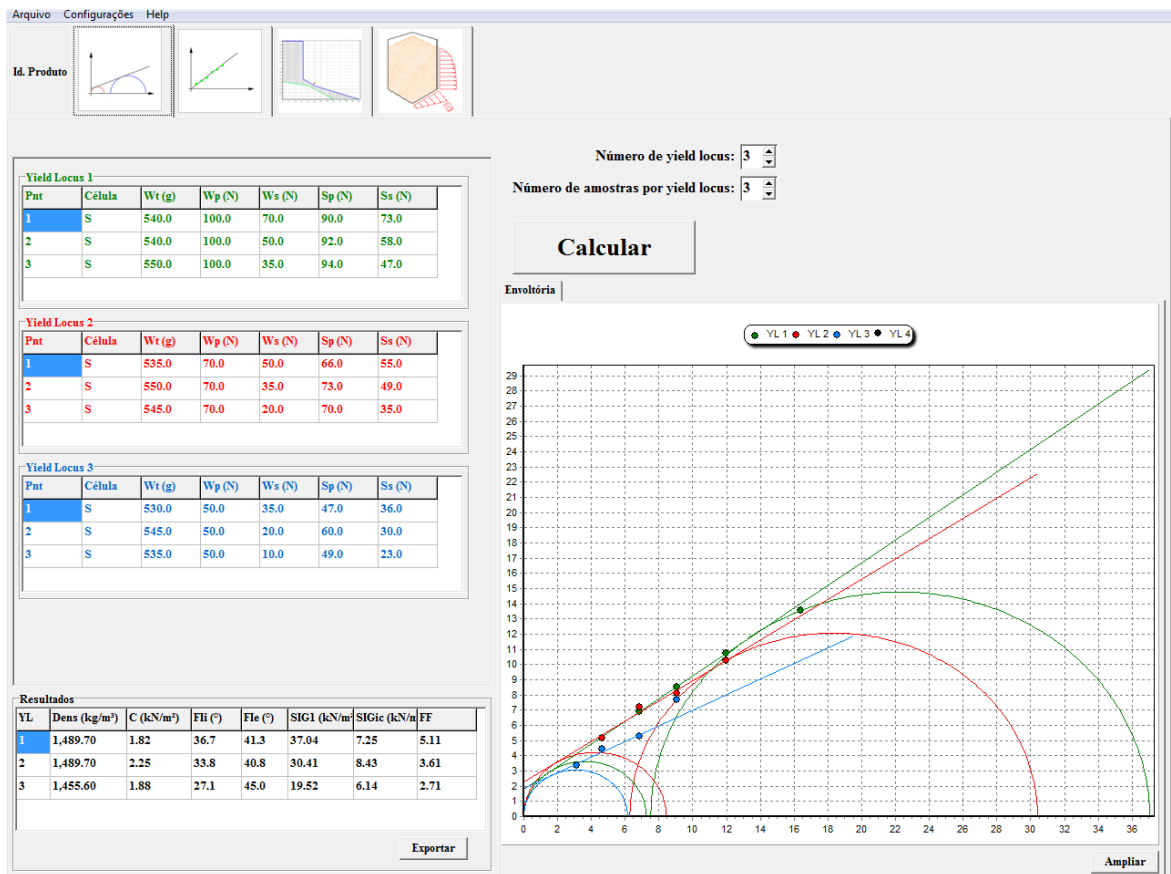


Figura 60 Procesamiento de datos. JP-A2

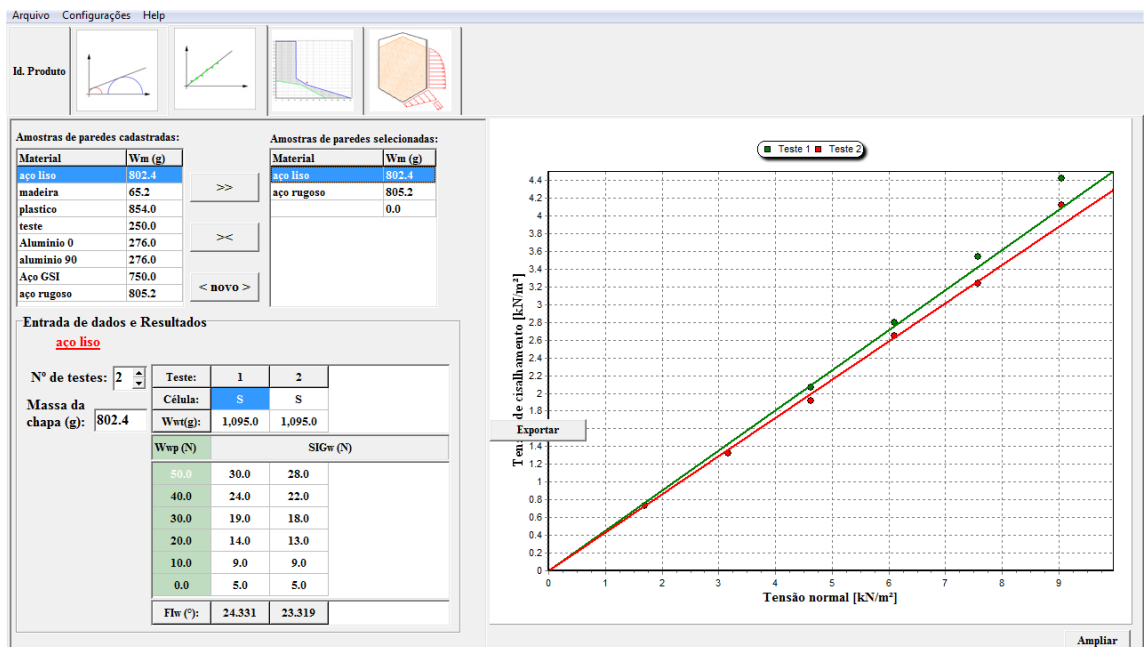


Figura 61 Ângulo de fricção material- pared lisa. JP-A2

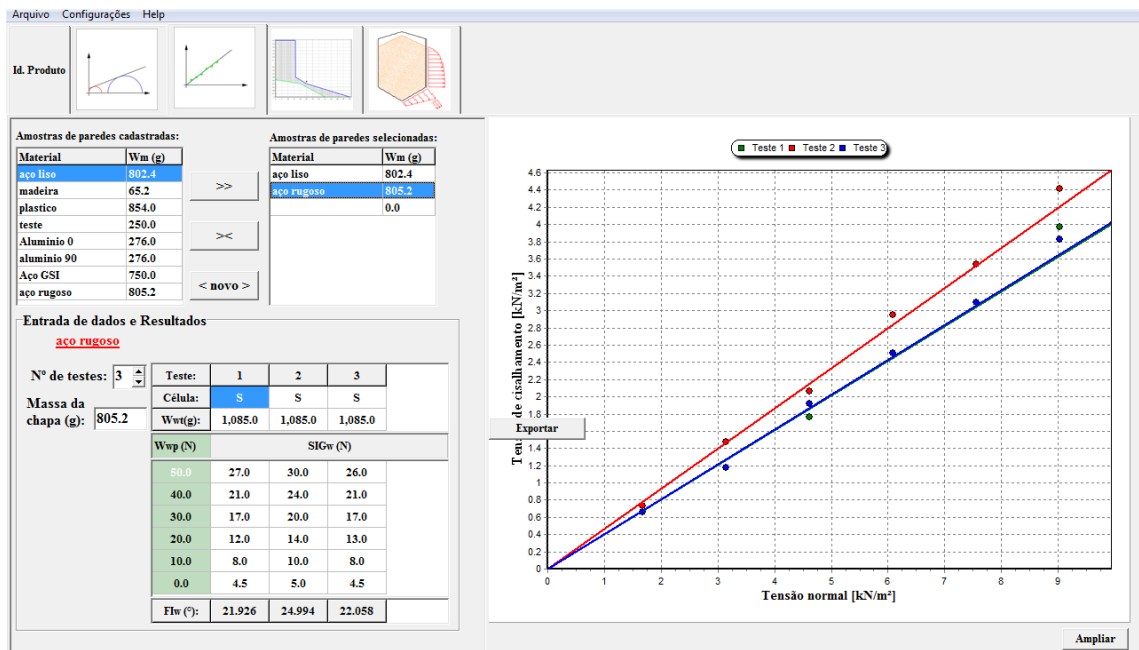


Figura 62 Ângulo de fricção material- pared rugosa. JP-A2

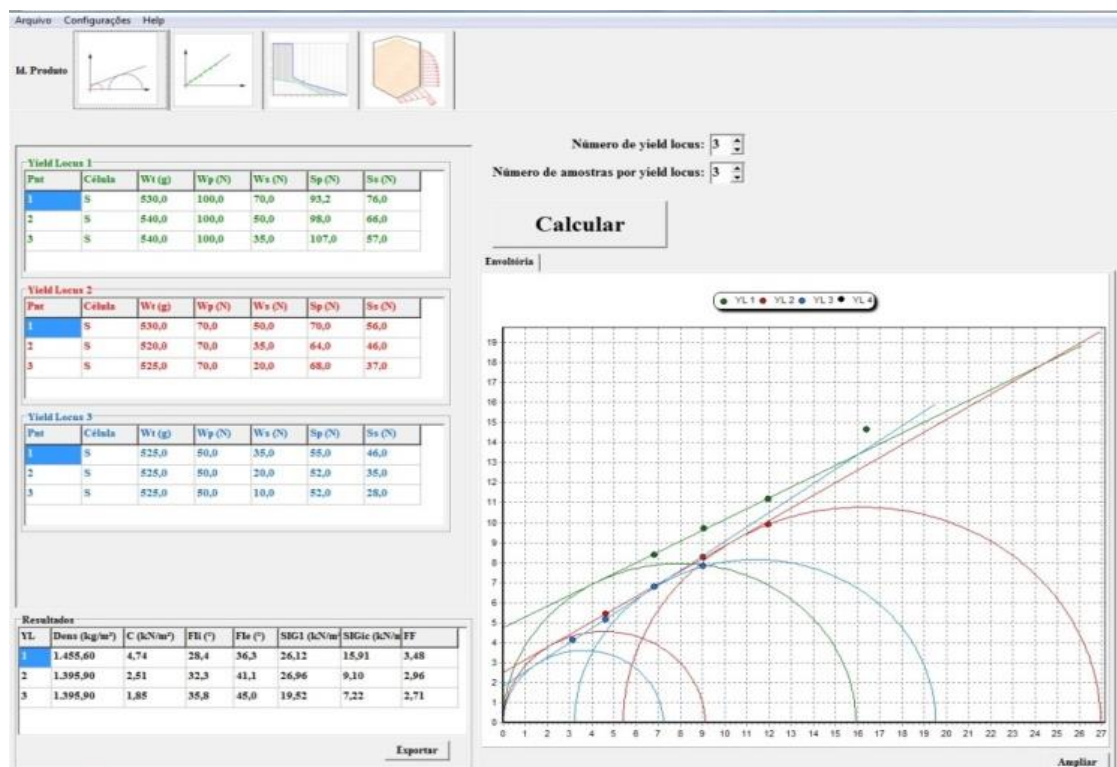


Figura 63 Procesamiento de datos. JP-A3

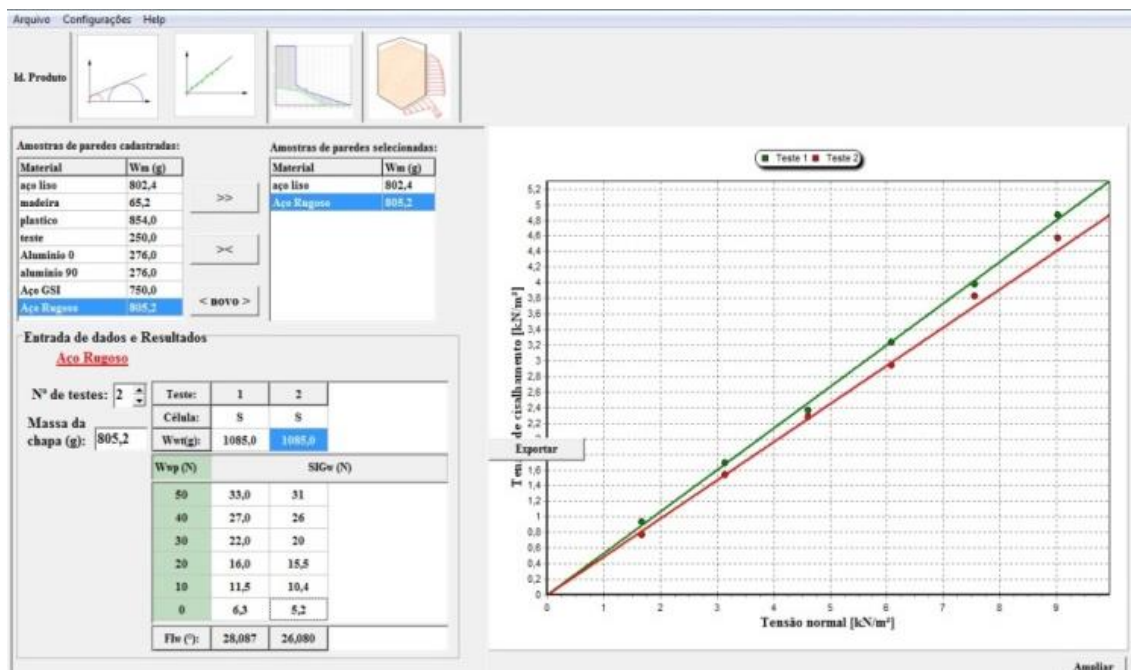


Figura 64 Ângulo de fricção material- pared lisa. JP-A3

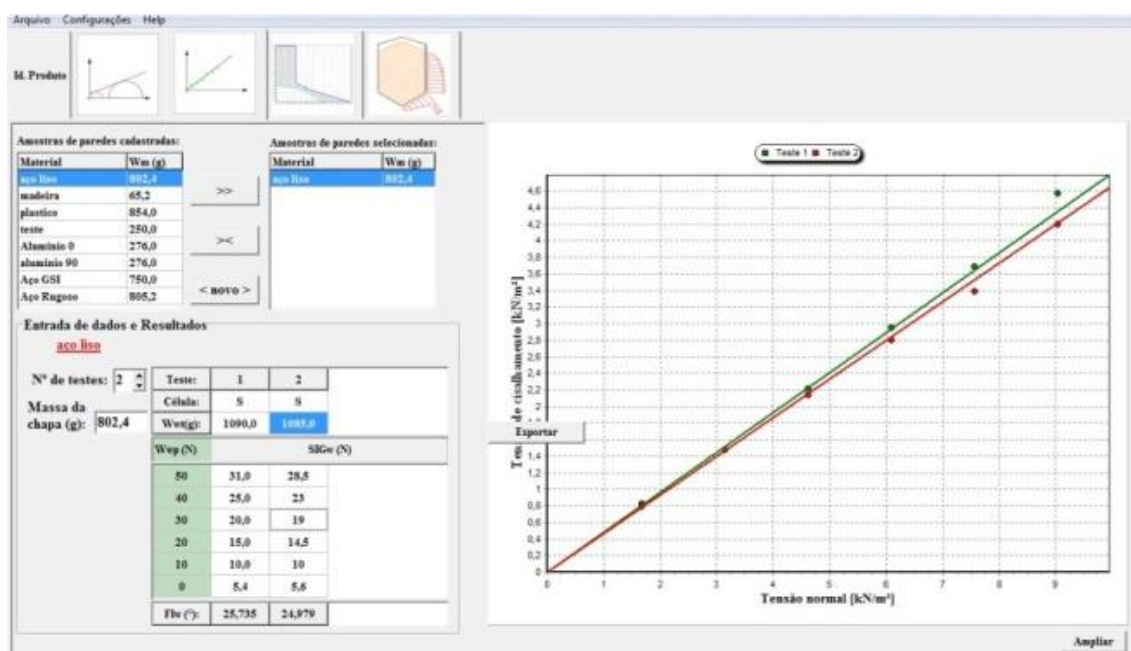


Figura 65 Ângulo de fricção material- pared rugosa. JP-A3

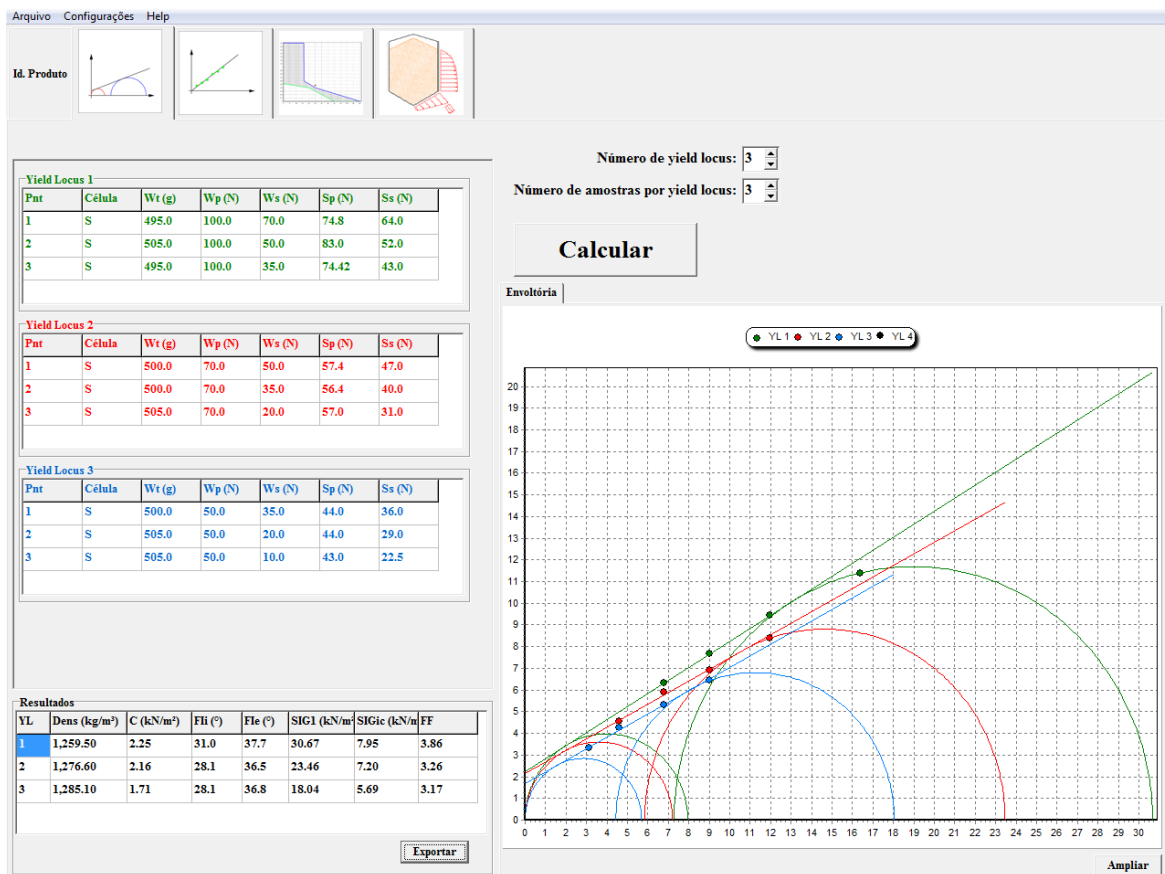


Figura 66 Procesamiento de datos. JP-B1

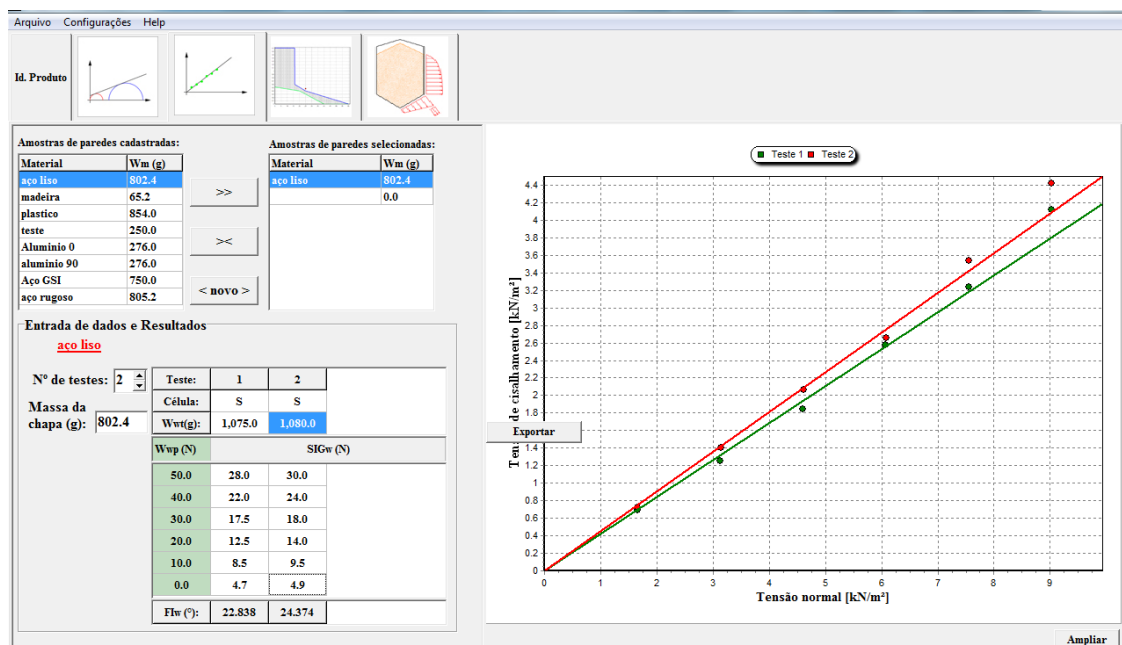


Figura 67Ángulo de fricción material- pared lisa. JP-B1

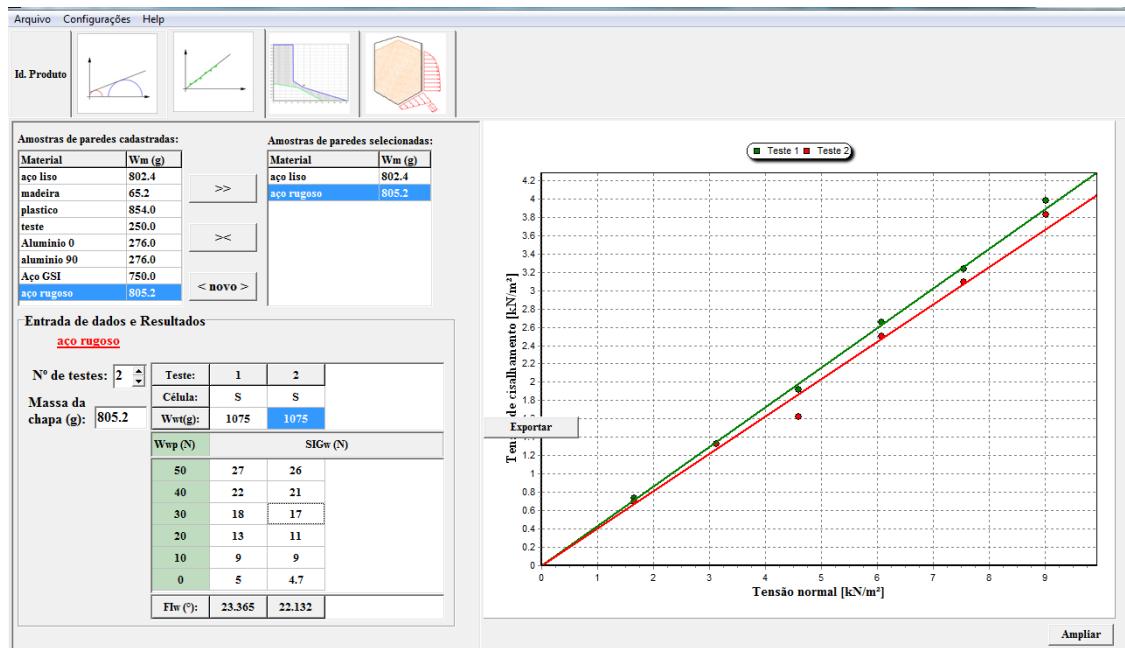


Figura 68 Ângulo de fricção material- pared rugosa. JP-B1

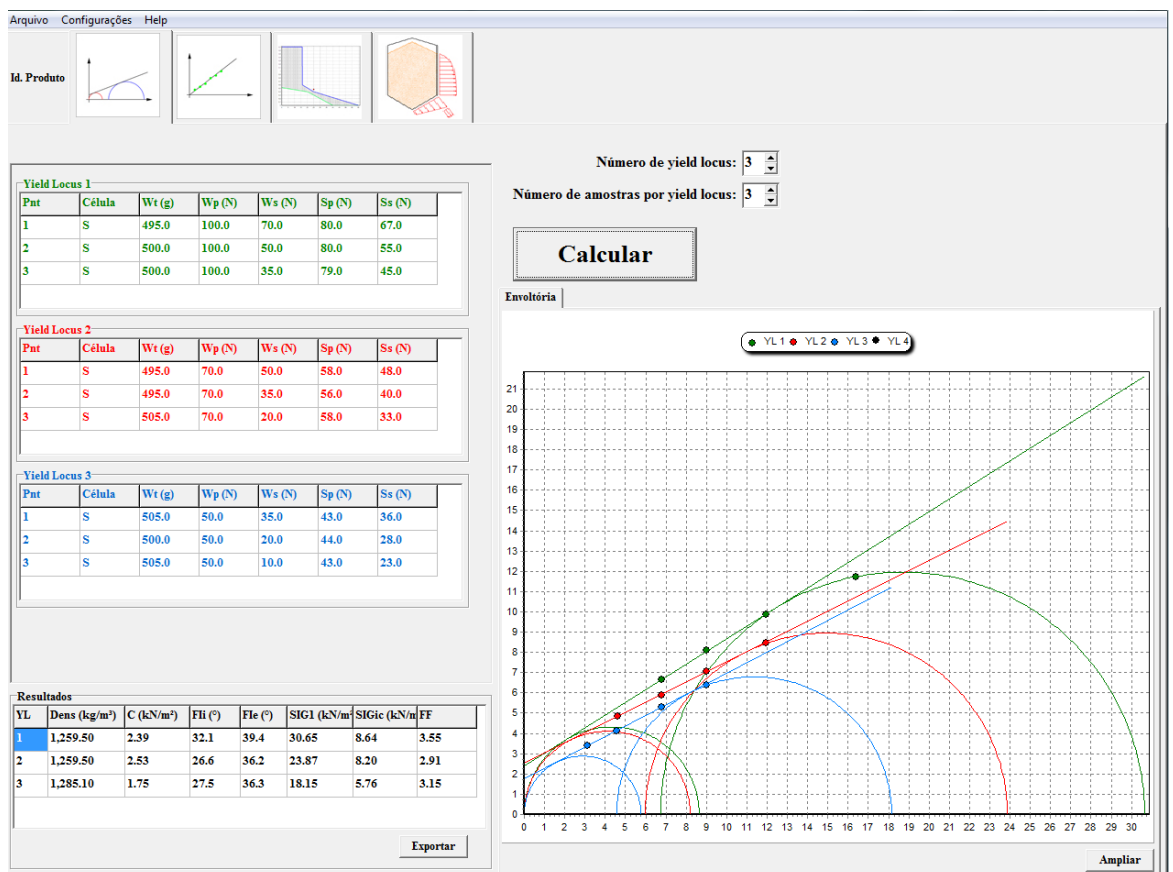


Figura 69 Procesamiento de datos. JP-B2

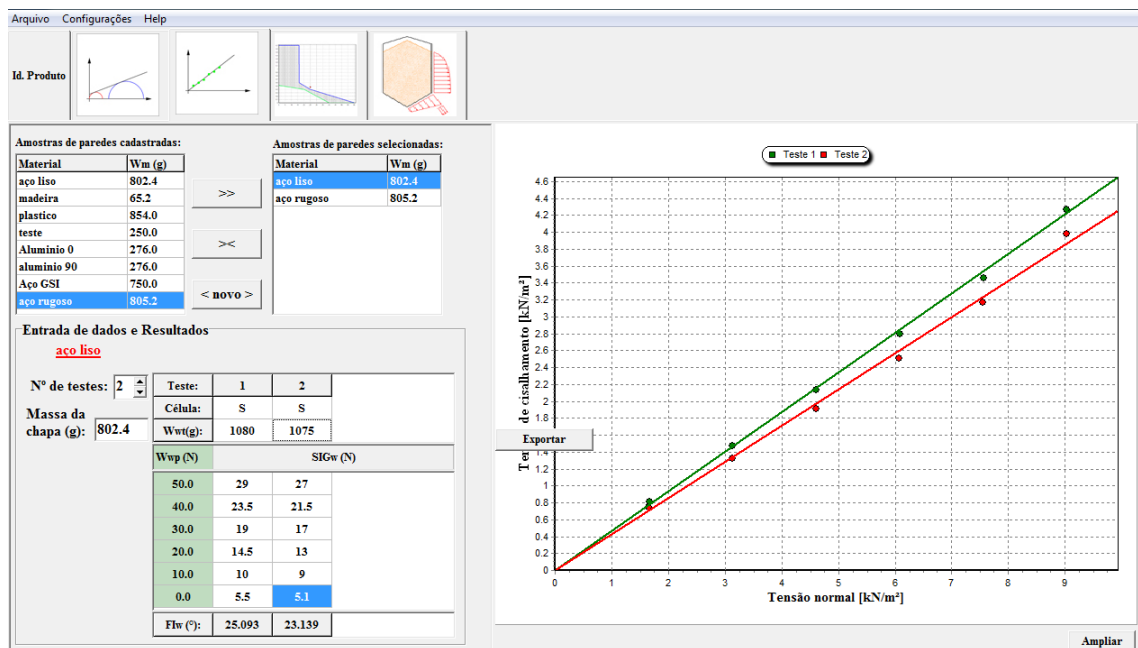


Figura 70 Ângulo de fricção material- pared lisa. JP-B2

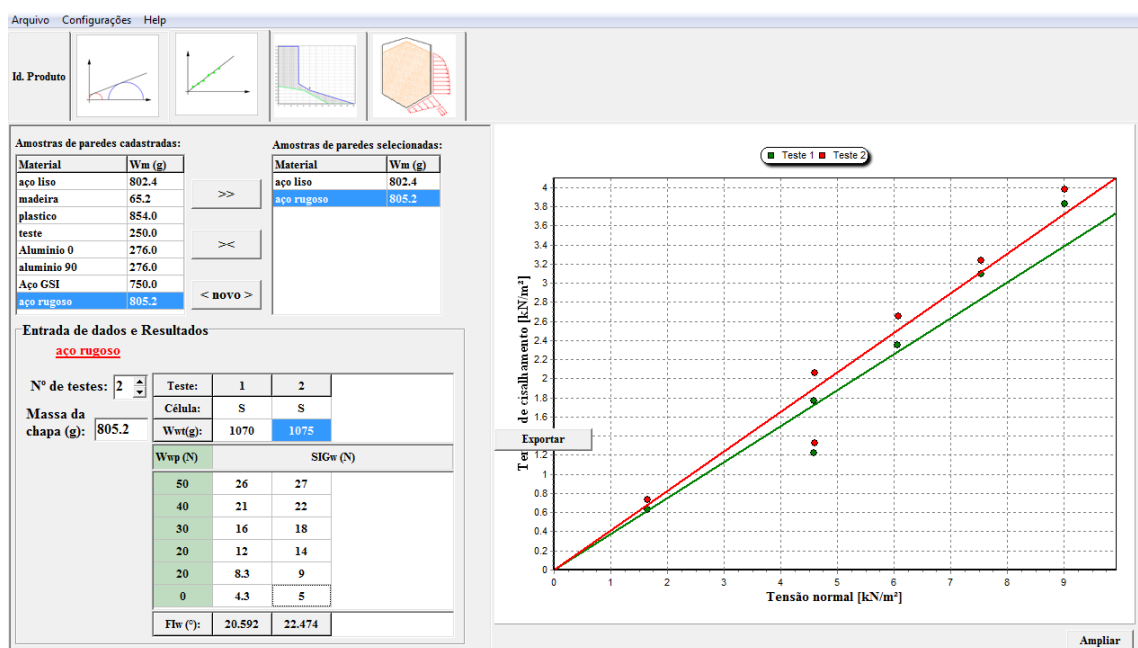


Figura 71 Ângulo de fricção material- pared rugosa. JP-B2

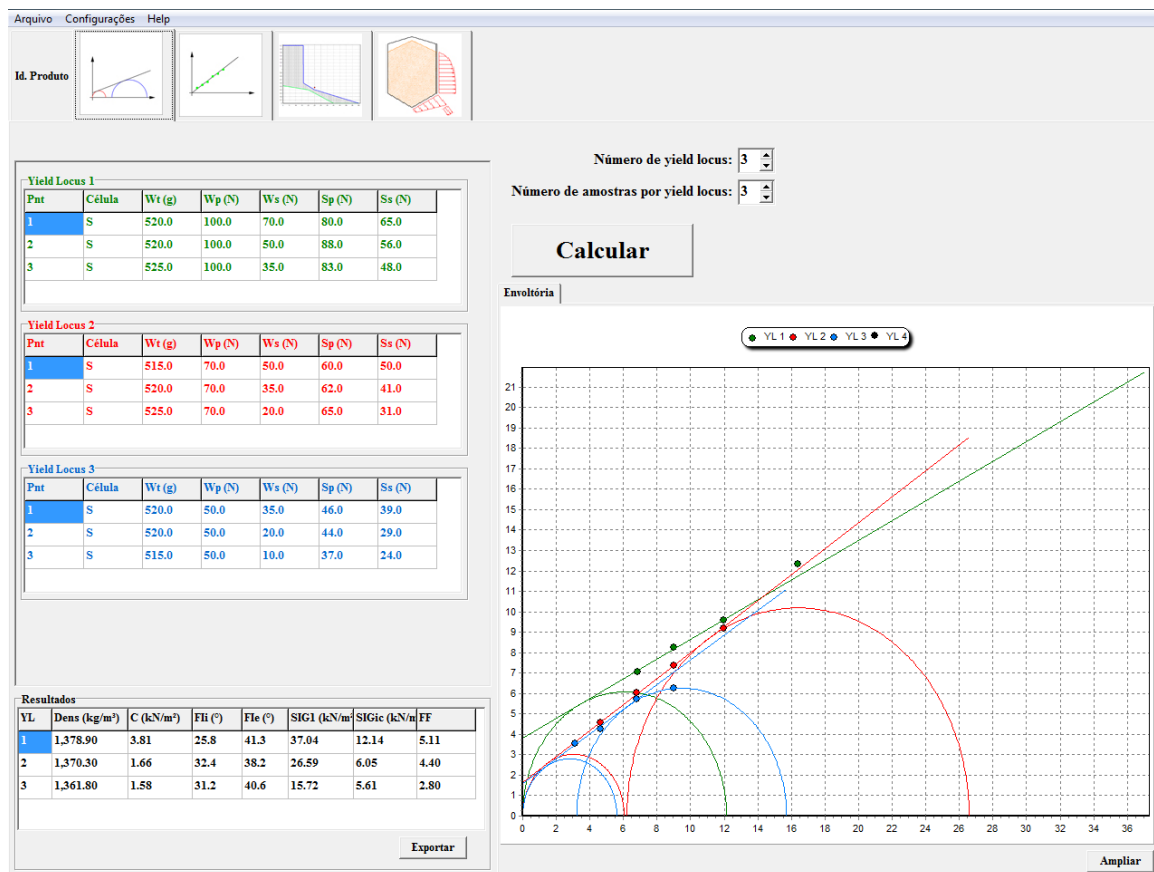


Figura 72 Procesamiento de datos. JP-C1

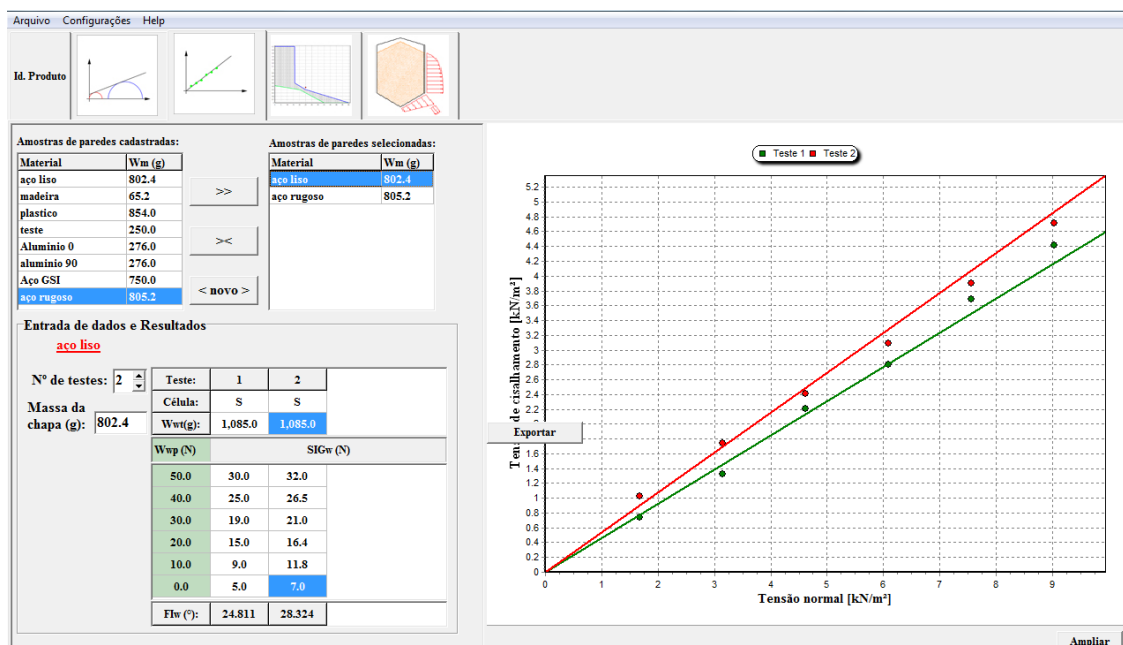


Figura 73 Ângulo de fricção material- pared lisa. JP-C1

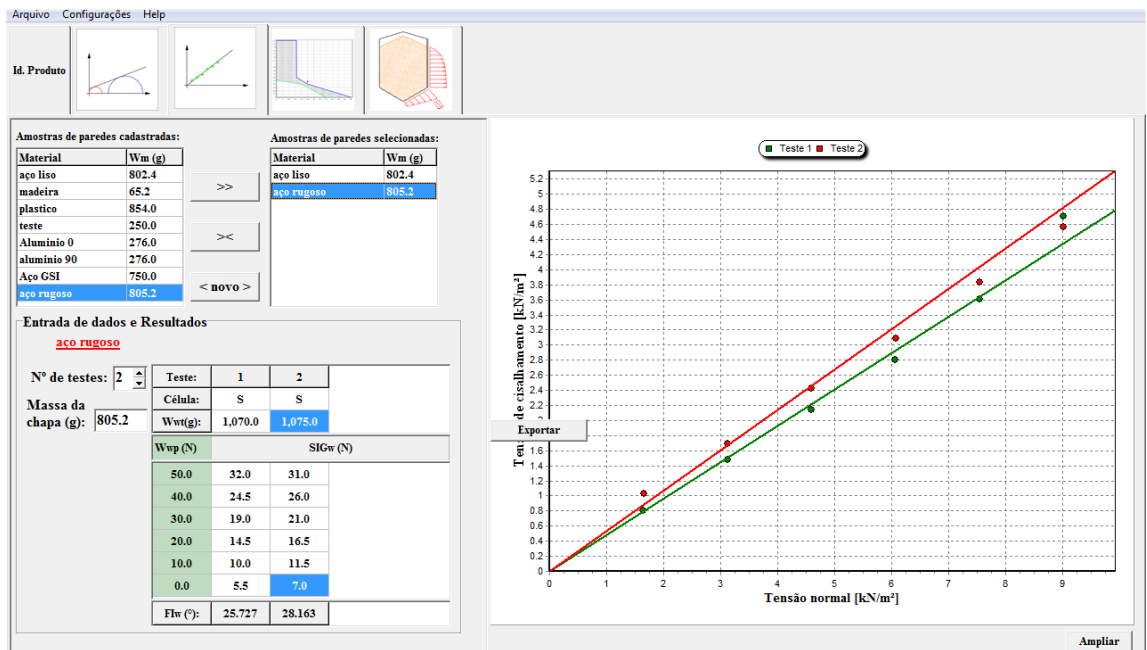


Figura 74 Ângulo de fricção material- pared rugosa. JP-C2

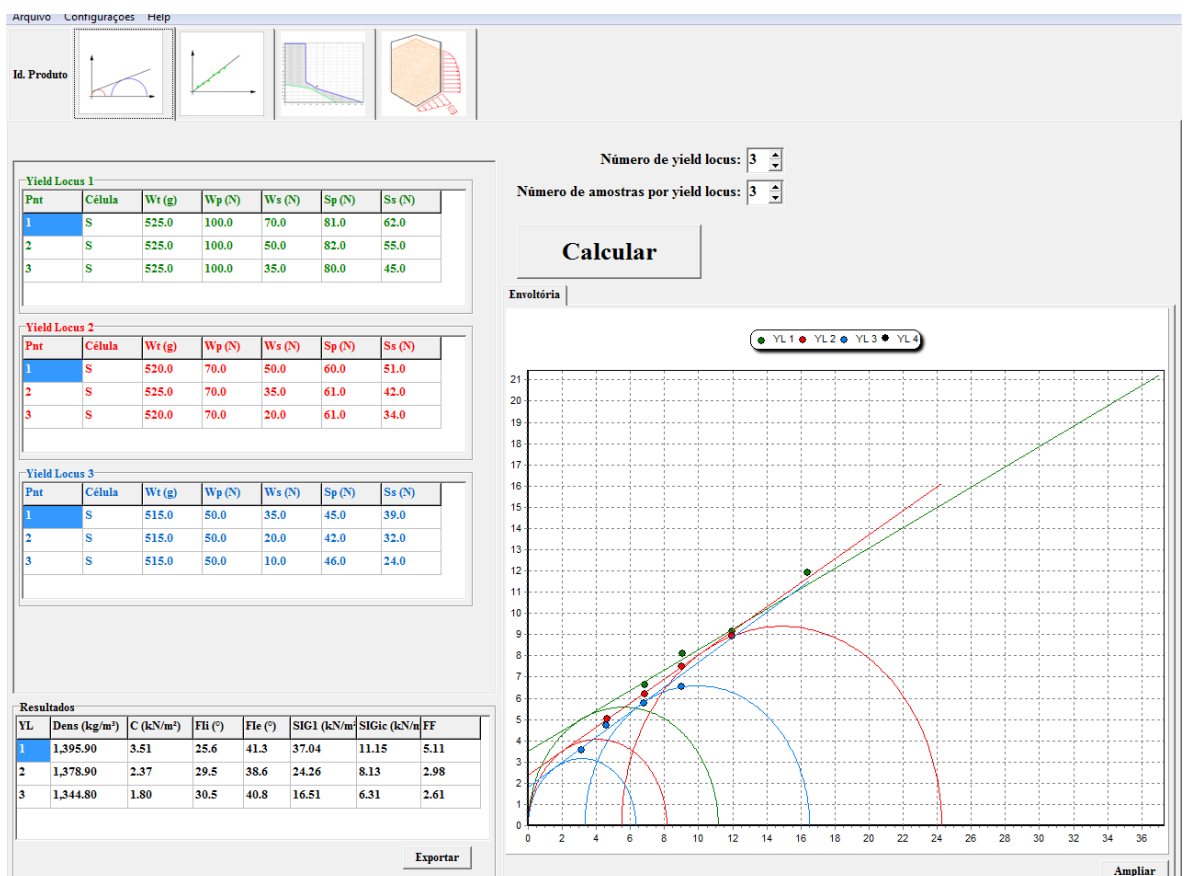


Figura 75 Procesamiento de datos. JP-C2

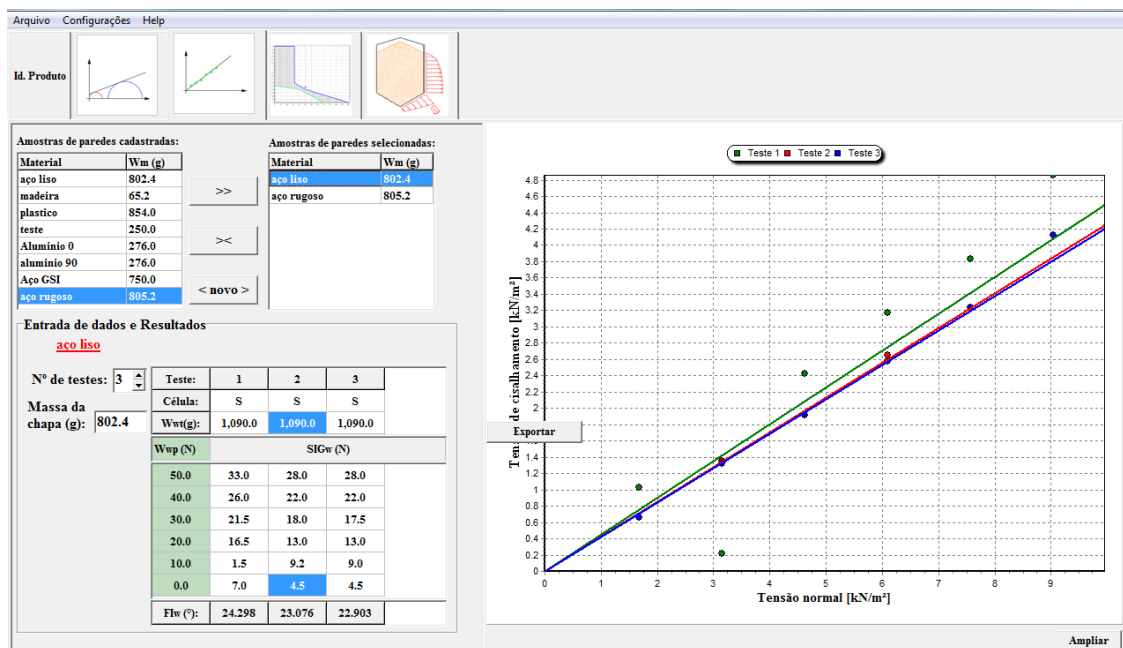


Figura 76 Ângulo de fricção material- pared lisa. JP-C2

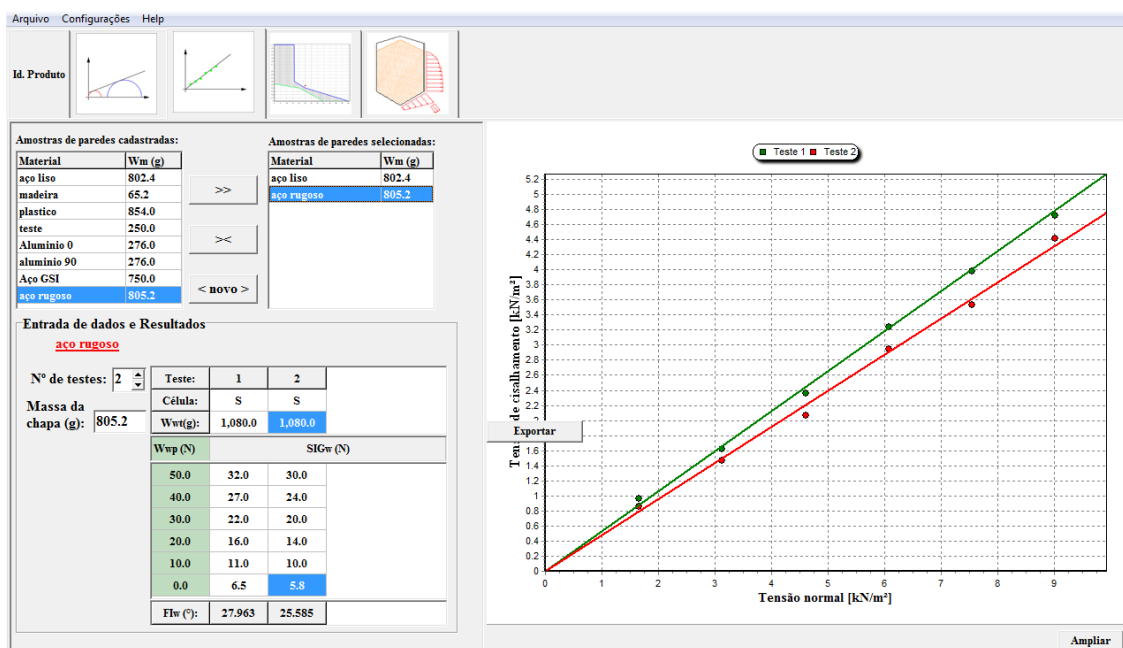


Figura 77 Ângulo de fricção material- pared rugosa. JP-C2

Análisis parcial de resultados: En cada ensayo se obtienen propiedades del material, para cada uno de ese conjunto de datos es calculado: valor mínimo, valor máximo, la media, la media aritmética y la desviación patrón.

Tabla 17 Propiedades: densidad, cohesión, ángulo de fricción y factor flujo (FF)

CEMENTO		Peso específico	Cohesión	Ángulo de fricción		Esfuerzos		FF
Muestra	Ensayo #	γ (kN/m³)	C (kN/m²)	Interno (°)	Efectivo (°)	1 (kN/m²)	ic (kN/m²)	
JP-A1	1	14.7	4.47	29.4	36.3	26.12	16.2	3.48
	2	14.5	1.6	37.4	42	33.14	6.49	5.11
	3	14.5	2.06	36	45	19.52	8.09	2.71
JP-A2	1	14.9	1.82	36.7	41.3	37.04	7.25	5.11
	2	14.9	2.25	33.8	40.8	30.41	8.43	3.61
	3	14.6	1.88	27.1	45	19.52	6.14	2.71
JP-A3	1	14.6	4.74	28.4	36.3	26.12	15.91	3.48
	2	14.0	2.51	32.3	41.1	26.96	9.1	2.96
	3	14.0	1.85	35.8	45	19.52	7.22	2.71
JP-B1	1	12.6	2.25	31	37.7	30.67	7.95	3.86
	2	12.8	2.16	28.1	36.5	23.48	7.21	3.25
	3	15.9	1.17	28.1	36.8	18.04	5.69	3.17
JP-B2	1	12.6	2.39	32.1	39.4	30.65	8.64	3.55
	2	12.6	2.53	26.6	36.2	23.87	8.2	2.91
	3	12.9	1.75	27.5	36.3	18.15	5.76	3.15
JP-C1	1	13.8	3.81	25.8	41.3	37.04	12.14	5.11
	2	13.7	1.66	32.4	38.2	26.59	6.05	4.40
	3	13.6	1.58	31.2	40.6	15.72	5.61	2.80
JP-C2	1	14.0	3.51	25.6	41.3	37.04	11.15	5.11
	2	13.8	2.37	29.5	38.6	24.26	8.13	2.98
	3	13.4	1.8	30.5	40.8	16.51	6.31	2.61
MIN		12.6	1.2	25.6	36.2			2.6
MAX		15.9	4.7	37.4	45.0			5.1
Media		14.0	2.2	30.5	40.6			3.3
Media Arit		13.9	2.4	30.7	39.8			3.6
Desviación estandar		0.890	0.956	3.636	2.960			0.883

Tabla 18 Propiedades: ángulo de fricción del material con pared lisa y rugosa

CEMENTO	Ángulo fricción pared			
Muestra	Lisa (°)		Rugosa (°)	
JP-A1	21.8	29.2	27.7	27.7
JP-A2	24.3	23.3	21.9	25.0
JP-A3	25.7	25.0	28.1	26.1
JP-B1	22.838	24.374	23.365	22.132
JP-B2	25.093	23.139	20.592	22.474
JP-C1	24.811	28.324	25.727	28.163
JP-C2	24.298	23.076	27.963	25.585
MIN	21.8	23.1	20.6	22.1
MAX	25.7	29.2	28.1	28.2
Media	24.3	24.4	25.7	25.6
Media Arit	24.1	25.2	25.1	25.3
Desviación estandar	1.373	2.555	3.102	2.329

	Pared Lisa	Pared Rugosa
MIN	21.8	20.6
MAX	29.2	28.2
Media	24.4	25.7
Media Arit	24.7	25.2
Desviación estandar	2.049	2.639

Tabla 19 Resultados del ensayo de humedad

Humedad - Cemento			Peso (g)			
Muestra	Ensayo #	ID	Inicial - W_1	Final - W_2	W_c	H (%)
JP-A1	1	H_A11	21.92	21.5	6.36	2.72%
	2	H_A12	23.83	23.5	6.37	
	3	H_A13	22.85	22.3	6.37	
JP-A2	1	H_A21	22.5	22.4	18.35	0.82%
	2	H_A22	20	20	18.34	
	3	H_A23	20.9	20.9	18.36	
JP-A3	1	H_A21	19.7	19.4	16.87	17.28%
	2	H_A22	22.7	22.6	16.05	
	3	H_A23	15.6	15.5	15.24	
JP-B1	1	H_B11	16.74	16.73	6.36	0.10%
	2	H_B12	16.2	16.19	6.37	
	3	H_B13	15.34	15.33	6.37	
JP-B2	1	H_B21	14.76	14.68	6.36	0.00%
	2	H_B22	17.24	14.2	6.37	
	3	H_B23	17.97	17.89	6.37	
JP-C1	1	H_C11	20.6	20.44	6.36	1.05%
	2	H_C12	20.1	19.83	6.37	
	3	H_C13	17.4	17.4	6.37	
JP-C2	1	H_C21	17.96	17.85	17.35	17.32%
	2	H_C22	15.67	15.58	15.24	
	3	H_C23	21.82	21.67	17.36	

MIN 0.00%

MAX 17.32%

Media 1.05%

Media Arit 5.61%

Desviación estandar 8.03%

Tabla 20 Resultados del ensayo de ángulo de reposo

CEMENTO			
<i>Muestra</i>	<i>h (m)</i>	<i>ϕ (°)</i>	
AR-A1	AR-A11	0.144	43.83
	AR-A12	0.166	47.90
	AR-A13	0.157	46.31
	AR-A14	0.165	47.73
	AR-A15	0.145	44.03
	AR-A16	0.143	43.63
AR-B1	AR-B11	0.157	46.31
	AR-B12	0.139	42.82
	AR-B13	0.149	44.81
	AR-B14	0.157	46.31
	AR-B15	0.151	45.19
	AR-B16	0.144	43.83
AR-C1	AR-C11	0.153	45.57
	AR-C12	0.158	46.49
	AR-C13	0.154	45.75
	AR-C14	0.158	46.49
	AR-C15	0.157	46.31
	AR-C16	0.147	44.42
MIN		42.8	
MAX		47.9	
Media		45.7	
Media Arit		45.4	
Desviación estandar		1.443	

