



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA

# **EXPANSIÓN DE ARENAS LIMOSAS CONTACTADAS CON ÁCIDO SULFÚRICO**

**AXEL ANTONIO CAYUPE MOLINA**

Informe de Actividad de Graduación para optar al Grado de  
Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica

Profesor Supervisor:

**FERNANDO RODRÍGUEZ ROA**

Santiago de Chile, Diciembre 2016.

I can make the earth stop in its tracks.  
I made the farthest things. I can  
change the course of nature.

I can place myself anywhere in space  
or time.

I can summon the dead.

I can perceive events on other worlds,  
in my deepest inner mind, & in the  
mind of others.

I can.

I am.

*Con amor infinito para mi Mujer y  
mis Hijas...*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar quisiera agradecer a todos los profesores del departamento de ingeniería estructural y geotécnica de la Pontificia Universidad Católica de Chile por todo el apoyo que siempre me entregaron durante el programa. Particularmente, a don Fernando Rodríguez Roa por tomar este desafío experimental y conducir mi investigación a buen puerto, y a don Carlos Ovalle Ortega por brindarme su apoyo constante en el desarrollo de los ensayos realizados en el laboratorio de docencia. También quiero entregar mi agradecimiento a doña Elena Cornejo Contardo y a don Guillermo Poblete por su apoyo en la coordinación y elaboración de este informe técnico.

Dentro de mi espectro profesional quiero agradecer el apoyo y aporte técnico de don Jorge Latorre Orrego, quien me instó a investigar las expansiones producidas por derrames ácidos y me facilitó gran parte del material con el que hasta el día de hoy se cuenta en el tema. También vayan mis agradecimientos a don Héctor Varela, quien me ha guiado en el análisis químico de las expansiones, y ha colaborado directamente con el desarrollo de las pruebas químicas realizadas al material en estudio.

## INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
INDICE DE TABLAS .....	1
INDICE DE FIGURAS.....	2
RESUMEN.....	3
ABSTRACT .....	4
<b>I. PRIMERA PARTE: ANTECEDENTES GENERALES .....</b>	<b>5</b>
I.1 Introducción .....	5
I.1.1 Descripción del proceso expansivo.....	5
I.2 Presiones Generadas en Estructuras Apoyadas sobre Suelos Contactados con Ácido Sulfúrico.....	6
I.3 Casos Históricos en la Minería Chilena .....	7
I.3.1 Estimación de la expansión a largo plazo .....	8
I.3.2 Derrame sobre suelo tratado con cal.....	11
I.3.3 Análisis del efecto de solevantamientos en estanques de almacenamiento .....	15
I.4 Expectativas de Respuesta del Estudio .....	25
<b>II. SEGUNDA PARTE: ANÁLISIS DEL PROCESO EXPANSIVO.....</b>	<b>27</b>
II.1 Análisis Físico y Químico del Fenómeno Expansivo .....	27
II.2 La Anhidrita .....	29
II.3 Descripción del Agente Contaminante (Soluciones Ácidas) .....	31
II.4 Análisis del Proceso Expansivo en el Tiempo .....	33
II.5 Caracterización del Material Areno Limoso a Utilizar en el Estudio .....	34
II.6 Definición de Variables y Consideraciones .....	39
II.7 Metodología de la Medición .....	41

III.	TERCERA PARTE: DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	44
III.1	Preparación de las Muestras y Mediciones Afines.....	44
III.2	Relaciones Estequiométricas para la Expansión Esperada.....	46
III.2.1	Análisis químico .....	47
III.2.2	Análisis volumétrico .....	49
III.3	Expansión Libre .....	50
III.4	Expansión bajo Carga Axial.....	51
III.5	Influencia del Nivel de Compactación .....	53
III.6	Influencia del contenido de Cal (CaO).....	54
IV.	CUARTA PARTE: APLICACIÓN EN EL DISEÑO DE ESTANQUES .....	56
IV.1	Estimación del Asentamiento.....	57
IV.1.1	Definición de los parámetros de entrada.....	58
IV.1.2	Zona en compresión (z) .....	59
IV.1.3	Esfuerzo de compresión máximo.....	59
IV.1.4	Solevantamiento por derrame ácido.....	59
IV.2	Cálculo de la Capacidad de Soporte.....	60
IV.2.1	Factores de forma.....	61
IV.2.2	Factores de profundidad.....	62
IV.2.3	Factores de inclinación de la carga .....	62
IV.2.4	Disminución de la capacidad de soporte por derrame ácido .....	63
V.	CONSIDERACIONES FINALES.....	64
V.1	Acerca de las Expansiones Reales Medidas en Terreno .....	65
V.II	Acerca de la Mitigación de los Procesos Expansivos .....	67
V.III	Acerca del Estudio de Aplicaciones Futuras.....	68
	BIBLIOGRAFIA.....	69
	A N E X O S.....	70
	Anexo A: DESARROLLO TEÓRICO PARA EL CÁLCULO DE	
	ASENTAMIENTOS FUERA DEL PLANO MEDIO DE GIRO .....	71
	Anexo B: RESULTADOS DE ENSAYOS MECÁNICOS .....	73
	Anexo C: RESULTADO DE ENSAYOS QUÍMICOS .....	74

Anexo D: PROPIEDADES DE LA CAL .....	75
Anexo E: ÁBACO DE CÁLCULO PARA FUNDACIÓN ANULAR .....	76

**INDICE DE TABLAS**

Pág.

Tabla I-1: Fechas de medición de solevantamientos V-102.....	9
Tabla I-2: Estimación de solevantamientos a largo plazo.....	11
Tabla I-3: Fechas de medición de solevantamientos V-401A/B.....	12
Tabla I-4: Estimación de solevantamientos a largo plazo V-401.....	14
Tabla I-5: Estimación de solevantamientos a largo plazo V-401B.....	15
Tabla I-6: Cálculo de parámetros del plano de giro medio.....	21
Tabla I-7: Parámetros de solevantamiento de los estanques de la planta.....	23
Tabla I-8: Valores admisibles para el giro de estanques.....	24
Tabla II-: Expansión de suelos por derrames ácidos.....	28
Tabla II-2: Descripción estratigráfica.....	36
Tabla II-3: Análisis granulométrico NCh3236.Of2010.....	38
Tabla II-4: Resultados de ensayos de laboratorio.....	38
Tabla II-5: Resultados de ensayos químicos.....	38
Tabla III-1: Registro de datos obtenidos para expansión libre.....	50
Tabla III-2: Deformaciones máximas en 36 horas.....	52

## INDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1.1: Solevantamiento en estanque V-102.....	9
Figura 1.2: Solevantamiento en estanque V-401A.....	13
Figura 1.3: Solevantamiento en estanque V-401B.....	13
Figura 1.4: Ubicación de estanque y zona de derrame.....	13
Figura 1.5: Fotografía Calicata 001.....	16
Figura 1.6: Fotografía Calicata 002.....	17
Figura 1.7: Fotografía Calicata 003 (T-201).....	17
Figura 1.8: Fotografía Calicata 004.....	18
Figura 1.9: Plano medio de giro.....	19
Figura 1.10: Asentamientos totales.....	19
Figura 1.11: Asentamientos diferenciales.....	21
Figura 1.12: Niveles de medición en los estanques.....	22
Figura II.1: Anhidrita.....	30
Figura II.2: Transformación de anhidrita a yeso.....	31
Figura II.3: Soluciones preparadas con ácido sulfúrico.....	33
Figura II.4: Solevantamientos en el tiempo.....	34
Figura II.5: Excavación de reconocimiento “Calicata N°1”.....	37
Figura II.6: Dispositivo de expansión casero.....	39
Figura II.7: Corrosión del ácido sobre el metal.....	41
Figura II.8: Arena limosa seleccionada bajo malla N°10.....	42
Figura II.9: Muestra post-ensayo.....	43
Figura III.1: Gráfica de expansión libre.....	51
Figura III.2: Gráfica de expansión bajo carga axial.....	52
Figura III.3: Relación de solevantamiento instantáneo.....	53
Figura III.4: Influencia de la densidad en la expansión.....	54
Figura IV.1: Fundación anular de estanque de almacenamiento.....	56
Figura IV.2: Diagrama paramétrico para ábaco de cálculo de fundación anular.....	58

## RESUMEN

El fenómeno de la expansión de suelos que en su conformación mineralógica presentan compuestos cálcicos, al ser inundados por derrames ácidos, constituye uno de los problemas que se han presentado con frecuencia en la gran minería de nuestro país, levantando diferentes estructuras y, típicamente, estanques de almacenamiento de ácido. La información con la que se cuenta acerca de estos sollevamientos es muy escasa, y corresponde en su mayoría a datos históricos de orden topográfico que han permitido ir modelando este fenómeno a lo largo del tiempo.

En este trabajo se presenta una descripción documentada de algunos casos registrados en la minería de nuestro país, ofreciendo una batería de datos históricos y una modelación a largo plazo para los sollevamientos producidos por derrames de ácido sulfúrico. Más adelante se presenta una descripción físico-química del proceso de expansión y se sientan las bases para la ejecución de ensayos de laboratorio que permitan modelar las expansiones instantáneas, es decir, dentro de las primeras 36 horas después de la inundación de las muestras, caracterizando completamente la arena limosa, el óxido de calcio (Ca) y las concentraciones de ácido sulfúrico a utilizar en los diferentes experimentos.

En la última parte de este trabajo se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos de expansión libre y bajo carga, realizados en un consolidómetro sobre muestras de arena limosa con cal inundadas con solución ácida al 15%.

Se concluye presentando una aplicación práctica acerca de la estimación del asentamiento y la capacidad de soporte en un estanque de almacenamiento de ácido sulfúrico con fundación anular, y la influencia que podría tener a corto plazo un derrame ácido en la magnitud de estos parámetros.

## ABSTRACT

The phenomena of expansion of soils that present calcium compounds within its mineralogical conformation, when being flooded by acid spills, is one of the frequent problems in the great mining of our country when lifting different structures and, typically, acid storage tanks. The information available on these soil lifting is very scarce, and it corresponds mostly to historical data based on topographic surveys that has allowed us modeling this phenomenon over time.

In this paper it is presented a documented description of some cases recorded in mining activity of our country offering both a set of historical data and a long-term modeling for expansions produced by sulfuric acid spills. A physicochemical description of the expansion process is analyzed as well as preliminary laboratory tests protocols to model instantaneous expansions, namely, among the first 36 hours after flooding occurs on samples, completely characterizing both silty sand and calcium oxide (Ca) and estimating sulfuric acid concentrations to be used in different tests.

The last part of this work presents the results, carried out in a consolidometer, from testing free and loaded (or constrained) expansion on samples of silty sand with calcium oxide flooded with a 15% acid solution.

It concludes by presenting a practical application regarding a sulfuric acid storage tank with annular foundation, where settlement and bearing capacity of soil are analyzed in a short-term basis when an acid spill occurs.

## **I. PRIMERA PARTE: ANTECEDENTES GENERALES**

### **I.1 Introducción**

Las plantas de ácido que operan en los grandes procesos mineros, sus líneas de ácido producto, los estanques de almacenamiento, las plantas de lixiviación de minerales, las refinерías electrolíticas y en general las plantas que usan ácido sulfúrico en sus procesos, están expuestas al riesgo de derrames ácidos por roturas de cañerías, válvulas en mal estado, sobre llenado de estanques, y filtraciones del proceso. Cuando estas soluciones ácidas penetran en el suelo reaccionan químicamente con algunas sustancias y minerales cálcicos presentes en este último, produciendo importantes expansiones en el tiempo capaces de levantar grandes estructuras.

El ácido sulfúrico presente en los procesos mineros se puede encontrar almacenado en estanques en estado puro (95%), o bien diluido en agua en proporciones que pueden variar típicamente desde un 15% hasta un 30% en volumen (soluciones ácidas).

Por todo lo anterior, parte integral de esta investigación estará referida a la respuesta de suelos típicos de la gran minería del norte de nuestro país, en términos de deformación y presiones generadas, para distintas concentraciones de calcio en el suelo y ácido sulfúrico en las soluciones derramadas.

#### **I.1.1 Descripción del proceso expansivo**

El proceso expansivo que experimentan los suelos contactados con derrames de ácido sulfúrico tiene sustento en las reacciones químicas que suceden cuando éste último penetra en la masa de suelo. Para que se desencadenen estas reacciones expansivas por efecto del contacto con ácido sulfúrico, el suelo necesariamente debe estar compuesto

por óxido de calcio (Cal) o “Anhidrita”, ya sea en su conformación mineralógica o como elemento añadido. Estos compuestos químicos serán caracterizados en el Capítulo II.

“Si el ácido penetra al subsuelo, traspasando las capas protectoras, se produce una reacción con la cal, con el carbonato de calcio presente en las especies mineralógicas, o con la cal que eventualmente se incorpora para neutralizar los derrames (subir el pH) generando expansiones en la masa del suelo inundado.” (Latorre, 2013)

“La reacción de carácter expansiva se explica básicamente en la formación de yeso al interior de la masa de suelo, produciéndose en esta reacción aumentos volumétricos que pueden llegar al 60%.” (J.M del Campo, 2012)

En este estudio se pretende estudiar las reacciones químicas que fundamentan el proceso expansivo y determinar las variables básicas que influyen, y en qué medida, en el fenómeno expansivo.

## **I.2 Presiones Generadas en Estructuras Apoyadas sobre Suelos Contactados con Ácido Sulfúrico**

Sin duda, aquí se concentra el interés de este trabajo. Como se verá más adelante no son pocos los casos en que a causa de los derrames ácidos ocurridos en los procesos mineros, sobre todo en el norte del país donde se pueden encontrar matrices mineralógicas que contienen óxido de calcio o directamente “anhidrita”, se han producido sollevamientos del terreno capaces de levantar estructuras pesadas de hormigón, y eventualmente producir daños en los cimientos de las mismas. Es un hecho que en la literatura no se encuentran estimaciones acerca de la magnitud de las presiones que se pueden presentar con ocasión del fenómeno expansivo en estudio.

“En efecto, no se conocen teorías para estimar las presiones que se ejercen durante un proceso de contaminación de suelos, sin embargo sabemos que se han levantado estructuras muy rígidas de hormigón y estanques pesados, aun con pequeñas filtraciones. Si analizamos el problema en términos de módulos de elasticidad

podemos establecer que en sollevamientos medidos de 30 cm para espesores de 3 m de suelo contaminado, el valor de la deformación unitaria es del 10%, y considerando un módulo de elasticidad de 500 kg/cm<sup>2</sup>, la presión ejercida es de 50 kg/cm<sup>2</sup>, valor muy alto que explicaría por qué los procesos de derrame de ácido sulfúrico en el suelo levantan cualquier estructura.” (Latorre, 2013)

En este trabajo se pretende realizar pruebas de laboratorio que apuntan a estimar la magnitud de los sollevamientos y las presiones que se ejercen en el proceso expansivo para ciertas condiciones bien definidas, y considerando un material areno limoso que es el que comúnmente se encuentra en las instalaciones mineras del norte del país.

### **I.3 Casos Históricos en la Minería Chilena**

A continuación se analizarán algunos casos de derrames ocurridos en instalaciones mineras ubicadas en el norte del país, en que el manejo, traslado y almacenamiento del ácido sulfúrico de proceso, hace probable la ocurrencia de derrames que penetran en el subsuelo. Dada la naturaleza constitutiva de los suelos de la zona norte en que se desarrollan estas actividades mineras y las características o niveles de derrame, este proceso expansivo es muy lento, y por ende, los datos recabados y expuestos en este documento son tan escasos como valiosos.

Para hacer una estimación de los sollevamientos remanentes, en general se recurre a información topográfica histórica de algunos derrames ocurridos y documentados en instalaciones mineras de proceso, tales como un terminal de carguío, y estanques de una planta de ácido.

Por ahora la idea es mostrar la magnitud que puede alcanzar en el tiempo este fenómeno expansivo en los suelos contactados, y más adelante estimar de qué manera se puede ver acelerado el proceso expansivo en suelos con altas concentraciones de

óxido de calcio. También resulta muy interesante revisar los modelos que se pueden consultar para estimar el desarrollo de las expansiones en el tiempo, y como analizar los efectos adversos que se producen sobre las estructuras apoyadas sobre suelos contactados, particularmente para el caso de estanques de almacenamiento.

### **I.3.1 Estimación de la expansión a largo plazo**

En un terminal de carguío de ácido sulfúrico para camiones y ferrocarril, existían dos estanques de ácido de 10 (k-Ton,) que fueron controlados a partir del 15 de diciembre de 1992 a raíz de un derrame ocurrido alrededor de esa fecha. Posteriormente se realizaron una serie de mediciones de nivel. Alrededor de fines de septiembre de 1994 se produce un segundo derrame y se monitorea el día 04 de octubre de 1994 (día 659). Estos estanques están apoyados en un relleno compactado de aproximadamente 3 m de profundidad, que corresponde a una arena con gravas y finos limosos que provienen de los botaderos de lastre de la mina.

A continuación se muestran las fechas en que se realizaron las mediciones de solevantamientos en los estanques V-102 y V-103, del terminal de carguío de ácido sulfúrico.

Tabla I-1: Fechas de medición de solevamientos V-102

Fecha	Tiempo (Días)
15-12-1992	1
08-05-1993	145
04-10-1994	659
01-02-1995	779
28-12-1999	2.570
29-02-2000	2.633
28-03-2000	2.661
28-04-2000	2.692
29-05-2000	2.723
30-04-2001	3.059
08-11-2005	4.712

Las mediciones realizadas se encuentran resumidas en la siguiente gráfica para el estanque V-102.

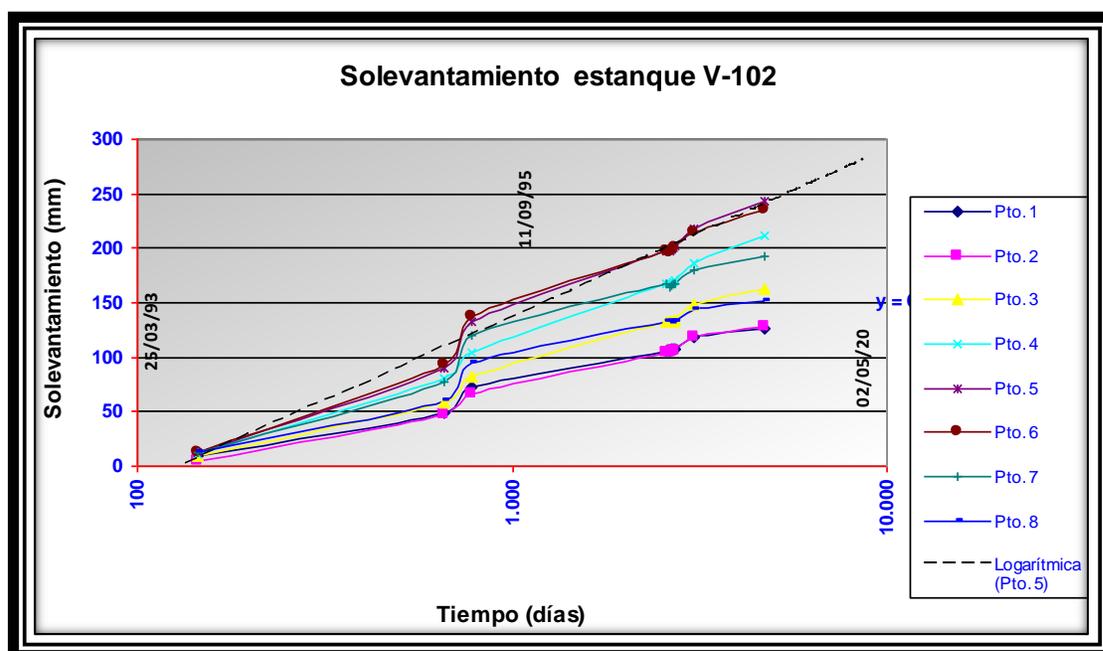


Figura I-1: Solevamiento en estanque V-102

En la gráfica expuesta anteriormente se puede apreciar la evolución de la expansión en el tiempo, conforme se suceden los derrames ácidos indicados en la gráfica. Es necesario aclarar que las distintas distribuciones del sollevamiento en el tiempo que se encuentran indicadas en el gráfico, corresponden a diferentes puntos de medición ubicados en distintas posiciones con respecto a la localización del derrame. De esta manera, es claro que la distribución de los sollevamientos correspondientes al punto de medición (Pto.6) corresponde a los de la zona más cercana al derrame. De igual manera, los sollevamientos de la distribución del punto de medición (Pto.2) corresponden a los de la zona más alejada del derrame.

Del desarrollo de gráficas como la anterior, se han desarrollado modelos logarítmicos para describir el proceso de expansión por derrames de ácido sulfúrico. El proceso expansivo generado por un derrame tiene un efecto instantáneo producto de la reacción con la fracción fina del suelo, y un proceso en el tiempo debido al ataque del ácido a las fracciones más gruesas del mismo.

La expresión del sollevamiento generado por un derrame ácido es de la forma (Latorre, 2009):

$$S = a + b \cdot \ln(t) \quad (1.1)$$

S: Sollevantamiento en (mm)

t : Tiempo en (días)

Este modelamiento será analizado con detalle en el desarrollo de capítulos posteriores. Por ahora resulta interesante revisar las expresiones obtenidas para el estanque V-102 del terminal de carguío, tanto en puntos cercanos como lejanos del sector del derrame.

a) Estanque V-102 (zona cercana al derrame)

$$S = 53.65 \cdot \ln(t) - 222.79 \quad (1.2)$$

b) Estanque V-102 (zona alejada del derrame)

$$S = 33.96 \cdot \ln(t) - 160.44 \quad (1.3)$$

Según estos resultados, se pueden esperar expansiones del orden porcentual indicado en la siguiente tabla, considerando que el estrato en estudio es de 3m de espesor:

Tabla I-2: Estimación de solevamientos a largo plazo

Período	Tiempo (días)	Solev. (cm)	Expansión
3 meses	90	2	1%
6 meses	180	6	2%
1 año	365	9	3%
5 años	1825	18	6%
10 años	3650	22	7%
20 años	7300	25	8%

Se debe tener en consideración que existe una reacción “instantánea” con la fracción fina del suelo contactado, que más bien debería ser evaluada por métodos experimentales. Las expresiones obtenidas en a) y b) cobran importancia en la estimación de las expansiones en el tiempo.

### I.3.2 Derrame sobre suelo tratado con cal

Los tratamientos de suelo con cal son comúnmente realizados con la finalidad de secar, modificar y/o estabilizar algunas de sus propiedades, y también para neutralizar su pH. En efecto, el grado de alcalinidad o acidez del terreno es un parámetro a tener en consideración para los elementos estructurales de hormigón que estarán en contacto con el suelo.

“Debe reconocerse, no obstante, que solamente los suelos con un contenido en materia orgánica coloidal muy alto, el grado de acidez es tal que pueden considerarse

susceptibles de generar un ataque al hormigón, y que en cualquier caso se trata de un ataque débil” (Franch, 2013)

Ahora presentaremos el análisis de los estanques denominados V401-A/B, que presentan diferencias sustantivas con el caso analizado anteriormente, ya que los solevantamientos tienen una magnitud mucho mayor que en los estanques del terminal de carguío debido a que el proceso de neutralización del terreno del sector se hizo con cal viva (óxido de calcio), que produce expansiones adicionales a las que suceden a partir de las fases mineralógicas del suelo.

“Esta información es útil por dos motivos, en primer lugar para dimensionar el efecto de un método de neutralización inadecuado y en segundo lugar para determinar el potencial de expansiones al que puede llegar un suelo por derrames ácidos” (Latorre 2009).

En el análisis este caso, se verá que resulta altamente recomendable realizar ensayos a los suelos de un sector expuesto al riesgo de derrames, para determinar el mejor método para neutralizarlos (y no necesariamente con cal).

Las fechas en que se realizaron las mediciones topográficas en los estanques V-401-A/B se encuentran registradas en la siguiente tabla:

Tabla I-3: Fechas de medición de solevantamientos V-401A/B

Fecha	Tiempo (Días)
30-05-1995	1
23-01-1998	970
08-07-1998	1.136
26-08-1998	1.185
27-11-1998	1.278
13-09-2000	1.934

El derrame de ácido esta vez se produjo alrededor del 21 de septiembre de 1997, que corresponde al día 845 desde el comienzo del monitoreo de niveles. Los valores de los solevamientos medidos se muestran en los siguientes gráficos:

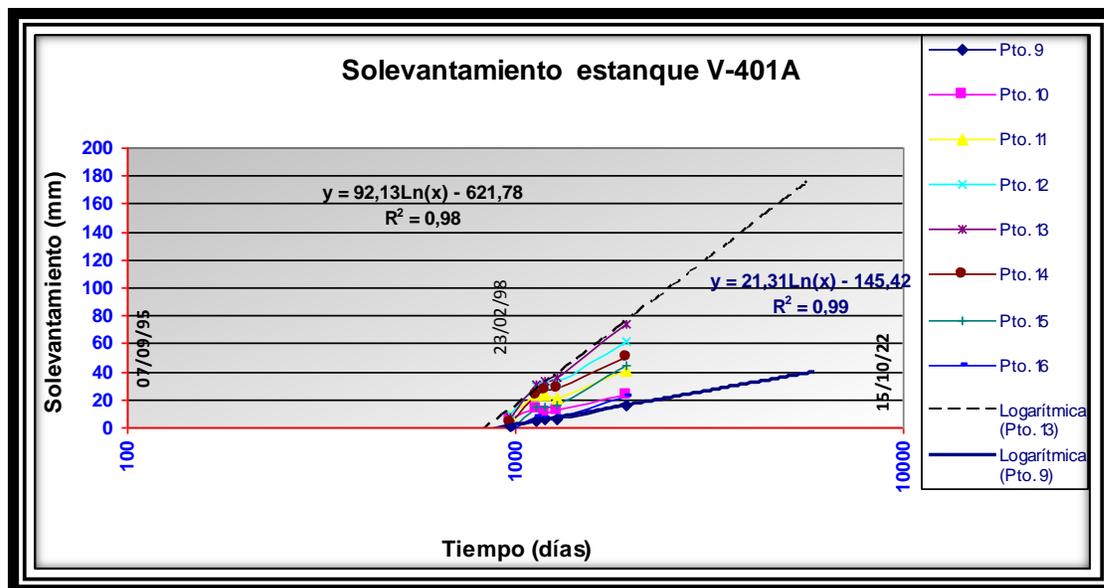


Figura I-2: Solevamiento en estanque V-401A

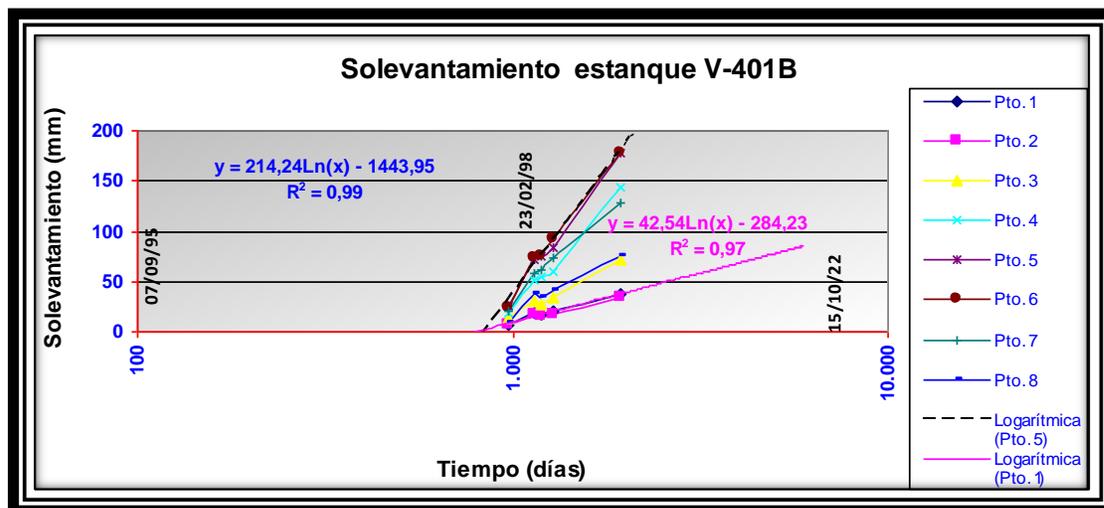


Figura I-3: Solevamiento en estanque V-401B

De las gráficas expuestas anteriormente se obtienen las correlaciones logarítmicas para estimar los solevantamientos en el tiempo, para los puntos relevantes de cada uno de los estanques monitoreados:

a) Estanque V-401 A (zona cercana al derrame)

$$S = 92.13 \cdot \ln(t) - 621.78 \quad (1.4)$$

b) Estanque V-401 A (zona alejada del derrame)

$$S = 21.31 \cdot \ln(t) - 145.42 \quad (1.5)$$

a) Estanque V-401 B (zona cercana al derrame)

$$S = 214.24 \cdot \ln(t) - 1443.95 \quad (1.6)$$

b) Estanque V-401 B (zona alejada del derrame)

$$S = 42.54 \cdot \ln(t) - 284.23 \quad (1.7)$$

En este caso, se pueden esperar expansiones del orden porcentual indicado en la siguiente tabla, considerando que un estrato de 3m de espesor:

Tabla I-4: Estimación de solevantamientos a largo plazo V-401A

ESTANQUE V-401 A		Zona cercana al derrame		Zona alejada del derrame	
Período	Tiempo (días)	Solev. (cm)	Expansión	Solev. (cm)	Expansión
3 meses	90	1	0.3%	0	0.0%
6 meses	180	2	0.6%	0	0.1%
1 año	365	3	1.1%	1	0.2%
5 años	1825	11	3.5%	2	0.8%
10 años	3650	15	5.1%	3	1.1%
20 años	7300	21	6.9%	5	1.5%

Tabla I-5: Estimación de solevantamientos a largo plazo V-401B

ESTANQUE V-401 B		Zona cercana al		Zona alejada del	
Período	Tiempo (días)	Solev. (cm)	Expansión	Solev. (cm)	Expansión
3 meses	90	2	0.7%	1	0.2%
6 meses	180	4	1.4%	1	0.4%
1 año	365	8	2.6%	2	0.6%
5 años	1825	25	8.2%	5	1.7%
10 años	3650	36	11.9%	7	2.5%
20 años	7300	49	16.2%	10	3.3%

### I.3.3 Análisis del efecto de solevantamientos en estanques de almacenamiento

Un caso importante de registro de solevantamientos producidos por derrames ácidos en la minería de nuestro país se obtiene del monitoreo realizado en las instalaciones de una planta de ácido, cuyos primeros registros topográficos datan de 1945. Lógicamente, se asume que las cotas de construcción fueron las señaladas en los planos de proyecto.

A continuación se presenta un esquema referencial de la planta, y de la ubicación de los estanques con respecto a la zona de derrame.

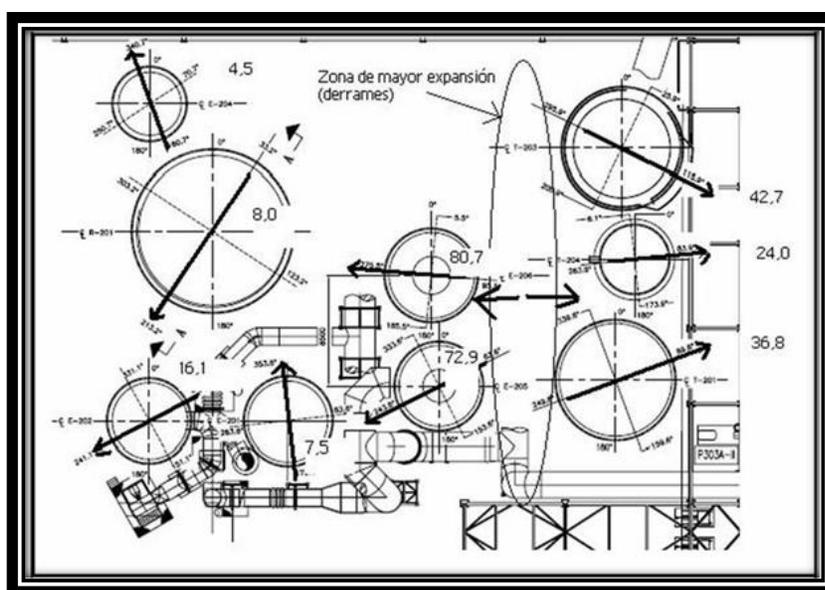


Figura I-4: Ubicación de estanques y zona de derrame

En el año 2009 se realizó una exploración destinada a conocer el grado de contaminación de los suelos del sector y su compacidad, ya que las restantes características (granulométricas, plasticidad, etc.) y los distintos estratos que se presentan en la planta se consideraron conocidos, de acuerdo a los antecedentes recabados en campañas anteriores.

En las próximas fotografías, se muestran las calicatas excavadas (superficiales) y la magnitud de la contaminación ácida por derrame.



Figura I-5: Fotografía calicata 001



Figura I-6: Fotografía calicata 002



Figura I-7: Fotografía calicata 003 (T-201)



Figura I-8: Fotografía calicata 004

En esta ocasión se presentará el análisis realizado para evaluar los efectos de los sollevamientos registrados a causa de los derrames ocurridos en la planta, mediante una metodología que define un plano medio de giro para estanques de sección circular, con respecto al cual se pueden determinar el sollevamiento promedio y los sollevamientos fuera del plano, parámetros que tienen tolerancias definidas al momento de evaluar el daño potencial sobre los estanques.

Para el análisis de los efectos de los sollevamientos en los estanques metálicos cilíndricos, se debe hacer una evaluación preliminar, partiendo por el cálculo del plano medio de giro. Para el cálculo del plano medio de giro se recomienda ubicar puntos de control de nivelación topográfica en el perímetro del estanque, en puntos que se puedan comparar. Es recomendable tomar 16 o 32 puntos, partiendo desde el norte, con un mínimo de 8 puntos. Adicionalmente se recomienda tomar niveles en puntos

de control en el interior del estanque y cada vez que se haga un mantenimiento e inspección del interior:

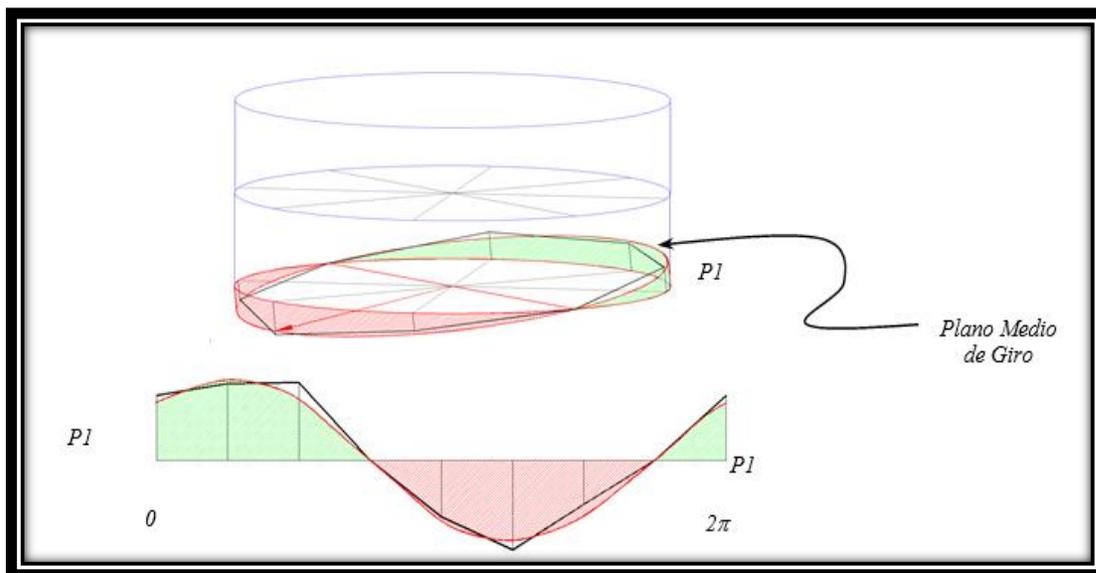


Figura I-9: Plano medio de giro

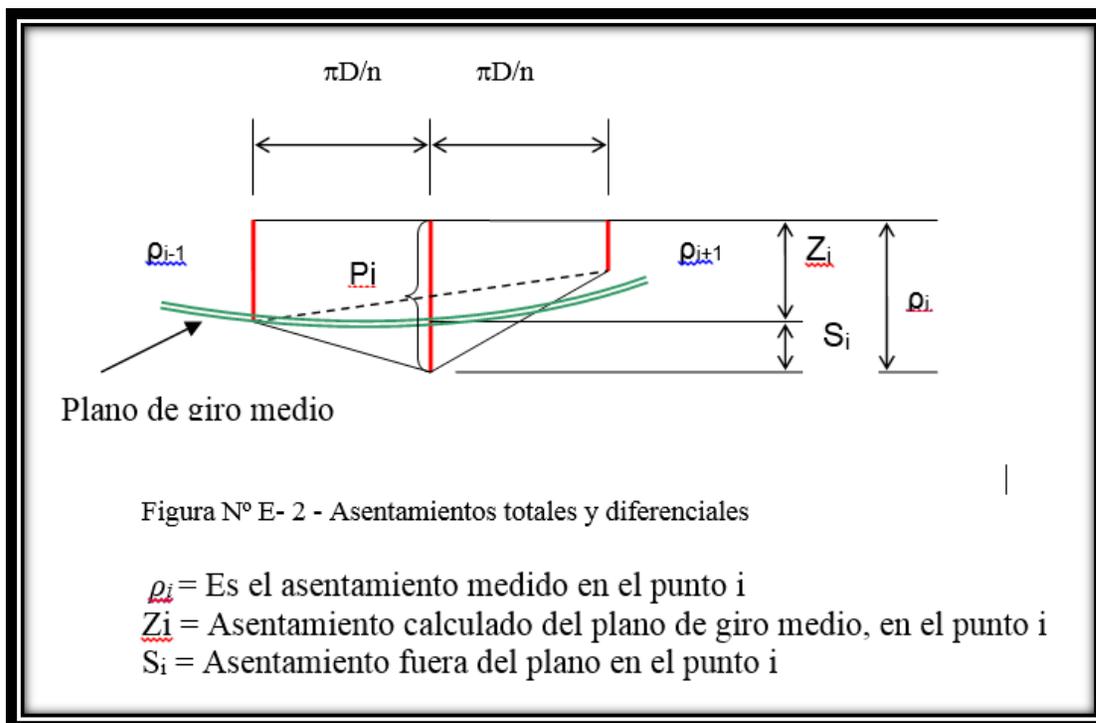


Figura I-10: Asentamientos totales

Una expresión aproximada para obtener los puntos pertenecientes al plano de giro medio, mediante un polinomio trigonométrico es la siguiente, donde “n” representa el número de puntos equidistantes de control de solevamientos en el perímetro del estanque:

$$Z_i(\varphi_i) = A_0 + A_1 \cdot \sin(\varphi_i + \beta') \quad (1.8)$$

$$i = 1..n$$

Esta expresión nos entrega los solevamientos calculados en función de la posición angular ( $0 \leq \varphi_i \leq 2\pi$ ), como puntos pertenecientes a un disco que se puede mover verticalmente y girar. En efecto, el coeficiente  $A_0$  representa el solevamiento vertical promedio y  $A_1$  la máxima amplitud vertical del giro, medidos en cada punto de control del plano medio. Estos coeficientes se calculan como sigue:

$$A_0 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \rho_i \quad (1.9)$$

$$A_1 = \frac{2}{n} \cdot \left[ \sqrt{\left( \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot \cos(\phi_i) \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot \text{sen}(\phi_i) \right)^2} \right] \quad (1.10)$$

$$\beta = -\arctan \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i \cdot \text{sen}(\phi_i)}{\sum_{i=1}^n \rho_i \cdot \cos(\phi_i)} \right] \quad (1.11)$$

El análisis de asentamientos (o solevamientos) diferenciales quedan definidos según las siguientes expresiones:

$$\Delta S_i = \text{abs}(S_i - S_{i-1}) \quad (1.12)$$

$$\delta_i = \text{abs}\left(S_i - \frac{S_{i-1} + S_{i+1}}{2}\right) \quad (1.13)$$

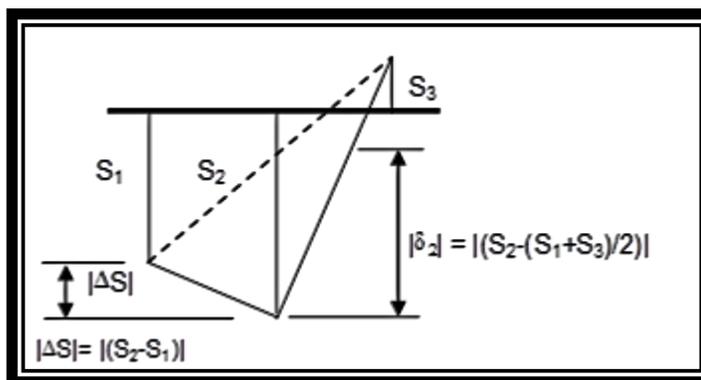


Figura I-11: Asentamientos diferenciales

De esta manera, como se muestra a continuación para el estanque E-201, se comienza por registrar los levantamientos medidos en cada uno de los puntos definidos (12), equidistantes entre ellos, a partir de la cota referencial definida por el proyecto original. Posteriormente se determinan los ángulos correspondientes a cada punto y se inicia el proceso de cálculo de  $Z_i(\varphi_i)$  y  $S_i(\varphi_i)$  – desplazamientos fuera del plano medio de giro en el punto “i”- utilizando las expresiones señaladas anteriormente. A continuación de muestra una tabla resumen con los resultados obtenidos para el estanque E-201.

Tabla I-6: Cálculo de parámetros del plano de giro medio

PUNTO	ÁNG. (°)	ANG. (rad)	$\rho_i$ (mm)	$\rho_i \sin \Phi_i$	$\rho_i \cos \Phi_i$	$Z_i$ (mm)	$S_i$ (mm)	$\Delta S_i$ (mm)	$\delta_i$ (mm)
1	0	0.00	64	0.00	64.00	68.4	-4.4	4	6
2	30	0.52	73	36.50	63.22	69.8	3.2	8	5
3	60	1.05	69	59.76	34.50	72.9	-3.9	7	9
4	<b>90</b>	1.57	84	84.00	0.00	76.7	<b>7.3</b>	<b>11</b>	<b>10</b>
5	120	2.09	78	67.55	-39.00	80.4	-2.4	10	5
6	150	2.62	80	40.00	-69.28	82.8	-2.8	0	1
7	180	3.14	83	0.00	-83.00	83.4	-0.4	2	1
8	210	3.67	85	-42.50	-73.61	82.0	3.0	3	4
9	240	4.19	77	-66.68	-38.50	78.9	-1.9	5	3
10	270	4.71	75	-75.00	0.00	75.1	-0.1	2	0
11	300	5.24	74	-64.09	37.00	71.4	2.6	3	3
12	330	5.76	69	-34.50	59.76	69.0	0.0	3	5

B	6.4 (°)	0.11157573 rad	
B'	-83.6 (°)	-1.45842427 rad	
n	12 adim		
A0	75.9 (mm)		
A1	7.5 (mm)		

**Nota. Base de cálculo en anexo**

De acuerdo a los cálculos realizados se obtiene que los parámetros de solevamiento promedio y amplitud de giro en el estanque son  $A_0 = 75.9$  (mm) y  $A_1 = 7.5$  (mm).

Las mediciones realizadas sobre los estanques de la planta están referidas a las placas de contacto o a los machones de los estanques, tal como se indica en la siguiente figura:

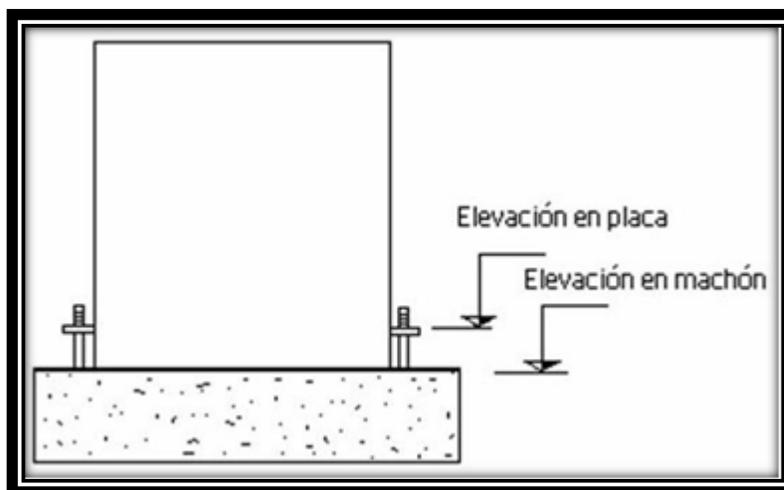


Figura I-12: Niveles de medición de los estanques

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los estanques de la planta, con los parámetros de solevamiento medidos con respecto a las cotas referenciales de proyecto.

Tabla I-7: Parámetros de solevantamiento de los estanques de la planta

Estanque	Cota referencia	$A_0$	Cota promedio	$A_1$	Ubicación	S	Ubicación	Observaciones
	(4)	(5)	(1)		Mínimo (2)		S máx (3)	
	(msnm)	(mm)	(mm)	(mm)	(°)	(mm)	(°)	
E-201	2.716,500	75,9	2.716.575,9	7,5	353,6	7,2	90	machón
E-202	2.716,500	82,7	2.716.582,7	16,1	241,1	16,0	150	machón
E-204	2.716,550	60,6	2.716.610,6	4,5	340,7	7,2	60	machón
E-205	2.716,550	89,3	2.716.639,3	72,9	243,6	4,6	120	machón
E-206	2.716,550	115,7	2.716.665,7	80,7	275,5	6,2	30	machón
R-201	2.716,500	80,7	2.716.580,7	8,0	213,2	8,7	126	machón
T-201	2.717,350	74,7	2.717.424,7	36,8	69,6	3,7	126	Placa
T-203	2.716,850	87,1	2.716.937,1	42,7	115,9	4,1	60	Placa
T-204	2.718,450	82,5	2.718.532,5	24,0	83,9	15,1	0	Placa

(1) Cota promedio es la cota de referencia más el valor  $A_0$  (solevantamiento promedio)

(2) Ubicación del punto de menor cota medido en el sentido de los punteros del reloj a partir del punto 1 ubicado al Norte.

(3) Ubicación del punto con mayor asentamiento fuera del plano.

(4) Cota de referencia según Plano topográfico de medición de niveles.

(5)  $A_0$ . Nivel promedio del estanque medido a partir de la cota de referencia.

Los parámetros que comúnmente se controlan para conocer los efectos de los solevantamientos sobre los estanques cilíndricos se describen a continuación.

#### I.3.3.1 Descenso o solevantamiento uniforme ( $A_0$ )

En este patrón de asentamiento (o solevantamiento), todo baja (o sube) en forma pareja.

Puede causar daños a las conexiones de las cañerías de entrada y salida debido a que se producen asentamientos diferenciales entre el manto y los soportes externos de las cañerías o ductos.

“En general tienen poco interés en la ingeniería estructural, siempre que las conexiones de entrada y salida sean flexibles o existan juntas de expansión que puedan absorber toda la deformación.” (Latorre, 2009)

#### I.3.3.2 Giro plano ( $A_1$ )

En el cual el estanque gira como un cuerpo rígido, tiene relativamente poca importancia estructural: reduce la capacidad del estanque, altera la forma de la superficie del fluido (en el caso de estanques de almacenamiento de fluidos) e introduce tensiones adicionales en el manto. Las causas típicas de este tipo de asentamiento, se encuentran en una variación lineal del espesor de algún estrato compresible de suelo o a un

derrame en el cual se produce un mayor asentamiento o solevantamiento en el sector donde se origina el derrame, como en el caso en estudio.

Se recomienda que  $A_1 \leq D/200$  ( $D$  = Diámetro del estanque), principalmente por razones estéticas. Por el mismo motivo, también se recomienda que el movimiento horizontal a la altura del techo no sea mayor a 30 cm. (Latorre, 2009)

En la siguiente tabla se muestra el giro de los estanques y en ella se puede ver que los estanques E-205, E-206 y T-203 presentan giros superiores a los recomendados.

Tabla I-8: Valores admisibles para el giro de estanques

Estanque	$A_1$	$\phi /200$	$A_1 < \phi/200$
	(mm)	(mm)	
E-201	7,5	31,0	OK
E-202	16,1	31,0	OK
E-204	4,5	27,0	OK
E-205	72,9	37,0	NOK
E-206	80,7	39,0	NOK
R-201	8,0	30,0	OK
T-201	36,8	44,5	OK
T-203	42,7	38,5	NOK
T-204	24,0	28,0	OK

El giro plano produce asentamientos diferenciales entre el manto del estanque y los soportes de cañerías o ductos, causando rotura de las líneas de entrada y salida. Este movimiento genera tensiones adicionales en el manto en los puntos de unión de las cañerías o ductos. Al igual que en el caso del asentamiento uniforme se soluciona disponiendo juntas de dilatación en las conexiones de Entrada y Salida.

### I.3.3.3 Asentamiento fuera del Plano ( $S_f$ )

Se produce un asentamiento variable a lo largo del manto. En general se debe a la diferencia de espesores o espesores variables de estratos de suelo o variaciones de

compresibilidad o a una mayor cantidad de líquido derramado en un punto. En general en este patrón de asentamientos o sollevamientos, se produce una “ovalidad” del manto que tiene importancia en estanques cónicos de techo flotante. En el caso de estanques de techo fijo, se pueden producir tensiones excesivas que causen la ruptura del manto.

Este patrón de asentamientos es muy relevante en estanques que llevan un revestimiento rígido interior, por ejemplo en base a ladrillos, que tienen poca capacidad de absorber este tipo de movimientos, causando grietas en el revestimiento, que a su vez produce filtraciones. Desde el punto de vista estructural este es el patrón que más tensiones genera en el manto. Se recomiendan los siguientes valores máximos de asentamiento fuera del plano, definidos a partir del diámetro ( $D$ ) del estanque (Latorre 2009):

$$S_{m\acute{a}x} \leq 4 \text{ cm}, \text{ si } D \leq 50\text{m} \quad (1.14)$$

$$S_{m\acute{a}x} \leq 6 \text{ cm}, \text{ si } D > 50\text{m} \quad (1.15)$$

Ninguno de los estanques alcanza valores cercanos a 40 mm de asentamiento fuera del plano.

#### **I.4 Expectativas de Respuesta del Estudio**

A la luz de los casos presentados anteriormente, y dado que el análisis del fenómeno expansivo en el tiempo requiere del monitoreo durante muchos años, además de encontrarse ya razonablemente modelado, se plantea realizar un estudio de la expansión inicial o “inmediata” en la que participan principalmente los granos finos de los suelos que se pueden encontrar en la gran minería del norte de nuestro país. Naturalmente este estudio pretende estimar la extensión del período en que puede ser

considerado como de reacción “inmediata” tras un derrame, si las condiciones experimentales lo permiten, y más aún la magnitud porcentual que podría alcanzar la expansión “inmediata” y las presiones que podrían generarse en el solevantamiento de estructuras, dependiendo de la constitución de los suelos contactados y de la solución ácida considerada en el ataque. Lógicamente, por las condiciones de seguridad experimental que deben mantenerse para el trabajo a realizarse en laboratorio, se desestimaré el análisis del ataque con ácido sulfúrico en estado puro.

Por último también se pretende contribuir con algunas recomendaciones prácticas al momento estudiar la ubicación y/o emplazamiento de estanques contenedores de ácido sulfúrico.

## II. SEGUNDA PARTE: ANÁLISIS DEL PROCESO EXPANSIVO

A continuación se aborda el proceso químico y físico que tiene lugar cuando soluciones ácidas compuestas por algún porcentaje de ácido sulfúrico inundan matrices de suelo, especialmente de composición cálcica, produciendo expansiones en el mismo que pueden derivar en el solevantamiento de estructuras existentes.

En forma ordenada se realiza un análisis detallado de las reacciones y los factores que tienen lugar en el proceso químico, para continuar con la definición de los agentes materiales que participarán en el fenómeno expansivo en estudio.

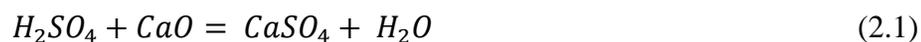
Por último, se orienta el desarrollo experimental al estudio de ciertas variables que tienen mayor influencia en el proceso de expansión “instantánea” de los suelos contactados, considerando el acotado espectro de ensayos que se pueden realizar al respecto, en gran parte determinado por el alto poder corrosivo del agente contaminante.

### II.1 Análisis Físico y Químico del Fenómeno Expansivo

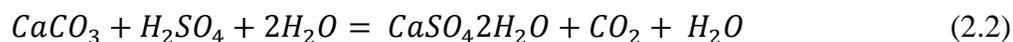
Si una solución ácida penetra al subsuelo, traspasando las capas protectoras, se produce una reacción con la cal ( $CaO$ ) o con el carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ) presentes en las especies mineralógicas o incorporado intencionalmente, formándose sulfato de calcio anhidro ( $CaSO_4$ ), también llamado “anhidrita” y agua.

A continuación se analizan las distintas reacciones químicas que pueden tener lugar originando el fenómeno expansivo en estudio.

- La solución ácida reacciona con la cal de la siguiente manera:



- Con el carbonato de calcio se produce la siguiente reacción:



Posteriormente, la anhidrita y el agua continúan reaccionando formando yeso, o yeso hemihidratado:



Estas dos últimas reacciones presentan un carácter expansivo. La reacción estequiométrica implica una expansión entre reactantes y productos como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla II- 1: Expansión de suelos por derrames ácidos

	Anhidrita <b>CaSO<sub>4</sub></b>	+	Agua <b>1/2*H<sub>2</sub>O</b>	→	Yeso hemidratado <b>CaSO<sub>4</sub>*1/2H<sub>2</sub>O</b>
Peso gr/mol:	136,1416		9,00767		145,14927
Densidad gr/cm <sup>3</sup> :	3,9		1		2,32
Volumen cm <sup>3</sup> :	34,9		9,0		62,6
Volumen total cm <sup>3</sup> :			43,9		62,6
Expansión (%):					42,5

	Anhidrita <b>CaSO<sub>4</sub></b>	+	Agua <b>2*H<sub>2</sub>O</b>	→	Yeso <b>CaSO<sub>4</sub>*2H<sub>2</sub>O</b>
Peso gr/mol:	136,1416		36,03068		172,17228
Densidad gr/cm <sup>3</sup> :	3,9		1		2,32
Volumen cm <sup>3</sup> :	34,9		36,0		74,2
Volumen total cm <sup>3</sup> :			70,9		74,2
Expansión (%):					4,6

## II.2 La Anhidrita

La anhidrita es sulfato de calcio anhidro ( $CaSO_4$ ) y debe su nombre a la palabra griega “anhidros” que significa “sin agua”. Está formada por un 41% de  $CaO$  y un 59% de  $SO_3$ .

A pesar de ser minerales relativamente comunes, la presencia de sulfatos en el suelo no es muy frecuente por su facilidad de lavado, puesto que son compuestos de solubilidad relativamente alta y su acumulación efectiva sólo puede producirse bajo determinadas condiciones, entre ellas: abundancia de sulfatos en el entorno inmediato y en climas áridos o semi-áridos. En estas condiciones los sulfatos pueden acumularse en forma de costras o eflorescencias. La anhidrita es muy común en los depósitos de sal, aunque es difícil encontrarla bien cristalizada.

Cuando se contacta con agua, la anhidrita absorbe las moléculas de agua y forma yeso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ).

La anhidrita se presenta en rocas sedimentarias, ya sea en forma de nódulos o agregados cristalinos en el seno de capas de arcilla, o formando yesos o halitas. Se podría presentar en forma de capas masivas inter-estratificadas normalmente entre materiales arcillosos.

También puede aparecer anhidrita en forma de rellenos fisurales o venas en rocas más competente, representando en este caso un volumen muy pequeño del macizo rocoso (J.M. del Campo, 2012).

La anhidrita se puede reconocer principalmente por su aspecto compacto y su coloración, distinguiéndose del yeso porque es más dura y no desprende agua al calentarla.



Figura II-1: Anhidrita

El proceso de hidratación de la anhidrita es lento, puede llevar años. No obstante, cuando se trata de un inter-estratificado de arcillas y anhidrita, el proceso puede acelerarse. Esto es debido a que la arcilla facilita la canalización de agua hacia las capas de anhidrita, que son solubles y más permeables, lo que acelera la transformación del sulfato anhidro a sulfato dihidratado (yeso) lo que conlleva al hinchamiento de la capa de anhidrita (J.M. del Campo, 2012). A continuación se describe esquemáticamente el proceso físico-químico de la transformación de anhidrita a yeso.

	Anhidrita 1 mol CaSO <sub>4</sub>	+	Agua 2 mol 2 H <sub>2</sub> O	↔	Yeso 1 mol CaSO <sub>4</sub> ·2 H <sub>2</sub> O
G (g)	136.14		36.0		172.14
D (g/cm <sup>3</sup> )	2.95		1.0		2.32
V (cm <sup>3</sup> )	46.2		36.0		74.3
V (%)	100.0		77.9		160.8

$\text{CaSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2 \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$

Figura II-2: Transformación de anhidrita a yeso

El hinchamiento químico debido a la hidratación de la anhidrita para transformarse en yeso es un proceso “a largo plazo” comparado con la expansión que se produce en arcillas expansivas, y que podría alcanzar un incremento volumétrico del 60% (J.M. del Campo, 2012).

### II.3 Descripción del Agente Contaminante (Soluciones Ácidas)

Las soluciones ácidas que generalmente son almacenadas en estanques en los procesos mineros corresponden a ácido sulfúrico en estado puro (comúnmente con una pureza 95%), o bien en soluciones con concentraciones cercanas (o comparables) al 15%.

En cualquiera de ambos casos, los derrames ácidos pueden provocar expansiones al penetrar en el suelo, si éste último tiene una composición cálcica determinada.

El ácido sulfúrico se mezcla en todas proporciones con el agua (tiene gran avidez por ella), generando mucho calor durante la disolución. Como el agua es más ligera que el ácido, a la hora de hacer una disolución, nunca se verterá el agua sobre el ácido ya

que esta flotará en la superficie y el calor generado en la zona de contacto puede hacer hervir el agua y ser proyectada con fuerza y caliente produciendo quemaduras a la persona que hace la disolución. Para hacerlo, se debe verter el ácido sobre el agua lentamente y agitando, para garantizar la distribución del calor en toda la masa de la disolución.

De esta manera se han preparado soluciones al 1%, 3%, 5%, 10% y 15% para realizar nuestro estudio, de manera de poder determinar cuál es el porcentaje de ácido sulfúrico en solución que puede lograr reacciones expansivas en la muestra de suelo de la manera más segura posible. En efecto, se tiene que para estas concentraciones de ácido sulfúrico en solución acuosa, los posibles contactos de solución ácida de la piel pueden ser removidos mediante el lavado con agua potable en un tiempo razonable. En efecto, se debe considerar que el ácido es altamente agresivo a la piel y a los tejidos, produciendo quemaduras dolorosas y aplicado a los ojos puede producir ceguera aun en estado diluido.

El ácido sulfúrico es intensamente corrosivo y ataca prácticamente a todos los metales (dependiendo de su concentración), por lo que los recipientes que lo contengan deben ser cuidadosamente elegidos.

El vidrio es un material utilizado para contener ácido sulfúrico en todas sus concentraciones. En nuestro caso, para concentraciones menores al 20% el plástico y sus derivados suelen contenerlo adecuadamente.



Figura II-3: Soluciones preparadas con ácido sulfúrico

#### **II.4 Análisis del Proceso Expansivo en el Tiempo**

Cuando se produce un derrame, se genera una reacción inmediata entre el ácido sulfúrico y las especies mineralógicas superficiales, en consecuencia esta reacción será más importante mientras más finos tenga el suelo y mientras más alta sea la superficie específica de esta fracción fina ( $\text{cm}^2$  de superficie por gramo de suelo). Posteriormente se desarrolla una reacción que afecta a las fracciones más gruesas (arenas y gravas) y se desarrolla lentamente a través del tiempo y puede durar años (Latorre, 2009)

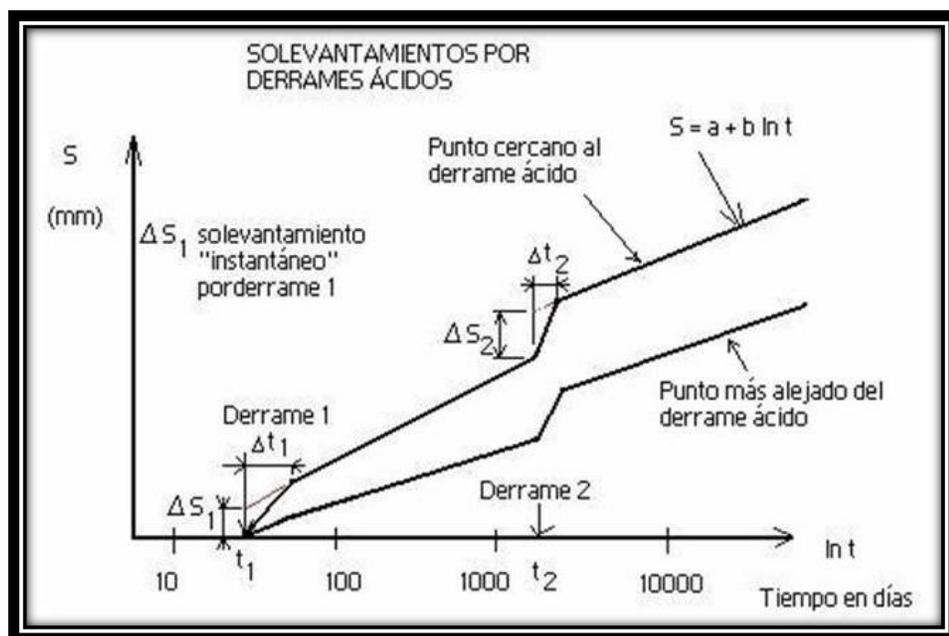


Figura II-4: Solevantamientos en el tiempo

En la figura se pueden observar dos curvas correspondientes a la evolución de los solevantamientos en el tiempo registrados en dos puntos, uno cercano a la zona del derrame y otro alejado de la zona del derrame que muestra solevantamientos menores.

La reacción con la cal presente en el suelo hace que el ácido se vaya “consumiendo” y por lo tanto cuando hay un nuevo derrame, se produce nuevamente una expansión “instantánea” y luego comienza nuevamente el proceso de ataque al interior de los granos de suelo, con una ley de expansión logarítmica, de la forma:

$$S(t) = a \cdot \ln(t) - b \quad (2.5)$$

## II.5 Caracterización del Material Areno Limoso a Utilizar en el Estudio

En este apartado se describe la caracterización del material areno limoso en estudio con el objetivo de definir las propiedades del mismo y considerar cuantitativamente

aquellas que tienen influencia en las expansiones que se pretenden medir y que serán consideradas en este estudio.

El material en estudio corresponde a contra muestras de arena limosa tomadas en una campaña de terreno dirigida a la elaboración de un estudio geotécnico para una empresa privada de la gran minería del cobre, en la segunda región del país. La campaña consistió en la ejecución de tres calicatas de hasta 7 m de profundidad, su descripción estratigráfica según los criterios establecidos en el Manual de Carreteras y la toma de muestras para la ejecución de ensayos de laboratorio. En la campaña, las calicatas se denominaron “Calicata N°1”, “Calicata N°2” y “Calicata N°3”. Las contra muestras que serán analizadas en este estudio, corresponden a la “Calicata N°1”, cuya descripción estratigráfica y fotografías se muestran a continuación:

Tabla II-2: Descripción estratigráfica

Proyecto:		Calicata N°: 1				Prof. Excavada: 7.50 m			
Prof. Napa de Agua: -		Fecha: 06-06-2016		Reconoció: John Venenciano		Hoja: 1 de 1			
Profundidad	Desde (m)	0.00	Hor.	0.35	Hor.			-	
	Hasta (m)	0.35	Esp.	0.35	7.50	7.15		Esp.	-
Granulometría Estimada	Total	T.máx. (Pulgadas)	-		2"				
		Bolones (>3")	-		-				
	Fracción Menor Que Tamiz 80 mm.	Grava (%)	-		30				
		Arena (%)	-		55				
	Fino (%)	-		15					
Color en estado Natural / Olor		-		Amarillo Pálido 5Y7/3					
Graduación / Dilatancia		-		Pobremente Graduada					
Plasticidad		-		No tiene					
Forma de Partic. / Resistencia Seca		-		Angulares y Subangulares					
Humedad		-		Baja a Nula					
Consistencia o Compacidad		-		Media-Alta					
Estructura / Cementación		-		Homogenea					
Origen		-		Relleno Natural					
Materia Orgánica o Raíces		-		Sin Indicios					
Símbolo según USCS		-		<b>SM</b>					
Nombre local		Suelo Chusca		Arenas Limosas					
Muestreo	N° / Profundidad			-					
	Cantidad (Kg)			-					
Observaciones:		La excavación se realiza solo con el balde de la excavadora sin utilizar otro accesorio de la excavadora (Picotón)							



Figura II-5: Excavación de reconocimiento “Calicata N°1”

Además de la batería de ensayos mecánicos típicos para obtener una clasificación completa, se realizaron algunos ensayos químicos de relevancia para el presente estudio en las contra muestras en análisis.

En primer lugar se presenta el análisis granulométrico de las muestras (contra muestras) provenientes de la Calicata N°1.

Tabla II-3: Análisis granulométrico NCh3236.Of2010

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO NCh3236.Of2010					
TAMIZ		PORCENTAJE PASANTE EN PESO (%)			
ASTM	(mm)	M-1	M-2	M-3	PROM.
3"	80	100	100	100	100
2 1/2"	63	100	100	100	100
2"	50	100	97	100	99
1 1/2"	40	94	86	95	92
1"	25	89	83	90	87
3/4"	20	86	80	84	83
3/8"	10	79	77	80	79
#4	5	70	69	73	71
#10	2	64	64	67	65
#40	0.5	44	47	46	46
#200	0.08	15	14	17	15

La información de los ensayos mecánicos y químicos contenida en los informes de ensayo que se adjuntan en anexo, se pueden resumir en la siguiente tabla:

Tabla II-4: Resultados de ensayos de laboratorio

RESULTADOS DE ENSAYOS TÍPICOS DE LABORATORIO						
ENSAYOS	UNIDAD	NORMATIVA DE ENSAYO	M0-1	M0-2	M0-3	PROM.
HUMEDAD IN SITU	(%)	NCh1515.Of79	0.6	1.1	1.6	1.1
DENSIDAD IN SITU	(kg/m3)	NCh1516.Of80	1953	-	2012	1983
D.M.C.S.	(kg/m3)	NCh1534/2.Of2008	2214	2204	2219	2212
HUMEDAD ÓPTIMA	(%)	NCh1534/2.Of2008	6.3	6.1	6.2	6.2
DENSIDAD DE SÓLIDOS	(kg/m3)	NCh1532.Of80	2671	2674	2650	2665
LÍMITE LÍQUIDO	(%)	NCh1517/1.Of79	13	12	13	13
LÍMITE PLÁSTICO	(%)	NCh1517/2.Of79	-	-	-	-
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	(%)	NCh1517/2.Of79	NP	NP	NP	NP
RESULTADOS DE ENSAYOS ESPECIALES						
PERMEABILIDAD	(cm/seg)	ASTM D 2434-68 (MOD)	0.0658	0.0566	0.0621	0.0615
SALES SOLUBLES TOTALES	(%)	IC-V8.2014-8.202.14(LNV8	5.45	3.72	4.08	4.4
CONT. DE CLORUROS	ppm	NCh1444.Of2010	13600	7020	7700	9440
CONT. DE SULFATOS	ppm	NCh1444.Of2010	12600	8600	15500	12233

Tabla II-5: Resultados de ensayos químicos

ENSAYOS QUÍMICOS (ASQUIM)					
ENSAYOS	UNIDAD	NORMATIVA DE ENSAYO	M-1	M-2	PROM.
PH (a 20°C)	-	ASTM G-51	7.84	7.92	7.88
CARBONATO DE CALCIO	%	PROC. ASQUIM	1.23	1.34	1.29
CALCIO SOLUBLE EN AGUA	ppm	PROC. ASQUIM	660	520	590

## II.6 Definición de Variables y Consideraciones

El proceso de investigación comenzó realizando una prueba casera que permitieran visualizar las características del fenómeno expansivo al añadir lentamente solución ácida al 5% a una pequeña muestra de arena limosa suelta. Se confeccionó un recipiente y un dosificador con una bombilla con pequeños agujeros inmersa en la muestra de arena.

Las observaciones realizadas permitieron establecer algunas características del fenómeno expansivo, como por ejemplo que la reacción química produce una efervescencia a partir de los primeros 5 minutos, y que se generan múltiples burbujas, que aparentan subir el nivel de la muestra para luego descender conforme cesa la reacción. La reacción química percibida visualmente dura alrededor de 30 minutos, y se aprecia un leve aumento de nivel en la muestra después de 1 hora de comenzada la prueba.



Figura II-6: Dispositivo de expansión casero

Posteriormente, se trabajó con un equipo edométrico realizando ensayos de expansión a la arena limosa con solución ácida al 1% y al 5%, con muy poca carga sobre arena limosa sin obtener expansiones importantes. Se inició entonces un proceso iterativo en el cual se realizaron una serie de ensayos de corta duración (hasta 3 horas) mezclando proporciones en peso de arena limosa con óxido de calcio (cal), para obtener una muestra con un contenido de calcio suficiente para producir anhidrita al reaccionar con el ácido sulfúrico de la solución de prueba. Lógicamente, también se probaron las soluciones con las distintas concentraciones de ácido sulfúrico. De este proceso, se decidió trabajar con una muestra de arena limosa con cal, cuyas proporciones en peso son 60% y 40% respectivamente, y con una solución ácida al 15%. Se considera que con esta receta se pueden obtener resultados aceptables para establecer comparaciones de manera segura. Se debe considerar que muy probablemente el efecto del ácido sulfúrico puro (95%) debería inducir expansiones mucho más importantes que las que se pueden inducir con la solución escogida (al 15%), pero las características corrosivas del ácido impiden una manipulación segura de los elementos involucrados en el ensayo. En efecto, la solución ácida corroe el metal del anillo y el pistón del equipo, decolorando y desgastando estos elementos. En este proceso de corrosión del metal, se puede apreciar que la solución ácida empleada (incolora) se torna de color azul.

Por este motivo, se deben construir anillos y pistones de acero inoxidable 316 que son capaces de resistir la corrosión de la solución ácida para la concentración del 15%. También se estudió la construcción de algunas piezas en una matriz polimérica, a fin de establecer un material idóneo para ejecutar ensayos de este tipo.



Figura II-7: Corrosión del ácido sobre el metal

La medición principal que considerará este estudio para determinar las características que interesan en la expansión “a corto plazo” de las muestras, lo constituyen la medición de las deformaciones por inundación ácida bajo carga, y la influencia del contenido de óxido de calcio (cal) presente en el suelo y su compacidad.

## **II.7 Metodología de la Medición**

Se considera estudiar la expansión producida en muestras de arena limosa bajo la malla #10 mezclada con óxido de calcio (Cal), en estado seco, y en las proporciones determinadas mediante la realización de varias pruebas (éxito-error). Las muestras fueron saturadas en el equipo edométrico con solución ácida al 15% y estaban compuestas por un 60% de arena limosa y un 40% de óxido de calcio (proporciones en peso).

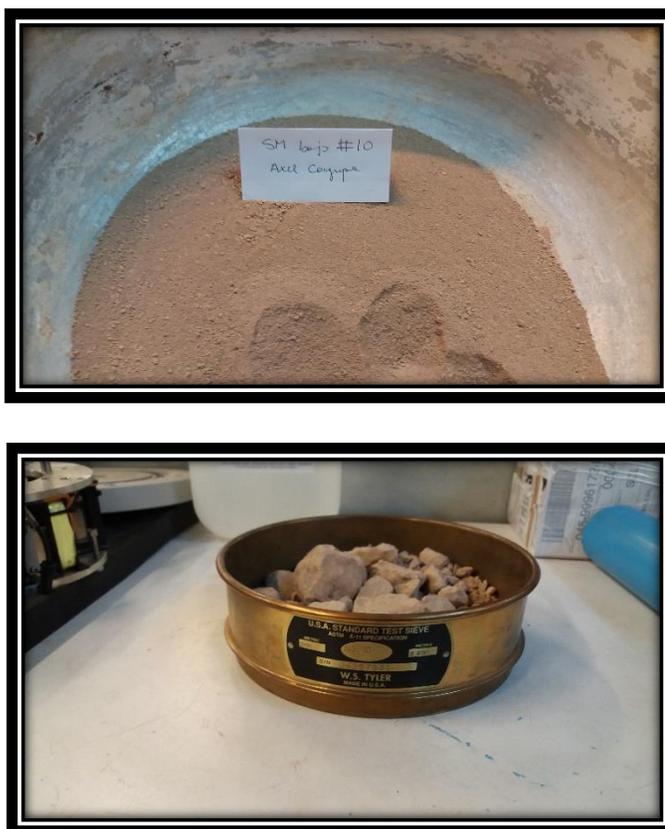


Figura II-8: Arena limosa seleccionada bajo malla N°10

Se realizaron ensayos de expansión para una densidad promedio de las muestras compactas de  $1.63 \text{ ton/m}^3$ , aplicando distintas cargas de prueba.

Con las gráficas obtenidas se analizó la variación de las deformaciones porcentuales obtenidas en el tiempo para cada una de las cargas consideradas. Además se estimó la finalización del proceso expansivo “a corto plazo” en aquellas muestras sometidas a mayor carga, idealmente comparables con las que actúan en la fundación de los estanques de almacenamiento de ácido, habiendo mantenido en curso el ensayo durante el tiempo necesario para se detuviera el proceso expansivo (cuando se estabilizaron las lecturas en el dial).

Con alguna de las muestras inundadas, se podría haber realizado un análisis post-ensayo para determinar la cantidad de sulfatos presentes en las muestras, con la finalidad de ser comparadas con la cantidad de sulfatos que originalmente contenían las muestras de arena limosa, y considerando la cantidad de cal añadida. Este proceso se consideró fuera del alcance de este estudio por razones económicas.



Figura II-9: Muestra post-ensayo

Por último se realizaron algunos ensayos de corta duración (de 2 a 3 horas) con la finalidad de evaluar la influencia de la densidad de la muestra en el proceso expansivo. Los ensayos se realizaron bajo una carga de  $100 \text{ kg/m}^2$  (lo más parecido a la medición del hinchamiento libre) y con las muestras definidas al comienzo de este apartado.

También se realizaron algunos ensayos de corta duración para evaluar la influencia del contenido de Cal (óxido de calcio) en las expansiones, bajo las mismas condiciones antes descritas.

### **III. TERCERA PARTE: DESARROLLO EXPERIMENTAL**

En el presente apartado se presenta un desglose del procedimiento experimental llevado a cabo para medir las expansiones en muestras de arena con contenido cálcico, con el objetivo de entender y uniformar los criterios utilizados en el estudio para obtener ensayos trazables y comparables entre sí. Ordenadamente se abordarán los títulos más importantes en esta materia.

#### **III.1 Preparación de las Muestras y Mediciones Afines**

Las muestras de ensayo se preparan controlando en una balanza de precisión 0.1 gramos, la masa de arena limosa bajo malla #10 y de cal. Esta medición se realiza en un recipiente de porcelana, incorporando primero la arena hasta que se registran 60 gr, y posteriormente la cal hasta que se completan los 100 gr de la muestra preparada. Posteriormente, se procede a homogeneizar la mezcla con la ayuda de una cuchara de plástico y se procede con el llenado de la cápsula, con aproximadamente 91 gr de mezcla.

La cápsula está dispuesta sobre el recipiente edométrico y en su parte inferior cuenta con una piedra porosa metálica (de bronce, por el ataque ácido) y un papel filtro sobre ella.

Se vierte la mezcla en tres capas, que se apisonan cuidadosamente desde los bordes hacia el centro con 25 golpes cada una.

Una vez que se ha vertido y compactado la muestra completa, se cubre la parte superior con un papel filtro y una piedra porosa metálica. Inmediatamente, se procede a medir la distancia entre el borde superior del anillo de la cápsula (de 1”) y la

superficie de la piedra porosa superior, para determinar el volumen compactado inicial, y su correspondiente densidad.

En general el proceso se estandariza obteniendo los siguientes valores antes de iniciar el ensayo:

$m_a$ : masa de arena bajo #10, en gr

$m_{cal}$ : masa de cal viva (CaO), en gr

$V_{mez,comp}$  : volúmen compacto de la mezcla, en  $cm^3$

$\gamma_{mez,c}$ : densidad de la mezcla compacta, en  $gr/cm^3$

$$m_a = 54.6 \text{ gr}; m_{cal} = 36.4 \text{ gr}; V_{mez} = 55.8 \text{ cm}^3$$

$$\gamma_{mez,comp} = \frac{(m_a + m_{cal})}{V_{mez,comp}} \quad (3.1)$$

$$\gamma_{mez,comp} = \frac{91 \text{ gr}}{55.8 \text{ cm}^3} = 1.63 \text{ gr/cm}^3$$

Una vez que se cuenta con la muestra preparada compacta, se procede a instalar el recipiente en el equipo de consolidación, ajustando el nivel de la carga por aplicar por medio de la báscula o de los anillos de carga, se ajusta el dial del deformímetro, y se inunda la muestra dentro del recipiente con la solución ácida al 15% en el instante cero.

En cada medición, se registra el tiempo y la deformación positiva que indica el dial. Se registran los datos durante el tiempo que sea necesario y con una frecuencia acorde al desarrollo de cada ensayo, hasta que se detiene la deformación (la curva deformación porcentual v/s tiempo se hace prácticamente horizontal). Los resultados de cada ensayo se tabulan, se grafican y se registran.

### III.2 Relaciones Estequiométricas para la Expansión Esperada

Para el caso de la arena, se midió la densidad suelta y compactada en cápsula en tres capas con 25 golpes de pisón, obteniéndose los siguientes resultados:

$$\gamma_{a,suelta} = 1.45 \text{ gr/cm}^3 \quad (3.2)$$

$$\gamma_{a,comp} = 1.97 \text{ gr/cm}^3 \quad (3.3)$$

Por lo tanto cuando la mezcla de arena y cal se encuentra compacta, previo a la inundación con solución ácida, cuando la densidad de la misma es de  $1.63 \text{ gr/cm}^3$ , se debe cumplir la siguiente relación:

$$\gamma_{mez,comp} = \frac{(m_a + m_{cal})}{V_{mez,comp}} \quad (3.4)$$

$$\gamma_{mez,comp} = \frac{91 \text{ gr}}{(V_{a,comp} + V_{cal,comp})} = 1.63 \text{ gr/cm}^3 \quad (3.5)$$

De la expresión (3.3) se tiene que:

$$\gamma_{a,comp} = \frac{m_a}{V_{a,comp}} = \frac{54.6 \text{ gr}}{V_{a,comp}} = 1.97 \text{ gr/cm}^3$$

$$V_{a,comp} = 27.72 \text{ cm}^3 \quad (3.6)$$

Reemplazando (3.6) en la expresión (3.5) se puede obtener el volumen compactado que ocupa la cal en la mezcla, es decir:

$$V_{cal,comp} = 28.08 \text{ cm}^3 \quad (3.7)$$

Con este volumen, podemos calcular la densidad compactada de la cal en la mezcla:

$$\gamma_{cal,comp} = \frac{m_{cal}}{V_{cal,comp}} = \frac{36.4 \text{ gr}}{28.08 \text{ cm}^3} = 1.30 \text{ gr/cm}^3 \quad (3.8)$$

Cabe señalar que se ha estimado la densidad de la cal compactada en la mezcla como consta precedentemente, por la dificultad para medirla directamente en laboratorio (se libera gran cantidad de partículas menores durante la compactación, que son dañinas para el sistema respiratorio).

### III.2.1 Análisis químico

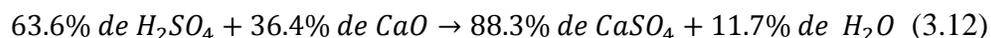
Cuando ácido sulfúrico presente en la solución ácida reacciona con la cal, se tiene la siguiente reacción:



En términos de masa molar (gr/mol), la reacción es la siguiente:



Por lo tanto la reacción está balanceada en términos másicos (154 gr/mol), en las siguientes proporciones en masa:



Considerando que la masa de cal en la mezcla es de  $m_{cal} = 36.4 \text{ gr}$ , cuya pureza es del 85%, tenemos una masa de cal reaccionante de:

$$m_{cal,r} = 31 \text{ gr} \quad (3.13)$$

Por otro lado, se estima el volumen de la solución ácida en  $450 \text{ cm}^3$ , por lo que considerando un 15% de ácido sulfúrico en ella, se obtiene un volumen de ácido de:

$$V_{H_2SO_4,r} = 67.5 \text{ cm}^3 \quad (3.14)$$

Considerando la densidad del ácido sulfúrico:  $1,84 \text{ gr/cm}^3$  se tiene que la masa disponible para reaccionar es de:

$$m_{H_2SO_4,r} = 124.2 \text{ gr} \quad (3.15)$$

De acuerdo con los cálculos anteriores, el reactivo dominante es el óxido de calcio (Cal), ya que se encuentra en menor cantidad. En efecto, para que reaccionen los 31 gr de Cal, sólo hacen falta 54.16 gr de ácido sulfúrico de los 124.2 gr disponibles. Si reaccionan los 31 gr de cal con los 54.16 gr de ácido sulfúrico, se produciría como producto anhídrita y agua en las siguientes cantidades:

$$m_{H_2O,p} = 9,96 \text{ gr} \quad (3.16)$$

$$m_{CaSO_4,p} = 75.2 \text{ gr} \quad (3.17)$$

Posteriormente la anhídrita formada reacciona con el agua formando yeso hemihidratado, en cuyo caso se tiene la siguiente reacción:

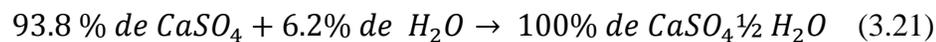


En términos de masa molar (gr/mol), la reacción es la siguiente:



$$136 + 9 \rightarrow 145 \quad (3.20)$$

Por lo tanto la reacción está balanceada en términos másicos (145 gr/mol), en las siguientes proporciones en masa:



De acuerdo a esta última expresión y los cálculos precedentes, se puede deducir que se con 31 gr de cal y ácido sulfúrico suficiente, se puede obtener yeso hemihidratado en la siguiente cantidad:

$$m_{CaSO_4 \frac{1}{2} H_2O,p} = 80.17 \text{ gr} \quad (3.22)$$

### III.2.2 Análisis volumétrico

Originalmente la mezcla tiene una densidad en estado seco igual que  $1.63 \text{ gr/cm}^3$  y una masa total de 91 gr, de los cuales 36.4 gr corresponden a cal viva. El volumen original del óxido de calcio reaccionante (31 gr), en estado compacto, sería:

$$V_{cal,r} = \frac{m_{cal,r}}{\gamma_{cal,comp}} \quad (3.23)$$

$$V_{cal,r} = \frac{31}{1.30} = 23.85 \text{ cm}^3$$

Después de las reacciones correspondientes, con los 31 gr de cal reaccionante se producen 80.17 gr de yeso hemi-hidratado si se dispone de ácido sulfúrico suficiente, como se verifica en nuestro desarrollo experimental.

Si consideramos que la densidad del yeso hemi-hidratado es de  $\gamma_{yeso} = 2.32 \text{ gr/cm}^3$ , se puede deducir el siguiente volumen al finalizar la reacción:

$$V_f = \frac{80.17}{2.32} = 34.56 \text{ cm}^3 \quad (3.24)$$

Por lo tanto, la expansión volumétrica se puede cuantificar como:

$$V_{exp} = 34.56 \text{ cm}^3 - 23.85 \text{ cm}^3 = 10.71 \text{ cm}^3 \quad (3.25)$$

Ahora bien, el volumen inicial de la mezcla en estado seco es de  $55.8 \text{ cm}^3$ . Si consideramos que la expansión esperada es de  $10.71 \text{ cm}^3$ , la expansión después de la reacción química se puede cuantificar como:

$$Exp = \frac{10.71}{55.8} = 19.2 \% \quad (3.26)$$

Entonces, en condiciones ideales de la mezcla (40% de cal y 60% de arena) se puede esperar una expansión del orden del 20% en volumen.

### III.3 Expansión Libre

Se realizó un ensayo con una carga de  $0.1 \text{ ton/m}^2$  (considerado como expansión libre dado la baja carga axial aplicada a la muestra) obteniendo la gráfica que a continuación se muestra.

También se adjunta la planilla de registro de datos de este ensayo, de manera que se pueda visualizar la forma en que, en general, se obtuvieron todas las gráficas de expansión en el tiempo. La expansión obtenida es del 20.52%, que resultó un poco superior a la expansión estimada precedentemente. Este hecho tiene su explicación en que en este ensayo en particular, la masa de la mezcla fue de 99.3 gr, con lo que la masa de óxido de calcio es superior a la considerada en el cálculo estimado para las expansiones.

Tabla III-1: Registro de datos obtenidos para expansión libre

Tiempo (t) (min)	Tiempo (t) (seg)	Lectura (mm)	Deformación (mm)	Acumulada (mm)	Tiempo (horas)	Expansión (%)
0	0	5.652	0.000	0.000	0.0	0.00
1	60	5.700	0.048	0.048	0.0	0.25
2	120	5.720	0.020	0.068	0.0	0.36
3	180	5.732	0.012	0.080	0.1	0.42
4	240	5.740	0.008	0.088	0.1	0.47
5	300	5.750	0.010	0.098	0.1	0.52
10	600	5.780	0.030	0.128	0.2	0.68
25	1500	5.830	0.050	0.178	0.4	0.94
30	1800	5.845	0.015	0.193	0.5	1.02
55	3300	5.940	0.095	0.288	0.9	1.52
70	4200	6.010	0.070	0.358	1.2	1.89
85	5100	6.070	0.060	0.418	1.4	2.21
90	5400	6.095	0.025	0.443	1.5	2.34
150	9000	6.360	0.265	0.708	2.5	3.75
180	10800	6.520	0.160	0.868	3.0	4.59
1180	70800	9.520	3.000	3.868	19.7	20.47
1200	72000	9.525	0.005	3.873	20.0	20.49
1205	72300	9.530	0.005	3.878	20.1	20.52
2160	129600	9.531	0.001	3.879	36.0	20.52

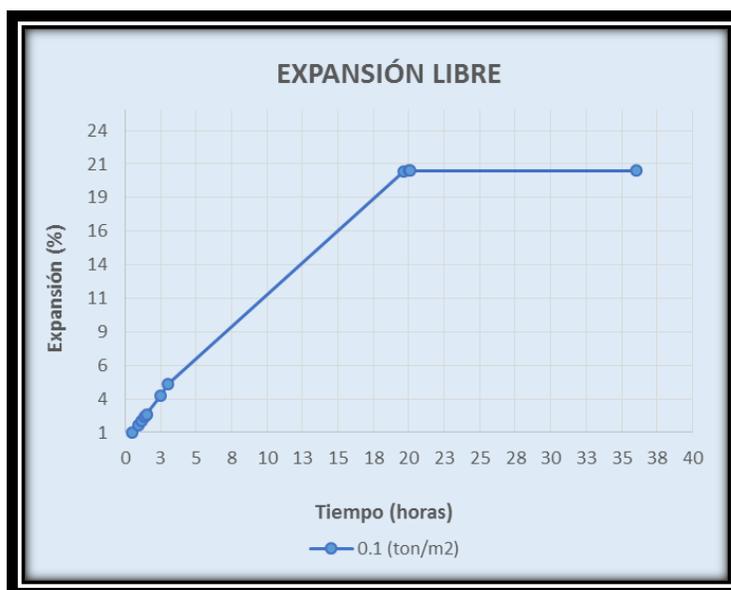


Figura III-1: Gráfica de expansión libre

#### III.4 Expansión bajo Carga Axial

Se realizaron ensayos para medir las deformaciones que se producen bajo carga axial, y observar su desarrollo. Se comparan las expansiones obtenidas bajo tres cargas de 10 ton/m<sup>2</sup>, 40 ton/m<sup>2</sup> y 60 ton/m<sup>2</sup>. En general, se puede observar que la expansión tarda un poco más de una o dos horas en comenzar a desarrollarse. La tendencia es prácticamente lineal durante 4/5 del tiempo que toma la reacción en alcanzar el punto de mayor expansión. En general, se considera en los tres casos que la expansión máxima se estabiliza alrededor de 36 horas. Este límite temporal, será considerado experimentalmente como el tiempo que dura la expansión “instantánea” en la fracción fina de los suelos integrales compuestos por matrices de arena limosa y contenido cálcico, para suelos bajo cargas de hasta 60 ton/m<sup>2</sup>.

El desarrollo de estos tres ensayos se realizó sobre muestras de arena y cal de aproximadamente 91 gr. A continuación se muestra la gráfica comparativa obtenida para la deformación bajo carga axial.

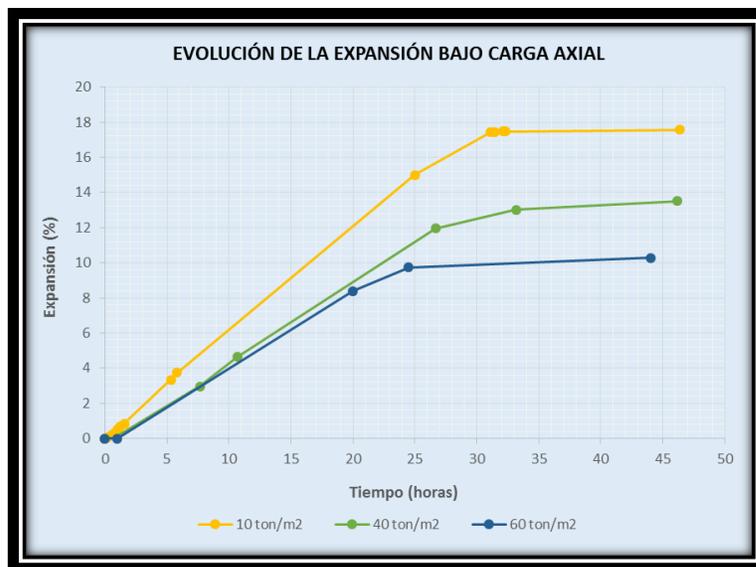


Figura III-2: Gráfica de expansión bajo carga axial

Se puede apreciar claramente que conforme se aumenta la carga axial sobre la muestra, la velocidad de desarrollo de la expansión determinada por la pendiente del tramo recto obtenido disminuye, al igual que la deformación máxima obtenida. En efecto, se puede obtener a partir del registro de las deformaciones máximas obtenidas en 36 horas, la siguiente relación entre la carga y la deformación:

Tabla III-2: Deformaciones máximas en 36 horas

Expansión (%)	Carga Axial (ton/m <sup>2</sup> )
17.6	10
13.5	40
10.3	60

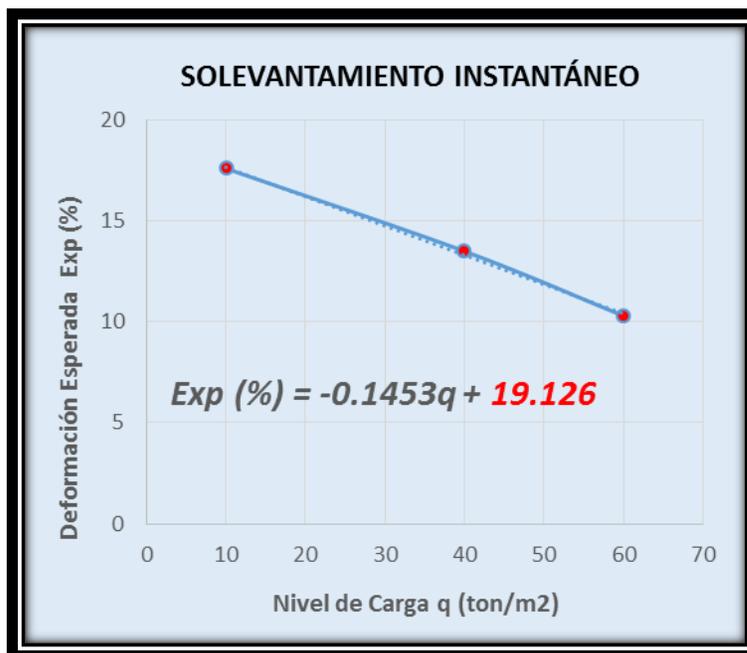


Figura III-3: Relación de solevantamiento instantáneo

Se puede apreciar una distribución prácticamente lineal entre la carga axial y la deformación instantánea, considerada como la máxima deformación y que esta se desarrolla dentro de las primeras 36 horas de ensayo.

### III.5 Influencia del Nivel de Compactación

Se han realizado dos ensayos en muestras compactadas con 25 y 15 golpes por capa, respectivamente, en tres capas cada una.

Se obtienen densidades de la mezcla de 1.27 (g/cm<sup>3</sup>) y 1.63 (g/cm<sup>3</sup>). Los ensayos se realizan durante tres horas, período durante el cual se puede observar que conforme se aumenta la densidad, se retrasa el inicio del desarrollo expansivo, manteniendo posteriormente una velocidad de desarrollo (pendiente) similar en ambas muestras, tal como se puede observar en los tramos rectos casi paralelos que se muestran en el gráfico siguiente:

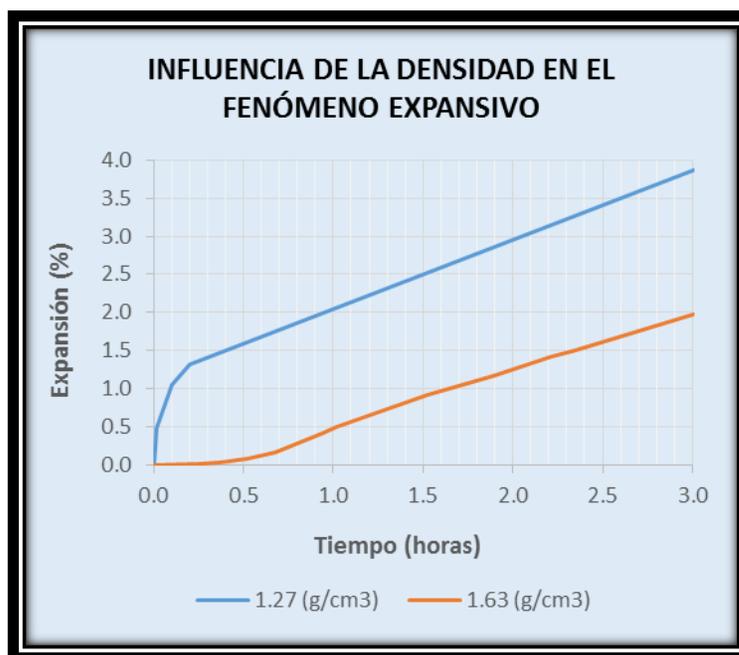


Figura III-4: Influencia de la densidad en la expansión

En general, en todos los ensayos realizados se puede apreciar que se produce una transición inicial que puede durar entre 15 y 60 minutos, antes de que la curva de deformación se rectifique según su velocidad de expansión (pendiente de la recta). En general es la carga axial sobre la mezcla ensayada la que irá disminuyendo la velocidad de expansión y su máxima expresión obtenida.

### III.6 Influencia del contenido de Cal (CaO)

El contenido cálcico, en nuestro caso de óxido de calcio, será en gran medida el que controle el nivel de expansión que se obtendrá en cada caso. En el caso que se trate de una expansión libre de carga axial, será el único factor que determinará el nivel de expansión o solevantamiento que se obtendrá, toda vez que se cuente con ácido sulfúrico suficiente para reaccionar con todo el contenido cálcico presente en la muestra.

En aquellos casos en que además la muestra está sometida a carga axial, será esta última en conjunto con el contenido de óxido de calcio, en nuestro caso, los factores que determinarán el nivel de expansión que se alcanzará en la muestra, siempre que se cuente con ácido sulfúrico suficiente para consumir todo el contenido cálcico presente en la muestra.

#### IV. CUARTA PARTE: APLICACIÓN EN EL DISEÑO DE ESTANQUES

Se contempla construir un estanque cilíndrico de 8 m de altura para almacenamiento de ácido sulfúrico. Estos estanques se suelen cimentar mediante una fundación anular de hormigón armado, cuyas dimensiones para nuestro caso a continuación se indican:

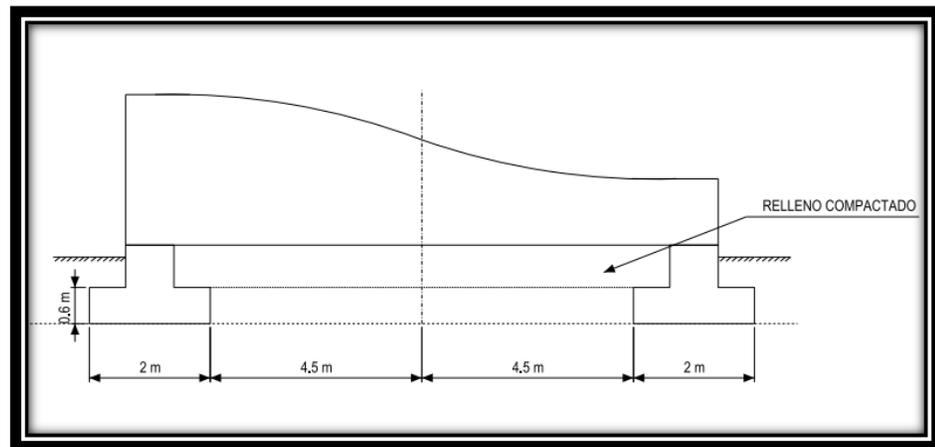


Figura IV-1: Fundación anular del estanque de almacenamiento

El análisis estructural, por simplicidad, no aborda el efecto hidrodinámico del fluido dentro del estanque.

En la presente Tesis solo se analiza el caso pseudoestático. Las cargas pseudoestáticas consideradas a nivel del sello de cimentación fueron las siguientes:

$$N = 905 \text{ ton (incluyendo el peso propio de la cimentación)}$$

$$M = 1900 \text{ ton} \cdot \text{m}$$

$$H = 110 \text{ ton}$$

El sismo de diseño considerado fue definido mediante los siguientes coeficientes sísmicos pseudoestáticos:

$$k_h = 0.122; \quad k_v = 0$$

El terreno de fundación corresponde a una arena densa que tiene una densidad seca en estado natural, igual que  $\gamma_d = 1.63 \text{ ton}/m^3$ , y un coeficiente de balasto  $k_0 = 16 \text{ kg}/cm^3$  obtenido de un ensayo de carga vertical en que se usó una placa circular  $B_0$  igual que 30 cm de diámetro.

Para completar nuestro estudio, resulta de interés conocer el asentamiento que experimentará la estructura y la capacidad última de soporte del suelo de fundación (arena densa), para más adelante concluir acerca de la influencia de las expansiones ante un derrame de ácido, en el caso que las arenas contengan algún contenido de minerales cálcicos.

En primer lugar, tomando en cuenta la geometría de este diseño, se comenzará con la corrección del coeficiente de balasto para la fundación anular considerando el radio y la longitud perimetral de la misma. A continuación se realizan las correcciones correspondientes asumiendo que se trata de una zapata corrida de ancho  $B=200\text{cm}$  y largo  $L=34.56 \text{ m}$ :

$$k_{B,B} = k_0 \cdot \left(\frac{B+30}{2B}\right)^2 = 5.29 \text{ kg}/cm^3 \quad (4.1)$$

$$k_{B,L} = \frac{2}{3} \cdot k_{B,B} \cdot \left(1 + \frac{2B}{L}\right) = 3.93 \text{ kg}/cm^3 \quad (4.2)$$

#### **IV.1 Estimación del Asentamiento**

Ahora bien, utilizando los ábacos de la bibliografía alemana consultada, y expuestos en anexo, se determinará el estado tensional en la fundación anular en cuestión como sigue:

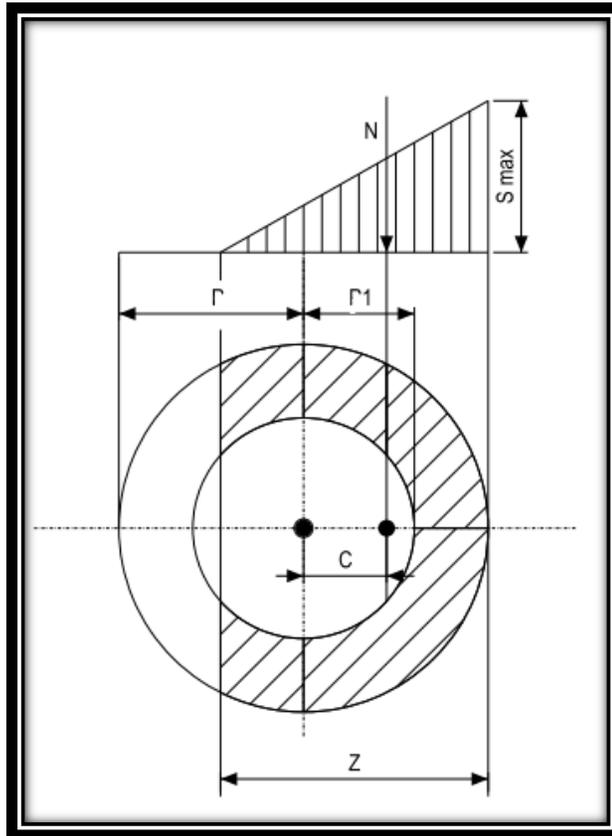


Figura IV-2: Diagrama paramétrico para ábaco de cálculo fundación anular

#### IV.1.1 Definición de los parámetros de entrada

$$r_1 = 4.5 \text{ m}$$

$$r = 6.5 \text{ m}$$

a) Excentricidad:

$$c = \frac{M}{N} = \frac{1900 \text{ ton}\cdot\text{m}}{905 \text{ ton}} = 2.1 \text{ m} \quad (4.3)$$

Entrada a las tablas:

$$\frac{c}{r} = 0.323$$

$$\frac{r_1}{r} = 0.692$$

#### IV.1.2 Zona en compresión (z)

$$\frac{z}{r} \geq 2 \text{ (de la tabla)} \rightarrow z \geq 2 \cdot r \quad (4.4)$$

Por lo tanto, toda la fundación del estanque se encuentra en compresión. Ahora se procederá a calcular el esfuerzo de compresión máximo.

#### IV.1.3 Esfuerzo de compresión máximo

$$\frac{S_{m\acute{a}x}}{S_{medio}} = 1.87 \quad (4.5)$$

$$S_{medio} = \frac{N}{A} = \frac{N}{\pi \cdot (r^2 - r_1^2)} \quad (4.6)$$

$$S_{medio} = \frac{905 \text{ ton}}{69.12 \text{ m}^2} = 13.09 \text{ ton/m}^2$$

Por lo tanto el esfuerzo de compresión máximo en la fundación anular es:

$$S_{m\acute{a}x} = 1.87 \cdot 13.09 = 24.49 \text{ ton/m}^2 \quad (4.7)$$

El asiento máximo ( $\delta_{m\acute{a}x}$ ) se calcula de acuerdo con la teoría de la elasticidad de la siguiente manera:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{S_{m\acute{a}x}}{k_{B,L}} \quad (4.8)$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{2.45}{3.93} = 0.62 \text{ cm} \quad (4.9)$$

#### IV.1.4 Solevantamiento por derrame ácido

Si consideramos que se trata de un suelo compuesto por arenas limosas con un contenido cálcico equivalente al que se ha estudiado en este trabajo, es decir con una proporción en masa del 40%, y similares condiciones de compactación en terreno con respecto a la de los ensayos realizados, se puede estimar el nivel de solevantamiento por derrame ácido con la expresión obtenida experimentalmente en la sección III.4:

$$Exp (\%) = -0.1453 \cdot q \left( \frac{ton}{m^2} \right) + 19.126 \quad (4.10)$$

La carga máxima sobre el estanque ( $q$ ) asume el valor del esfuerzo de compresión máximo sobre la fundación anular ( $S_{m\acute{a}x}$ ) calculada en (4.7), es decir:

$$q = S_{m\acute{a}x} = 24.49 \frac{ton}{m^2}$$

Por lo tanto el nivel de expansión esperado es en este caso:

$$Exp (\%) = 15.57 \quad (4.11)$$

El nivel de solevantamiento efectivo (en cm) deberá ser calculado considerando el espesor del estrato involucrado, y/o el espesor del cordón inundado.

Este solevantamiento efectivo deberá superponerse con el asentamiento estimado en el punto anterior, al momento de enfrentar un derrame ácido.

## IV.2 Cálculo de la Capacidad de Soporte

Para calcular la capacidad última del suelo de fundación se utilizarán las expresiones de Meyerhof, asumiendo las siguientes propiedades geotécnicas para el material arenoso en estado denso:

$$c = 0 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$\phi = 34^\circ$$

$$\gamma = 1.63 \text{ ton}/m^3$$

Del uso de tablas de la bibliografía se pueden obtener los factores de carga para los parámetros expuestos precedentemente:

$$N_c = 42.16$$

$$N_q = 29.44$$

$$N_\gamma = 31.15$$

Los factores de capacidad de soporte pseudoestáticos se pueden obtener a partir de las expresiones propuestas por Budhu y Al-Karmi en 1993:

$$N_{cE} = N_c \cdot e^{-\beta_c} \quad (4.12)$$

$$N_{qE} = N_q \cdot (1 - k_V) \cdot e^{-\beta_q} \quad (4.13)$$

$$N_{\gamma E} = N_\gamma \cdot \left(1 - \frac{2}{3}k_V\right) \cdot e^{-\beta_\gamma} \quad (4.13)$$

En que los coeficientes sísmicos asumidos para evaluar estas expresiones son  $k_V=0$  y  $k_h = 0.122$ .

Los factores beta se definen a continuación:

$$\beta_c = 4.3 \cdot k_h^{(1+D)}; \text{ con } D = \frac{c}{\gamma \cdot D_f} = 0 \quad (4.14)$$

$$\beta_q = \frac{5.3 \cdot k_h^{1.2}}{1 - k_V} \quad (4.15)$$

$$\beta_\gamma = \frac{9 \cdot k_h^{1.1}}{1 - k_V} \quad (4.16)$$

De acuerdo a las expresiones anteriores se pueden calcular los factores de carga pseudoestáticos, obteniendo los siguientes resultados:

$$N_{cE} = 24.94; \quad N_{qE} = 19.25; \quad N_{\gamma E} = 12.80 \quad (4.17)$$

#### IV.2.1 Factores de forma

Para  $\emptyset = 34^\circ \geq 10^\circ$ , se calculan los factores según las siguientes expresiones considerando una fundación corrida con  $B = 2 \text{ m}$ , y  $L = 34.55 \text{ m}$ :

$$F_{cs} = 1 + 0.2 \cdot \left(\frac{B}{L}\right) \cdot \tan^2 \left(45 + \frac{\emptyset}{2}\right) \quad (4.18)$$

$$F_{qs} = F_{\gamma s} = 1 + 0.1 \cdot \left(\frac{B}{L}\right) \cdot \tan^2 \left(45 + \frac{\emptyset}{2}\right) \quad (4.19)$$

$$F_{cs} = 1.041$$

$$F_{qs} = F_{\gamma s} = 1.020$$

#### IV.2.2 Factores de profundidad

Para  $\phi=34^\circ \geq 10^\circ$ , se calculan los factores según las siguientes expresiones considerando una fundación corrida con  $B = 2 \text{ m}$ , y  $D_f = 1.1 \text{ m}$ :

$$F_{cd} = 1 + 0.2 \cdot \left(\frac{D_f}{B}\right) \cdot \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (4.20)$$

$$F_{qd} = F_{\gamma d} = 1 + 0.1 \cdot \left(\frac{D_f}{B}\right) \cdot \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (4.21)$$

$$F_{cd} = 1.389$$

$$F_{qd} = F_{\gamma d} = 1.195$$

#### IV.2.3 Factores de inclinación de la carga

Estos se calculan a partir del ángulo de inclinación  $\beta$  que forma la carga resultante con respecto a la vertical. Estos factores no aplican en el cálculo sísmico pseudoestático, por cuanto se consideran incorporados en los factores de carga propuestos por Budhu y Al-Karni.

Componiendo vectorialmente la carga vertical y la carga sísmica, se obtiene la siguiente resultante y dirección con respecto a la vertical:

$$R = 911.66 \text{ ton}; \quad \beta = 6.93^\circ \quad (4.22)$$

Los factores de inclinación de la carga de se calculan como se indica a continuación:

$$F_{ci} = F_{qi} = \left(1 - \frac{\beta}{90}\right)^2 = 0.852 \quad (4.23)$$

$$F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{\beta}{\phi}\right)^2 = 0.634 \quad (4.24)$$

El cálculo de la capacidad de carga última según Meyerhof viene dada entonces por la siguiente expresión, considerando  $C = 0$ :

$$q_u = q \cdot N_{qE} \cdot F_{qs} \cdot F_{qd} + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_{\gamma E} \cdot F_{\gamma s} \cdot F_{\gamma d} \quad (4.25)$$

$$c = 0; \quad q = \gamma \cdot D_f = 1.793 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}; \quad \gamma = 1.63 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}; \quad B = 2 \text{ m.}$$

$$q_u = 67.5 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2} \quad (4.26)$$

El factor de seguridad se calcula considerando la capacidad de soporte última obtenida según Meyerhof y la sollicitación máxima en compresión:

$$F.S = \frac{q_u}{S_{\text{máx}}} = \frac{67.50 \text{ ton/m}^2}{24.49 \text{ ton/m}^2} = 2.75 \quad (4.27)$$

El valor del factor de seguridad obtenido es aceptable ( $F.S \geq 2$ ) para el análisis sísmico realizado.

#### IV.2.4 Disminución de la capacidad de soporte por derrame ácido

El efecto de la expansión por derrame ácido en arenas limosas viene dado por la disminución de la densidad del suelo por efecto del aumento volumétrico. En efecto, bajo las mismas condiciones de compacidad, carga y contenido cálcico del suelo asumido en este estudio se esperaría según la expresión (4.11) una expansión del 15.57%. En términos del volumen inicial  $V$ , el volumen final sería:

$$V_f = \left( \frac{\text{Exp}(\%)}{100} + 1 \right) \cdot V = 1.156 \cdot V \quad (4.28)$$

Con lo anterior la densidad disminuiría en 13.49%, y con ella la capacidad de soporte en igual medida (recordar que en este caso la cohesión es nula). Finalmente la capacidad última de soporte disminuida es igual que:

$$q_u = 58.39 \text{ ton/m}^2 \quad (4.29)$$

Ante esta situación el factor de seguridad disminuye manteniéndose dentro del rango aceptable. En efecto:

$$F.S = \frac{q_u}{S_{\text{máx}}} = \frac{58.39 \text{ ton/m}^2}{24.49 \text{ ton/m}^2} = 2.38 \quad (4.30)$$

## V. CONSIDERACIONES FINALES

El problema de la expansión que puede experimentar un suelo con algún contenido cálcico, por efecto de un derrame de ácido sulfúrico se puede modelar a partir de ensayos de expansión bajo carga axial, previo conocimiento de la sustancia cálcica (típicamente anhídrita, óxido de calcio o carbonato de calcio) y su proporción en peso dentro de la masa de suelo. Lo anterior nos permitirá conocer el tipo de reacción que ha de producirse y estimar la magnitud de los cambios volumétricos asociados.

La magnitud de las expansiones que pueden ocurrir tiene que ver indiscutiblemente con la cantidad de sustrato cálcico presente, considerando que los estanques de almacenamiento contienen suficiente ácido para hacerlo reaccionar completamente. Por otro lado, aunque no estaba dentro del alcance de este estudio medir las presiones que se pueden generar a causa de estas expansiones en cada caso particular, se pudo verificar que se pueden producir expansiones considerables (superiores al 10%) para cargas elevadas, como por ejemplo 60 ton/m<sup>2</sup>.

Por ahora podríamos utilizar la ecuación obtenida en (4.10) para estimar la presión producida por la expansión de una arena con contenido cálcico similar al considerado en el desarrollo experimental de este trabajo, para una densidad in situ como la considerada en el mismo. Así, por ejemplo para una expansión del 5% que puede ser considerada importante para un determinado estrato, se tiene:

$$Exp (\%) = 5 = -0.1453 \cdot q \left( \frac{ton}{m^2} \right) + 19.126$$

$$q = 100 \left( \frac{\text{ton}}{\text{m}^2} \right) = 10 \left( \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \quad (5.1)$$

Este valor de la presión de expansión ya puede ser considerado para explicar el por qué este tipo de reacción es capaz de levantar cualquier estructura.

### **V.1 Acerca de las Expansiones Reales Medidas en Terreno**

En primer lugar las expansiones medidas en terreno de acuerdo a los datos reportados en la primera parte de este trabajo son menores, en general, a las obtenidas en el desarrollo experimental de este trabajo, y por cierto mucho más lentas. Con respecto a la menor magnitud de las expansiones reportadas en casos reales, éstas pueden ser explicadas a partir de un menor contenido mineralógico reaccionante presente en el suelo de fundación de los estanques, lo que disminuye la capacidad máxima de expansión en presencia de suficiente ácido sulfúrico tal como se dedujo en el análisis volumétrico de la tercera parte de este trabajo.

Con respecto a la velocidad de las expansiones observadas en casos reales, es necesario recordar que las expansiones instantáneas medidas experimentalmente (desarrolladas en las primeras 36 horas) suponen la saturación del suelo y se desarrollan en las partículas más finas que lo conforman. Posteriormente la reacción expansiva se desarrolla en las partículas de mayor tamaño (arenas medias) muy lentamente, que es lo que se evidencia en los datos de terreno, en que se podría estimar el quiebre de la velocidad de expansión entre 1 y 3 meses, para continuar mucho más lentamente en el tiempo conforme el ácido reacciona con el contenido cálcico presente en las partículas de mayor tamaño (gravas). En el caso experimental expuesto en este trabajo, se trabajó con una muestra arenosa

con finos limosos, y por cierto con cal, que estabilizaron su nivel de deformación dentro de 36 horas, posteriores a las que se evidenció experimentalmente un desarrollo expansivo despreciable, pero que sin duda podría alcanzar un desarrollo más notorio en el caso que se hubieran mantenido los ensayos por períodos prolongados (meses). Experimentalmente no se consideró viable esta medición por las condiciones operativas de laboratorio, y por la incertidumbre acerca de las propiedades corrosivas del ácido para con los componentes del equipo de ensayo. No obstante, en el gráfico de la Figura III-2 es posible evidenciar el lento proceso expansivo posterior a la “estabilización” de la deformación instantánea medida.

Por último, se debe considerar que en los gráficos de la expansión real registrada en terreno los niveles en los estanques no se midieron en forma continua, por lo que la expansión instantánea no presenta medición alguna. Es más, si se observa detenidamente el gráfico conceptual presentado en la Figura II-4 (Latorre, 2009), se podrá inferir que muestra esta expansión instantánea sin medir su duración, y sólo se marca el quiebre de velocidad expansiva entre partículas menores y mayores (arenas gruesas y gravas), según las mediciones de terreno.

Lógicamente el desarrollo de las expansiones a causa de derrames ácidos en suelos con minerales cálcicos podrá ser estudiado con métodos experimentales apropiados para discernir su magnitud según el tamaño de las partículas.

Otro factor a considerar y que escapa del alcance de este trabajo, es la manera en que el ácido penetra en el estrato de suelo, dependiendo de su permeabilidad y la avidez del sustrato cálcico presente, y con esto, a la determinación del

espesor de suelo que se debe considerar en un derrame ácido al momento de evaluar la magnitud de las expansiones en el tiempo.

## **V.II Acerca de la Mitigación de los Procesos Expansivos**

Resulta de gran importancia a la luz del análisis realizado estudiar el suelo de fundación en forma previa a la construcción de estanques o contenedores de ácido sulfúrico. El análisis químico del suelo en cuanto a su contenido cálcico, así como su análisis granulométrico y caracterización (densidad in situ, y otros), son de suma relevancia al momento de evaluar su aptitud.

En caso que el suelo resulte no apto para soportar un estanque o contenedor de ácido, posterior al análisis de expansión realizado y su influencia en las deformaciones y capacidad de soporte, se podrá optar por reemplazo de suelo de fundación y/o estructuras de drenaje y contención que resulten adecuadas.

Lógicamente, también se deben cuidar los métodos de estabilización utilizados en el suelo de fundación de los estanques considerando la imposibilidad de utilizar cal en estos procesos.

Por cierto, también se genera la necesidad en etapas posteriores a este estudio de investigar acerca de la inclusión de sustancias químicas que puedan mitigar las reacciones expansivas desarrolladas en este trabajo.

Resulta conveniente citar en este apartado algunas recomendaciones expuestas en los estudios anteriores que dieron origen a esta investigación:

“Las presiones que ejerce el proceso de contaminación son de tal magnitud que no es conveniente generar alternativas del tipo anclaje para detener el proceso de solevantamiento” (Latorre, 2009)

“En todas las instalaciones en que se maneje ácido sulfúrico se deben disponer puntos de control de nivel y se debe llevar un registro periódico de los niveles” (Latorre, 2009)

### **V.III      Acerca del Estudio de Aplicaciones Futuras**

Este trabajo, además de estudiar las expansiones provocadas por derrames ácidos en suelos con minerales cálcicos en su conformación desde el punto de vista del daño que puede provocar sobre las estructuras que soporta, insta al estudio del beneficio que puede obtenerse en la materialización de obras civiles a partir de las reacciones expansivas analizadas.

Por ahora, se puede mencionar el estudio del aprovechamiento de estas propiedades expansivas, y de aumento de rigidez, en la materialización de rellenos que proporcionen confinamiento a estructuras enterradas y a la confección de elementos estructurales compuestos prefabricados, siempre y cuando medie un control sobre las expansiones requeridas.

## BIBLIOGRAFIA

LATORRE, J. (2009) Informe Final del Estudio de Mecánica de Suelos para el Estudio de Prefactibilidad IN-01-02-170309 Rev. A “Reemplazo de equipos Planta de Ácido N°2”, *Metaconsultores E.I.R.L.*

DAS, B. (2004) *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*, Cengage Learning, México.

RODRÍGUEZ ROA, F. (2013) Diseño de Fundaciones Superficiales. *Apuntes de Clases, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica*, Pontificia Universidad Católica de Chile.

OVALLE, C. (2014) Caracterización y Comportamiento de Suelos. *Apuntes de Clases, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica*, Pontificia Universidad Católica de Chile.

DEL CAMPO, J.M. “et al”. (2012) Análisis del fenómeno de expansividad en túneles construidos en anhidrita. Consecuencias y experiencias. *Materiales de Construcción, Vol. 62*, 308, 583-595.

COLOMA, G. (2008) *La Cal: Un Reactivo Químico*, Biblioteca INACESA, Chile.

**ANEXOS**

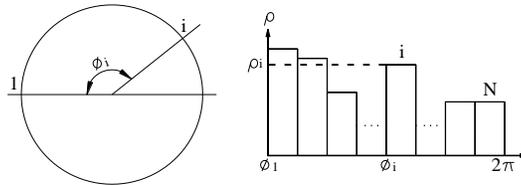
## ANEXO A: DESARROLLO TEÓRICO PARA EL CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS FUERA DEL PLANO DE GIRO

Para calcular los asentamientos fuera del plano ( $S_i$ ) se debe determinar el plano de giro medio que corresponde a la ecuación sinusoidal que mejor aproxima a los puntos medidos al interior del estanque.

Si se desea aproximar una función  $\rho(\varphi_i)$  que represente los asentamientos medidos en función de la posición angular en el intervalo  $0 \leq \varphi_i \leq 2\pi$ , mediante un polinomio trigonométrico (series de Fourier), se obtiene:

$$Z(\phi) = \sum_{k=0}^{\infty} (a_k \cdot \cos(k \cdot \phi) + b_k \cdot \text{sen}(k \cdot \phi))$$

Las expresiones de Fourier para  $a_k$  y  $b_k$  son:



$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \rho(\phi) \cdot d\phi$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \rho(\phi) \cos(k\phi) \cdot d\phi$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \rho(\phi) \cdot \text{sen}(k\phi) \cdot d\phi$$

$$k = 1.. \infty$$

Para una función escalón  $\rho(\varphi_i) = \rho_i$ , con  $\varphi_i \leq \varphi \leq (\varphi_i + \Delta\varphi_i)$ , en que  $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{n}$ , con n: número de puntos de medición, se obtiene para los primeros dos términos de la serie que representan a un disco que se mueve verticalmente y gira:

$$Z_i = A_0 - A_1 \cdot \cos(\phi_i + \beta) = A_0 + A_1 \cdot \text{sen}(\phi_i + \beta')$$

$$\beta = -\arctan \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i \cdot \sin(\varphi_i)}{\sum_{i=1}^n \rho_i \cdot \cos(\varphi_i)} \right]$$

$$A_0 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \rho_i$$

$$A_1 = \frac{2}{n} \cdot \left[ \sqrt{\left( \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot \cos(\varphi_i) \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot \sin(\varphi_i) \right)^2} \right]$$

$$\beta' = \beta - \frac{\pi}{2} = \arctan \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i \cdot \cos(\varphi_i)}{\sum_{i=1}^n \rho_i \cdot \sin(\varphi_i)} \right]$$

La expresión así desarrollada representa el movimiento del estanque como un cuerpo rígido. El primer término  $A_0$  corresponde al asentamiento o solevantamiento promedio, el parámetro  $A_1$  corresponde a la amplitud de giro y  $(\frac{\pi}{2} - \beta)$  a la ubicación angular del eje de rotación.

A partir de la determinación del plano medio, se determinan con respecto a éste, los asentamientos ( $S_i$ ), o asentamientos fuera del plano de giro medio:

$$S_i = \rho_i - Z_i$$

**ANEXO B: RESULTADOS DE ENSAYOS MECÁNICOS**

**ANEXO C: RESULTADO DE ENSAYOS QUÍMICOS**

### ANEXO D: PROPIEDADES DE LA CAL

Tipos de Cal	Unidad	Calcítica	Dolomítica	Magnesiana
Nombre químico		Óxido de Ca	Óxido doble Ca-Mg	Óxido de Mg
Formula química		CaO	CaO•MgO	MgO
Peso molecular	g/mol	56,08	96,40	40,32
Punto de fusión	°C	2.57		2.80
Índice de refracción		1.838		1.736
Calor de solución	kcal.	+18,33		
Formación cristalina		Cúbica		Cúbica
Solubilidad a 0°C	g/l	1,40		0,0068
Solubilidad a 100°C	g/l	0,54		0,0030
Peso específico		3,2-3-4	3,2-3-4	3,65
Densidad en granza	g/l	881-961	881-961	
Calor específico a 100°F	BTU/lb	0,19	0,21	
Ángulo de reposo			50-55°	50-55°
Calor de hidratación	cal/mol	43,3		28,9
Calor Formación $\Delta H$ a 25°C	kcal/mol	-151,7		-235,58
Energía Libre $\Delta G$ 25°C	kcal/mol	-144,3		
Porcentaje de CaO puro	%	100	58,17	
Porcentaje de MgO puro	%		41,83	100

Tabla 9: Características físico-químicas de los distintos tipos de cal viva (Fuente: National Lime Association)

La Cal: Un Reactivo Químico, Guillermo Coloma Álvarez, Primera Edición julio 2008, Biblioteca INACESA

**ANEXO E: ÁBACO DE CÁLCULO FUNDACIÓN ANULAR**