



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES DE DISEÑO PARA ESTANQUES ESPESADORES EN LA MINERÍA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ÁLVARO FERNANDO MONTOYA JORQUERA

PROFESOR GUÍA

RAMÓN MONTECINOS CONCHA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

ALEJANDRO VERDUGO PALMA

SANTIAGO DE CHILE

2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL.

Por: Álvaro Fernando Montoya Jorquera.

Profesor guía: Ramón Montecinos C.

Fecha: 15/11/2021

ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES DE DISEÑO PARA ESTANQUES ESPESADORES EN LA MINERÍA

El presente trabajo consiste en el estudio y análisis de los estanques espesadores de la industria minera que tienen en su interior líquido con densidad variable. Esto con el principal objetivo de realizar un análisis, y generar una guía base para el diseño de espesadores y clarificadores, buscando optimizar recursos y costos para la construcción de los estanques en la industria minera.

Para la realización de este trabajo se establece una revisión bibliográfica de libros escritos por ingenieros y personas que previamente ya han realizado cálculos correspondientes al tema de presiones sobre muros en estanques bajo aceleraciones sísmicas, estos estudios a diferencia de lo realizado en esta memoria, son bajo la condición de fluidos completamente homogéneos.

Se busca también recoger dentro de una gama de memorias de cálculo de proyectos ya realizados, generar una estadística con el objetivo de tener métodos simples y que sean aporte para el prediseño de futuros estanques, en lo que a cubicación de hormigón y posible cubicación de armadura de acero se refiere.

Se hace mención al alcance de este trabajo, el cual tiene en consideración estanques con geometría doblemente simétrica y circular, que se encuentran directamente apoyados en el suelo, junto con una relación entre su altura y diámetro respectivo menor o igual a un 10%.

Es por esto que se hace presentación de una guía con recomendaciones simples para futuros diseños de este tipo de estructuras, teniendo en consideración lo incluido en el alcance de la memoria.

Se destaca el hecho de la utilización del promedio entre la densidad del relave respectivo al proyecto y la densidad del agua para los cálculos respectivos a los pesos del líquido contenido en el estanque.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Referencias de costos	1
1.1.2. Importancia del agua	3
1.1.3. Estanques espesadores y/o clarificadores	3
1.1.4. Tipos de Estanques	5
1.1.5. Funcionamiento	6
1.1.6. Problemas típicos	6
1.1.7. Aportes al diseño de estanques	7
1.2. Objetivos	9
1.2.1. Objetivo principal	9
1.2.2. Objetivos específicos	9
1.3. Metodología	10
1.4. Alcance	11
2. Marco Teórico	12
2.1. Cargas sísmicas en fluidos con densidad homogénea	12
2.1.1. Presiones impulsivas	12
2.1.2. Presiones convectivas	14
2.1.3. Ecuaciones utilizadas norma ACI	16
2.2. Cargas sísmicas en fluidos con densidad variable	18
2.2.1. Metodología	19
2.2.2. Masa líquido de estanque	22
2.2.3. Caso impulsivo	23
2.2.4. Caso convectivo	23
2.3. Estadística en base a memorias de cálculos existentes	25
2.4. Resultados obtenidos	34
2.5. Simplificaciones para ecuaciones	41
2.5.1. Valores de altura de centro de gravedad masa impulsiva	41
2.5.2. Valores de altura de centro de gravedad masa convectiva	41
2.5.3. Masa impulsiva	41
2.5.4. Masa convectiva	42
2.5.5. Análisis cambios propuestos	42
3. Condiciones de diseño	44
3.1. Bases de diseño	44
3.1.1. Materiales	44
3.1.2. Cargas a considerar	45
3.1.3. Factores de seguridad	45
3.1.4. Parámetros geotécnicos	45
3.1.5. Parámetros sísmicos	46
3.1.6. Factor de importancia	47
3.1.7. Espectro de diseño	50
3.1.8. Coeficientes sísmicos	50

3.1.8.1.	Impulsivo	50
3.1.8.2.	Convectivo	52
3.1.8.3.	Vertical	53
3.2.	Combinaciones de cargas	55
3.2.1.	Estanques superficiales	55
3.2.2.	Estanques enterrados	55
4.	Metodología de diseño	57
4.1.	Cálculo de cargas	57
4.1.1.	Peso propio	57
4.1.1.1.	Cálculo de masas	59
4.1.2.	Cargas de operación	60
4.1.3.	Carga inercial	60
4.1.4.	Presión hidrostática del líquido almacenado	60
4.1.5.	Cargas sísmicas	62
4.1.6.	Presiones hidrodinámicas del líquido almacenado	62
4.2.	Cálculo de cortes y momentos basales	64
4.2.1.	Corte basal	64
4.2.2.	Momento basal	64
4.3.	Diseño revancha por ola sísmica	65
4.4.	Diseño de hormigón armado	67
4.4.1.	Determinación de esfuerzos	67
4.4.1.1.	Tracción	67
4.4.2.	Armaduras	69
4.4.2.1.	Distanciamiento mínimo de refuerzos	69
4.4.2.2.	Armadura mínima	70
4.4.3.	Control de ancho de grietas	70
4.4.3.1.	Flexión	70
4.4.3.2.	Tracción pura	71
4.4.4.	Hormigón postensado	72
4.5.	Estimaciones iniciales	74
4.5.1.	Cubicación hormigón	74
4.5.2.	Corte y momento basal	74
4.5.3.	Armadura anular a requerir	75
5.	Guía de diseño	77
5.1.	Tablas resumen	77
5.1.1.	Modificaciones a alturas y masas convectivas/impulsivas	77
5.1.2.	Parámetros sísmicos	77
5.1.3.	Estimaciones iniciales	78
5.2.	Pasos a seguir	79
5.3.	Ejemplo simple de diseño	80
5.3.1.	Estimaciones iniciales	80
6.	Conclusiones y recomendaciones	82
7.	Glosario	86

Bibliografía	90
8. Anexos	91

Índice de Tablas

1.	Tabla datos espesadores-clarificadores.	26
2.	Cálculo de valores según norma ACI	27
3.	Cálculo de valores según memoria	28
4.	Diferencia de valores obtenidos ACI-memoria	28
5.	Peso específico de relave y a utilizar.	29
6.	Factores de seguridad	45
7.	Factores de durabilidad ambiental.	45
8.	Zonas sísmicas asignadas CODELCO.	46
9.	Aceleración efectiva, Nch 2369.	46
10.	Parámetros sísmicos según tipo suelo, Nch 2369.	46
11.	Clasificación complementaria a Nch3171, para estructuras.	48
12.	Coeficiente de importancia.	50
13.	Tablas coeficiente sísmico por división de Codelco.	51
14.	Combinaciones de cargas según método ASD estanques superficiales, tensiones terreno.	55
15.	Combinaciones de carga según método LRFD, estanques superficiales, Muros.	55
16.	Combinaciones de cargas estanques enterrados, tensiones terreno.	56
17.	Combinaciones de cargas estanques enterrados, Muros.	56
18.	Valores a utilizar estimaciones iniciales	75
19.	Tabla Resumen fórmulas simplificadas	77
20.	Parámetros Sísmicos	77
21.	Parámetros Sísmicos 2	77
22.	Tabla resumen estimaciones iniciales	78
23.	Resultados ejemplo estimaciones iniciales	81

Índice de Figuras

1.	Consumo de agua, industria minera, Chile 2018-2019. Fuente: Cochilco.[16][17]	3
2.	Espesador tipo, vista perfil	5
3.	Tipos de espesadores	6
4.	Ejemplo de espesador	6
5.	Espesador de Relaves de CODELCO MMH.	11
6.	Representación comportamiento de líquido en estanque.	13
7.	Volumen estanque considerado	18
8.	Comportamiento de la densidad dentro de estanque (ejemplo para densidad relave 2 [ton/m3])	19
9.	Método G.W. Housner caso impulsivo estanque rectangular	20
10.	Método G.W. Housner caso convectivo estanque rectangular	21
11.	Perfil típico muro estanque	25

12.	Ejemplo tracción anular	30
13.	Gráfico espesor de muros en estanques.	32
14.	Gráfico espesor de zapata en estanques.	32
15.	Gráfico ancho de zapata en estanques.	33
16.	Gráfico comparativo para valores de h_c , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.	35
17.	Gráfico comparativo para valores de h_i , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.	35
18.	Gráfico comparativo para valores de W_c , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.	36
19.	Gráfico comparativo para valores de W_i , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.	36
20.	Gráfico comparativo para valores de ω^2 , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.	37
21.	Gráfico comparativo para valores de T_c , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.	38
22.	Comparación porcentual resultados - corte y momento	39
23.	Clasificación de estructuras según importancia, Nch2369.	49
24.	Coefficiente de importancia según Nch2369.	49
25.	Tabla 5.7, Nch 2369.	51
26.	Coefficiente C_w para estanques circulares.	52
27.	Comportamiento de coeficiente convectivo adoptado para distintos periodos	53
28.	Cálculo masa sísmica.	57
29.	Sección típica espesador.	58
30.	Presión hidrostática.	61
31.	Ejemplo representación diferencia de carga hidrostática para densidad variable, $\rho_L = 1.67[\text{ton}/\text{m}^3]$, $H_L = 3.65[\text{m}]$	61
32.	Distribución de presiones muro para presiones hidrodinámicas.	62
33.	Distribución de presiones en el manto.	63
34.	Movimiento del fluido e estanque.	65
35.	Tracción	67
36.	Efecto presión hidrostática en muros con unión muro-losa rígidos	68
37.	Anchos admisibles de grietas en hormigón armado bajo cargas de servicio. .	71
38.	Muro perimetral hormigón para postensado.	73
39.	Fierros hormigón postensado	73
40.	Gráficos estadísticos de diseños actuales para estimaciones iniciales de espesores de hormigón	84
41.	Gráfico comparativo para valores de h_i , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.	92
42.	Gráfico comparativo entre valor de h_i de densidad homogénea memoria y ACI.	93
43.	Gráfico comparativo para valores de h_c , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.	94
44.	Gráfico comparativo entre valor de h_c de densidad homogénea memoria y ACI.	95
45.	Gráfico comparativo para valores de W_i , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.	96
46.	Gráfico comparativo entre valor de W_i de densidad homogénea memoria y ACI.	97

47.	Gráfico comparativo para valores de W_c , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.	98
48.	Gráfico comparativo entre valor de W_c de densidad homogénea memoria y ACI.	99
49.	Gráfico comparativo para valores de ω^2 , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.	100
50.	Gráfico comparativo entre valor de ω^2 de densidad homogénea memoria y ACI.	101
51.	Gráfico comparativo para valores de T_c , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.	102
52.	Gráfico comparativo entre valor de T_c de densidad homogénea memoria y ACI.	103

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Chile desde sus inicios ha sido un país que obtiene sus riquezas principalmente por la extracción de recursos naturales, que inicialmente pasaba por la industria del salitre (1880-1930). Esta, al ser desvalorizada por la entrada al mercado por parte del salitre sintético, provoca que en Chile el mayor y principal recurso de exportación sea el Cobre, que hasta hoy en día es la principal materia prima que el país exporta al resto del mundo.

La industria minera encabezada por la corporación del cobre de Chile (CODELCO) y empresas privadas se encargan de la extracción y explotación de este recurso para generar un aporte económico significativo.

Para esto, se realizan varios procesos industriales para la extracción del cobre, en donde se logran mencionar los procesos de prospección, exploración, extracción, chancado, molienda, lixiviación, flotación, fundición, electro refinación, entre otros.

Todos los procesos llevados a cabo para obtener cobre producen desechos mineros, los cuales constituidos por mezclas de rocas molidas, agua y minerales, entre otros le dan paso al nombre de relave.

Además, todos estos procesos tienen un elevado requerimiento de agua, por lo que se vuelve fundamental este recurso para industrias, que en su mayor parte, se ubican en localidades donde el agua justamente es un recurso que escasea.

Ante esta necesidad, la solución utilizada mayoritariamente por todas las empresas de la industria es la construcción de estanques espesadores y clarificadores de relave, estructuras formadas por hormigón u acero, que tienen por objetivo trabajar el relave de manera de optimizar el consumo de agua en las industrias, extrayendo el agua de estos desechos para reutilizarlas en las distintas faenas.

Los espesadores y clarificadores son estructuras de hormigón de grandes dimensiones. Los diámetros varían entre 30 m y 120 m, en que los diámetros menores corresponden a los espesadores de concentrado y los clarificadores mineros.

Los diámetros mayores son espesadores de relaves y algunos clarificadores de industrias de la celulosa. La altura del muro en general es inferior al 10 % del diámetro, con la mayor fracción con muros entre el 3 % y el 7 % con un promedio del 5 %.

1.1.1. Referencias de costos

Los espesadores de relaves son obras de alto costo y plazo de construcción.

Por ejemplo, para un espesador de 100 m de diámetro:

Volumen hormigón muro:	1500 m ³
Volumen hormigón fundación:	1500 m ³
Volumen hormigón núcleo y túnel:	2000 m ³
Volumen pavimento:	4000 m ³
Otros misceláneos:	1000 m ³

Total estimado: 10.000 m³ de hormigón y unas 1.000 ton de acero de refuerzo.

De acuerdo a revisión de costos involucrados en la Gran Minería, el m³ de hormigón le cuesta al mandante unos US\$ 1500 en costo directo y cerca de otros US\$ 1000 en costos indirectos en los casos mas conservadores. Esto considerando todo lo que es moldaje, transporte, arriendo de oficinas, y todo tipo de gastos involucrados en la realización del proyecto.

Es por esto, que se pueden estimar valores iniciales para las construcciones de estanques espesadores y clarificadores de esas dimensiones, en un orden de magnitud cercano a los \$ 25 millones, esto es sin considerar los costos asociados a movimientos de tierra, que pueden incrementar considerablemente este valor.

De acuerdo a la experiencia de proyectos actuales, si se somete el diseño a una revisión y un estudio especializado, se podría lograr una reducción significativa de esfuerzos de diseños, y así reduciendo volumen de hormigón requerido, obteniendo economías considerables para la industria minera.

Por otro lado, se debe tener presente que la mayor parte de las faenas mineras se ubican en zonas de acceso complicado y con temporadas invernales que pueden detener la construcción, especialmente la de obras enteramente expuestas, como los espesadores.

Es por esto que una reducción de los tiempos de construcción de los espesadores evita grandes gastos de dinero para el mandante.

Para el caso en estudio, si se logra una optimización de esfuerzos de diseño, y esto genera una reducción del m³ de hormigón a requerir, resultaría en una reducción importante en la inversión monetaria necesaria, siendo un factor bastante atractivo para mandantes que necesitan mejorar su asignación de recursos.

Al ser estructuras de dimensiones significativas y estar ubicadas en zonas de difícil acceso como son los campos mineros, las cargas sísmicas y cargas de viento pueden ser, entre otras, factores de importancia a la hora de realizar un diseño de los estanques.

A su vez y como se ha dado a conocer, estas estructuras son motivo de grandes inversiones, por lo que generar un diseño que no necesite ser sometido a modificaciones una vez realizado y que optimice recursos de construcción, es de gran relevancia para los mandantes en la industria minera.

Es por esta razón que nace la iniciativa de realizar una guía base que se encargue de evitar errores comunes y sea indicador de los procedimientos a realizar para lograr una

optimización en los recursos de volúmenes de hormigón en base a un análisis estadístico basados en los diseños ya realizados de este tipo de obra en la industria minera.

1.1.2. Importancia del agua

El agua es un recurso de alto consumo en las labores industriales, especialmente en las localidades más áridas como lo son la región de Antofagasta, la cual es la región con mayor producción de cobre en Chile (54 % de la producción total).

Los consumos de este recurso son elevados de tal manera que el lograr reutilizar el mayor porcentaje factible en las faenas es de significativa importancia.

La Dirección de Estudios y políticas públicas de la Comisión Chilena del Cobre, presenta en porcentajes los consumos de aguas utilizados en los años 2018 y 2019 (Figura 1).

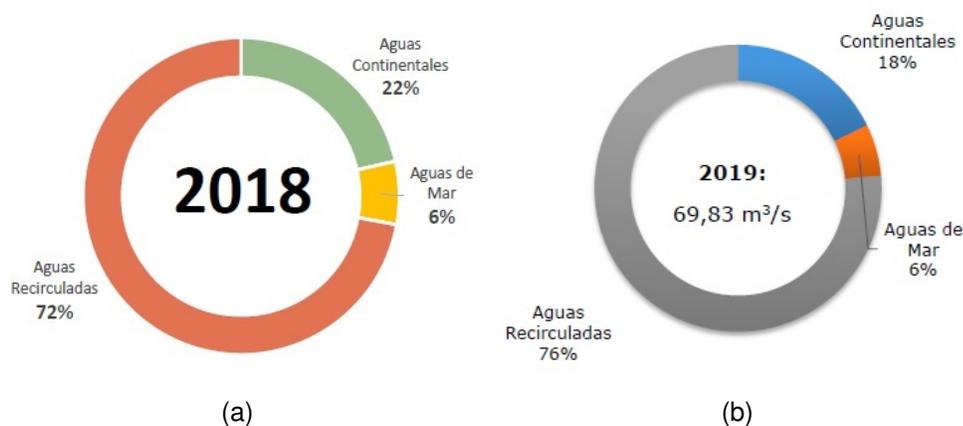


Figura 1: Consumo de agua, industria minera, Chile 2018-2019.
Fuente: Cochilco.[16][17]

En donde se puede ver que la mayor cantidad de agua utilizada es la recirculada con 72% y 76% en 2018 y 2019 respectivamente, lo que deja en evidencia de la importancia del reutilizar este recurso.

1.1.3. Estanques espesadores y/o clarificadores

En la industria minera se utilizan estanques de grandes dimensiones como lo son los estanques espesadores y clarificadores de relave, con el objetivo de recuperar y reutilizar las grandes cantidades de agua utilizadas en las faenas mineras.

Los espesadores, o clarificadores, según la aplicación, se pueden usar para recuperar agua de proceso reutilizable inmediatamente, así como para extraer finos y otros mate-

riales. Los espesadores son utilizados por productores de minería y agregados, así como por contratistas ambientales en industrias como la gestión de aguas residuales, para separar sólidos de líquidos en suspensión.

Los beneficios de los espesadores pueden variar de un usuario a otro según las necesidades del productor y la industria. A modo de ejemplo, los espesadores se pueden usar en lugares donde el agua es escasa o muy cara, como el caso de las mineras en Chile, siendo así, estos estanques proporcionan agua de proceso reutilizable inmediatamente a la planta.

También se pueden usar para reducir el tamaño de los estanques de sedimentación o las instalaciones de almacenamiento de relaves. En algunas industrias, se usan como clarificadores para eliminar minerales contaminantes y finos del agua de proceso.

Estas estructuras son construida en base a materiales como hormigón, hormigón postensado, acero, entre otros.

En el interior del estanque es donde se vierte el relave proveniente de procesos de faenas anteriores, junto en su interior se encuentra a una estructura metálica que cumple las funciones de rastra, para mezclar y provocar un movimiento circular el líquido interior del estanque, esta rastra a su vez hace de puente para las labores de mano de obra y mantención. Las bases de estos estanques suele ser de fondo cónica, esto para ayudar a la decantación del material y que al mismo tiempo funciona como pedestal.

Estos estanques tienen como principal característica ser de diámetros de considerable magnitud, aproximadamente se pueden encontrar con diámetros en intervalos que van desde los 40 metros hasta 120 metros, mientras que la altura perimetral de estas estructuras son relativamente pequeñas en consideración a su diámetro, frecuentemente no superando los 6 metros de altura perimetral.

Si se considera el fondo del estanque, que usualmente se encuentra de forma cónica con cierto grado de inclinación en dirección al centro de la estructura, ahí se puede llegar a superar las alturas de los 6 metros comúnmente encontrados.

Cuando se habla de estanques clarificadores, espesadores de concentrado y espesadores de relave, podemos categorizar las densidades aproximadas que están en su interior, siendo mas explicito, encontramos usualmente las siguientes densidades correspondientes:

- Clarificadores: cercanos a 1.0 [ton/m³]
- Espesadores de relaves: 1.5 a 1.7 [ton/m³]
- Espesadores de concentrado: 1.8 a 1.9 [ton/m³]

La variación de la densidad dentro del estanque varía entre 1.0 [ton/m³] o algo parecido en la zona superior, y el valor anotado en la zona baja más cercana al fondo, lo

que conduce a densidades medias de 1.3 para los espesadores de relaves y 1.5 para los espesadores de concentrado.

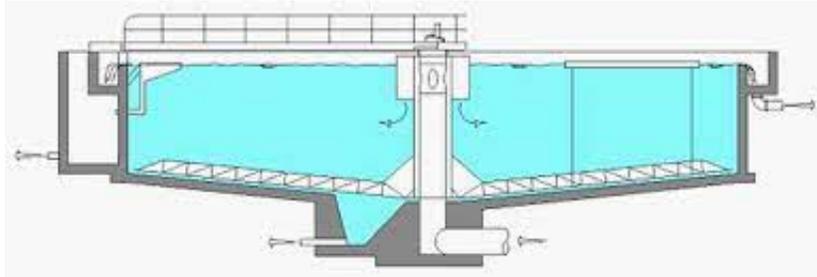


Figura 2: Espesador tipo, vista perfil

1.1.4. Tipos de Estanques

Dentro de los tipos de estanques existentes se pueden considerar estanques de diferentes formas geométricas, tanto de simetría en un eje como doblemente simétricas, en donde podemos encontrar los estanques con forma rectangular, elíptica, compuestos y circular.

Los más típicamente utilizados en la industria minera son los estanques con doble eje de simetría de forma circular.

Para las diferentes geometrías posibles existen dos tipos de estanques, apoyados directamente en el suelo y estanques elevados.

Para el caso de los estanques elevados, el movimiento del líquido contenido responde a la aceleración del tanque y esta depende a su vez de la aceleración del terreno y de las características de la estructura de apoyo.

Mientras que los estanques directamente apoyados en el suelo, es decir, en donde la altura a la que se encuentra el centro de gravedad del estanque no supera la altura total del muro, el movimiento responde directamente a la aceleración del terreno.

En la presente memoria, solamente nos referiremos a estanques de hormigón armado de grandes diámetros, que se encuentran apoyados directamente en el suelo.

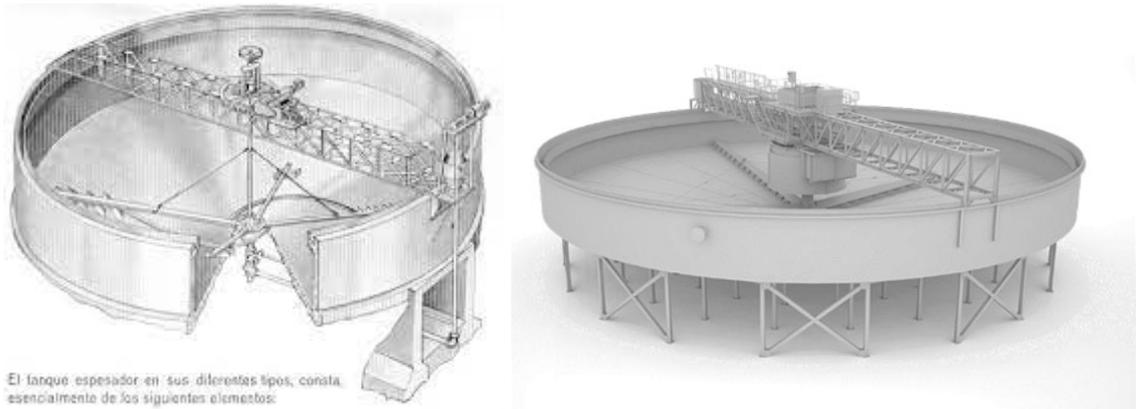


Figura 3: Tipos de espesadores

1.1.5. Funcionamiento

Los estanques espesadores y clarificadores de relave tienen un funcionamiento simple, el relave proveniente de las faenas anteriores es ingresado al estanque vía un ducto. Este fluido con ayuda de químicos coagulantes y floculantes y mediante el movimiento de la rastra, logra generar una separación en el líquido debido a la diferencia de densidades entre las fases sólidas y líquidas del fluido, estas por gravedad decantan al fondo de la estructura, dejando el líquido más puro en la zona superior o superficie.

Este líquido puro, es expulsado debido al rebalse ocasionado por el movimiento de la rastra, a una canaleta ubicada en la zona superior de los muros, llevando este líquido para ser reutilizado en las diferentes faenas mineras. Mientras que en la zona inferior en donde decantan los sólidos de dicho relave son descargados del estanque desde la base a través de la bomba centrífuga de caudal.

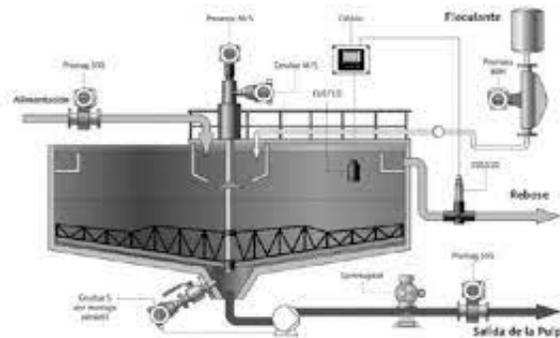


Figura 4: Ejemplo de espesador

1.1.6. Problemas típicos

La industria minera maneja elevadas cifras económicas a la hora de ejecutar sus funciones, es por esto que la inversión en estructuras que logren reducir costos es muy importante, puesto que ayuda a maximizar las utilidades. No obstante, y sumado a lo

anterior se busca ser lo más consciente con el ambiente posible, es por eso que la recuperación del agua utilizada para estas faenas es de gran relevancia.

Dicho esto, los principales problemas que aquejan a la hora de diseñar, construir, y faenar estos estanques, son las pérdidas y no optimización del agua, junto el gasto excesivo de material de construcción. Estos problemas pueden deberse a un mal diseño inicial de la estructura y/o al mal manejo en faena.

La dificultad a la hora de diseñar estos estanques es modelar de la manera más precisa las cargas de presión ejercidas por el fluido que se encuentra en el interior del estanque, debido a la densidad desconocida del relave, aunque esta puede ser aproximada, pero la realidad es que la densidad del líquido es variable a lo largo de la altura del estanque, i.e., no es homogénea, es por esto que se busca modelar de manera de generar el menor margen de error a la hora de calcular las presiones.

A esto se le agrega que durante la etapa de proyecto, que sin previa experiencia se puede llegar al error de modelar el muro perimetral como muros en voladizo, obteniendo momentos de flexión en la base importantes, pero dejando de lado lo que son los esfuerzos anulares.

Algo de mucha importancia debido a que al ser estanques de diámetros muy grandes, trabajan primariamente como anillos, por lo tanto las tracciones en el perímetro de la estructura son de significativa importancia a la hora del diseño, que no se debe pasar a llevar teniendo en cuenta que es usual trabajar y tener los muros separados de la losa de fondo.

Otro punto a considerar es la incorporación de juntas de dilatación con el objetivo de controlar la fisuración, esto puede generar un problema a la hora del llenado del estanque puesto que al cortar la armadura anular deja en evidencia juntas que se abren.

Debido a las grandes dimensiones del estanque, el viento genera olas permanentes que pueden en su defecto, provocar que el líquido del estanque salga en el lado del sotavento, pudiendo inclusive erosionar el relleno. De manera que se busca dar una alerta válida para considerar protecciones debidas y evitar la erosión y eventualmente conducir derrames.

Si bien este no es un error de diseño estructural, es un problema frecuente, especialmente en zonas con vientos, como ocurre en muchas instalaciones mineras, por lo que se requiere hacer mención de ello.

1.1.7. Aportes al diseño de estanques

A lo largo de los años han surgido diferentes nombres que han logrado ser un aporte en la creación de diseños de estanques que contienen fluidos en su interior, enfocándose en las presiones que se ejercen por parte del líquido interior del estanque a la estructura en sí, en presencia de aceleraciones sísmicas. Es por ello que se hace mención junto con su aporte a los siguientes referentes tomados en cuenta para esta memoria de título:

- Westergaard (1933): Determinó las presiones sobre una pared vertical rectangular sujeta a aceleraciones horizontales [11].
- Jacobsen (1949): Solucionó el problema de un tanque cilíndrico con líquido y una pila cilíndrica rodeada del mismo [12].
- Werner y Sundquist (1949): Extendieron el trabajo de Jacobsen a un recipiente rectangular [10].
- Graham y Rodríguez (1952): Realizaron un análisis completo de las presiones en un recipiente rectangular [15].
- George W. Housner (1954, 1957): Resuelve y presenta formulas simples para los distintos tipos de estanques de doble simetría, tanto para muros rígidos como para muros flexibles, para fluidos con presiones impulsivas y convectivas [5][6].
- Hunt y Pristley (1978, 1982): Desarrollaron fórmulas que permiten seguir las variaciones de características importantes durante acelerogramas sísmicos específicos [13][14].
- Aldo Ivan Ramírez (1996): Propone método aproximado en base a los trabajos anteriores mencionados, evitando soluciones de ecuaciones diferenciales parciales y presentando soluciones simples [2].

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo principal

Realizar un análisis, y generar una guía base para el diseño de espesadores y clarificadores, buscando optimizar recursos y costos para la construcción de los estanques en la industria minera.

1.2.2. Objetivos específicos

Resumir la experiencia de diseño de estanques de hormigón circulares apoyados en suelo cuyo uso es para espesadores y clarificadores de la minería.

Construir una guía de diseño que recoja los diseños actuales, preparados por diferentes empresas del rubro actual y alerte sobre los problemas detectados.

Estudiar las soluciones que los ingenieros dan actualmente a los principales problemas del diseño y tratar en particular el tema de las presiones sísmicas sobre el muro perimetral para el caso de un fluido de densidad variable en profundidad.

Construir una estadística a partir de una buena muestra de espesadores y clarificadores diseñados para instalaciones modernas, que permita prediseños simples y rápidos.

1.3. Metodología

Revisión bibliográfica, basada en la lectura de la recopilación de datos obtenidos mediante un número de memorias de cálculos de proyectos que ya han sido realizados y ejecutados en las empresas de la industria minera.

Estudio de cargas a considerar, dando énfasis a las cargas sísmicas en líquidos de densidades variables.

Generación estadística de los proyectos realizados, obteniendo en números las cantidades de recursos utilizados, geometrías, condiciones de diseños y volúmenes de obra utilizados.

Análisis de la información y generación de guía de recomendaciones de diseño, en base a lo observado y analizado, generar una guía de diseño que tome en cuenta las ventajas y desventajas de proyectos anteriores.

1.4. Alcance

La realización de esta memoria de título tiene como limitaciones el enfoque directo en estanques espesadores de relave/concentrado y clarificadores, diseñados con hormigón armado, de geometría circular doblemente simétrica apoyados directamente sobre el terreno, junto con una relación de altura-diámetro de la estructura $\frac{H_L}{D} \leq 10\%$. Esto pensando en el diseño de la estructura para la utilización posterior en zonas industriales mineras a lo largo de Chile.

Esto considerando que se enfatiza el diseño para la industria minera realizada en Chile, en donde de manera usual, la construcción de estas estructuras no escapa a la relación recientemente señalada.

Por otra parte, la memoria hace énfasis en lo que es el estudio de cargas de presiones sísmicas en muros perimetrales, para estanques con fluidos de densidad variable en su interior y el surgimiento de modificaciones propuestas a las ya existentes dictadas en la norma americana ACI, sin generar cambios en sus fórmulas en sí, sino que añadir modificaciones extras a modo de sugerencia para el ingeniero a cargo del diseño.

Junto con agregar una guía de recomendaciones basadas en estadísticas de proyectos de estanques ya realizados, entregando métodos simples y fáciles para realizar estimaciones iniciales para cálculos de corte y momentos basales y pre diseños de cubicación de hormigón y armaduras. Las cuales serán entregadas como sugerencia para el ingeniero.



Figura 5: Espesador de Relaves de CODELCO MMH.

2. Marco Teórico

2.1. Cargas sísmicas en fluidos con densidad homogénea

Para los estanques espesadores y clarificadores de relaves, una de las cargas mas relevantes a considerar son las cargas que surgen debido a movimientos telúricos, puesto que al ser estos contenedores de grandes volúmenes de fluidos de densidades variables, la carga de estos líquidos influye de manera importante a la hora de diseñar los muros de estos estanques.

Para el estudio de las presiones del fluido, que se ejercen al estanque en presencia de sismos, el ingeniero sísmico Estadounidense George W. Housner [5][6]. Ingeniero del cual se utilizan sus ecuaciones obtenidas para el diseño de estanques como fuente de origen a las fórmulas y ecuaciones presentadas en las normas ACI.

Housner revela que el movimiento sísmico en el fluido genera dos tipos de cargas, conocidas como las cargas generadas por las presiones Impulsivas y las presiones Convectivas. Estas son asociadas a las presiones que se ejercen por parte del fluido debido al movimiento sísmico generado por parte de los muros del contenedor y por el movimiento sísmico ejercido por el fluido en si, respectivamente.

Para lo realizado por Housner se debe tener en cuenta que su trabajo está basado en la solución de la ecuación de Laplace cumpliendo las condiciones de borde adecuadas y teniendo las siguientes consideraciones generales:

- Líquido homogéneo, incompresible y no viscoso.
- El flujo producido por el movimiento es irrotacional.
- Los números de Reynolds son suficientemente pequeño para despreciar efectos de turbulencias.

2.1.1. Presiones impulsivas

Cuando una estructura que contiene fluido en su interior se expone en presencia de un sismo, se generan movimientos tanto verticales como horizontales, viéndose afectada la estructura diseñada, esto se refleja en que los muros del recipiente sufre aceleraciones en distintas direcciones provocando aceleración en el mismo fluido contenido. Housner es el ingeniero el cual obtiene de manera simplificada soluciones para representar las presiones ejercidas debido a las aceleraciones horizontales en la estructura.

Para casos en donde el diámetro de los contenedores sobrepasan de manera significativa las respectivas alturas de muro ($\frac{H_L}{D} \leq 0.1$) los resultados de Housner generan una aceptable precisión en cuanto a los resultados numéricos.

Las presiones impulsivas generan que el movimiento del estanque en conjunto del fluido se comporten de tal manera que puede ser representada como una sola masa que oscila (Figura 6).

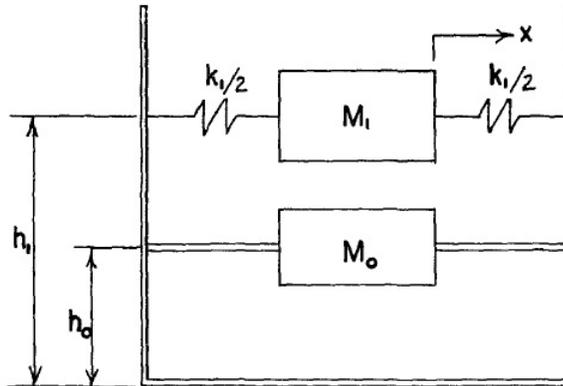


Figura 6: Representación comportamiento de líquido en estanque.

Siguiendo con los métodos de diseños por parte de la norma americana ACI 350.3 [7], que se encuentra fuertemente inspirada en los resultados obtenidos por Housner, se tienen las siguientes ecuaciones presentadas de las cuales surgen las ecuaciones que aparecen en la norma americana.

- Ecuación de movimiento del fluido

$$\dot{u} = \dot{u}_0 \cdot \frac{\cosh\left(\sqrt{3} \cdot \frac{x}{H_L}\right)}{\cosh\left(\sqrt{3} \cdot \frac{R}{H_L} \cdot \cos(\phi)\right)} \quad (2.1)$$

- Presiones en muros

$$p_{muro}(y) = -\rho \cdot \dot{u}_0 \cdot H_L \cdot \sqrt{3} \cdot \cos(\phi) \left[\frac{y}{H_L} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{y}{H_L}\right)^2 \right] \cdot \tanh\left(\sqrt{3} \cdot \frac{R}{H_L}\right) \quad (2.2)$$

- Presiones en fondo de estanque

$$p_{fondo}(x) = -\rho \cdot \dot{u}_0 \cdot H_L \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\sinh\left(\sqrt{3} \cdot \frac{x}{H_L}\right)}{\cosh\left(\sqrt{3} \cdot \frac{R}{H_L} \cdot \cos(\phi)\right)} \quad (2.3)$$

- Fuerzas en muros

$$P_{muro} = -\rho \cdot \dot{u}_0 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot H_L \cdot \frac{\tanh\left(\sqrt{3} \cdot \frac{R}{H_L}\right)}{\sqrt{3} \cdot \frac{R}{H_L}} \quad (2.4)$$

- Fuerza en fondo de estanque

$$P_{fondo} = -\rho \cdot \dot{u}_0 \cdot H_L^2 \cdot R \cdot \cos(\phi) \cdot \left(1 - \frac{\tanh\left(\sqrt{3} \cdot \frac{R}{H_L} \cdot \cos(\phi)\right)}{\sqrt{3} \cdot \frac{R}{H_L} \cdot \cos(\phi)} \right) \quad (2.5)$$

- Punto de aplicación

- EBP

$$h_i = \frac{3}{8} \cdot H_L \quad (2.6)$$

- IBP

$$h'_i = \frac{3}{8} \cdot H_L \cdot \left(1 + \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{\sqrt{3} \cdot \frac{R}{H_L}}{\tanh\left(\sqrt{3} \cdot \frac{R}{H_L}\right)} - 1 \right) \right) \quad (2.7)$$

Nota (EBP e IBP, excluye e incluye la presión en el fondo del estanque, respectivamente.)

- Masa equivalente

$$W_i = W_L \cdot \frac{\tanh\left(\sqrt{3} \cdot \frac{R}{H_L}\right)}{\sqrt{3} \cdot \frac{R}{H_L}} \quad (2.8)$$

2.1.2. Presiones convectivas

Según Housner, las presiones convectivas son generadas por las mismas oscilaciones del fluido que se encuentra sujeto a aceleraciones dentro del estanque, estas presiones son proporcionales a la amplitud del movimiento y pueden representarse como una serie de masas ligadas por elementos de diferentes rigideces (Figura 6), para estas oscilaciones se obtienen sus periodos y frecuencias naturales así como las masas equivalente para los distintos modos.

Housner en su estudio revela que el comportamiento oscilante del fluido puede representarse de mejor manera para los modos impares, por lo que las ecuaciones solo hacen referencias para modos “n”, siendo “n” un numero impar.

- Oscilaciones libres del fluido

$$\theta = \theta_h \frac{\sinh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{y}{R}\right)}{\sinh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{H_L}{R}\right)} \sinh(\omega t) \quad (2.9)$$

- Frecuencia natural del modo de vibración

$$\omega_c^2 = \sqrt{\frac{27}{8}} \frac{g}{R} \tanh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{H_L}{R}\right) \quad (2.10)$$

- Período modo convectivo

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_c} \quad (2.11)$$

- Presiones en muros

$$p_{muro} = -\frac{\rho R^3}{3} \frac{\partial \theta''}{\partial y} \left[1 - \frac{\cos^2(\phi)}{3} - \frac{\sin^2(\phi)}{4} \right] \cos(\phi) \quad (2.12)$$

con

$$\frac{\partial \theta''}{\partial y} = - \left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{1}{R} \frac{\cosh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{y}{R}\right)}{\sinh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{H_L}{R}\right)} \right) \theta_h \omega^2 \sin(\omega t) \quad (2.13)$$

- Presión en fondo de estanque

$$p_{fondo}(x) = -\rho \omega^2 \sqrt{\frac{3}{8}} \frac{R^2}{\sinh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{H_L}{R}\right)} \left[\frac{x}{R} - \frac{1}{3} \left(\frac{x}{R}\right)^3 - \frac{1}{4} \frac{x}{R} \left(\frac{z}{R}\right)^2 \right] \theta_h \sinh(\omega t) \quad (2.14)$$

- Fuerza en muros

$$P_{muro} = -\pi \frac{11}{48} \rho \omega^2 R^4 \theta_h \sin(\omega t) \quad (2.15)$$

Housner observó que la fuerza total sobre el tanque por el líquido es la misma que la producida por una masa equivalente M_1 montada elásticamente (Figura 6). En lo que refiere a la aplicación para esta memoria, la masa M_1 es equivalente a la masa convectiva W_c .

$$x_1 = A_1 \sin(\omega t) \quad (2.16)$$

$$F_1 = -M_1 A_1 \omega^2 \sin(\omega t) \quad (2.17)$$

$$E_c = \frac{1}{2} M_1 A_1^2 \omega^2 \sin^2(\omega t) \quad (2.18)$$

- Masa equivalente

$$M_1 = W_c = W_L \frac{1}{4} \left(\frac{11}{12}\right)^2 \sqrt{\frac{27}{8}} \frac{R}{H_L} \tanh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{H_L}{R}\right) \quad (2.19)$$

$$A_1 = \theta_h \frac{\frac{12}{11} H_L}{\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{H_L}{R} \tanh\left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{H_L}{R}\right)} \quad (2.20)$$

- Rigidez M_1

$$k_1 = \frac{27}{32} \left(\frac{11}{12} \right)^2 \frac{g}{H_L} \tanh^2 \left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{H_L}{R} W_L \right) \quad (2.21)$$

- Punto de aplicación

- EBP

$$h_c = H_L \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{H_L}{R} \tanh \left(\sqrt{\frac{27}{8}} \frac{H_L}{R} \right)} \right) \quad (2.22)$$

- IBP

$$h'_c = H_L \left(1 - \frac{\cosh(3.68 \frac{H_L}{D}) - 2.01}{3.68 \frac{H_L}{D} \cdot \sinh(3.68 \frac{H_L}{D})} \right) \quad (2.23)$$

2.1.3. Ecuaciones utilizadas norma ACI

Las ecuaciones dictadas en la norma ACI 350.3 [7] están basadas en el trabajo realizado por Housner en conjunto con lo que se muestra en la norma de Nueva Zelanda [21].

Estas son las ecuaciones actuales en las que se basan los diseños de estanques, para los cálculos de las masas y altura convectiva como impulsiva, junto con la frecuencia angular convectiva.

Estas ecuaciones presentadas son a las cuales este trabajo de título ha dado enfoque para incluir la variabilidad de la densidad, es decir, ecuaciones adaptadas a estanques con fluidos no homogéneos.

Las ecuaciones mencionadas se presentan de manera que el ingeniero a cargo tenga las herramientas actuales para realizar la labor del diseño del estanque, siendo las ecuaciones las siguientes:

- Masa impulsiva

$$W_i = W_L \cdot \frac{\tanh \left(0.866 \cdot \frac{D}{H_L} \right)}{0.866 \frac{D}{H_L}} \quad (2.24)$$

- Altura impulsiva

$$h_i = \frac{3}{8} \cdot H_L \quad (2.25)$$

- Masa convectiva

$$W_c = W_L \cdot 0.230 \frac{D}{H_L} \cdot \tanh \left(3.68 \frac{H_L}{D} \right) \quad (2.26)$$

- Altura convectiva

$$h_c = H_L \left(1 - \frac{\cosh \left(3.68 \frac{H_L}{D} \right) - 1}{3.68 \frac{H_L}{D} \cdot \sinh \left(3.68 \frac{H_L}{D} \right)} \right) \quad (2.27)$$

- Frecuencia angular convectiva

$$\omega_c^2 = \frac{3.68 g \tanh \left(3.68 \frac{H_L}{D} \right)}{D} \quad (2.28)$$

- Periodo natural convectivo

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_c} \quad (2.29)$$

2.2. Cargas sísmicas en fluidos con densidad variable

Una vez introducido lo que son cargas sísmicas en fluidos con densidad homogénea, se expande estos conocimientos a las áreas en donde la densidad es variable a lo largo del vertical del estanque, puesto que en la práctica, el relave se comporta como un fluido de esta categoría, y se busca la mayor precisión a la hora de calcular las cargas que debe soportar la estructura para realizar un diseño acorde a lo exigido.

Para la obtención de las fórmulas que se presentan en esta memoria, se ha tomado en cuenta los orígenes de los cálculos obtenidos por Housner con la diferencia de que se utiliza una densidad que es variable a lo largo de la altura del estanque.

Para los diseños de muros de los estanques se identifican dos metodologías, la primera considerando los volúmenes cónicos (cono 1 y cono 2, figura 7) y volumen de cilindro.

Y una segunda, considerando volumen del cilindro y despreciando los volúmenes de cono 1 y 2. Siendo esta última metodología mas conservadora ya que ubica el centro de masa en el centro del muro mientras que la anterior la considera por debajo de este subdimensionado la carga aplicada a los muros.

Así mismo se considera para el diseño de fluidos con densidad variable (volumen cilindro únicamente), y de lo cual se obtienen las formulas presentadas en esta sección.

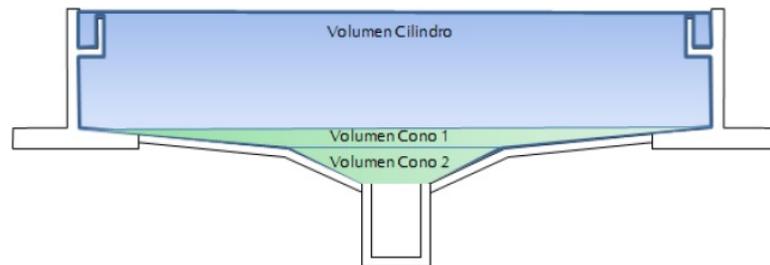


Figura 7: Volumen estanque considerado

Se tiene conocimiento que la densidad de líquido dentro de los estanques de relaves se comporta de manera mayormente lineal con respecto a la altura, siendo el fondo del estanque en donde se encuentra la zona con mayor densidad (figura 8).

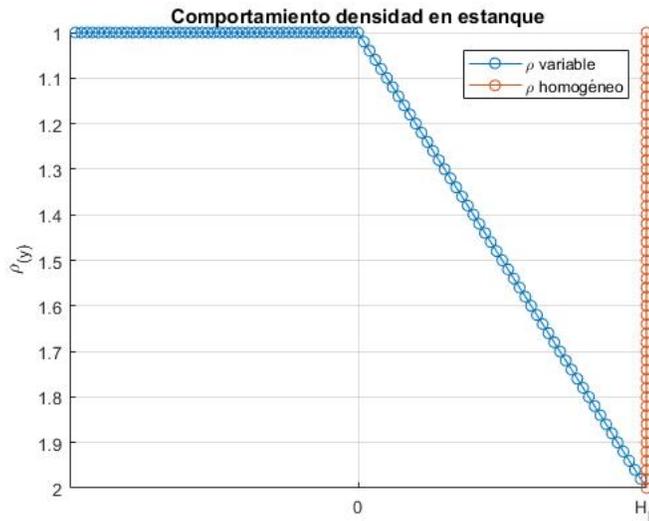


Figura 8: Comportamiento de la densidad dentro de estanque (ejemplo para densidad relave 2 [ton/m³])

Por temas prácticos en la realización de los cálculos, para el caso de obtención de valores respectivos a la masa impulsiva, se considera en el álgebra una densidad linealmente variable. Mientras tanto que para los cálculos que se realizan en el caso del álgebra correspondiente a la masa convectiva se considera una densidad exponencialmente variable. Esto puede realizarse debido a que al ser estanques con alturas relativamente bajas, la densidad exponencial se comporta aproximadamente lineal, por lo que es solo una alternativa para la facilitación de los cálculos matemáticos a realizar.

2.2.1. Metodología

Para la realización de la obtención de las ecuaciones ACI adoptadas para densidad variable, se utiliza el mismo método empleado por G.W. Housner [5] [6], con la diferencia que se le agrega este parámetro en función de la altura del estanque ($\rho_{(y)}$) a lo que antes era considerado como constante.

Se utilizan dos métodos de densidad variable para obtener los resultados algebraicos para la masa impulsiva y convectiva respectivamente. En donde como límites de y , se tiene la superficie del estanque ($y = 0$) y el fondo del estanque ($y = H_L$).

- Linealmente variable (caso impulsivo):

$$\rho_{(y)} = \rho_0 + \frac{(\rho_r + \rho_0)}{H_L} \cdot y$$

- Exponencialmente variable (caso convectivo):

$$\rho_{(y)} = \rho_0 \cdot e^{\ln\left(\frac{\rho_r}{\rho_0}\right) \cdot \frac{y}{H_L}}$$

Esta diferencia de densidades variables se debe a la facilitación algebraica para el desarrollo de las ecuaciones, evitando incidir de manera significativa en los resultados, puesto a que se debe que al ser estanques de baja estatura, el desarrollo de esta densidad exponencial, muestra un comportamiento similar al lineal.

A raíz de esto se puede ver el comportamiento para distintos rangos de densidad máxima del relave (entre 1 y 2 [ton/m³]), representado en los gráficos adjuntos en Anexos.

Estos gráficos muestran los valores para diferentes relaciones de altura-diámetro (H_L/D) con distintos valores de densidad de relave (ρ_r) tanto para la obtención de la masa impulsiva, masa convectiva, altura impulsiva, altura convectiva, frecuencia natural convectiva y período convectivo.

El origen de las ecuaciones planteadas por Housner provienen de las ecuaciones del análisis de una lámina de espesor diferencial de un estanque doblemente simétrico que se encuentra sometido a una aceleración horizontal (figura 9).

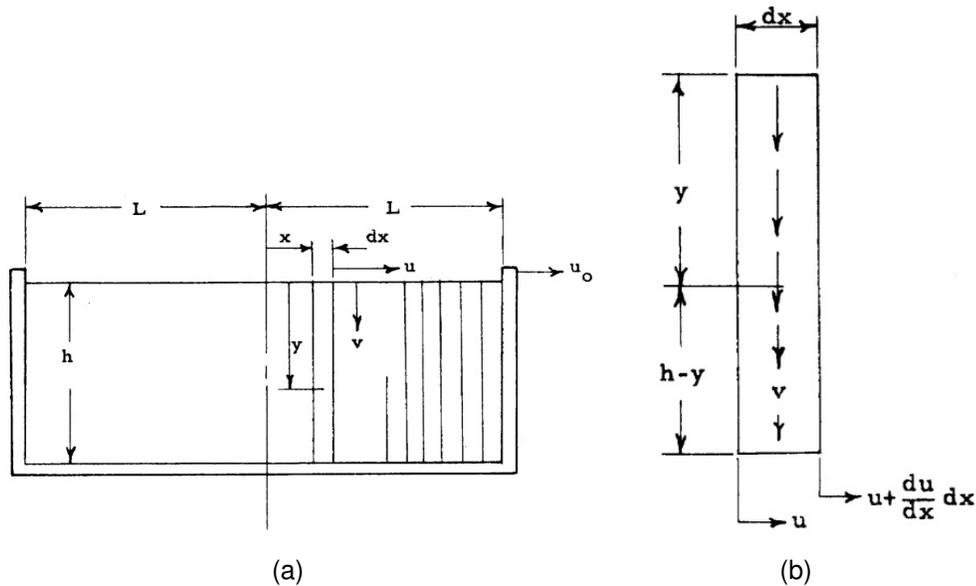


Figura 9: Método G.W. Housner caso impulsivo estanque rectangular

De este análisis se resuelven las integrales correspondientes a la velocidad del fluido (v) en dirección del eje 'Y', y la presión del fluido (p) en conjunto con la fuerza generadas del fluido (Q)

$$v_{(y)} = (h - y) \cdot \frac{du}{dx}$$

$$\begin{aligned}
 p_{(y)} &= -\rho \int_0^y (h - y) \frac{d\dot{u}}{dx} dy \\
 &= \rho h^2 \int_0^h \left[\frac{y}{h} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right] \frac{d\dot{u}}{dx} dy \\
 Q &= -\rho h^2 \int_0^h \left[\frac{y}{h} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right] \frac{d\dot{u}}{dx} dy \\
 &= -\rho \frac{h^3}{3} \frac{d\dot{u}}{dx}
 \end{aligned}$$

Resolviendo esto, y las ecuaciones diferenciales respectivas siguiendo lo dictado en las referencias mencionadas a los libros de Housner, se obtienen las ecuaciones presentadas en la sección .

Para el caso convectivo se considera los principios realizados en el caso impulsivo, añadiendo el factor de movimiento rotacional correspondiente al fluido

Cuando las paredes de un recipiente conteniendo líquido están sujetas a aceleraciones, el líquido es excitado en oscilaciones, las cuales producen presiones tanto en las paredes como en el fondo del tanque. El movimiento del líquido obedece a sus modos naturales de vibración.

Para examinar el primer modo de vibrar, considérese que existen restricciones tales que se forman membranas horizontales rígidas y libres de rotar (figura 10)].

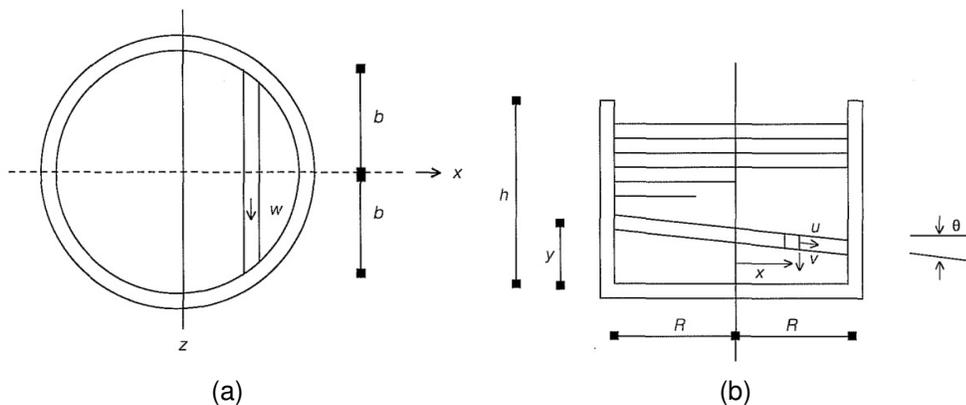


Figura 10: Método G.W. Housner caso convectivo estanque rectangular

Housner (1957) desarrolló expresiones generales para las velocidades del fluido en las direcciones x (u), y (v), z (w) para tanques doblemente simétricos resultando:

$$u = -\frac{1}{b} \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial y} \int_{-R}^x xb \, dx$$

$$w = -z \frac{b'}{b} u$$

$$b' = \frac{db}{dx}$$

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$$

Y utilizando el principio de Hamilton, se iguala la energía cinética y potencial del fluido:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \int_0^h \left[I_z \dot{\theta}^2 + K \left(\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial y} \right)^2 \right] dy$$

$$E_p = \frac{1}{2} \rho g \theta_h^2 I_z$$

Con I_z siendo el momento de inercia respectivo a la geometría y la rigidez respectiva, por Hamilton se tiene que:

$$\int_{t1}^{t2} (E_c - E_p) dt = 0$$

De donde el desarrollo, presentado en los libros de Housner [6], lleva a los resultados presentados en la sección .

La expansión para estanques circulares cabe en el cambio de la utilización del parámetro L (largo de estanque rectangular) por el radio (R) en el caso impulsivo, y la utilización de la inercia rotacional de un círculo ($I_z = \frac{\pi R^4}{4}$) y rigidez ($K = \frac{2\pi}{27} R^6$).

El desarrollo respectivo realizado en esta memoria, es la misma metodología utilizada por Housner a diferencia de la densidad considerada, la cual ya no es constante sino variable ($\rho(y)$), dificultando las ecuaciones presentadas por Housner debido a la integración y la resolución diferencial de este nuevo parámetro, todo este álgebra realizado conlleva a los resultados presentados en este trabajo.

2.2.2. Masa líquido de estanque

Al comportarse de manera lineal la densidad con respecto a la altura del estanque, es decir, no es una densidad homogénea. Calcular el volumen de líquido dentro del estanque y este ser multiplicado por su densidad entrega un resultado erróneo. Es por esto, que se presenta un método diferente al utilizado, para calcular el peso del volumen del líquido real

$$\begin{aligned}
\text{Masa líquido de densidad Variable} &= \text{Área} \cdot \left(\int_0^{H_L} \gamma_0 + \frac{\gamma_r - \gamma_0}{H_L} \cdot y \, dy \right) \\
&= \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \cdot H_L \cdot \frac{(\gamma_r + \gamma_0)}{2} \\
&= \pi R^2 \cdot H_L \cdot \gamma_u
\end{aligned}$$

Con γ_u : Peso específico a utilizar, igual a $\frac{\gamma_r + \gamma_0}{2}$

Este valor del peso específico a utilizar tiene cabida debido a que en la práctica se es utilizado el valor original del peso específico del relave (γ_r). Con este nuevo valor la masa del líquido contenido en el estanque puede llegar a variar hasta un 25 % en comparación si se usa el peso específico original, este hecho tiene directa incidencia en los cálculos posteriores para obtener espesores de muros y zapatas.

2.2.3. Caso impulsivo

$$h_i = \frac{H_L}{40} \cdot \left(\frac{7H_L \cdot k_i + 25\rho_0}{\frac{H_L \cdot k_i}{4} + \rho_0} \right) \quad (2.30)$$

$$W_i = W_L \cdot \frac{\tanh(\alpha_i \cdot L)}{\alpha_i \cdot L} \quad (2.31)$$

Con

$$\begin{aligned}
k_i &= \frac{\rho_r - \rho_0}{H_L} \\
\alpha_i &= \frac{\sqrt{3}}{H_L} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 + \frac{H_L \cdot k_i}{2}}{\rho_0 + \frac{H_L \cdot k_i}{4}}}
\end{aligned}$$

2.2.4. Caso convectivo

$$h_c = \frac{-(\mu_1 \cdot e^{H_L \cdot (\beta_c + \alpha_c)} + \mu_2 \cdot e^{H_L \cdot (\beta_c - \alpha_c)} + 6\alpha_c \beta_c^2 + 2\alpha_c^3)}{(\beta_c^2 - \alpha_c^2) \cdot [(\beta_c - \alpha_c)^2 \cdot e^{H_L \cdot (\beta_c + \alpha_c)} + (4\alpha_c \beta_c - (\beta_c + \alpha_c)^2 \cdot e^{H_L \cdot (\beta_c - \alpha_c)})]} \quad (2.32)$$

$$W_c = W_L \cdot \frac{2\beta_c}{e^{2 \cdot \beta_c \cdot H_L}} \cdot \frac{L^2}{3} \cdot \frac{\%_0^2}{\kappa} \quad (2.33)$$

$$\omega_c^2 = g \cdot \frac{\sinh^2(\alpha_c \cdot H_L)}{\kappa} \quad (2.34)$$

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_c^2} \quad (2.35)$$

Con

$$\alpha_c = \frac{\sqrt{k_c^2 + 4\alpha_0^2}}{2}$$

$$\beta_c = \frac{k_c}{2}$$

$$\alpha_0 = \sqrt{\frac{27}{8}} \cdot \frac{1}{L}$$

$$k_c = \frac{1}{H_L} \cdot \ln\left(\frac{\rho_r}{\rho_0}\right)$$

$$\mu 1 = -(\beta_c^2 - \alpha_c^2)(\beta_c - \alpha_c)^2 \cdot H_L + (\beta_c - \alpha_c)^3$$

$$\mu 2 = (\beta_c^2 - \alpha_c^2)(\beta_c + \alpha_c)^2 \cdot H_L - (\beta_c + \alpha_c)^3$$

$$\% = \frac{(\beta_c + \alpha_c)^2 \cdot e^{H_L \cdot (\beta_c - \alpha_c)} - (\alpha_c - \beta_c)^2 \cdot e^{H_L \cdot (\beta_c + \alpha_c)} - 4\alpha_c \beta_c}{2 \cdot (\beta_c^2 - \alpha_c^2)}$$

$$\kappa = \frac{1}{\alpha_0^2} \left(\frac{H_L}{2} (\alpha_c^2 - \beta_c^2) + \frac{\sinh(2\alpha_c \cdot H_L)}{4\alpha_c} (\alpha_c^2 + \beta_c^2) - \beta_c \cdot \sinh(\alpha_c \cdot H_L) \right) + \frac{\sinh(2\alpha_c \cdot H_L)}{4\alpha_c} - \frac{H_L}{2}$$

2.3. Estadística en base a memorias de cálculos existentes

En base a los datos obtenidos de memorias de cálculos para estanques ya realizados en distintas zonas mineras a lo largo de Chile, se recoge y se resume los parámetros y resultados obtenidos en cada estanque.

Esto con el objetivo de simplificar los resultados obtenidos y tener una muestra de valores que ayude a la generación de un método de cálculo aproximado de valores a obtener en futuros diseños, haciendo referencia a los volúmenes de hormigón.

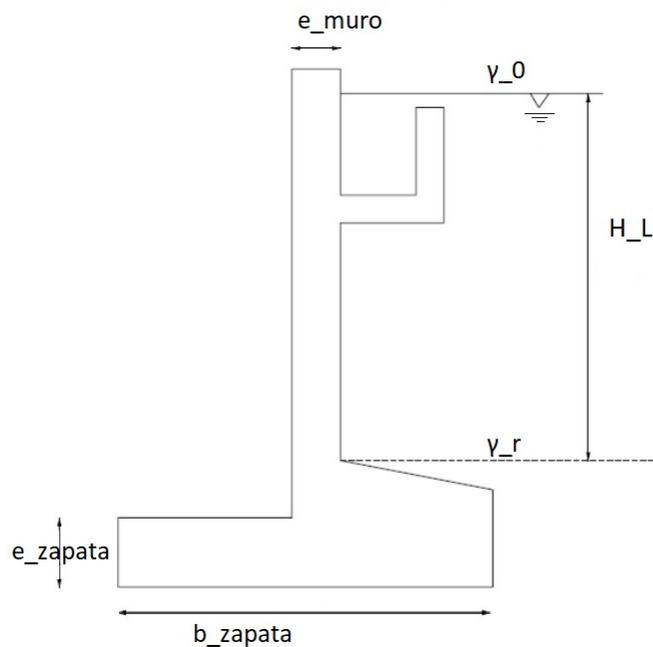


Figura 11: Perfil típico muro estanque

Tabla 1: Tabla datos espesadores-clarificadores.

Identificación	D	γ_r	e_{muro}	b_{zapata}	e_{zapata}	H_L	γDH_L	γDH_L^2
-	[m]	[ton/m ³]	[m]	[m]	[m]	[m]	[ton/m]	[ton]
CLA 1	54	1.000	0.30	1.00	0.30	4.5	243	1094
CLA 2	80	1.000	0.55	4.15	0.80	7.5	600	4500
CLA 3	119	1.000	0.55	4.15	0.80	9.5	1131	10740
ESP-CON 1	46	1.857	0.35	2.30	0.85	3.2	273	875
ESP-REL 1	45	1.360	0.40	2.50	0.60	6.5	398	2586
ESP-REL 2	110	1.670	0.80	3.00	1.00	3.0	551	1653
ESP-REL 3	90	1.630	0.30	2.55	0.50	3.3	484	1598
ESP-REL 4	100	1.610	0.50	3.00	0.70	3.0	483	1449
ESP-REL 5	100	1.670	0.70	5.00	0.80	4.0	668	2672
ESP-REL 6	120	1.460	0.60	3.50	0.60	3.2	561	1794
ESP-REL 7	110	1.270	0.55	2.50	0.70	4.0	559	2235
ESP-REL 8	99	1.230	0.30	2.70	0.50	4.0	487	1948
ESP-REL 9	60	1.610	0.55	5.80	0.90	6.0	580	3478

- CLA: Clarificador.
- ESP-CON: Espesador de concentrado.
- ESP-REL: Espesador de relave.

Los clarificadores usualmente tienen densidades cercanas a 1 [ton/m³], debido a que el fluido que manejan en su interior es agua mezclada con ciertas partículas que podría variar levemente su densidad, de manera no significativa.

Mientras que los espesadores de relave manejan densidades entre 1.5 y 1.7 [ton/m³], ya que es justamente relave lo que tienen en su interior, en donde las partículas de mayor dimensión van decantando dejando al fluido con densidad mas cercana a la del agua en la parte superior del estanque.

Mientras que los espesadores de concentrados manejan densidades mayores, entre 1.8 y 1.9 [ton/m³]. Esto se puede ver reflejado en la tabla 1, donde los valores de densidad perteneciente a los diseños de estanques pertenecen en su mayoría a lo dictado recientemente.

Los proyectos identificados como CLA 1, 2 y 3, son estanques clarificadores que manejan densidades aproximadamente igual a la del agua, mientras que ESP-CON 1, es un estanque espesador de concentrado que maneja una densidad aproximada de 1.86 [ton/m³], para finalmente ver los estanques espesadores de relave identificados como ESP-REL 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 y 9, teniendo en promedio densidades dentro del rango mencionado.

Teniendo estos datos, se procede en base a los datos ahí entregados, realizar los cálculos de los porcentajes correspondientes a las masas convectivas/impulsivas, de igual manera para obtener las alturas de centro de gravedad de las respectivas masas. Todo esto según los métodos de cálculo conocidos en la norma ACI.

Tabla 2: Cálculo de valores según norma ACI

Identificación	W_c [%]	W_i [%]	h_c [%]	h_i [%]
CLA 1	82.1	9.6	0.50	0.375
CLA 2	81.4	10.8	0.50	0.375
CLA 3	82.3	9.2	0.50	0.375
ESP-CON 1	82.8	8.0	0.50	0.375
ESP-REL 1	77.5	16.7	0.51	0.375
ESP-REL 2	84.4	3.1	0.50	0.375
ESP-REL 3	84.1	4.2	0.50	0.375
ESP-REL 4	84.3	3.5	0.50	0.375
ESP-REL 5	84.0	4.6	0.50	0.375
ESP-REL 6	84.4	3.1	0.50	0.375
ESP-REL 7	84.1	4.2	0.50	0.375
ESP-REL 8	84.0	4.7	0.50	0.375
ESP-REL 9	81.0	11.5	0.51	0.375

Los valores obtenidos en la tabla 2, tienen lugar para la masa total contenida, porcentaje respectivo para masa convectiva, masa impulsiva, porcentaje respectivo a la altura de centro de gravedad de masa convectiva y altura de centro de gravedad de masa impulsiva. Aclarando que los valores de W_c , W_i se encuentran expresados en porcentaje de la masa total (W_L) mientras que las alturas h_c , h_i , se encuentran expresadas en porcentaje de la altura de líquido (H_L).

Estos valores son calculados mediante lo dictado en la norma ACI, siendo los mismos valores presentados en las respectivas memorias de cálculo.

La tabla 3 presenta de igual manera que la tabla 2, pero habiendo utilizado lo estipulado para las ecuaciones respectivas en esta memoria de trabajo.

Tabla 3: Cálculo de valores según memoria

Identificación	W_c [%]	W_i [%]	h_c [%]	h_i [%]
CLA 1	81.8	9.6	0.50	0.375
CLA 2	81.2	10.8	0.51	0.375
CLA 3	82.0	9.2	0.50	0.375
ESP-CON 1	79.7	7.4	0.50	0.363
ESP-REL 1	76.2	16.0	0.51	0.369
ESP-REL 2	82.2	3.0	0.50	0.363
ESP-REL 3	82.2	4.0	0.50	0.364
ESP-REL 4	82.4	3.3	0.50	0.367
ESP-REL 5	81.9	4.3	0.50	0.365
ESP-REL 6	83.1	2.9	0.50	0.369
ESP-REL 7	83.5	4.1	0.50	0.370
ESP-REL 8	83.4	4.5	0.50	0.370
ESP-REL 9	78.8	10.9	0.51	0.365

En la tabla 4 se muestra los valores resultantes al restar lo obtenido siguiendo lo dictado por la ACI y lo estipulado en esta memoria. En donde se puede notar que para los casos de los clarificadores (CLA 1, 2 y 3) los cambios son igual a cero, con excepción de la masa convectiva (W_c).

Esta diferencia se debe a que en las ecuaciones ACI se hace un redondeo de valor dentro de la fórmula, mientras que en esta memoria se deja el valor exacto, llevando a un efecto en cadena que termina con esta diferencia de valores no significativa.

Tabla 4: Diferencia de valores obtenidos ACI-memoria

Identificación	$W_c^{ACI} - W_c^{memoria}$ [%]	$W_i^{ACI} - W_i^{memoria}$ [%]	$h_c^{ACI} - h_c^{memoria}$ [%]	$h_i^{ACI} - h_i^{memoria}$ [%]
CLA 1	0.25	0.00	0.00	0.000
CLA 2	0.24	0.00	0.00	0.000
CLA 3	0.25	0.00	0.00	0.000
ESP-CON 1	3.15	0.62	0.00	0.013
ESP-REL 1	1.32	0.65	0.00	0.006
ESP-REL 2	2.13	0.15	0.00	0.012
ESP-REL 3	1.98	0.26	0.00	0.011
ESP-REL 4	1.88	0.20	0.00	0.008
ESP-REL 5	2.16	0.30	0.00	0.010
ESP-REL 6	1.29	0.15	0.00	0.006
ESP-REL 7	0.69	0.13	0.00	0.005
ESP-REL 8	0.59	0.13	0.00	0.005
ESP-REL 9	2.19	0.65	0.00	0.010

En la tabla 5 se presentan los valores de peso específico de los respectivos estanques junto a los pesos específicos a utilizar, que son las presentadas como sugerencia en esta memoria, correspondiente al promedio entre el peso específico de relave (γ_r) entregado por los especializados en el área por parte del proyecto y el peso específico del agua (γ_0). Además del porcentaje afectado con este cambio, en donde se puede hacer mención de que los tres primeros valores correspondientes a los estanques clarificadores, el cambio de peso específico es igual a cero, puesto que estos estanques manejan agua en su interior.

Tabla 5: Peso específico de relave y a utilizar.

γ_r	γ_u	$\Delta = \frac{\gamma_r - \gamma_u}{\gamma_r} [\%]$
1.000	1.00	0%
1.000	1.00	0%
1.000	1.00	0%
1.857	1.43	23%
1.360	1.18	13%
1.670	1.34	20%
1.630	1.32	19%
1.610	1.31	19%
1.670	1.34	20%
1.460	1.23	16%
1.270	1.14	11%
1.230	1.12	9%
1.610	1.31	19%

Se destaca los cambios porcentuales generados por este cambio de densidad de relave a densidad a utilizar (γ_u), que para los datos que se manejan en esta memoria van desde 0% hasta un 23%, siendo el que menor cambio tiene (0%) los estanques clarificadores, y el de mayor cambio el estanque espesador de concentrado (23%).

El utilizar esta sugerencia de cambio de peso específico para el fluido interno del estanque respectivo puede generar cambios en su masa total que varía en un rango de 0% hasta 25%, teniendo el mínimo para estanques clarificadores, resultado que es el esperado puesto que los estanques clarificadores trabajan con líquidos homogéneos similares o exactamente al peso específico del agua.

Si no se toma en cuenta los estanques clarificadores, los valores menores de cambio porcentual al utilizar el valor de γ_u rondan en el 9%, correspondiente al valor de espesador de relave 8 (ESP-REL 8).

Mientras que los valores máximos corresponden hasta un 23 % (estanques espesadores de concentrado), valores también esperables puesto que se explica anteriormente que los espesadores de concentrado son los estanques con fluido de mayor valor en peso específicos, pudiendo ser inclusive un 25 % si se considera un peso específico de relave (γ_r) igual a 2 [ton/m³].

Esto afecta de manera directa para los valores de masa convectiva e impulsiva respectiva, que a su vez incide de manera directa para el cálculo de corte y momento basal del diseño.

Como siguiente punto a tocar, y en base a los datos de la tabla 1 se generan tres gráficos correspondientes al cálculo de espesor de muros en estanques, espesor de zapata de fundación y ancho de zapata de fundación, así utilizando una regresión lineal que permite tener una estimación inicial de cubicación de hormigón para los nuevos diseños de estanques espesadores y clarificadores a diseñar (figuras 13, 14 y 15).

Estos gráficos se presentan para valores del espesor y ancho a utilizar (tanto en cm o en m como corresponda), en base a los parámetros ($\gamma_r D H_L$) y ($\gamma_r D H_L^2$). Estos parámetros son escogido en base al origen de cálculo que se tiene para obtener los valores de espesor y ancho de muros/zapata.

En el caso del muro perimetral, lo que define primordialmente la cantidad de muro a utilizar es la tracción anular que percibe el estanque, en donde de manera simple de calcular, viene del análisis de la presión que se ejerce en todas direcciones desde el centro de la circunferencia (geometría de estanque), como lo indicado en la figura 12.

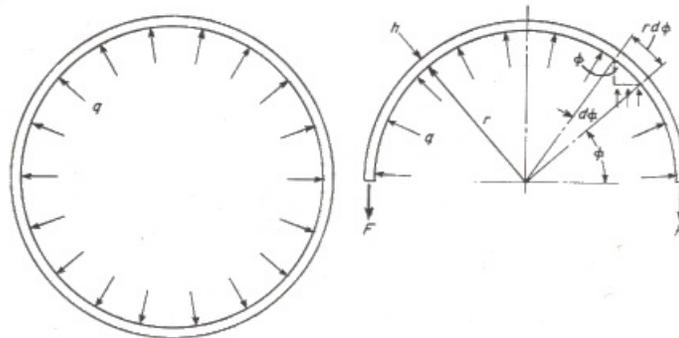


Figura 12: Ejemplo tracción anular

De donde se resuelve la fuerza de tracción resistida por los muros.

$$2 F = \int_0^{\pi/2} q R \sin(\theta) d\theta$$

$$2 F = 2 q R$$

$$F = q R$$

$$F = q \frac{D}{2}$$

$$F = \gamma_r \cdot \frac{D}{2} \cdot H_L$$

$$F = \gamma_r \cdot D \cdot H_L \text{ (Por simplicidad, para el gráfico)}$$

En donde existe una directa relación entre el radio y el diámetro utilizado, cosa que para realizarlo de manera mas fácil se utiliza por simplicidad la variable del diámetro reemplazando al radio. Mientras que las variables respectivas al ejemplo representan lo siguiente.

- F = Tracción anular [ton].
- q = Presión del líquido [ton/m].
- R = Radio estanque [m].
- D = Diámetro estanque [m].

Para los gráficos con respecto a las zapatas se utiliza la misma analogía y origen de los cálculos para obtener los valores respectivos. La demostración queda omitida en esta memoria.

Para la realización de los gráficos y regresiones lineales correspondientes se quiere destacar los diseños que tienen datos que escapan al objetivo de estos gráficos en si, como lo son el clarificador 3 (CLA 3), espesador de relave 2 (ESP-REL 2) Y espesador de relave 8 (ESP-REL 8).

En el diseño de muro perimetral, el diseño del espesador ESP-REL 2 muestra un espesor de muro excesivo, correspondiente a un diseño holgado y sobre conservador, causando efecto en atrofiar la realización de una proyección correcta para valores de pre diseños.

Mientras que de manera opuesta, los espesadores ESP-REL 3 y 8, obtiene valores de espesor perimetral notoriamente bajos en comparación a los demás diseños, esto se debe, que este proyecto en particular se realiza con hormigón postensado, modificando sus características y resistencias provocando un menor requerimiento de hormigón para el diseño, este material de hormigón postensado difiere al utilizado usualmente y del que en mayor parte se habla para el diseño de estanques en este trabajo, siendo un punto a tocar mas adelante.

Finalmente, para el caso del CLA 3, es otro diseño que no cuadra en lo usual de las estadísticas, puesto que tiene valores de diámetro y alturas excesivamente grandes, resultando en un valor de $\gamma_r \cdot D \cdot H_L$ significativamente grande y no cuadrando con el diseño esperado para la realización de este apoyo de pre diseños de muros y zapatas de estanques.

Por lo recientemente mencionados estos 3 diseños son desechados en la generación de los gráficos de pre diseño para que así se obtengan valores mas acorde a lo real, de manera que al momento de estimar un pre diseño de espesores de muro y zapata se obtengan valores mas cercanos a lo finalmente obtenidos en el diseño final.

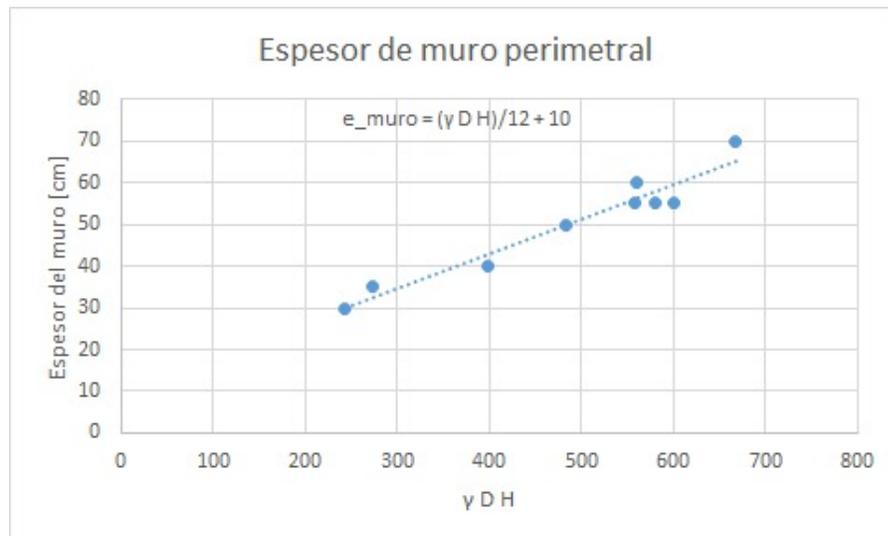


Figura 13: Gráfico espesor de muros en estanques.

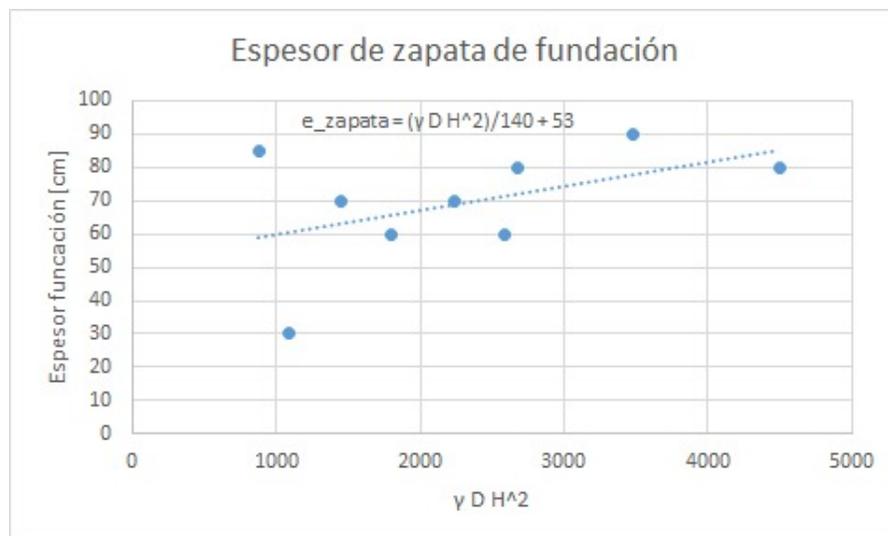


Figura 14: Gráfico espesor de zapata en estanques.

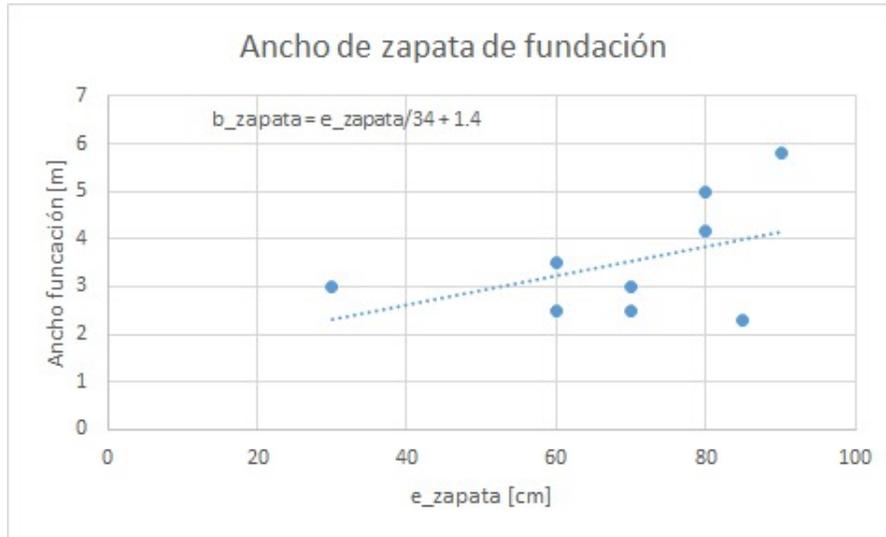


Figura 15: Gráfico ancho de zapata en estanques.

De los gráficos presentados (Figuras 13, 14 y 15) se obtienen las regresiones lineales de los espesores de muro obtenido a los parámetros presentados, con origen las memorias de cálculos existentes de proyectos realizados. Lo que se busca en esta memoria de título no es solo analizar y generar estos gráficos, sino que también realizar cálculos que permitan de manera fácil obtener valores razonables y similares al utilizar las fórmulas mostradas.

Es por esto que de manera simple se presentan las siguientes ecuaciones que cumple con lo dicho para obtener espesores y ancho de muros/zapata.

$$e_{muro} [\text{cm}] = 10 [\text{cm}] + \frac{(\gamma_r \cdot D \cdot H_L)}{12} \quad (2.36)$$

$$e_{zapata} [\text{cm}] = 53 [\text{cm}] + \frac{(\gamma_r \cdot D \cdot H_L^2)}{140} \quad (2.37)$$

$$b_{zapata} [\text{m}] = 1.4 [\text{m}] + \frac{e_{zapata}}{34} \quad (2.38)$$

- γ_r : [ton/m³].
- D : [m].
- H_L : [m].

Se quiere destacar el origen de estas ecuaciones presentadas, en dónde de manera privilegiada se tienen a disposición memorias de proyectos ya ejecutados, otorgando así a la persona a cargo de futuros diseños una gran ayuda, debido a puede contar de manera única con parámetros de diseños ya realizados por empresas del rubro minero, que a lo largo del tiempo han ido realizando proyectos de estanques espesadores. Por lo que lo presentado aquí es de gran importancia y significativa ayuda para poder hacer comparaciones con lo que se va obteniendo en el avance del diseño.

2.4. Resultados obtenidos

Con el método y ecuaciones presentadas, se obtienen los comportamientos para las diferentes densidades de relave y para las distintas relaciones de altura-diámetro de los estanques acorde lo dicho en el alcance de esta memoria.

Es por eso que se presentan en anexos las figuras 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, y 52.

Estos gráficos representan los comportamientos de las ecuaciones 2.30 a 2.35, para distintos valores de densidad de relaves (ρ_r) y distintas relaciones altura-diámetro (H_L/D), añadiendo a modo de comparación los valores que se obtienen siguiendo lo dictado por la norma ACI (ecuaciones 2.24 a 2.29).

En los gráficos de las figuras 42, 44, 46, 48, 50 y 52 (anexos) se puede ver que de manera aislada se comparan los valores obtenidos según la norma ACI y los dictados según esta memoria para el caso de densidad homogénea, en donde se puede verificar que se obtienen los mismos valores para ambos métodos a excepción de 1 caso presentado para la masa convectiva (figura 48).

Esta diferencia entre el valor obtenido según ACI y según lo trabajado en esta memoria radica en la diferencia de valor utilizado en la ecuación original (ecuación 2.26), ya que la norma ACI utiliza un valor aproximado en la ecuación (correspondiente al 3.68 presentado), mientras que lo trabajado en esta memoria utiliza el valor exacto correspondiente a $(2 \cdot \sqrt{\frac{27}{8}})$. Esta diferencia genera la no igualdad en los valores resultantes presentados en el gráfico.

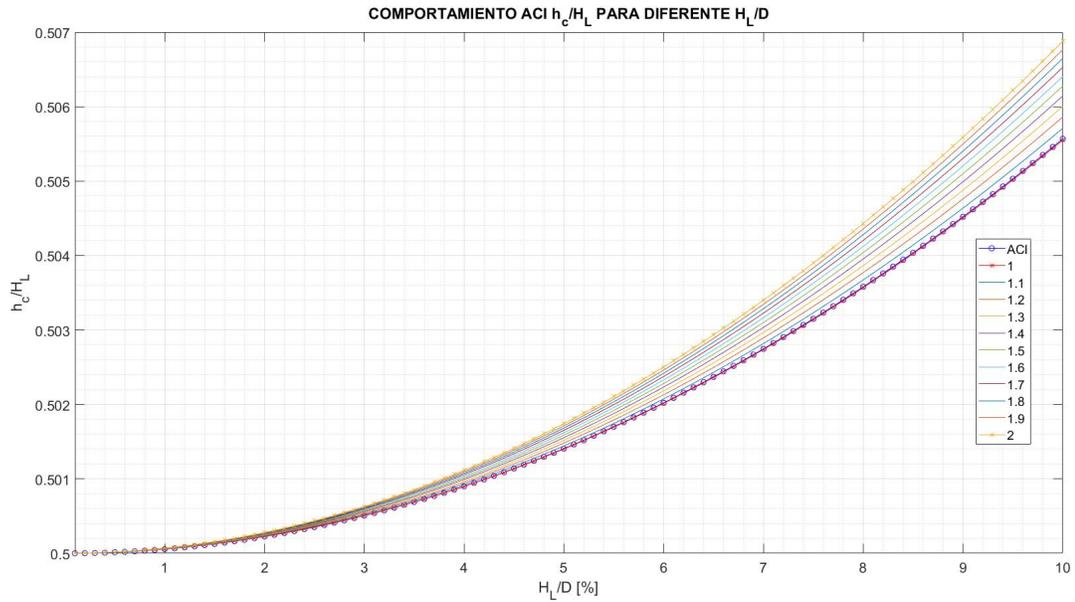


Figura 16: Gráfico comparativo para valores de h_c , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.

El comportamiento que muestra la altura de centro de gravedad de la masa convectiva con respecto a la masa total, demuestra una diferencia bastante pequeña, moviéndose en un rango entre 0.5 de la altura total del líquido (H_L) hasta un 0.507 (para $H_L/D = 0\%$ y 10% respectivamente).

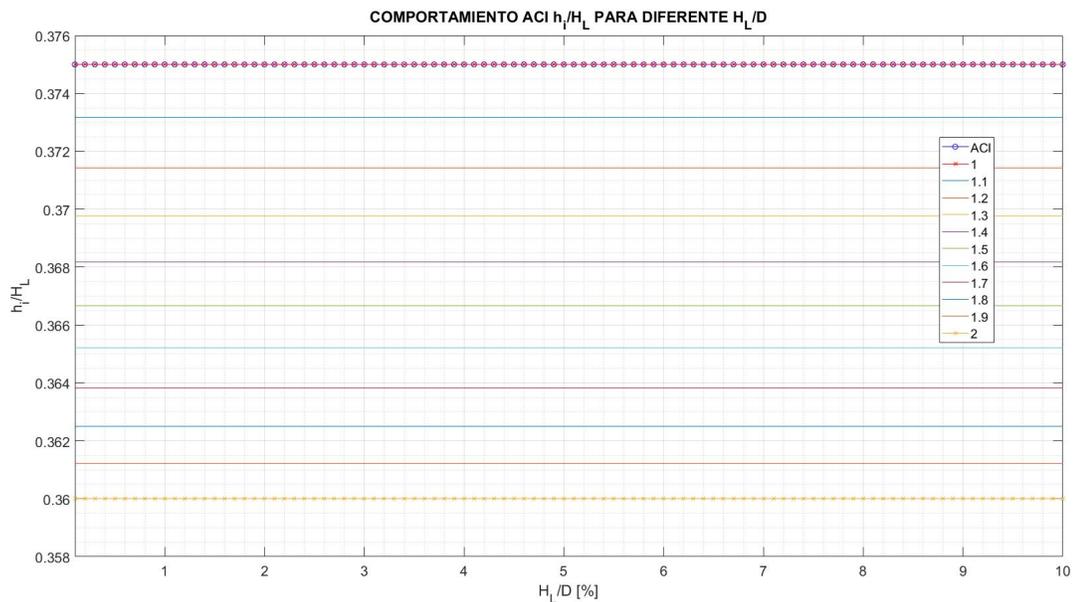


Figura 17: Gráfico comparativo para valores de h_i , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.

Mientras que para el caso de la altura de centro de gravedad de la masa impulsiva,

la altura se mantiene constante para lo que es la relación altura-diámetro, y entre mayor densidad se encuentra en el fondo del estanque, h_i tiende a disminuir su valor teniendo como valor límite mínimo (para densidad igual a 2 [ton/m³]) de 0.36 de H_L .

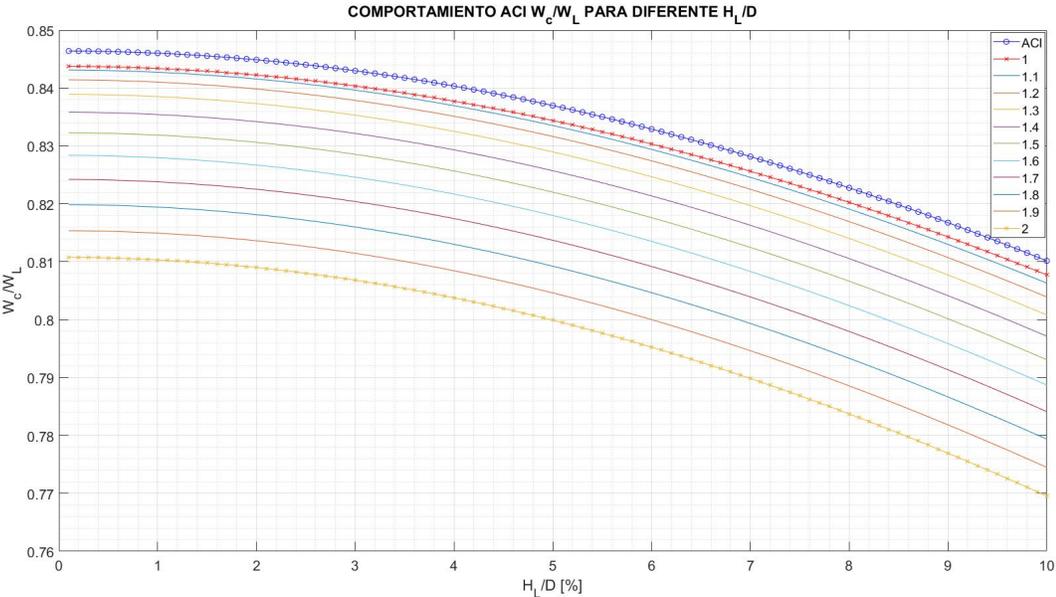


Figura 18: Gráfico comparativo para valores de W_c , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.

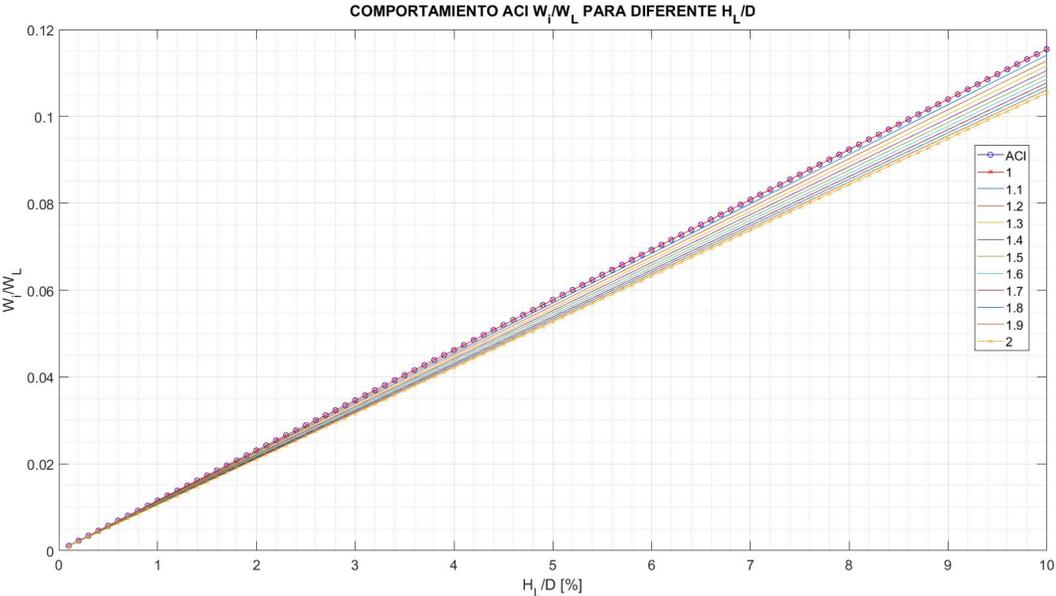


Figura 19: Gráfico comparativo para valores de W_i , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.

El comportamiento demostrado para distintas densidades tanto para la masa convec-

tiva como la masa impulsiva. A medida de que se tiene una mayor densidad en el fondo del estanque, se tienen un menor valor de estos (W_c y W_i), en donde es totalmente esperable que el valor de W_c disminuya, puesto que al encontrarse una mayor densidad en el fondo, es decir, un mayor porcentaje de la masa se encuentra cercano al suelo, la masa convectiva pierda porcentaje de la masa total, en comparación a si el líquido fuese totalmente homogéneo.

Ahora bien puede llamar la atención que disminuya también el porcentaje que se lleva la masa impulsiva, pero a esto se le hace mención dos cosas. Primero, la disminución que existe es muy baja a medida de que aumenta la densidad, y matemáticamente esto se explica debido a que, y apoyándose en el comportamiento real de la densidad del líquido (figura 8). Existe un área que se deja de considerar en la zona inferior correspondiente a la ubicación de la masa impulsiva del estanque, que es erróneamente considerada al utilizar densidad homogénea.

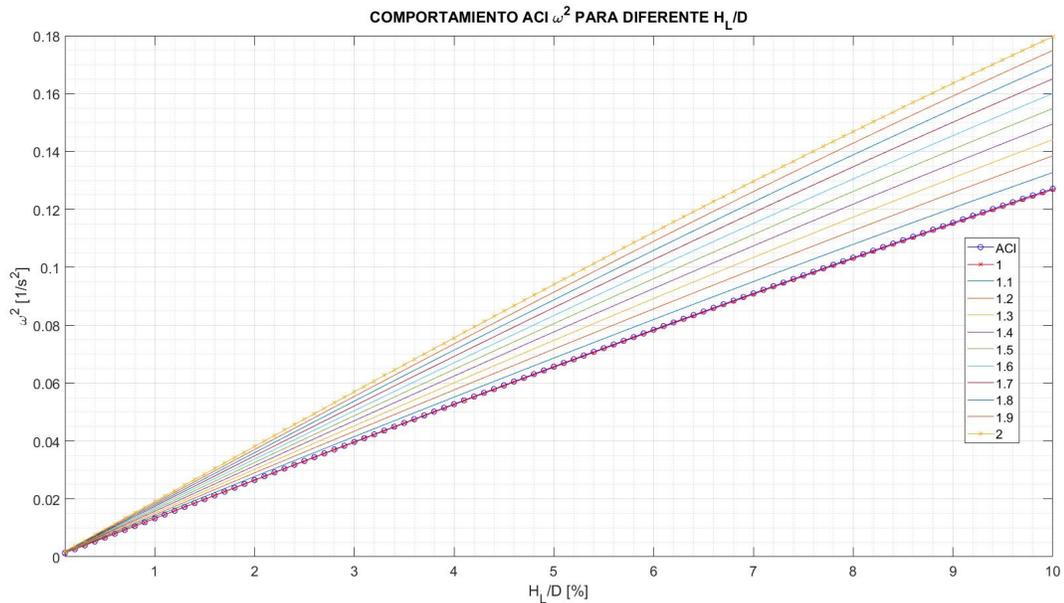


Figura 20: Gráfico comparativo para valores de ω^2 , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.

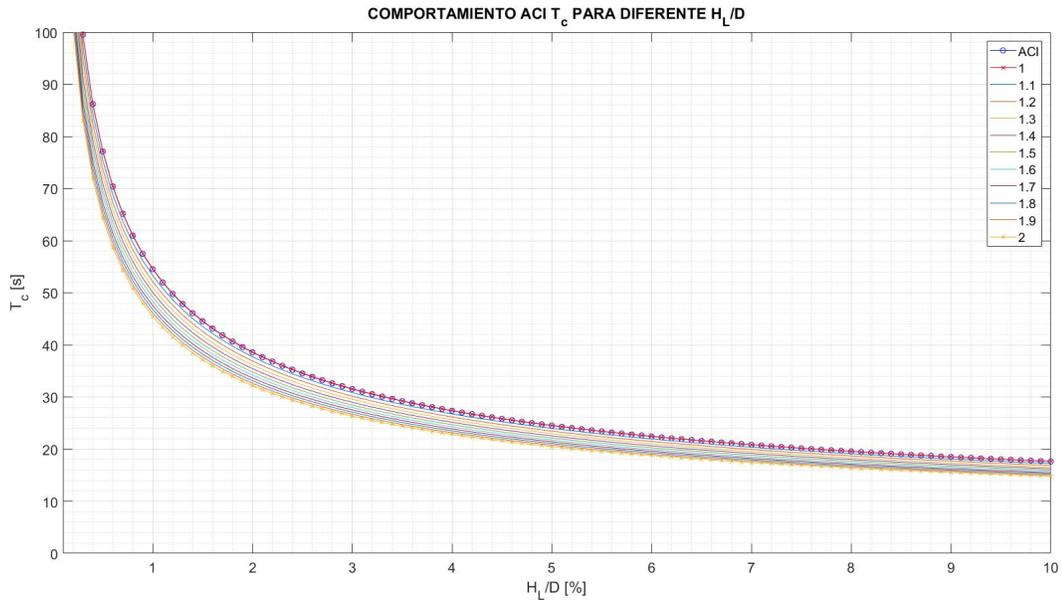


Figura 21: Gráfico comparativo para valores de T_c , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.

Dentro de las comparaciones obtenidas a partir de la estadística de proyectos realizados a disposición, se utilizan 4 casos para analizar diferentes métodos de cálculo de corte y momento basal para comparación de valores, en donde el Caso 1, representa al caso utilizado con las ecuaciones de la norma ACI.

- Caso 1: Utilizar valor de γ_r y valores impulsivos/convectivos según ACI.
- Caso 2: Utilizar valor de γ_r y valores impulsivos/convectivos según memoria.
- Caso 3: Utilizar valor de γ_u y valores impulsivos/convectivos según ACI.
- Caso 4: Utilizar valor de γ_u y valores impulsivos/convectivos según memoria.

En donde γ_r es el valor original y completo de la densidad de relave (es decir, se trabaja como si fuera fluido homogéneo) y γ_u es el valor ponderado (se trabaja como fluido con densidad variable).

Dentro de los proyectos realizados que se tienen a disposición, se utilizan 6 de estos para la realización de comparaciones en los cortes y momentos basales obtenidos según los 4 casos mostrados.

Se descarta el restante de proyectos debido a la no completa información que se tiene de ellos para realizar el análisis completo.

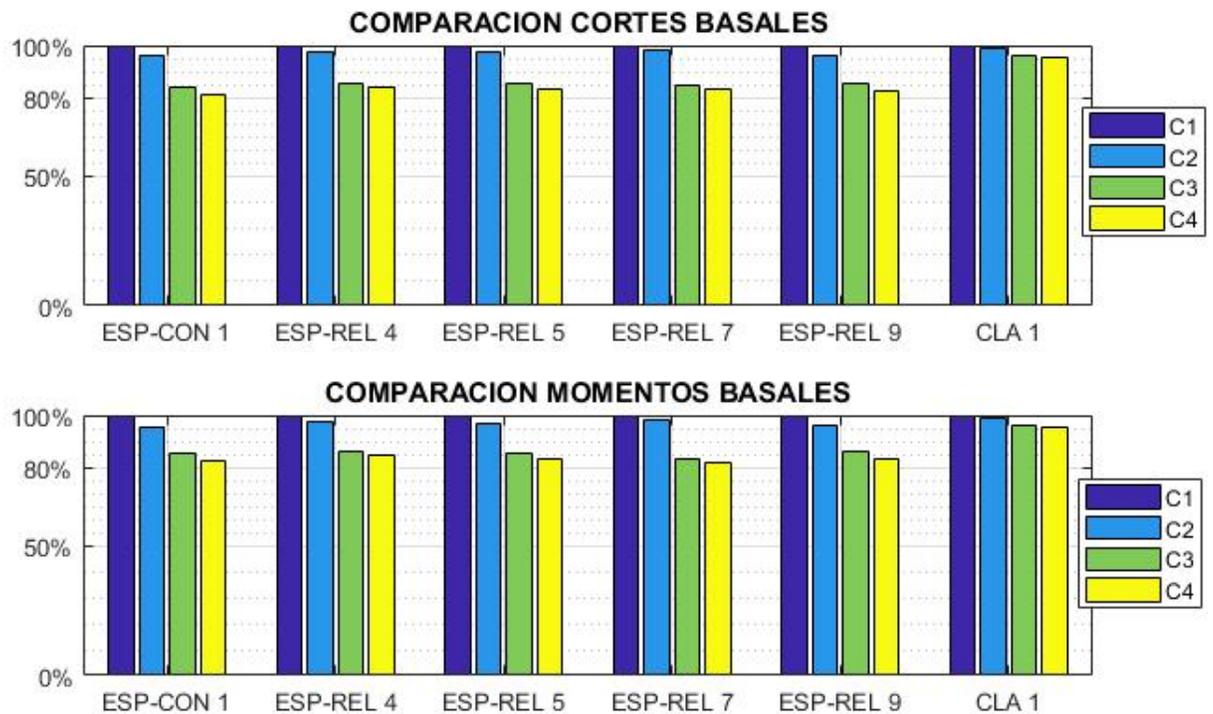


Figura 22: Comparación porcentual resultados - corte y momento

La pequeña diferencia de porcentajes obtenidos en el caso de CLA-1 se debe al pequeño valor de densidad de relave utilizado, puesto a que este proyecto corresponde a un estanque clarificador de relave que maneja valores de densidad cercanos (o iguales) al del agua (1 [ton/m³]), siendo esto traducido al trabajo de la memoria a trabajar con una densidad homogénea, explicando la baja diferencia en cortes y momentos basales.

Se puede ver la diferencia porcentual de los resultados obtenidos para los proyectos en cada caso (teniendo al caso 1 como referencia). En donde el caso 2 obtiene un cambio porcentual de aproximadamente entre un 2 y un 3 por ciento de valor final obtenido, mientras que el caso 3 y caso 4 son los con mayor diferencia porcentual en el resultado final, siendo entre 14 %-15 % para el caso 2 y 15 %-19 % para el caso 4.

Con esto se puede concluir que los cambios en las ecuaciones obtenidas por esta memoria, en donde se considera la densidad variable genera un cambio porcentual pequeño ($\approx 3\%$), el cambio más influyente es el de la utilización de un valor de peso específico considerando la densidad variable (γ_u), algo que no fue utilizado en los proyectos que se tienen a disposición salvo en 1 caso.

Teniendo entre un 15 % y 19 % de reducción de los cortes y momentos basales, que tienen valores muy altos al ser estanques de grandes dimensiones con un volumen de líquido significativo dentro de ellos, se genera una considerable disminución de diseños de esfuerzos basales, que se pueden traducir en ahorro para el diseño de los muros de las estructuras.

En caso de que el encargado del diseño no guste usar los valores de este trabajo dados para las masas impulsivas y convectivas (Caso 4), obtiene entre un 14 % y 15 % de disminución del corte y momento al utilizar sólo la sugerencia del cambio de peso específico (γ_u , Caso 3), que sigue siendo considerable para el diseño de hormigón armado.

2.5. Simplificaciones para ecuaciones

En vista a las ecuaciones obtenidas en la sección 2.2 y los gráficos obtenidos del comportamiento del fluido, presentados en la sección 2.4, se puede dar a cuenta lo engorroso de las fórmulas, es por eso, que teniendo en cuenta la pequeña relación entre altura y diámetros de los estanques a trabajar (H_L/D) se pueden realizar simplificaciones válidas que representan lo anterior mencionado.

Esto tiene como propósito generar un extra a las ecuaciones dictadas por ACI, con el objetivo de que añadiendo un Δ respectivo para los parámetros, se obtengan los valores resultantes de esta memoria, sin necesidad de utilizar las ecuaciones presentadas en este trabajo.

2.5.1. Valores de altura de centro de gravedad masa impulsiva

Para el caso con densidad variable, y dando cuenta los resultados a obtener, la variación de h_i/H_L puede llegar a ser hasta un 1.5 %, por lo que a modo de facilitación para el encargado de diseño se muestra la opción restarle un delta a la ecuación presentada por la norma ACI para llegar al valor logrado de las ecuaciones de densidad variable, y que es dependiente de la densidad del relave a considerar.

$$\Delta h_i = -0.015 \cdot (\rho_r - 1) \quad (2.39)$$

Esto en vista del comportamiento presentado en el gráfico de la figura 17.

2.5.2. Valores de altura de centro de gravedad masa convectiva

En vista del comportamiento ante distintas densidades consideradas y para las diferentes relaciones de altura-diámetro, los valores mostrados en el gráfico de la figura 16 se encuentran en un intervalo de $0.5 - 0.51 \cdot H_L$.

Esto es un cambio poco relevante para los cálculos posteriores y puede ser despreciado, es decir, se puede sugerir una simplificación igual a 0 para el resultado de la altura de centro de gravedad de la masa convectiva.

$$\Delta h_c = 0$$

2.5.3. Masa impulsiva

Lo mostrado en la figura 19, indica que a medida que cambia el valor de la densidad de relave, genera un cambio en la pendiente de los valores resultantes para W_i/W_L , generando una simplificación igual a:

$$\Delta W_i = -10 \cdot \left(\frac{H_L}{D} \right) \cdot (\rho_r - 1)$$

2.5.4. Masa convectiva

Para el caso de la masa convectiva, que es la masa a la que mayor importancia se le debe dar, debido a que en los casos de estanques con relación $H_L/D \ll 1$, es esta masa convectiva, la que mayor porcentaje del peso total del líquido se lleva.

Se puede observar en el comportamiento reflejado en la figura 18, que los valores que resultan para W_c/W_L dependiendo su relación H_L/D y su densidad ρ , generan valores paralelos que van disminuyendo a medida que la densidad aumenta, por lo que se concluye una variación igual a:

$$\Delta W_c = -4 \cdot (\rho_r - 1)$$

2.5.5. Análisis cambios propuestos

En consideración de los cambios propuestos a las ecuaciones dictadas del ACI, se puede observar que el valor para h_i puede llegar a tener una variación de hasta un 1.5 %, si se compara con lo mayormente obtenido para estos estanques con relación altura-diámetro menores a un 10 %, se habla de un cambio al 37.5 % de la altura total. Como ejemplo, si usualmente se tiene que para estos estanques $h_i = 0.375 \cdot H_L$, con estas modificaciones propuestas se puede llegar a obtener un 36 % de la altura total ($0.36 \cdot H_L$).

Este cambio, y teniendo en consideración que las alturas usuales de los estanques a diseñar se encuentran en un rango de 6 a 8 metros como máximos valores, estaría representado por un cambio máximo aproximado entre 9 [cm] y 12 [cm], valores bastante pequeños para lo trascendente del diseño, por lo que pueden ser despreciados sin afectar mayormente a los cálculos que se obtienen posteriormente en el diseño.

En el caso de los valores h_c , los cambios a obtener son bastante menores y muy cercanos a cero, por lo que las modificaciones para los valores de la altura de centro de gravedad convectiva se sugiere despreciarlos.

En el caso de la masa impulsiva (W_i), el valor a modificar correspondería en un caso máximo a un $\Delta W_i = 0.1 \cdot 10 \cdot 1 = 1 \%$, en otras palabras, si se obtiene un valor de masa impulsiva correspondiente a un 10 % de la masa del líquido (W_L), el cambio a efectuar sería de un 1 % de la masa del líquido, dejando un valor final de 9 % de la masa total. Siendo esto para un caso extremo y con un cambio pequeño a realizar, se puede despreciar esta modificación.

Finalmente para la masa convectiva, que es a la que mayor importancia se le debe otorgar, y recordando que la masa convectiva es la que mayor porcentaje de la masa total se le asigna, al evaluar en casos límites, se pueden obtener modificaciones propuestas

de hasta un 4 %.

Para ejemplificar, en caso de obtener un valor de masa convectiva igual a 80 % de la masa total ($0.8 \cdot W_L$), este cambio puede llevar a un valor final de la masa convectiva igual a un 76 % de la masa total ($0.76 \cdot W_L$), cambio significativo si se tiene en consideración los altos valores manejados para masa de líquido total, usualmente superiores a 20000 [ton], por lo que este método queda recomendado, pero su uso queda a criterio del ingeniero a cargo.

3. Condiciones de diseño

En esta sección, se realiza el procedimiento y los parámetros a seguir para el diseño de espesadores de relaves según las condiciones locales y requerimientos a seguir según lo establecido en la norma ACI 350.3 [7] y bajo los criterios de diseño de CODELCO [8].

Se debe considerar que para la mayoría de los casos del diseño de estanques contenedores de relave, las condiciones de diseño de estas estructuras tiene referencia para las zonas mineras a lo largo de Chile, por lo que se debe enfrentar a casos en lugares con alturas de valores significativos y donde la calidad de suelo suele ser factor a considerar.

Es por esto que se debe trabajar en conjunto con el encargado de la mecánica de suelos para los parámetros del suelo a considerar, como así el espectro específico del suelo a tener en cuenta, siempre y cuando exista dicho espectro.

3.1. Bases de diseño

3.1.1. Materiales

Definir materiales a utilizar, tanto para el tipo de hormigón como para el acero de refuerzo, siendo los mas comunes:

- Hormigón G30
 - $f'_c = 30$ [MPa]
 - $E_c = 263$ [ton/cm²]
 - $\gamma_c = 2.5$ [ton/m³]
 - $\rho_c = 2500$ [kg/m³]
 - $f_{ct} = (0.5 \text{ a } 0.66) \cdot \sqrt{f'_c}$ [MPa]
- A630-420H
 - $f_y = 420$ [MPa]
 - $f_u = 630$ [MPa]
- Pernos de Anclaje Grado 36
 - $f_y = 2530$ [kgf/cm²]
 - $f_u = 4080$ [kgf/cm²]

3.1.2. Cargas a considerar

Las cargas a considerar en el diseño del estanque:

- Peso propio.
- Cargas de operación.
- Presión hidrostática del líquido almacenado.
- Presión hidrodinámica del líquido almacenado.
- Cargas sísmicas.

3.1.3. Factores de seguridad

A menos que se especifique lo contrario en el estudio de mecánica de suelos, se debe verificar los factores de seguridad:

Tabla 6: Factores de seguridad

FS	
Volcamiento	1.50
Deslizamiento	1.25

Estos se verifican con estados de cargas sin mayorar.

También se debe tener en consideración que la resistencia requerida debe multiplicarse por factores de durabilidad ambiental en caso de que se consideren revestimientos, capítulo 9 del código ACI 350.

Tabla 7: Factores de durabilidad ambiental.

Flexión	1.30
Tracción	1.65
Corte	1.30

3.1.4. Parámetros geotécnicos

El informe de mecánica de suelos, debe otorgar los parámetros a considerar para las ecuaciones a utilizar de aquí en adelante, es por eso que dependiendo de tal informe se espera obtener al menos los siguientes parámetros.

- Tensión admisible caso estático (σ_{est}).

- Tensión admisible caso sísmico (σ_{sis}).
- Peso específico de relleno estructural (γ_e).
- Coeficiente de balasto (K).
- Coeficientes sísmicos para empuje de suelo (K_h y K_v).
- Espectro específico del suelo.

3.1.5. Parámetros sísmicos

Para las zonas sísmicas, en los criterios de CODELCO [8] se facilitan las zonas pertenecientes para cada división:

Tabla 8: Zonas sísmicas asignadas CODELCO.

División	Zona
Codelco Norte	2
Teniente	
Andina	
Salvador	
Ventanas	3

Junto a estos valores se agrega lo dictado por la Nch 2369 para los valores de aceleración efectiva correspondiente al tipo de suelo sísmico.

Tabla 9: Aceleración efectiva, Nch 2369.

Zona sísmica	A_o
1	0.20 g
2	0.30 g
3	0.40 g

Tabla 10: Parámetros sísmicos según tipo suelo, Nch 2369.

Tipo de suelo	T' (s)	n
I	0.20	1
II	0.35	1.33
III	0.62	1.8
IV	1.35	1.8

3.1.6. Factor de importancia

Para efectos de la aplicación de la norma sísmica, existen las clasificaciones de las estructuras y equipos, en base a categorías de ocupación, según la naturaleza de su uso.

Para eso, la norma chilena Nch3171, establece definiciones según categoría de ocupación de la estructura y el riesgo que podría producir un colapso en la estructura, en donde se mide dependiendo la importancia de ocupación de la estructura a diseñar y el posible riesgo que generaría a personas que transiten, utilicen o se encuentren en un área cercana en donde pudiesen verse afectadas.

Mientras tanto, la norma chilena Nch2369, le asigna valores numéricos según la categoría otorgada a cada estructura, bajo un tipo similar de clasificación, con el fin de que cumplan las exigencias de las normas sísmicas.

Es por esto, que en la tabla 11, se muestran los diferentes tipos de categoría para las diferentes estructuras en base a los riesgos que puede provocar un colapso de esta, complementando a lo dictado en la norma chilena Nch3171. Mientras que en las tablas extraídas de la norma chilena Nch2369, que se muestran en las figuras 23 y 24 aparecen los valores asignados para el diseño de las estructuras.

Todo esto, con el fin de generar una discusión cuya conclusión sea entregar un valor correspondiente y que aplique para las estructuras que se encuentran dentro del alcance de esta memoria.

Tabla 11: Clasificación complementaria a Nch3171, para estructuras.

Descripción de la instalación, estructura o equipo	Categoría
<p>Obras y equipos menores o provisionales, cuya falla sísmica no ocasiona detenciones prolongadas ni tampoco puede poner en peligro otras obras de las categorías siguientes.</p> <p>Estructuras provisionales cuyo propósito es servir tareas de mantenimiento, montaje y reparación que duren menos de 60 días.</p> <p>Instalaciones móviles menores cuyos daños y detención no afecta ni los procesos productivos ni la seguridad de las personas o el medio ambiente.</p>	I
<p>Estructuras y equipos normales, que pueden tener fallas menores susceptibles de reparación rápida que no causan detenciones prolongadas ni pérdidas importantes de producción y que tampoco pueden poner en peligro otras obras de las categorías superiores.</p> <p>Equipos e instalaciones que operen o almacenen sustancias peligrosas para las que un estudio de riesgo certifique que una eventual fuga después de un sismo no afecta la salud de las personas ni al medio ambiente, pueden ser calificadas en esta Categoría.</p> <p>La consideración de un equipo o instalación como normal debe ser ratificada por los especialistas del proceso.</p>	II
<p>Instalaciones o equipos críticos o esenciales, cuya falla puede causar detenciones prolongadas y pérdidas serias de producción.</p> <p>Instalaciones y equipos de industrias que proveen servicios públicos (agua potable, alcantarillado, telecomunicaciones, etc)</p> <p>Estructuras de salas de control, eléctricas, telecomunicaciones y similares, cuya detención implica la de procesos críticos.</p> <p>La consideración de un equipo o instalación como esencial debe ser ratificada por los especialistas del procesos.</p>	III
<p>Instalaciones o equipos peligrosos, cuya falla involucra riesgo de incendio, explosión o envenenamiento del aire o aguas.</p> <p>Instalaciones o equipos vitales que se deben mantener en funcionamiento para controlar incendios, explosiones o daño al medio ambiente, y atender las necesidades de salud y primeros auxilios a los afectados.</p> <p>Instalaciones cuyo objeto es la protección y evacuación del personal que opera la planta.</p> <p>Sistemas, instalaciones y equipos de alta inversión y difícil reemplazo, cuya detención no programada genera pérdidas o atrasos importantes en la puesta en marcha y que a juicio de los especialistas del proceso y/o del propietario, justifican un grado de seguridad adicional al que proporciona la Categoría III.</p>	IV

Para la norma chilena Nch2369, las estructuras se clasifican en categorías C1, C2 o C3 correspondiente la importancia de la estructura, según lo dictado en el punto 4.3.1 de

la norma.

4.3 Clasificación de estructuras y equipos según su importancia

4.3.1 Clasificación

Para los efectos de la aplicación de esta norma, las estructuras y equipos se clasifican en categorías según su importancia, como sigue:

- **Categoría C1.** Obras críticas, por cualquiera de las razones siguientes:
 - a) Vitales, que se deben mantener en funcionamiento para controlar incendios o explosiones y daño ecológico, y atender las necesidades de salud y primeros auxilios a los afectados.
 - b) Peligrosas, cuya falla involucra riesgo de incendio, explosión o envenenamiento del aire o las aguas.
 - c) Esenciales, cuya falla puede causar detenciones prolongadas y pérdidas serias de producción.
- **Categoría C2.** Obras normales, que pueden tener fallas menores susceptibles de reparación rápida que no causan detenciones prolongadas ni pérdidas importantes de producción y que tampoco pueden poner en peligro otras obras de la categoría C1.
- **Categoría C3.** Obras y equipos menores, o provisionales, cuya falla sísmica no ocasiona detenciones prolongadas, ni tampoco puede poner en peligro otras obras de las categorías C1 y C2.

Figura 23: Clasificación de estructuras según importancia, Nch2369.

La clasificación correspondiente a cada estructura, se le otorga el valor en el punto 4.3.2 de esta misma norma (Nch2369), y corresponden a los siguientes valores expuestos en la tabla mostrada en la figura 12.

4.3.2 Coeficientes de importancia

A cada categoría le corresponde un coeficiente de importancia I , cuyo valor es el siguiente:

C1 $I = 1,20$

C2 $I = 1,00$

C3 $I = 0,80$

Figura 24: Coeficiente de importancia según Nch2369.

A lo mencionado, se le debe agregar que una estructura no podrá tener una clasificación inferior a la del equipo o proceso más crítico que aloje o soporte, a menos que el diseño demuestre que los daños o detenciones de ella no afectan a dicho equipo o proceso.

Por lo tanto, para las categorías explicadas en las normas Nch2369 y Nch3171, se puede hacer una discusión con el objetivo de complementar ambas normas y alcanzar una sola tabla de definición numérica para el valor del factor de importancia I . Es por eso,

que teniendo en cuenta lo escrito en ambas normas se puede hacer la siguiente clasificación mostrada en la tabla 12.

Tabla 12: Coeficiente de importancia.

Categoría de ocupación	Coeficiente I
I	0.8
II	1.0
III	1.2
IV	1.2

Junto a esto, se menciona el hecho que el coeficiente de importancia tiene un nivel de discrecionalidad, especialmente en su aplicación a equipos e instalaciones críticas, que la descripción entregada ha tratado de objetivar.

Las instalaciones normales, esto es, la mayor parte del proyecto, debe ser clasificado como Categoría de ocupación II, teniendo presente que el nivel de desempeño que es deseado para las estructuras en esa clasificación es el que la norma aspira en sus objetivos.

Para las categorías superiores a la II, se busca niveles de desempeño superiores, esto en general equivale a reducir las incursiones fuera del rango elástico y proveer sobre resistencia superiores a las del diseño estándar, lo que se consigue a través de un coeficiente de importancia superior a 1.0.

3.1.7. Espectro de diseño

Para el análisis modal espectral se utiliza las ecuaciones dictadas en la Nch 2369.

$$S_a = \frac{2.75 \cdot A_o \cdot I}{R} \left(\frac{T'}{T^*} \right)^n \left(\frac{0.05}{\xi} \right)^{0.4}$$

Donde:

$$S_a \leq I \cdot C_{max} \cdot g$$

- T^* : período de vibración del modo considerado.

3.1.8. Coeficientes sísmicos

3.1.8.1. Impulsivo

Según lo dictado en la norma chilena Nch2369of2003, en el punto 11.8.7. Para estanques de hormigón armado se debe usar un valor máximo para $R_i = 3$ del factor de modificación de respuesta. Este valor aplica a la construcción normal de unión continua

entre pared y base, si esta condición no se cumple, usar valores de R_i menores que el proyectista debe justificar.

Para los valores de ξ_i , lo descrito en la norma (11.8.8), se utiliza un valor $\xi_i = 0.03$ para estanques de hormigón.

Tabla 5.7 - Valores máximos del coeficiente sísmico

R	$C_{\text{máx.}}$		
	$\xi = 0,02$	$\xi = 0,03$	$\xi = 0,05$
1	0,79	0,68	0,55
2	0,60	0,49	0,42
3	0,40	0,34	0,28
4	0,32	0,27	0,22
5	0,26	0,23	0,18

NOTA - Los valores indicados son válidos para la zona sísmica 3. Para las zonas sísmicas 2 y 1, los valores de esta tabla se deben multiplicar por 0,75 y 0,50, respectivamente.

Figura 25: Tabla 5.7, Nch 2369.

Por lo que para las respectivas divisiones de Codelco, se tienen los siguientes valores de coeficientes sísmicos máximos.

Tabla 13: Tablas coeficiente sísmico por división de Codelco.

División	C_i
Codelco Norte	0.26
Teniente	
Andina	
Salvador	
Ventanas	0.34

En caso de que se tenga un análisis modal espectral, el coeficiente C_i se determina como se indica a continuación:

Para $T_i \leq 0.31$

$$C_i = \frac{2.75}{S}$$

Para $T_i > 0.31$

$$C_i = \frac{1.25}{T_i^{2/3}} \leq \frac{2.75}{S}$$

Donde el valor del periodo fundamental impulsivo (T_i) para uniones rígidas (empotramiento) manto-losa de fondo. Se calcula de la siguiente manera:

$$C_I = C_w \cdot 10 \cdot \sqrt{\frac{t_w}{12 R}} \quad (3.1)$$

$$\omega_i = C_I \cdot \frac{12}{H_L} \cdot \sqrt{\frac{E_c}{\rho_c}} \quad (3.2)$$

$$T_i = \frac{2\pi}{\omega_i} \quad (3.3)$$

- ω_i : Frecuencia circular de vibración para modo impulsivo.
- T_i : Período fundamental de vibración de estanque más la componente impulsiva de líquido almacenado.
- H_L : Altura de diseño de líquido almacenado.
- C_w : Coeficiente obtenido en figura 26.
- E_c : Módulo de elasticidad del hormigón.
- ρ_c : Densidad de masa del hormigón.
- t_w : Espesor promedio del manto.
- R : Factor modificación de respuesta.

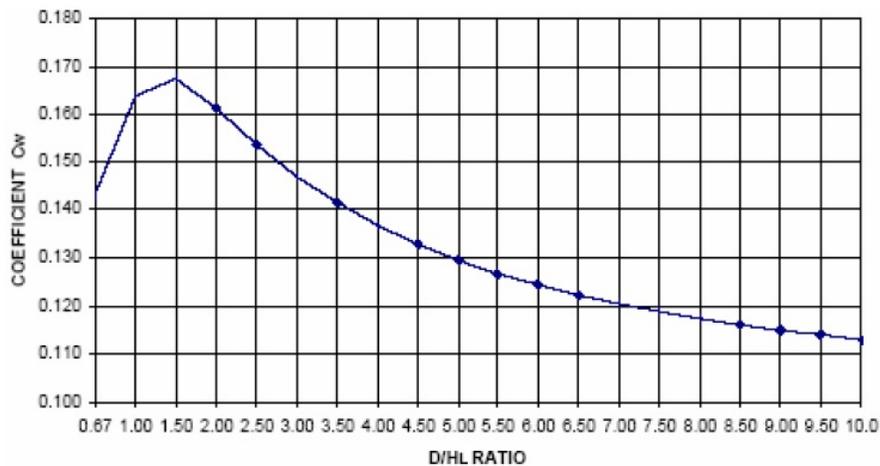


Figura 26: Coeficiente C_w para estanques circulares.

3.1.8.2. Convectivo

En lo descrito en Nch 2369, según el punto 11.8.8, el valor de amortiguación corresponde a $\xi_c = 0.005$.

Siendo el coeficiente sísmico convectivo:

$$C_c = \frac{2.75}{R} \left(\frac{A_0 \cdot I}{g} \right) \left(\frac{T'}{T^*} \right)^n \left(\frac{0.05}{\xi_c} \right)^{0.4} \geq 0.10 \cdot \left(\frac{A_0 \cdot I}{g} \right) \quad (3.4)$$

En los presentes gráficos (Figura 27) se muestra el comportamiento de los valores que adopta el coeficiente convectivo dependiendo los 4 tipos de suelos posibles (acordes a sus parámetros respectivos), en conjunto a los valores adoptados para el periodo convectivo acorde al alcance de este trabajo para las distintas densidades del fluido del estanque.

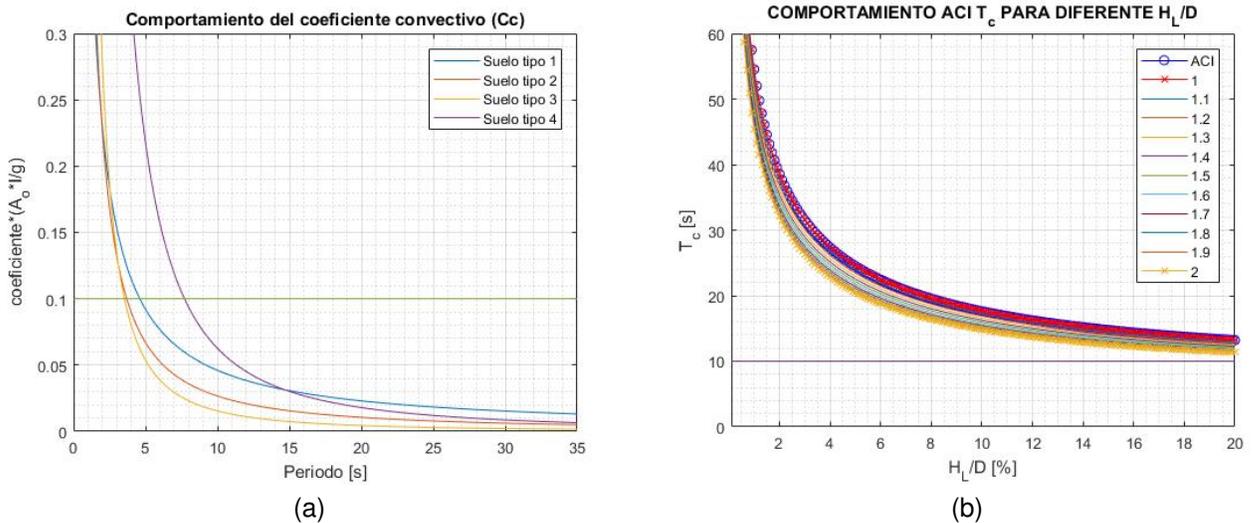


Figura 27: Comportamiento de coeficiente convectivo adoptado para distintos periodos

Se observa gracias al gráfico de la figura 27b que en ningún caso para las distintas densidades adoptadas en este trabajo y para ninguna relación de altura-diámetro utilizado en esta memoria acorde al alcance, se obtienen valores para periodos de 10 segundos, significando que nunca se utiliza el lado izquierdo de la ecuación 3.4, ya que los valores de C_c a partir de los periodos igual o mayor a 10 segundos (figura 27a) provienen del resultado de $0.1 \cdot \left(\frac{A_0 \cdot I}{g} \right)$.

3.1.8.3. Vertical

Para los casos que se considere la aceleración vertical, el coeficiente sísmico vertical corresponde a (en caso de ausencia de espectro específico del lugar):

$$C_v = \frac{2}{3} \cdot C_i \quad (3.5)$$

En caso de existir espectro específico, se considera:

$$C_v = \frac{1.25}{T_v^{2/3}} \leq \frac{2.75}{S} \quad (3.6)$$

$$T_v = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma_L D H_L^2}{2g t_w E_c}} \quad (3.7)$$

3.2. Combinaciones de cargas

3.2.1. Estanques superficiales

Se presentan las combinaciones de cargas a considerar en el diseño de los estanques superficiales/enterrados, en donde se utiliza el método de factores de carga y resistencia (LRFD, por sus siglas en inglés), para el diseño de muros y el método de tensiones admisibles (ASD) para el diseño de fundaciones en terreno.

El método LRFD es utilizado para el diseño de muros mayorando las cargas nominales y minorizando las cargas resistentes, obteniéndose diseños conservadores en lo que es los muros de hormigón.

Mientras que el método ASD utilizado principalmente en el diseño de fundaciones, toma en cuenta las tensiones admisibles del terreno y estas son minoradas, sin mayorar las cargas nominales.

Tabla 14: Combinaciones de cargas según método ASD estanques superficiales, tensiones terreno.

	PP	PV	PE	PH	EA	ES	S
Terreno	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0

En los muros

Tabla 15: Combinaciones de carga según método LRFD, estanques superficiales, Muros.

	PP	PV	PE	PH	EA	ES	S
Muro	1.4	1.4	1.4	0	0	0	0
	1.2	1.2	1.2	1	0	0	1

3.2.2. Estanques enterrados

Para verificar la estabilidad y tensiones en terreno

Tabla 16: Combinaciones de cargas estanques enterrados, tensiones terreno.

	PP	PV	PE	PH	EA	ES	S
Terreno	1	1	1	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	1
	1	1	0	0	1	0	1
	1	1	0	0	1	1	1
	1	1	0	0	1	0	1
	1	1	1	1	1	1	1

En los muros

Tabla 17: Combinaciones de cargas estanques enterrados, Muros.

	PP	PV	PE	PH	EA	ES	S
Muro	1.4	1.4	1.4	0	0	0	0
	1.2	1.2	1.2	1.2	0	0	1.2
	1.4	1.4	0	0	1.4	0	1.4
	1.2	1.2	0	0	1.2	1.2	1.2
	1.4	1.4	1.4	0	1.4	0	1.4
	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

4. Metodología de diseño

4.1. Cálculo de cargas

4.1.1. Peso propio

Considerando las cargas provenientes de los pesos propios del estanque, líquido almacenado, peso propio del manto del estanque, se pueden definir las características geométricas de la estructura.

Para los diseños de muros y fundaciones se logran identificar 2 metodologías para el diseño sísmico, siendo una más conservadora que la otra.

- Considerar masa sísmica del estanque como toda la masa del líquido contenida (volumen de cilindro + volumen cono 1 + volumen cono 2), esto genera un centro de gravedad del líquido mas bajo que la mitad de la altura de muros del estanque por lo que la carga aplicada a muros se encuentra subdimensionada.
- Considerar masa sísmica del estanque solo como volumen del cilindro, este método es mas conservador y ubica el centro de gravedad del líquido en el centro del muro, coincidiendo con lo estipulado en ACI 350 [7]. Para este caso el coeficiente sísmico de cono 1 y cono 2 se asume como impulsivo con el coeficiente de diseño obtenido.

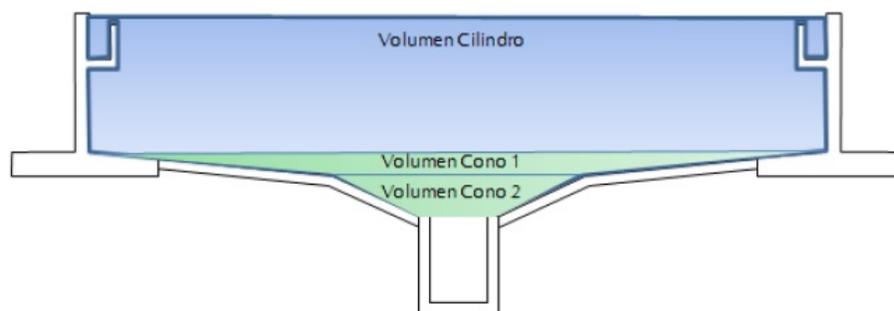


Figura 28: Cálculo masa sísmica.

Cabe mencionar que el peso del líquido correspondiente a los volúmenes de cono 1 y cono 2, se encuentran considerados dentro de la masa impulsiva del estanque.

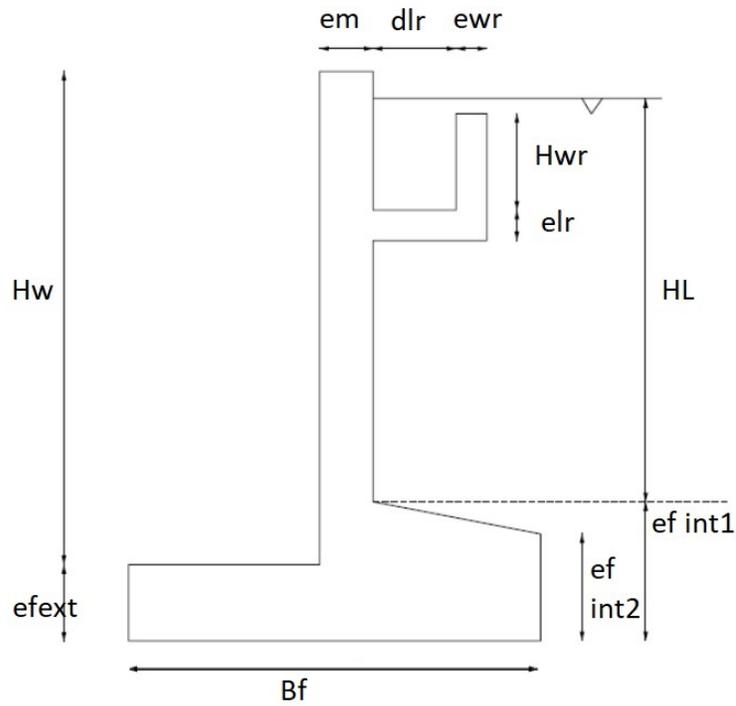


Figura 29: Sección típica espesador.

- Diámetro interior (D_{int}).
- Diámetro exterior (D_{ext}).
- Altura máxima del contenido (H_L).
- Altura muro (H_w).
- Espesor muro (e_m).
- Altura muro canaleta de rebose (H_{wr}).
- Espesor muro canaleta de rebose (e_{wr}).
- Largo losa canaleta de rebose (d_{lr}).
- Espesor losa canaleta de rebose (e_{lr}).
- Relación alto/ancho estanque (H_L/D).
- Ancho zapata (B_f).
- Espesor zapata exterior (e_{fext}).
- Espesor zapata interior 1 (e_{fint1}).
- Espesor zapata interior 2 (e_{fint2}).

4.1.1.1. Cálculo de masas

- Área del anillo de fundación:

$$A_{rw} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_e^2 - D_i^2)$$

- Peso total líquido

$$W_L = \gamma_L \cdot \pi \left(\frac{D_{int}}{2} \right)^2 \cdot H_L$$

- Peso muro exterior

$$W_{we} = \gamma_c \cdot H_w \cdot \pi \left[\left(\frac{D_{ext}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{int}}{2} \right)^2 \right]$$

- Peso muro canaleta de rebose

$$W_{wr} = \gamma_c \cdot H_{wr} \cdot \pi \left[\left(\frac{D_{int}}{2} - d_{lr} \right)^2 - \left(\frac{D_{int}}{2} - d_{lr} - e_{wr} \right)^2 \right]$$

- Peso losa canaleta de rebose

$$W_{lr} = \gamma_c \cdot e_{lr} \cdot \pi \left[\left(\frac{D_{int}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{int}}{2} - d_{lr} \right)^2 \right]$$

- Peso zapata interior

$$W_{fint} = \gamma_c \pi \left(\frac{D_{int}^2}{4} - \frac{(B_f - e_m)^2}{4} \right) \left(\frac{e_{fint1} + e_{fint2}}{2} \right)$$

- Peso zapata exterior

$$W_{fext} = \gamma_c e_{fext} \pi \left[\left(\frac{D_{int} + B_f + e_m}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{int}}{2} \right)^2 \right]$$

- Peso muro

$$W_W = W_{we} + W_{wr} + W_{lr}$$

- Peso manto total

$$W_w = W_{we} + W_{wr} + W_{lr} + W_{fint} + W_{fext}$$

- Coeficiente masa efectiva

$$\xi_{eff} = \left(0.0151 \left(\frac{D}{H_L} \right)^2 - 0.1908 \frac{D}{H_L} + 1.021 \right) \leq 1.0 \quad (4.1)$$

Nota: Para $H_L/D \leq 0.08 \rightarrow \xi_{eff} = 1$

Se puede agregar un método alternativo que tiene como consecuencia ser mas rápido a la hora de calcular la cubicación de hormigón. Este método consiste en calcular de primera los espesores de muro perimetral, y con los parámetros conocidos (H_L y D) calcular la cubicación perimetral, para posteriormente, y en función de estos datos obtener la cubicación de canaleta de rebose.

El método simple sugerido para esta cubicación de canaleta de rebose es (y basado en los detalles de los datos estadísticos de memorias existentes) que se puede reconocer la cubicación de la canaleta de rebose como un 20 % de la cubicación del muro perimetral. Por lo tanto, la cubicación del manto perimetral del estanque total, viene dado por el espesor de muro calculado con los gráficos obtenidos en la sección 2.3, amplificado por 1.2.

4.1.2. Cargas de operación

Se considera el peso del líquido almacenado en estado estático de acción vertical.

$$W_L = \left(\frac{\pi \cdot D_{int}^2}{4} \right) \cdot H_L \cdot \gamma_u \quad (4.2)$$

γ_u : Peso específico del líquido a utilizar [ton/m³].

4.1.3. Carga inercial

Carga propia de la geometría y peso propio del diseño del estanque:

$$P_w = \gamma_c \cdot \xi_{eff} \cdot W_W \cdot (2\pi R) \quad (4.3)$$

$$h_w = 0.5 \cdot H_w \quad (4.4)$$

4.1.4. Presión hidrostática del líquido almacenado

Presión ejercida por el líquido almacenado en el interior sobre las paredes del estanque.

$$P_e(y) = \gamma_L \cdot y \quad (4.5)$$

Con y = punto de altura medido, siendo H_L el máximo y 0 el mínimo (superficie).

- γ_L : Peso específico del líquido almacenado.

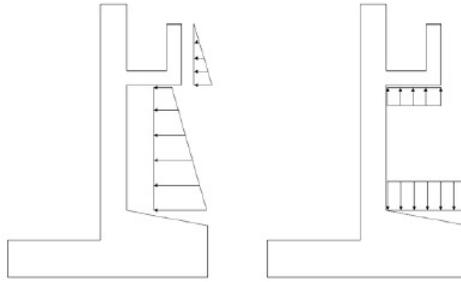


Figura 30: Presión hidrostática.

Para el cálculo de la presión hidrostática vertical, se debe amplificar por el factor C_v a las presiones hidrostáticas P_e .

$$P_v(y) = C_v \cdot P_e(y)$$

Para el caso del cálculo de fuerza hidrostática para de densidad variable, la ecuación mostrada (Ec. 4.5) no es precisa, puesto que en esta se considera densidad constante a lo alto del estanque, para corregir eso se debe restar la siguiente expresión al cálculo de carga hidrostática:

$$\Delta P_e = \frac{H_L^2}{6} (\rho_r - 1) \quad (4.6)$$

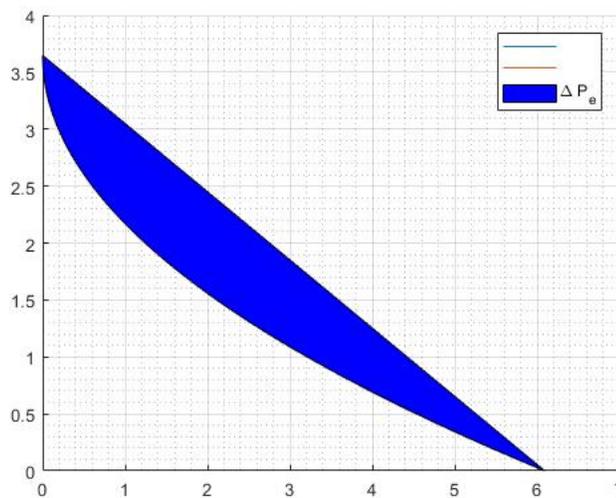


Figura 31: Ejemplo representación diferencia de carga hidrostática para densidad variable, $\rho_L = 1.67[\text{ton}/\text{m}^3]$, $H_L = 3.65[\text{m}]$.

4.1.5. Cargas sísmicas

Estas refieren a las fuerzas provocadas por las presiones sísmicas impulsivas y convectivas ya explicadas.

$$P_w = I \cdot C_i \cdot \xi_{eff} \cdot W_w \quad (4.7)$$

$$P_i = I \cdot C_i \cdot W_i \quad (4.8)$$

$$P_c = I \cdot C_c \cdot W_c \quad (4.9)$$

4.1.6. Presiones hidrodinámicas del líquido almacenado

Correspondientes a las presiones impulsivas y convectivas generadas a raíz de movimientos telúricos, estas se representan de manera lineal según lo expresado en el código ACI 350.3 [7] con las siguientes ecuaciones.

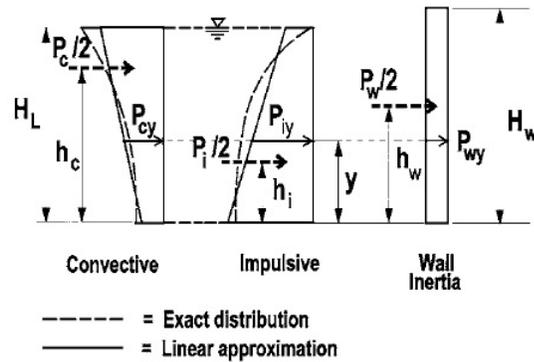


Figura 32: Distribución de presiones muro para presiones hidrodinámicas.

Distribución de presiones a lo alto del muro:

$$P_i(y) = \frac{P_i}{2} \cdot \frac{\left[4H_L - 6h_i - (6H_L - 12h_i) \left(\frac{y}{H_L} \right) \right]}{H_L^2} \quad (4.10)$$

$$P_c(y) = \frac{P_c}{2} \cdot \frac{\left[4H_L - 6h_c - (6H_L - 12h_c) \left(\frac{y}{H_L} \right) \right]}{H_L^2} \quad (4.11)$$

Estas distribuciones pueden ser simplificadas para relaciones de H_L/D muy bajas, quedando de la siguiente manera.

$$P_i(y) = \frac{1.75 - \frac{1.5 \cdot y}{H_L}}{H_L}$$

$$P_c(y) = \frac{P_c}{2 \cdot H_L}$$

Distribución de presiones en el manto:

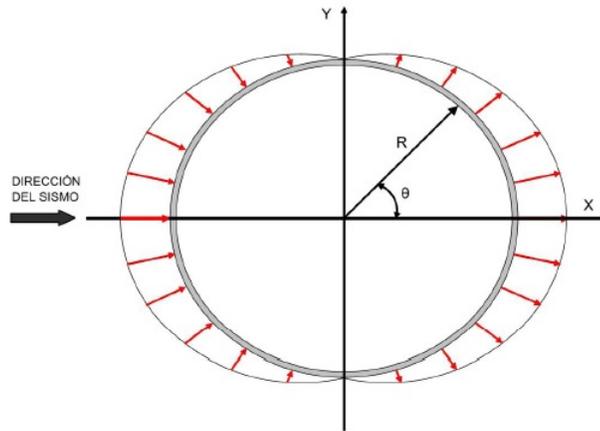


Figura 33: Distribución de presiones en el manto.

$$p_{wy} = \frac{P_w(y)}{\pi r}$$

$$p_{iy} = \frac{2 \cdot P_i(y)}{\pi r} \cdot \cos(\theta)$$

$$p_{cy} = \frac{16 \cdot P_c(y)}{9\pi r} \cdot \cos(\theta)$$

4.2. Cálculo de cortes y momentos basales

4.2.1. Corte basal

$$Q_o = \sqrt{(P_i + P_w)^2 + P_c^2} \quad (4.12)$$

- Q_o : Corte basal.
- P_i : Peso de la masa impulsiva del líquido almacenado.
- P_w : Peso de los muros del estanque.

4.2.2. Momento basal

$$M_w = P_w h_w \quad (4.13)$$

$$M_i = P_i h_i \quad (4.14)$$

$$M_c = P_c h_c \quad (4.15)$$

$$M_o = \sqrt{(M_i + M_w)^2 + M_c^2} \quad (4.16)$$

- h_w : Altura de c.g. muro del estanque.
- M_o : Momento basal.

Importante: La norma chilena Nch2369of2003, en el punto 5.8.1.3 establece que los valores de corte basal obtenidos bajo los parámetros indicados en el informe de mecánica de suelos (P_{ims}) correspondiente al terreno respectivo, no deben ser ni mayor ni menor en un 25% de los valores obtenidos bajo los parámetros que indica la misma norma ($P_{Nch2369}$), escrito de otra manera:

$$0.75 P_{Nch2369} \leq P_{ims} \leq 1.25 P_{Nch2369}$$

Por lo tanto, se calcula un factor (f) correspondiente a:

$$f = \begin{cases} 1.25 \cdot \frac{P_{Nch2369}}{P_{ims}} & \text{si } P_{ims} \geq 1.25 \cdot P_{Nch2369} \\ 0.75 \cdot \frac{P_{Nch2369}}{P_{ims}} & \text{si } P_{ims} \leq 0.75 \cdot P_{Nch2369} \\ 1 & \text{si } 0.75 \cdot P_{Nch2369} \leq P_{ims} \leq 1.25 \cdot P_{Nch2369} \end{cases}$$

4.3. Diseño revancha por ola sísmica

Debido a las aceleraciones horizontales producidas por un sismo, las olas superficiales generadas (modo convectivo) pueden ocasionar derrames, daños en techo, etc.

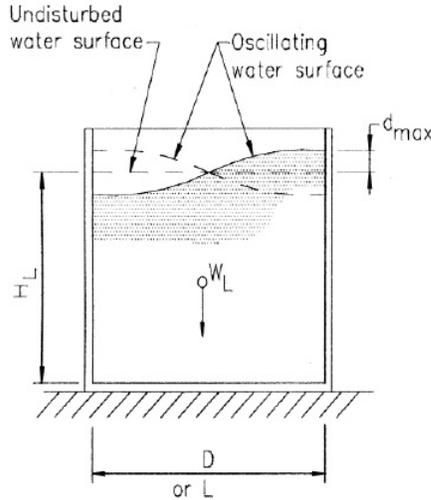


Figura 34: Movimiento del fluido e estanque.

Dentro de los criterios de Codelco [8] se especifica una altura de revancha de a lo menos un 4 % de la profundidad total del líquido almacenado.

Se estima la revancha de oscilación según ACI 350.3 [7], considerando los coeficientes sísmicos:

$$d_{max} = \frac{D}{2} I C_c \quad (4.17)$$

- d_{max} : Altura de la ola sísmica medida desde la superficie del líquido en reposo.
- C_c : Factor de amplificación espectral correspondiente al modo convectivo de oscilación.
- D : Diámetro interior del estanque.

La revancha considerando los espectros de diseño específicos de la zona:

$$d_{max} = \frac{D}{2} I \eta_c \frac{S_D}{g} \left(\frac{2\pi}{T_c} \right) \quad (4.18)$$

Con

$$\eta_c = \frac{3.043}{2.73 - 0.45 \cdot \ln(\beta)}$$

- I : Coeficiente de importancia.

- T_c : Período de vibración para primer modo convectivo.
- S_D : Desplazamiento espectral correspondiente a T_c , con $T_c > 4$.

4.4. Diseño de hormigón armado

Se puede realizar estimaciones previas al diseño final de las cubicaciones de hormigón a utilizar, utilizando a manera de sugerencia los gráficos mostrados en la sección 2.3, donde se pueden obtener los espesores de muro, zapata y ancho de zapata.

Con estos datos se puede obtener los valores de cargas de inercia de los muros, para finalmente tener un valor de corte basal.

Valores iniciales:

- Altura de muro (H_W)= $1.1 \cdot H_L$ [m]
- Cubicación canaleta de rebose (W_{cr}) $\approx 20\%$ de cubicación muro de estanque.

4.4.1. Determinación de esfuerzos

4.4.1.1. Tracción

Se debe considerar que el esfuerzo predominante en el diseño de los estanques es la tracción anular, esta tracción es ejercida principalmente por las presiones convectiva, impulsiva y la hidrostática.

Para facilitar el diseño y obtener unas estimaciones de la cantidad de acero a utilizar se explican las simplificaciones a realizar.

De manera preliminar, se puede realizar una estimación del acero a utilizar mediante los esfuerzos por la presión hidrostática.

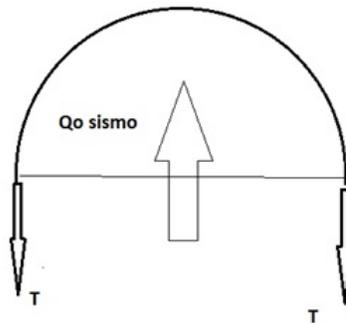


Figura 35: Tracción

Al momento de calcular los valores de tracción anular solicitantes por presión hidrostática, y según en lo expuesto en la referencia del libro 'PCA, Circular concrete tanks without prestressing' [20], se indica que el efecto de la presión hidrostática en el fondo de muros con base muro-losa continua en estanques circulares tiene valores correspondientes al

rango de 60 % y 70 % del valor máximo original de la presión hidrostática $((0.6-0.7) \cdot \gamma \cdot H_L)$, debido a la restricción de la losa de fondo, mientras que para las bases flexibles se considera el valor original y convencionalmente calculado.

La figura 36 muestra el efecto de la presión hidrostática en estanques de concreto sin pretensar, con geometría circular para casos de unión base muro-losa rígida y flexible, para el diseño de tracción anular. Los valores que aparecen lo largo del eje vertical que van de 0 a 1.0, corresponden a los coeficientes de la presión hidrostática correspondiente, para el caso máximo (coeficiente = 1.0), se representa de la manera $1.0 \cdot \gamma \cdot H_L$.

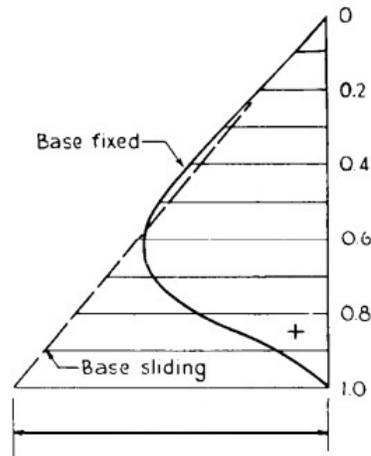


Figura 36: Efecto presión hidrostática en muros con unión muro-losa rígidos

$$P_{e(max)}^{PCA} = 0.61 \cdot \gamma_L \cdot H_L \quad (4.19)$$

Pero teniendo en consideración un punto de vista conservador, y teniendo en cuenta lo dictado en el libro PCA, se sugiere en esta memoria utilizar un coeficiente mayor.

Por lo que se recomienda considerar que el efecto de la presión hidrostática para muros de estanques circulares hechos de hormigón armado con base continua entre muro-losa, considerar un 80 % de la presión hidrostática máxima en el fondo del muro para el diseño según tracción anular.

$$P_{e(max)}^{sugerido} = 0.8 \cdot \gamma_L \cdot H_L \quad (4.20)$$

Se puede realizar una estimación inicial de los valores de esfuerzos a tracción que genera la presión hidrostática en el muro perimetral, junto con la presión debido a sismos que involucra la presión impulsiva y convectiva, representado en el corte basal (Q_o).

Conociendo el funcionamiento de la presión hidrostática a lo largo del eje vertical del muro se puede ver su valor máximo a la altura del fondo del estanque.

$$T_{pe} = 0.8 \cdot \gamma_u \cdot H_L \cdot \frac{D}{2} \quad (4.21)$$

$$T_{qo} = \frac{\pi}{8} \cdot \sqrt{(C_i \cdot (c_{wi} + \xi_{eff} c_{ww}))^2 + (C_c \cdot c_{wi})^2} \cdot (\gamma_r D^2 H_L I) \quad (4.22)$$

Siendo:

- $c_{wi,wc,ww}$: $W_{i,c,w}/W_L$

4.4.2. Armaduras

Con los valores de cubriciones y de tracciones obtenidas, se realizan las estimaciones de armaduras iniciales para el estanque.

Se realiza una estimación inicial para cargas de servicio (120 MPa) para las cargas hidrostáticas y luego se realiza estimación para cargas sísmicas utilizando $f_y=420$ MPa.

$$As_1 = \frac{Traccion_{hidrosttica}}{f_{servicio}}$$

$$As_2 = \frac{Traccion_{ssmica}}{0.9 \cdot f_y}$$

Observación: Tener en consideración que puede ser útil el usar dos capas de armadura, lo que significaría que $As = As_i/2$.

4.4.2.1. Distanciamiento mínimo de refuerzos

En el código ACI 318, punto 10.6 se especifica que para vigas y losas el espaciamiento máximo de las armaduras cercanas a la superficie en tracción no debe exceder:

$$s = 380 \cdot \left(\frac{280}{f_s} \right) - 2.5 c_c \quad (4.23)$$

- s : Espaciamiento medido de centro a centro del refuerzo de tracción por flexión más cercana a cara extrema en tracción.
- f_s : Esfuerzo en el refuerzo calculado para cargas de servicio.
- c_c : Recubrimiento libre.

4.4.2.2. Armadura mínima

El código ACI 224R-1, sección 4.2.3.2, dicta que el área mínima de acero de refuerzo requerido para el control de ancho de grieta es:

$$A_s = \frac{k_{ch} \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct}}{\sigma_s} \quad (4.24)$$

- A_s : Área de refuerzo dentro de la zona en tracción.
- A_{ct} : Área efectiva de sección de hormigón a tracción.
- k_{ch} : Coeficiente que depende de naturaleza de distribución de tensiones, 1.0 para tracción pura y 0.4 para flexión.
- k : Coeficiente que considera tensiones no uniformes debido a deformaciones por contracción, varía entre 0.5 y 1.0.
- $f_{ct,eff}$: Resistencia efectiva del hormigón en la formación de la primera grieta.

4.4.3. Control de ancho de grietas

En el diseño de un estanque con geometría circular, en donde el principal factor a tomar en cuenta para el diseño es la tracción anular generada, el control de ancho de grietas es fundamental para una buena realización del diseño. Este control, se genera basado en lo dictado en la norma americana ACI 224R junto con los criterios de diseño de CODELCO, para obtener un máximo de ancho de grieta posible, que logre un correcto funcionamiento del estanque.

4.4.3.1. Flexión

La ecuación que se describe en los criterios de diseños de CODELCO [8], basado en lo dictado en la norma americana ACI 224R [18], estima el ancho máximo permitido de fisura superficial debido a flexión:

$$w_v = 0.011 \cdot f_s \cdot \sqrt[3]{d_c \cdot A} \cdot 10^{-3} \quad (4.25)$$

- w_v : Ancho máximo de grietas en vigas [mm].
- β_{grieta} : Relación entre las distancias desde la cara de máxima tensión y desde el centroide del acero hasta el eje neutro (1.2 para vigas).
- f_s : Tensión en el acero para la carga con la cual se desea determinar el ancho de grieta [MPa].
- d_c : Espesor de recubrimiento de viga [mm].

- A : Área de hormigón que rodea a la barra, igual a área total efectiva a tensión del hormigón que rodea el refuerzo que tiene el mismo centroide dividido por el número de barras [mm²].

Según los criterios de CODELCO junto a lo dictado en la norma ACI224R-01 [18], los anchos admisibles de grietas en hormigón armado bajo cargas de servicio (sin mayorar) son:

Condición de exposición	Ancho admisible de la grieta	
	pulgadas	mm
Aire seco o membrana protectora.	0,016	0,41
Humedad, aire húmedo, suelo.	0,012	0,30
Químicos para deshielo.	0,007	0,18
Agua de mar y rocío, de agua de mar: humedecimiento y secado.	0,006	0,15
Estructuras de contención de agua, se excluyen ductos sin presión.	0,004	0,10

Figura 37: Anchos admisibles de grietas en hormigón armado bajo cargas de servicio.

Para esta memoria de trabajo se adoptan los anchos admisibles de grietas máximos igual a 0.004 pulgadas (0.10 [mm]).

Por lo que el ancho de grieta máximo a flexión (ec. 4.25) queda:

$$f_s \cdot \sqrt[3]{d_c \cdot A} \leq 9090$$

Para f_s en [MPa] y d_c , A en [mm].

4.4.3.2. Tracción pura

Para el caso de control de ancho de grieta para diseños a tracción pura, lo dictado en ACI 224R indica lo siguiente.

$$w_t = 0.02 \cdot 10^{-3} \cdot f_s \cdot \sqrt{d_c^2 + \frac{s^2}{16}} \quad (4.26)$$

- w_t : Ancho máximo de grietas por tracción pura [mm].
- f_s : Tensión en el acero para la carga con la cual se desea determinar el ancho de grieta [MPa].

- d_c : Espesor de recubrimiento de viga [mm].
- s : Espaciamiento de barras [mm].

Aplicando a la restricción de 0.1 [mm] de ancho de grieta, se puede tener un valor de la armadura mínima a necesitar en función de la tracción, recubrimiento y espaciamiento entre barras.

$$A_s \geq 0.002 \cdot T_{tp} \cdot \sqrt{d_c^2 + \frac{s^2}{16}}$$

- T_{tp} : Tracción [ton].

De igual manera, se puede extraer una expresión que indica un máximo de tracción a resistir en función de la armadura a utilizar, recubrimiento de barras [cm], y de su respectivo espaciamiento [cm].

$$f_{s(max)} = \frac{500}{\sqrt{d_c^2 + \frac{s^2}{16}}}$$

- $f_{s(max)}$: Tensión máxima admisible acero diseño a tracción pura [ton].

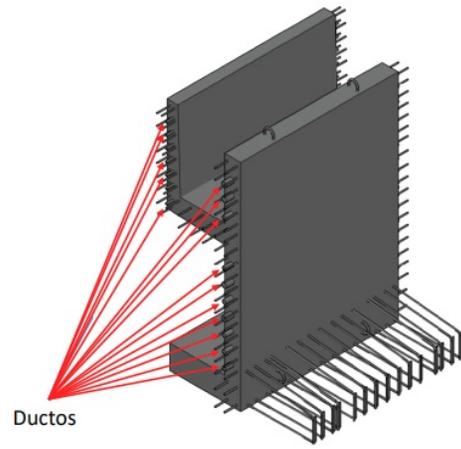
4.4.4. Hormigón postensado

Como se explica en la sección de estadística (S.2.3), dentro de los proyectos realizados existe un diseño que exige un requerimiento de espesores significativamente menor en comparación al resto de proyectos y acorde a sus parámetros ($\gamma_r \cdot D \cdot H_L$), este diseño obtiene un menor espesor de muros perimetrales debido a la utilización de hormigón postensado en su construcción y diseño.

El hormigón postensado es un método de presfuerzo en el cual, utilizando cables de acero que se colocan entre un ducto para evitar su adherencia con el concreto, este se somete a fuerzas opuestas a las producidas por las cargas de trabajo, logrando aumentar así su capacidad de carga, que una vez concluidos sus procesos de fraguado y alcanzado el porcentaje de resistencia especificado por el ingeniero. Este procedimiento para este material tiene efecto en las resistencias del hormigón, de manera que estas aumentan y así permiten una mayor resistencia a la tracción y obteniendo un requerimiento menor a su vez de espesor de hormigón como de armadura a necesitar.



(a)



(b)

Figura 38: Muro perimetral hormigón para postensado.



Figura 39: Fierros hormigón postensado

4.5. Estimaciones iniciales

Con el objetivo de que de manera breve se puedan obtener estimaciones iniciales para conocer las cubicaciones aproximadas a utilizar se añade este capítulo para el lector de manera que pueda obtener sin necesidad de profundizar, valores para el corte y momento basal, de manera que se pueda tener una consideración básica de la inversión económica que el diseño pueda requerir.

Se hace en esta sección una breve guía de las ecuaciones y pasos a seguir para obtener estos datos. Para esto se debe tener conocimiento de la altura de líquido a considerar, peso específico del relave y diámetro del estanque a considera (H_L, γ_r, D).

4.5.1. Cubicación hormigón

En el capítulo de estadística (S.2.3) se tienen los valores para espesor de muro/zapata y ancho de zapata preliminares que son suficientes para obtener una estimación inicial de la cantidad volumétrica de hormigón a requerir (ecuaciones 2.36, 2.37 y 2.38). Se tiene en consideración que como altura estimada de muros es un 10% más de la altura de líquido ($H_w = 1.1 \cdot H_L$).

Obteniéndose lo siguiente:

- $V_w = (\pi \cdot D) \cdot e_{muro} \cdot H_w$
- $V_{cr} = 0.2 \cdot V_w$
- $V_f = (\pi \cdot D) \cdot e_{zapata} \cdot b_{zapata}$
- $V_W = V_w + V_{cr} + V_f$

Con:

- V_w : Volumen muro perimetral.
- V_{cr} : Volumen canaleta de rebose.
- V_f : Volumen zapata de fundación.
- V_W : Volumen manto total de estanque.

4.5.2. Corte y momento basal

Para hacer un rápido cálculo de cuánto serán los valores a obtener para corte y momento basal se asumen valores de coeficiente los coeficientes de C_i y C_c , y las alturas de centro de gravedad para la masa impulsiva y convectiva, h_i y h_c respectivamente.

$$W_L = \frac{\pi}{4} \cdot \gamma_u \cdot D^2 \cdot H_L$$

Tabla 18: Valores a utilizar estimaciones iniciales

C_i	0.26
C_c	0.04
W_i	$0.1 \cdot W_L$
W_c	$0.8 \cdot W_L$
h_i	$0.375 \cdot H_L$
h_c	$0.5 \cdot H_L$

$$\begin{aligned}
 Q_o &= C_i \cdot W_i + C_c \cdot W_c \\
 &= (0.1 \cdot 0.26 + 0.8 \cdot 0.04) \cdot W_L \\
 &= 0.058 \cdot W_L \\
 &= 0.046 \cdot D^2 \cdot H_L \cdot \gamma_u \\
 &\approx 0.05 \cdot D \cdot (\gamma_u \cdot D \cdot H_L)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_o &= C_i \cdot h_i \cdot W_i + C_c \cdot h_c \cdot W_c \\
 &= (0.1 \cdot 0.26 \cdot 0.375 + 0.8 \cdot 0.04 \cdot 0.5) \cdot H_L \cdot W_L \\
 &= 0.02 \cdot D \cdot (\gamma_u \cdot D \cdot H_L^2)
 \end{aligned}$$

4.5.3. Armadura anular a requerir

Para calcular una estimación de cuánta armadura se va a requerir, se tiene que enfocar en la tracción anular de la estructura, y esta es principalmente afectada por las presiones tanto sísmicas como la presión hidrostática del líquido contenido.

$$\begin{aligned}
 \text{Tracción Hidrostática} &= 0.8 \cdot \gamma_r \cdot R \cdot H_L \\
 &= 0.4 \cdot (\gamma_r \cdot D \cdot H_L)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Tracción Corte basal} &= \frac{Q_o}{2} \cdot \frac{1}{H_w} \\
 &= \frac{Q_o}{2 \cdot 1.1 \cdot H_L} \\
 &= 0.02 \cdot \gamma_u \cdot D^2
 \end{aligned}$$

Nota: Se considera altura de muro $H_w = 1.1 \cdot H_L$.

$$\begin{aligned}\text{Tracción Sísmica} &= \text{Tracción Hidrostática} + \text{Tracción Corte basal} \\ &= \gamma_u \cdot D^2 \cdot \left(0.4 \cdot \frac{H_L}{D} + 0.02\right)\end{aligned}$$

En donde finalmente para el cálculo de armadura se utiliza una estimación inicial que considera la tracción hidrostática bajo cargas de servicios ($f_s = 120$ MPa), para luego corroborar la tracción sísmica bajo cargas últimas ($f_y = 420$ MPa).

$$A_{s1} = \frac{\text{Tracción Hidrostática}}{f_s}$$
$$A_{s2} = \frac{\text{Tracción Sísmica}}{f_y}$$

5. Guía de diseño

5.1. Tablas resumen

5.1.1. Modificaciones a alturas y masas convectivas/impulsivas

Tabla 19: Tabla Resumen fórmulas simplificadas

	Δ Memo
h_i	$-0.015 \cdot (\gamma_r - 1)$
h_c	0
W_i	$-0.1 \cdot (H/D) \% \cdot (\gamma_r - 1)$
W_c	$-4 \cdot (\gamma_r - 1)$

5.1.2. Parámetros sísmicos

A modo de simplificar la labor, se adjuntan las tablas 20 y 21 con con los parámetros para el diseño correspondiente.

Tabla 20: Parámetros Sísmicos

	Impulsivo	Convectivo	Vertical
Razón de amortiguamiento (ξ)	0.03	0.005	-
Factor de modificación de respuesta (R)	3	1	-
Coeficiente Sísmico (C)	Tab. 13, cap. 3.1.8.1.	Ec. 3.4, cap. 3.1.8.2.	Ec. 3.5, cap. 3.1.8.2.

Tabla 21: Parámetros Sísmicos 2

Tipo de Suelo	IMS
Zona Sísmica	Tabla 8, Sección 3.1.5
Aceleración efectiva (A_{0g})	Figura 9, Sección 3.1.5
Parámetros T' y n	Figura 10, Sección 3.1.5
Factor de Importancia (I)	Sección 3.1.6

5.1.3. Estimaciones iniciales

Tabla 22: Tabla resumen estimaciones iniciales

H_w	[m]	$1.1 \cdot H_L$
γ_u	[ton/m ³]	$(\gamma_r + 1)/2$
W_L	[ton]	$0.25 \cdot \pi \cdot D \cdot (\gamma_u \cdot D \cdot H_L)$
e_{muro}	[cm]	$10 + (\gamma_r \cdot D \cdot H_L)/12$
e_{zapata}	[cm]	$53 + (\gamma_r \cdot D \cdot H_L^2)/140$
b_{zapata}	[m]	$1.4 + e_{zapata}/34$
V_W	[m ³]	$(\pi \cdot D) \cdot (1.2 \cdot e_{muro} \cdot H_w + e_{zapata} \cdot b_{zapata})$
Q_o	[ton]	$0.05 D \cdot (\gamma_u \cdot D \cdot H_L)$
M_o	[ton*m]	$0.02 D \cdot (\gamma_u \cdot D \cdot H_L^2)$
Tr. Hidrostática	[ton/m]	$0.4 \cdot (\gamma_u \cdot D \cdot H_L)$
Tr. Corte Basal	[ton/m]	$0.02 \cdot \gamma_u \cdot D^2$
Tr. Sísmica	[ton/m]	$\gamma_u \cdot D^2 \cdot (0.4 \cdot \frac{H_L}{D} + 0.02)$
Armadura As_1	[cm ² /m]	$\frac{\text{Tr. Hidrostática}}{f_s}$
Armadura As_2	[cm ² /m]	$\frac{\text{Tr. Sísmica}}{f_y}$

5.2. Pasos a seguir

- Obtener parámetros sísmicos (Tablas 20 y 21).
- Estimación inicial espesores de muro-zapata, Fig. 13 y 15 (S. 2.3).
- Estimación inicial cubicación hormigón (S. 4.5.1).
- Calcular todas las masas correspondientes:
 - Muro, canaleta de rebose, zapata (S. 4.1.1.1.)
 - Masa efectiva, Ec. 4.1 (S. 4.1.1)
 - Pesos impulsivos y convectivos, Ec. 2.24 y 2.26 (S. 2.2.1 y 2.1.2).
- Calcular frecuencias y periodos de vibración:
 - Impulsiva, Ec. 3.2 y 3.3 (S. 3.1.7)
 - Convectiva, Ec. 2.28 y 2.29 (S. 2.1.2)
- Calcular las cargas dinámicas laterales (P_w , P_i , P_c), Ec. 4.7, 4.8 y 4.9 (S. 4.1.5)
- Calcular la distribución de presiones, Ec 4.10 y 4.11 (S. 4.1.6)
- Calcular corte y momento basal, Ec. 4.12 y 4.16 (S. 4.2)
- Calcular esfuerzos (S. 4.4.1)
- Estimar armaduras (S. 4.5.3)

5.3. Ejemplo simple de diseño

En la presente sección se explica paso a paso el procedimiento a realizar mediante un ejemplo.

A modo de clarificar cualquier duda existente del procedimiento en esta sección descrita, se agrega un ejemplo numérico para estimación inicial de corte, momento y armaduras perimetrales.

Parámetros conocidos:

- $\gamma_r = 1.5$ [ton/m³]
- $H_L = 3$ [m]
- $D = 100$ [m]

5.3.1. Estimaciones iniciales

De los gráficos estadísticos de la sección S.2.3, se obtienen las cubicaciones de hormigón preliminares. Mientras que del capítulo S.4.5 se obtienen los resultados para corte, momento, tracciones y armaduras

Tabla 23: Resultados ejemplo estimaciones iniciales

γ_u	1.25	[ton/m3]
$\gamma_r \cdot D \cdot H_L$	450	[ton/m]
$\gamma_r \cdot D \cdot H_L^2$	1350	[ton]
$\gamma_u \cdot D \cdot H_L$	375	[ton/m]
$\gamma_u \cdot D \cdot H_L^2$	1125	[ton]
H_w	3.3	[m]
W_L	29452	[ton]
e_{muro}	48	[cm]
e_{zapata}	63	[cm]
b_{zapata}	3.2	[m]
V_W	1229	[m3]
Q_o	1875	[ton]
M_o	2250	[ton*m]
Tr. Hidrostática	150	[ton/m]
Tr. Corte Basal	250	[ton/m]
Tr. Sísmica	400	[ton/m]
As_1	125	[cm2/m]
As_2	95	[cm2/m]

6. Conclusiones y recomendaciones

Esta memoria desarrolla los objetivos planteados: estudiar el comportamiento de los estanques espesadores de la minería, caracterizar sus propiedades de diseño, y establecer una guía simplificada para prediseñar los muros perimetrales, que representan una fracción muy significativa del volumen de hormigón, y así lograr una optimización de esfuerzos de diseño que pueda ayudar a una optimización en recursos.

El diseño de los estanques queda en gran medida determinado por el comportamiento del fluido en régimen para el diseño estático y excitado por aceleraciones basales en su desempeño hidrodinámico.

El tratamiento general simplificado proviene de estudios clásico de Housner en la década del 50 del siglo pasado, posteriormente complementados por nuevos investigadores. Los documentos de ACI 350.3 y 224R entregan una guía que se aplica en nuestro país, sin embargo no cubren de manera explícita aspectos específicos de los espesadores como:

- Son estanques de gran diámetro y poca altura, normalmente con razones H_L/D menos que 0.10 (10 %) y normalmente cercanas a 0.05 (5 %).
- La densidad del líquido puede ser constante, como en los clarificadores o variable en profundidad, como en los espesadores de relaves, que en su fondo alcanzan niveles de densidad un 50 % o más que la densidad superficial.

Los valores de modificación propuestos ΔW_i , Δh_i , Δh_c , pueden ser despreciadas debido a sus bajos valores resultantes, inclusive para casos límites no influyen de gran manera en los cálculos finales. A excepción de la variación de masa convectivas ΔW_c , en donde se puede obtener un cambio máximo de un 4 %, valor significativo, por lo que se deja a criterio del ingeniero la utilización de esta variación. Su efecto de uso está en bajar considerablemente los valores de masa y por ende menor cantidad de hormigón requerido.

Recomendaciones y consideraciones a la hora del diseño:

- Utilizar el promedio de peso específicos (γ_u), entre el relave (γ_r) y el agua (γ_0).
Pudiese ser a simple vista de fácil ocurrencia, pero no es considerado en los actuales proyectos realizados y estudiados. El cambio puede generar variaciones de masa total de hasta un 25 % en un caso máximo ($\gamma_r = 2$ [ton/m³]), siendo lo real tener variaciones de entre 22 % y 24 % para espesadores de condensado, 17 % y 19 % para espesadores de relave, mientras que 0 % para estanques clarificadores (manejan agua en su interior).
- Usar guía de estimaciones iniciales planteadas en la memoria.
Basado en estadísticas de los proyectos actuales, permite tener nociones iniciales de inversión a requerir, con resultados que sirven como límite máximo de lo que se requerirá.

- Establecer correcto valor de factor de importancia (I).

Se establece en la memoria la discusión sobre los aspectos de categorías de ocupación de estructuras, basado en el estudio de normas Nch2369 y Nch3171, dejando definiciones precisas y claras.

- Diseñar en base a tracción anular.

Tomar en cuenta el coeficiente sugerido para el diseño según tracción anular, correspondiente al efecto de la presión máxima hidrostática en la base del muro, considerando un valor conservador, pero que cumple el reducir los valores de esfuerzos de diseño. Recalcando que este efecto solo se considera para el caso de diseño de tracción anular y para bases muro-losa continuos.

- Correcto control ancho de grietas.

En base a lo que dice la ACI 224R, se establecen ecuaciones que cumplen las limitantes de ancho de grietas para estas estructuras, y dejando la opción de definir las en base a tensiones máximas admisibles para el acero.

- Revancha sísmica, considerar el viento para un diseño adecuado.

Los lugares en donde se realizan estas construcciones son en su mayor parte desértico y amplios en donde el viento genera oleajes considerables.

- Aplicar lo dicho en esta guía de diseño.

Se presenta de manera simple, métodos de estimaciones iniciales para cubicación y simplificaciones para cálculos respectivos, haciendo fácil la labor y explicativa para un buen entendimiento.

Los resultados que se obtienen en comparaciones con proyectos reales ya realizados en la industria, utilizando lo estudiado en esta memoria, permite tener variaciones de 16 % y 19 % en el valor final de cortes y momentos basales en comparación a los resultados que se obtienen al realizarlo de la manera actual (considerando γ_r y no γ_u , en conjunto con los valores de masa impulsiva/convectiva dictados en ACI).

Incluso se pueden obtener beneficios en esfuerzos de diseño de un 14 %-15 % si se considera únicamente el factor de γ_u , siendo este el parámetro trascendental en la disminución de valores de esfuerzos incidentes en el diseño.

Para los casos de espesadores clarificadores (que manejan densidades cercanas al valor del agua) las diferencias son mínimas y despreciables, debido a que si bien, las ecuaciones presentadas concuerdan con los valores de la norma ACI al tratarse de fluidos homogéneo (se considera el fluido como agua), estos despreciables cambios se deben a la diferente manipulación numérica en las ecuaciones dictadas (decimales aproximados).

Al considerar lo recomendado en esta memoria, se pueden conseguir economías superiores al 15 % en valores de corte y momentos basales para el diseño, que se traducen en una disminución significativa de esfuerzos de diseño, traducándose en ahorro significativo del diseño de espesores de muros y losa de hormigón armado, exigiendo menor

cantidad en la minería para volúmenes de hormigón.

Los gráficos entregados (figura 40) permiten controlar, a partir de la estadística, las dimensiones principales del estanque y reflejan una práctica nacional exitosa.

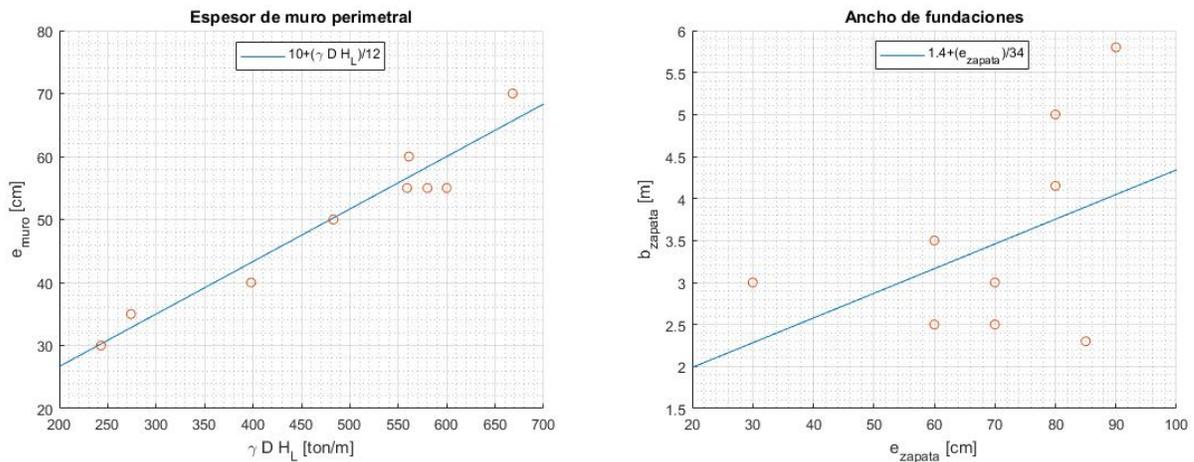


Figura 40: Gráficos estadísticos de diseños actuales para estimaciones iniciales de espesores de hormigón

Recalcar la importancia de estos gráficos estadísticos presentados debido a su inexistencia en el ámbito laboral actual, en este trabajo de título de manera privilegiada se ha logrado tener a disposición memorias de cálculo de proyectos realizados otorgando una gran ventaja a la persona a cargo de próximos diseños, en donde puede tener en consideración lo que otras empresas del rubro han obtenido y utilizar esta información como parámetro para sus diseños.

Esto es algo que en la actualidad se es imposible tener, por lo que los actuales encargados de diseños de estanques se ven enfrentados al diseño sin ningún tipo de material de apoyo, orientación ni advertencia sobre errores comunes.

Para lo que la industria minera necesita, cualquier ahorro es importante, ya que se manejan cifras de alta envergadura, reducir costos indirectos es relevante cuando antes era obviado. El hormigón prefabricado ofrece una solución considerable reduciendo los tiempos de montaje, personal en obra, apoyo de personal, etc.

La incorporación de prefabricados en los proyectos mineros ha sido lenta y limitada, sin aprovechar muchas de las ventajas del sistema. Este material permite un rápido montaje, y si se adecúan a lo que la industria necesita, pueden llegar a ser un gran aporte económico.

Como recomendaciones para próximos estudios, se puede aplicar el método lineal para la obtención de las ecuaciones en la masa convectiva, esto puede provocar una leve mejora en la precisión de los resultados, pero requiere de un trabajo más extenso debido

a las complicaciones algebraicas.

De igual manera, se recomienda un estudio sobre el ahorro que significaría la reducción de espesores de los radieres de los estanques, debido a sus amplios diámetro, esto generaría grandes impactos económicos.

Otro punto posible a tocar, es la consideración del fondo cónico para los diseños de muros, en este trabajo solo se considera el volumen cilíndrico del estanque, debido a que se considera el caso mas conservador.

Finalmente se propone un estudio del impacto económico en la industria que pudiese generar la utilización de hormigón postensado y hormigón prefabricado en el diseño de estanques. Estos materiales se proyectan como el material a utilizar en un futuro no lejano debido a su mayor resistencia (postensado).

7. Glosario

- A_1 : Máximo desplazamiento de la masa M_1 .
- A_c : Área de la sección de hormigón.
- A_{ct} : Área efectiva de sección de hormigón a tracción.
- A_o : Aceleración efectiva.
- A_{rw} : Área del anillo de fundación.
- A_s : Sección total de las armaduras.
- A_{s1} : Sección armadura estimada bajo condiciones de servicio.
- A_{s2} : Sección armadura estimada bajo condiciones últimas.
- b_{zapata} : Ancho de zapata [m].
- C_c : Coeficiente sísmico convectivo.
- C_i : Coeficiente sísmico impulsivo.
- C_I : Coeficiente de apoyo en cálculo utilizado para estanques con uniones rígidas.
- C_{max} : Valor máximo admisible para coeficiente sísmico.
- C_v : Coeficiente sísmico vertical.
- C_w : Coeficiente obtenido en figura 26.
- d_{max} : Altura de la ola sísmica medida desde la superficie del líquido en reposo.
- D : Diámetro estanque.
- e_{muro} : Espesor de muro perimetral [cm].
- e_{zapata} : Espesor de zapata [cm].
- E_A : Empuje activo del terreno lateral al estanque.
- E_c : Módulo de elasticidad del hormigón.
- f_{ct} : Resistencia a la tracción del hormigón.
- $f_{ct,eff}$: Resistencia efectiva del hormigón en la formación de la primera grieta.
- f'_c : Resistencia a la compresión del hormigón.
- f_{ES} : Coeficiente de amplificación.
- f_s : Límite de servicio del hormigón [MPa].
- $f_{s(max)}$: Tensión máxima admisible acero diseño a tracción pura [MPa].
- f_u : Resistencia a la tracción del acero [MPa].
- f_y : Límite de fluencia del hormigón [MPa].
- FS : Factor de seguridad.
- g : Aceleración de gravedad.
- h_i : Altura centro de gravedad masa impulsiva.
- h'_i : Altura centro de gravedad masa impulsiva incluyendo presión sobre fondo de estanque.
- h_c : Altura centro de gravedad masa convectiva.
- h'_c : Altura centro de gravedad masa convectiva incluyendo presión sobre fondo de estanque.
- H_a : Punto de aplicación de empuje activo.
- H_L : Altura líquido contenido en estanque.

- H_T : Altura total de terreno.
- i_{EA} : Inclinación de la superficie del relleno posterior.
- I : Coeficiente de factor de importancia.
- k : Coeficiente que considera tensiones no uniformes debido a deformaciones por contracción, varía entre 0.5 y 1.0.
- k_c : Coeficiente de variación de densidad, caso convectivo.
- k_{ch} : Coeficiente que depende de naturaleza de distribución de tensiones, 1.0 para tracción pura y 0.4 para flexión.
- k_i : Coeficiente de variación de densidad, caso impulsivo.
- K : Coeficiente de balasto.
- K_h : Coeficiente sísmico horizontal para empuje de suelo.
- K_O : Coeficiente de empuje en reposo.
- K_v : Coeficiente sísmico vertical para empuje de suelo.
- M_1 : Masa respectiva al primer modo en un sistema mecánico equivalente al estanque. También se representa como la masa convectiva W_c .
- n : Parámetro de suelo, tabla 5.4, Nch2369.
- N : Esfuerzo de tracción máximo previsto.
- p_{fondo} : Presión ejercida en fondo de estanque.
- p_{muro} : Presión ejercida en muro perimetral.
- P_{fondo} : Fuerza ejercida en fondo de estanque.
- P_i : Peso de la masa impulsiva del líquido almacenado.
- P_{muro} : Fuerza ejercida en muro perimetral.
- P_w : Peso de los muros del estanque.
- Q_o : Corte basal.
- R : Factor modificación de respuesta, Radio estanque [m].
- R_c : Factor de reducción, caso convectivo.
- R_i : Factor de reducción, caso impulsivo.
- s : Separación de las barras.
- S_a : Espectro de diseño, análisis modal.
- S_D : Desplazamiento espectral correspondiente a T_c , con $T_c > 4$.
- t_w : Espesor promedio manto.
- T' : Parámetro de suelo, tabla 5.4, Nch2369.
- T^* : Periodo de vibración del modo considerado [s].
- T_c : Periodo fundamental convectivo.
- T_i : Periodo fundamental masa impulsiva.
- T_{max} : Tracción máxima para diseño control ancho de grietas.
- T_{tp} : Tracción en diseño control ancho de grieta para tracción pura.
- T_v : Periodo fundamental vertical.
- \dot{u} : Ecuación de movimiento fluido impulsivo.
- V_{cr} : Volumen canaleta de rebose.

- V_f : Volumen zapata de fundación.
- V_w : Volumen muro perimetral.
- V_W : Volumen manto total de estanque.
- W_c : Peso masa convectiva.
- W_{fext} : Peso zapata parte exterior.
- W_{fint} : Peso zapata parte interior.
- W_i : Peso masa impulsiva.
- W_{lr} : Peso losa canaleta de rebose.
- W_L : Peso masa líquido contenido en estanque.
- W_w : Peso manto total.
- W_W : Peso muro perimetral.
- W_{we} : Peso muro exterior.
- W_{wr} : Peso muro canaleta de rebose.
- x_1 : Desplazamiento de la masa M_1 .
- α_0 : Cambio de variable para facilitación de cálculos en sección S.2.2.
- α_c : Cambio de variable para facilitación de cálculos en sección S.2.2, caso convectivo.
- α_i : Cambio de variable para facilitación de cálculos en sección S.2.2, caso impulsivo.
- β_c : Cambio de variable para facilitación de cálculos en sección S.2.2, caso convectivo.
- β_{EA} : Inclinación de la cara interior del muro, empuje activo.
- β_{grieta} : = relación entre la distancia entre el eje neutro y la cara traccionada y la distancia entre el eje neutro y el baricentro del acero de las armaduras, 1.20 en vigas.
- γ_0 : Peso específico agua.
- γ_c : Peso específico hormigón.
- γ_e : Peso específico relleno estructural.
- γ_f : Coeficiente de seguridad a la fisuración (=1.5).
- γ_L : Peso específico del líquido.
- γ_r : Peso específico relave.
- γ_s : Peso específico del suelo.
- γ_u : Peso específico a utilizar.
- δ_{EA} : Ángulo de fricción entre relleno y muro.
- Δh_i : Modificación sugerida para altura impulsiva.
- Δh_c : Modificación sugerida para altura convectiva.
- ΔW_i : Modificación sugerida para masa impulsiva.
- ΔW_c : Modificación sugerida para masa convectiva.
- η_c : Factor que da cuenta de la influencia del amortiguamiento en la amplificación espectral.
- θ : Rotación angular del fluido.
- θ_h : Máxima rotación angular del fluido, medido desde el centro del estanque.
- κ : Cambio de variable para facilitación de cálculos en sección S.2.2.
- μ_1 : Cambio de variable para facilitar cálculos.
- μ_2 : Cambio de variable para facilitar cálculos.
- ξ_c : Valor de amortiguación, caso convectivo.

- ξ_{eff} : Coeficiente de masa efectiva.
- ξ_i : Valor de amortiguación, caso impulsivo.
- ρ_0 : Densidad de masa del agua.
- ρ_c : Densidad de masa del hormigón.
- σ_{est} : Tensión admisible, caso estático.
- σ_{sis} : Tensión admisible, caso sísmico.
- ϕ_{EA} : Ángulo de fricción interna del relleno.
- ω_c : Frecuencia natural convectiva.
- ω_i : Frecuencia circular de vibración para modo impulsivo.
- $\%$: Cambio de variable para facilitación de cálculos en sección S.2.2.

Bibliografía

- [1] Javeed A. Munshi, "Design of Liquid-Containing Concrete Structures for Earthquake Forces".
- [2] Aldo Iván Ramírez (1996), "Presión hidrodinámica en tanques de almacenamiento producida por aceleración horizontal".
- [3] ICC IBC (2009), International Building Code.
- [4] ACI 318-08, "Building code Requirements for Structural Concrete and Commentary".
- [5] Housner, G.W. 1963. "The dynamic behaviour of water tanks, Bulletin of the seismic society of America".
- [6] Housner, G.W. 1956, "Limit Design of Structures to Resist Earthquakes".
- [7] ACI 350.3-06, "Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary".
- [8] CODELCO, Criterio diseño para estanques atmosféricos de hormigón armado y acero.
- [9] Norma Chilena 2369 of 2003, "Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales".
- [10] Werner, P.W. y Sundquist, K.J. 1943. "On hydrodynamic earthquake effects". Transactions of the American Geophysical Union, 30(5): 636-657
- [11] Westergaard, H.M. 1931. "Water pressures on dams during earthquakes". Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ASCE, 57:1031
- [12] Jacobsen, L.S. 1949. "Impulsive hydrodynamics of fluids inside a cylindrical tank and of fluid surrounding a cylindrical pier". Bulletin of the Seismic Society of America, 33(3):189-204
- [13] Hunt, B. y M.J.N Priestley. 1978. "Seismic water waves in a storage tank". Bulletin of the Seismic Society of America, 68(2):487:489
- [14] Hunt, B. y M.J.N Priestley. 1982. "Seismic response of elevated water reservoirs". Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 15(2):68-76.
- [15] Graham, E.W y A.M. Rodríguez. 1952. "Characteristics of fuel motion which affect airplane dynamics". Journal of Applied Mechanics, 19(3):381-388
- [16] Comisión Chilena del Cobre, "Consumo de agua en la minería del cobre al 2018".
- [17] Comisión Chilena del Cobre, "Consumo de agua en la minería del cobre al 2019".
- [18] ACI 224.R-01, "Control de la fisuración en estructuras de hormigón".
- [19] Norma Chilena 3171, "Diseño estructural - Disposiciones generales y combinaciones de cargas".
- [20] Circular concrete tanks without prestressing, Portland Cement Association, Skokie, IL 60077, 1993.
- [21] New Zealand Standard, NZS 1968, ASCE 1981, ANSI/AWWA 1995a.

8. Anexos

COMPORTAMIENTO ACI h_i/H_L PARA DIFERENTE H_L/D

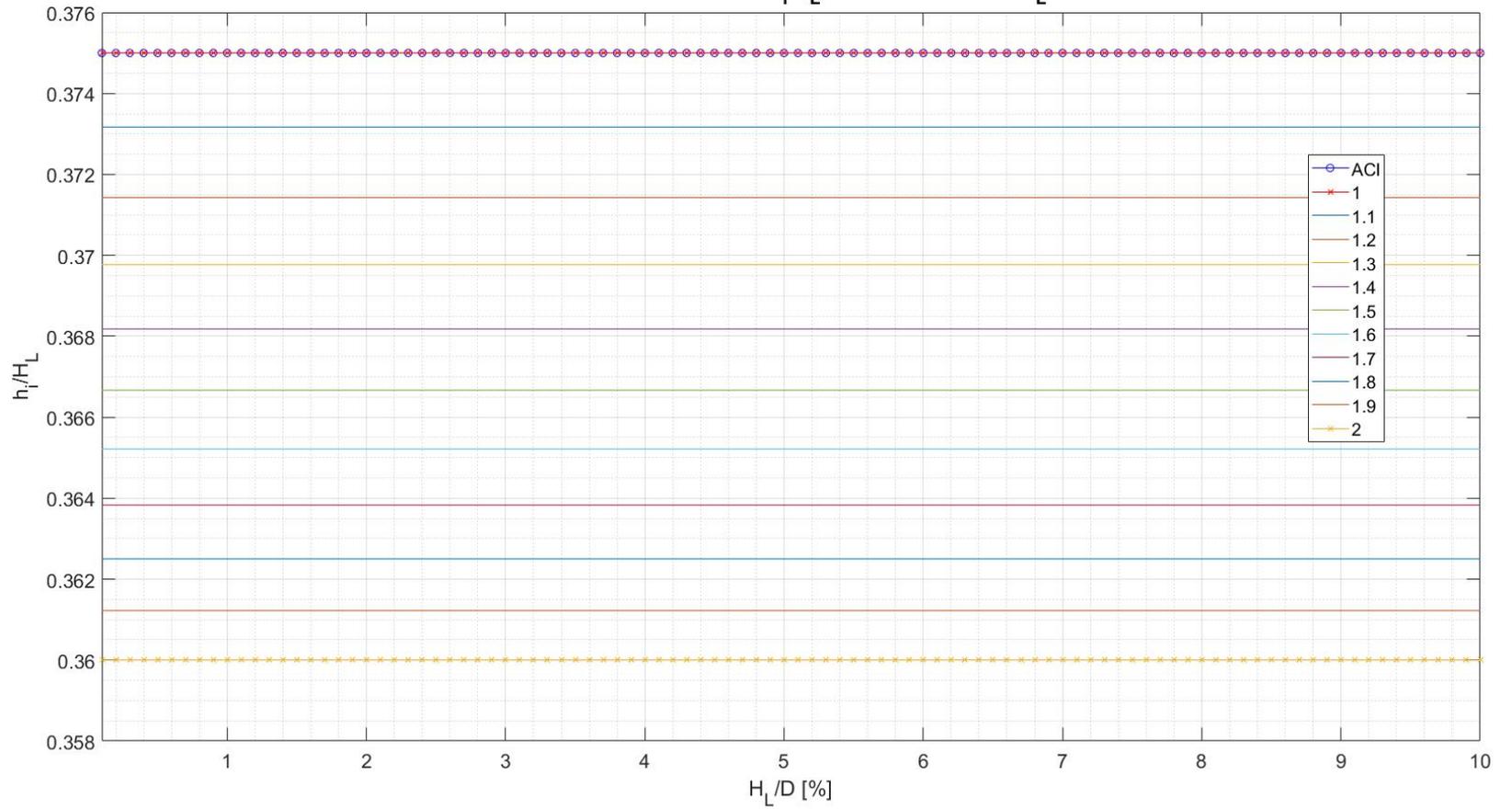


Figura 41: Gráfico comparativo para valores de h_i , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.

COMPARACION h_i ACI Y MEMORIA

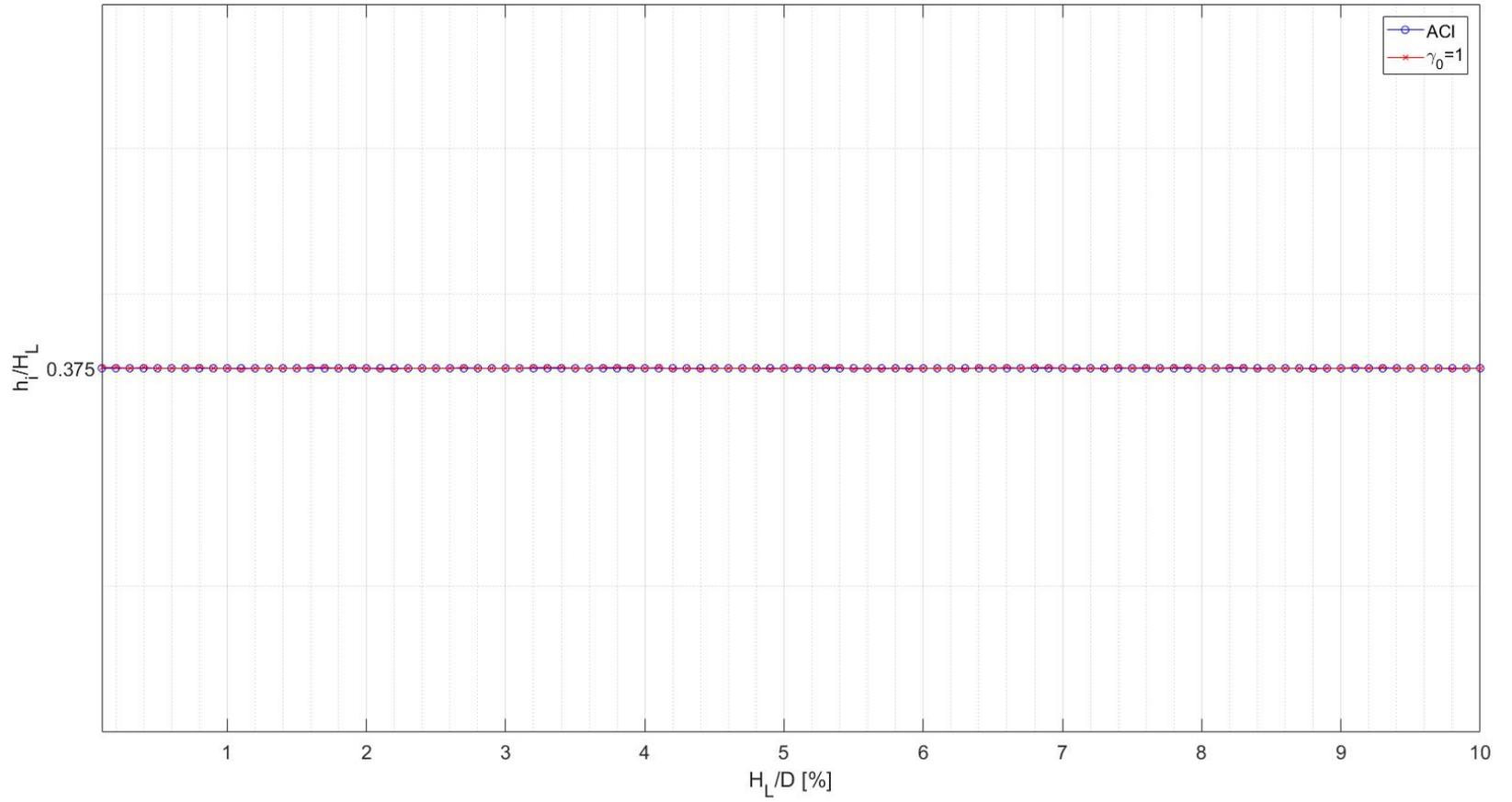


Figura 42: Gráfico comparativo entre valor de h_i de densidad homogénea memoria y ACI.

COMPORTAMIENTO ACI h_c/H_L PARA DIFERENTE H_L/D

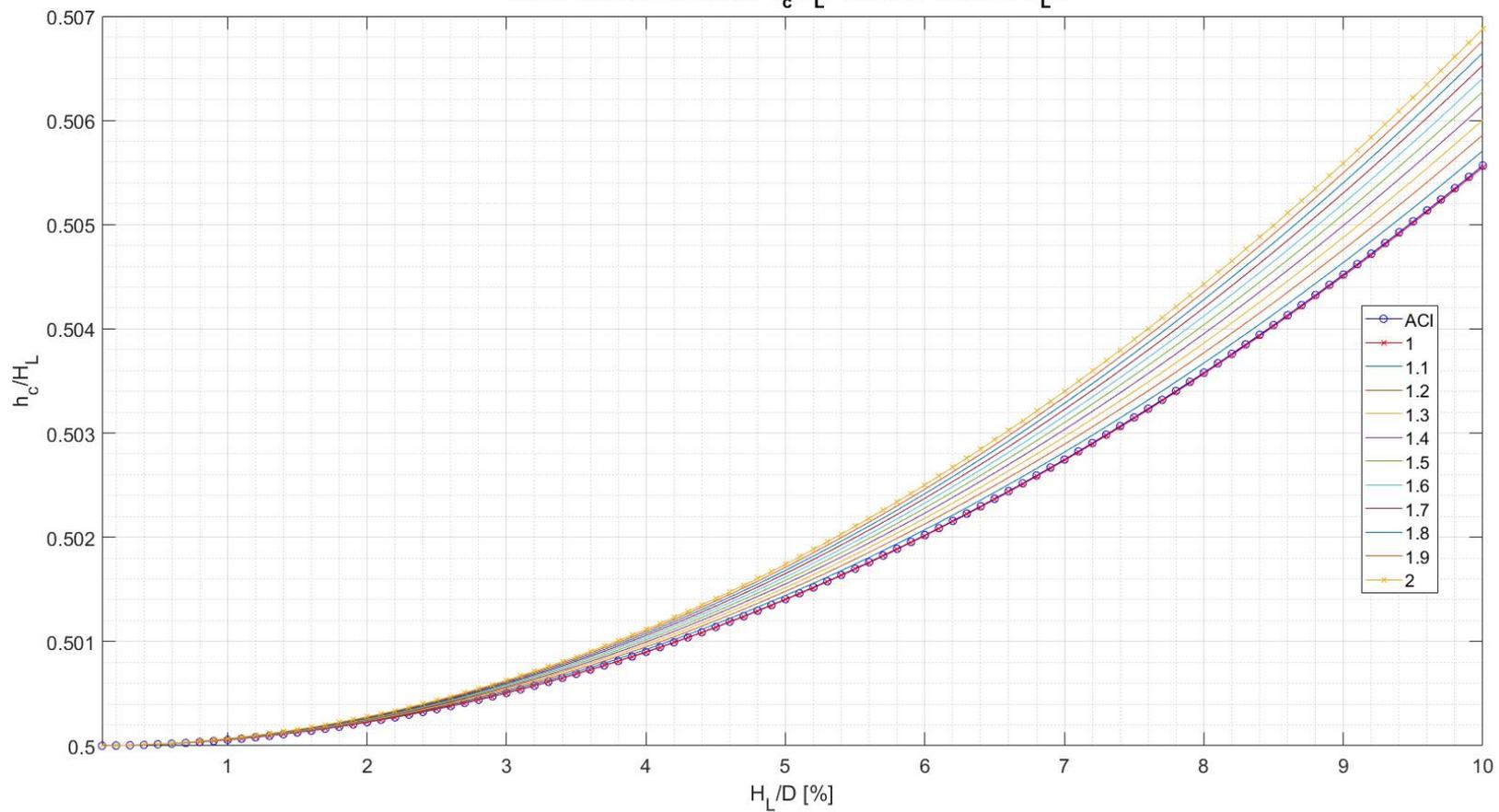


Figura 43: Gráfico comparativo para valores de h_c , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.

COMPARACION h_c ACI Y MEMORIA

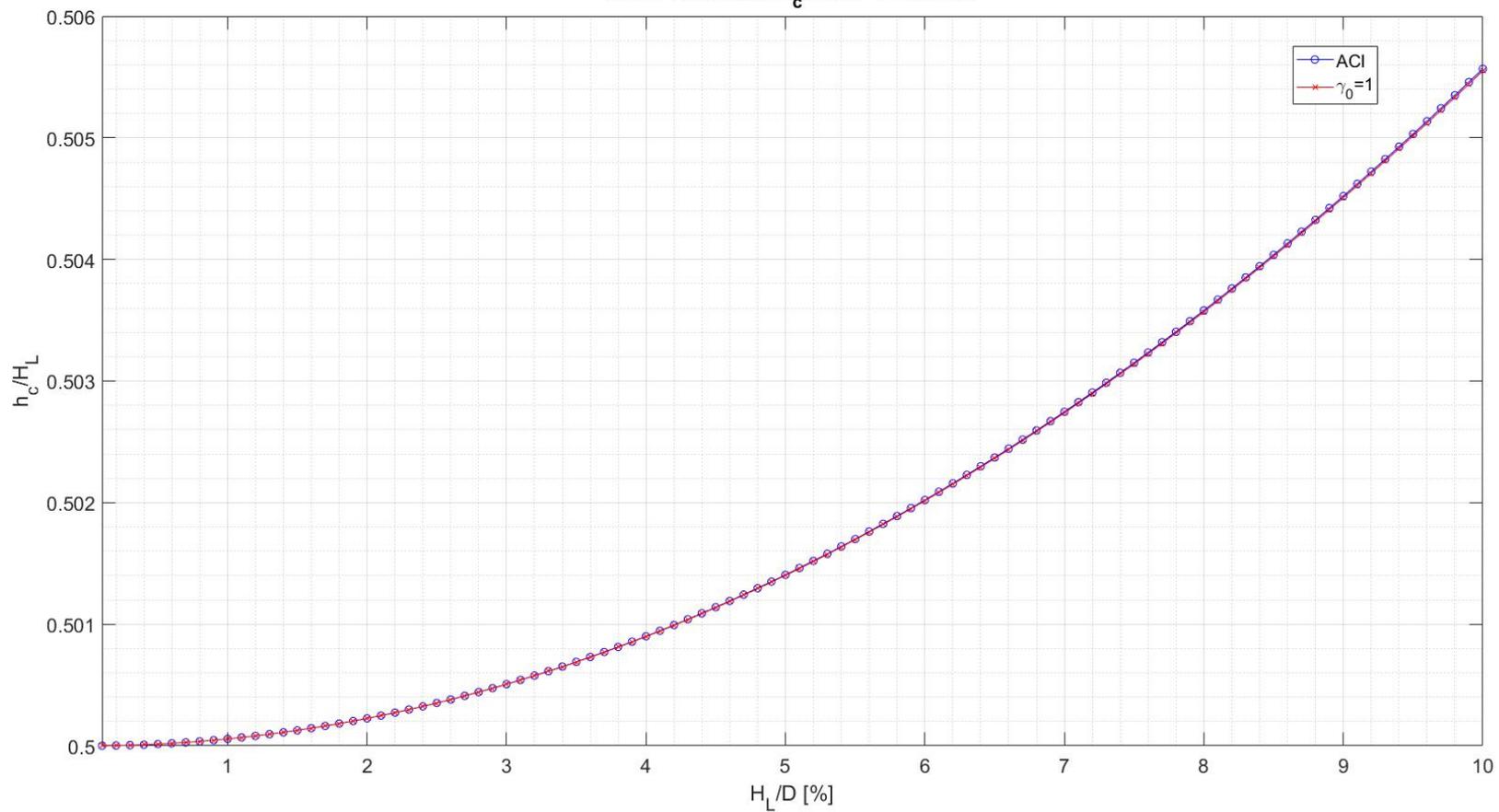


Figura 44: Gráfico comparativo entre valor de h_c de densidad homogénea memoria y ACI.

COMPORTAMIENTO ACI W_i/W_L PARA DIFERENTE H_L/D

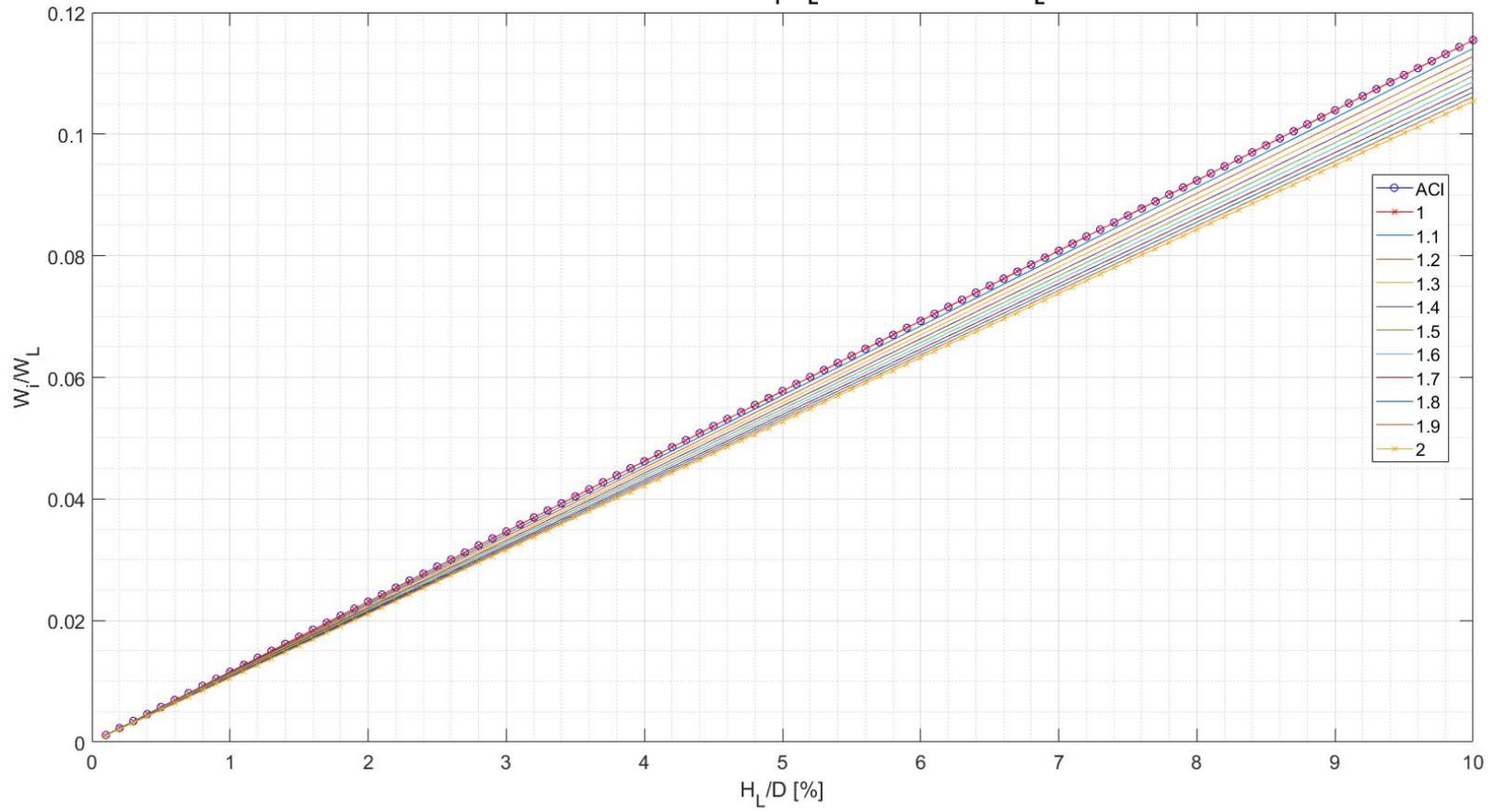


Figura 45: Gráfico comparativo para valores de W_i , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.

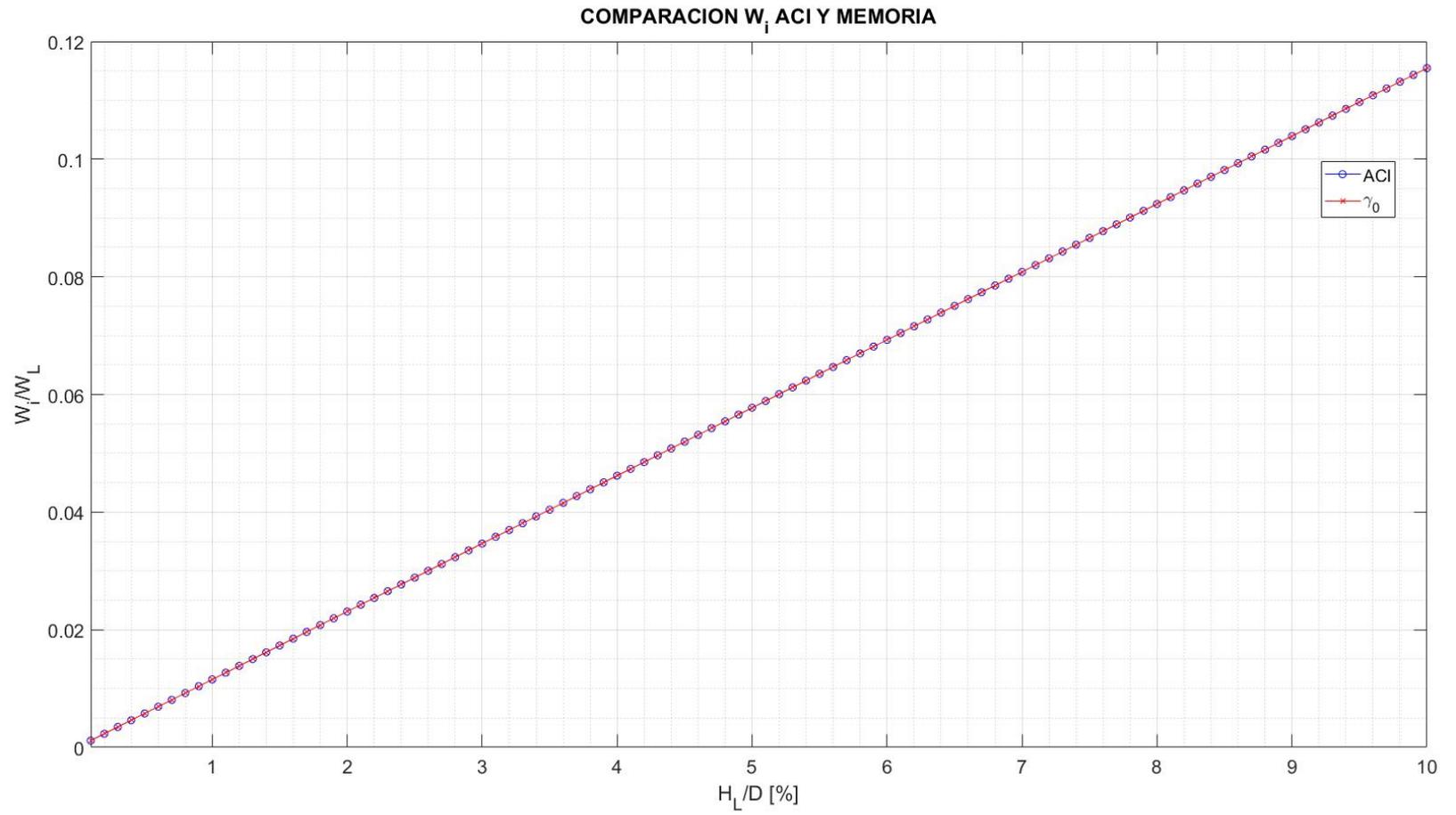


Figura 46: Gráfico comparativo entre valor de W_i de densidad homogénea memoria y ACI.

COMPORTAMIENTO ACI W_c/W_L PARA DIFERENTE H_L/D

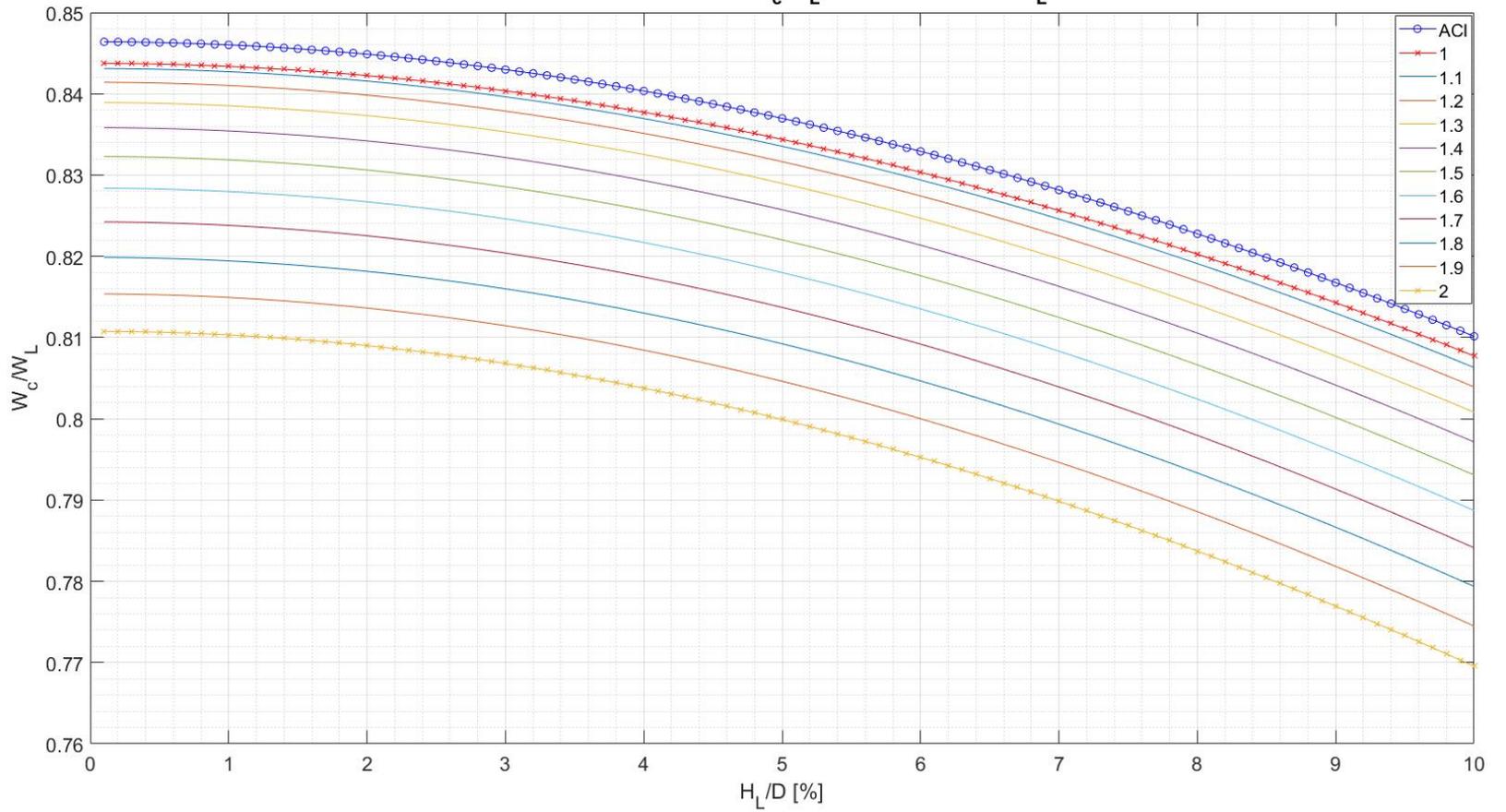


Figura 47: Gráfico comparativo para valores de W_c , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.

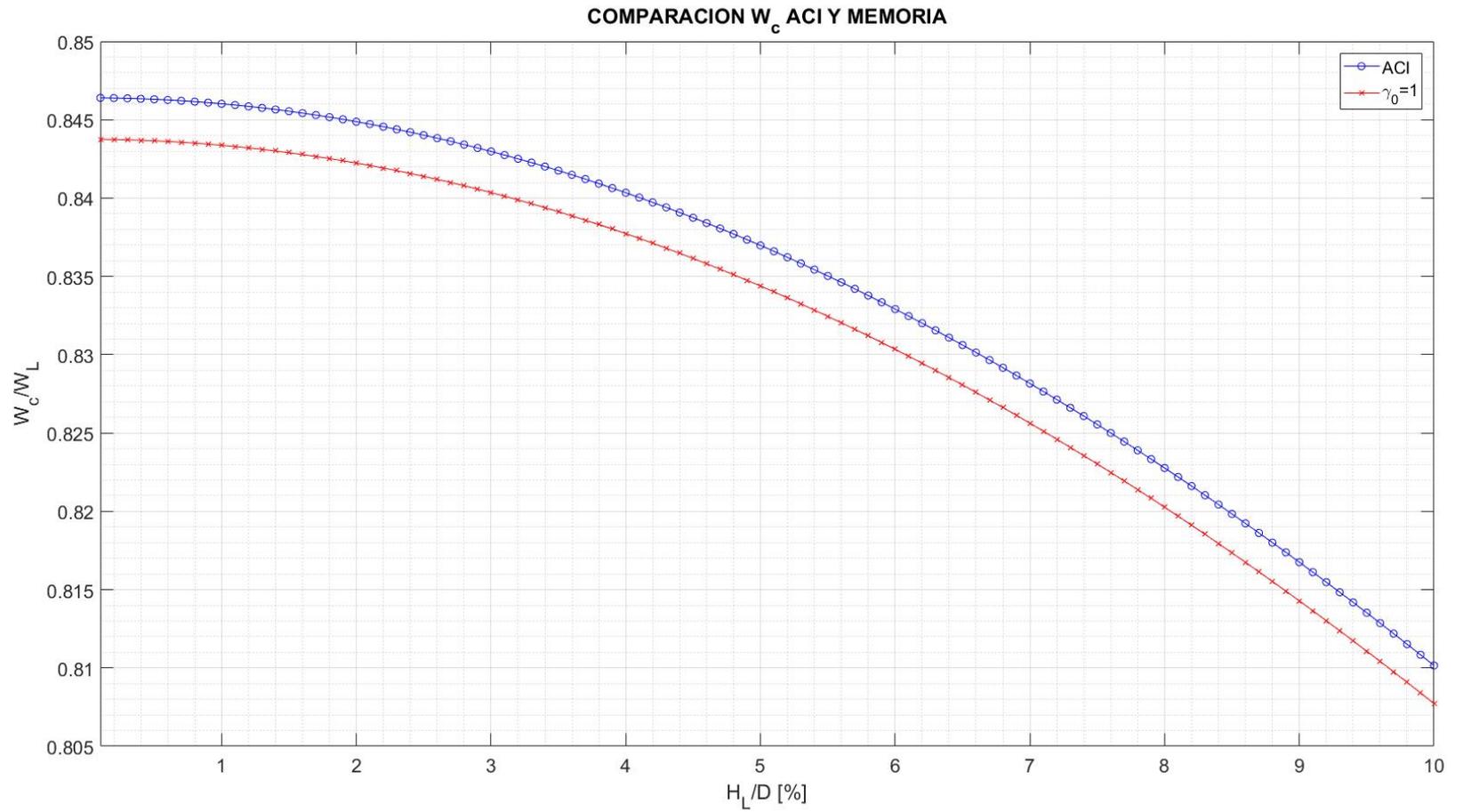


Figura 48: Gráfico comparativo entre valor de W_c de densidad homogénea memoria y ACI.

COMPORTAMIENTO ACI ω^2 PARA DIFERENTE H_L/D

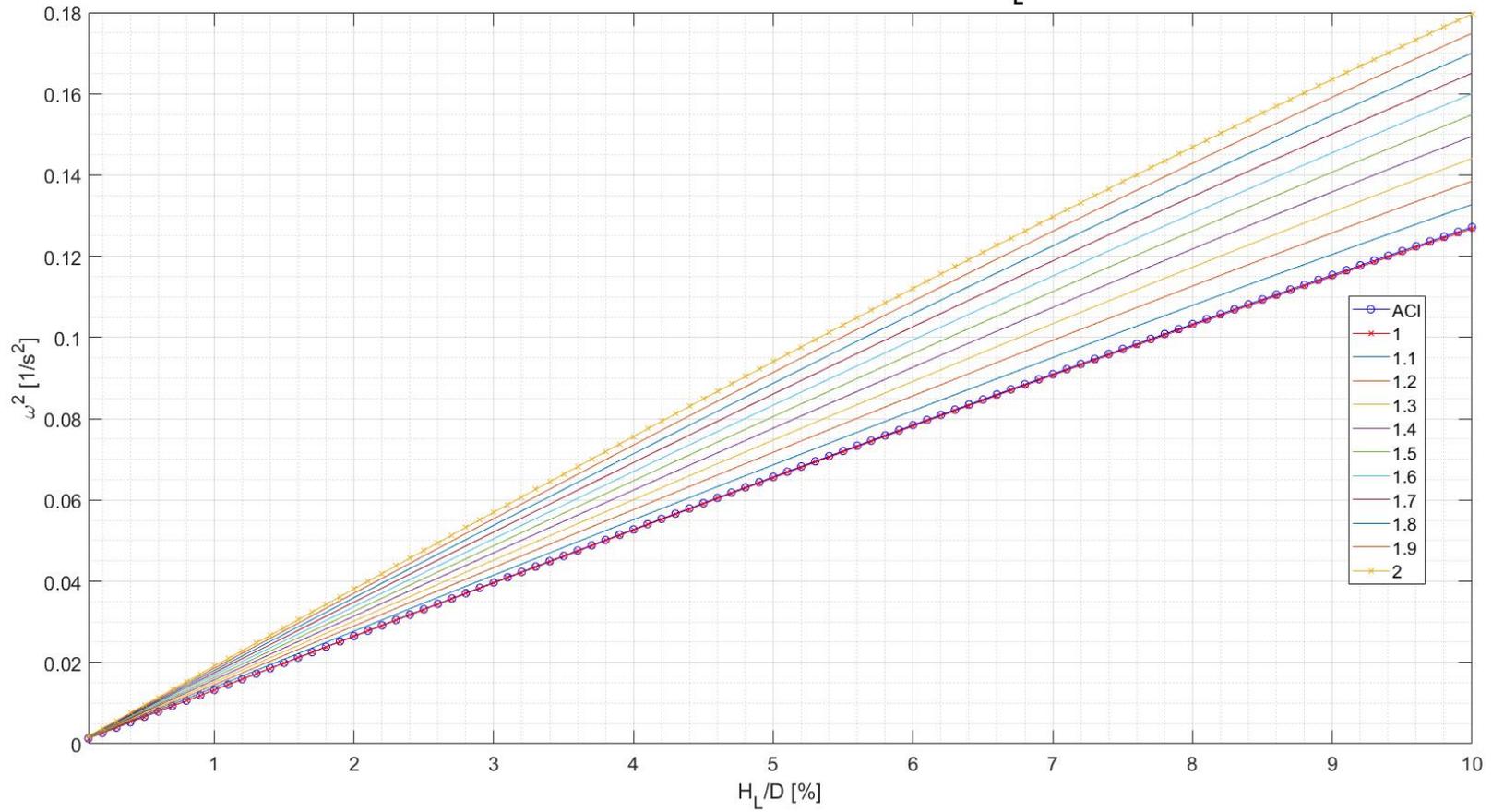


Figura 49: Gráfico comparativo para valores de ω^2 , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.

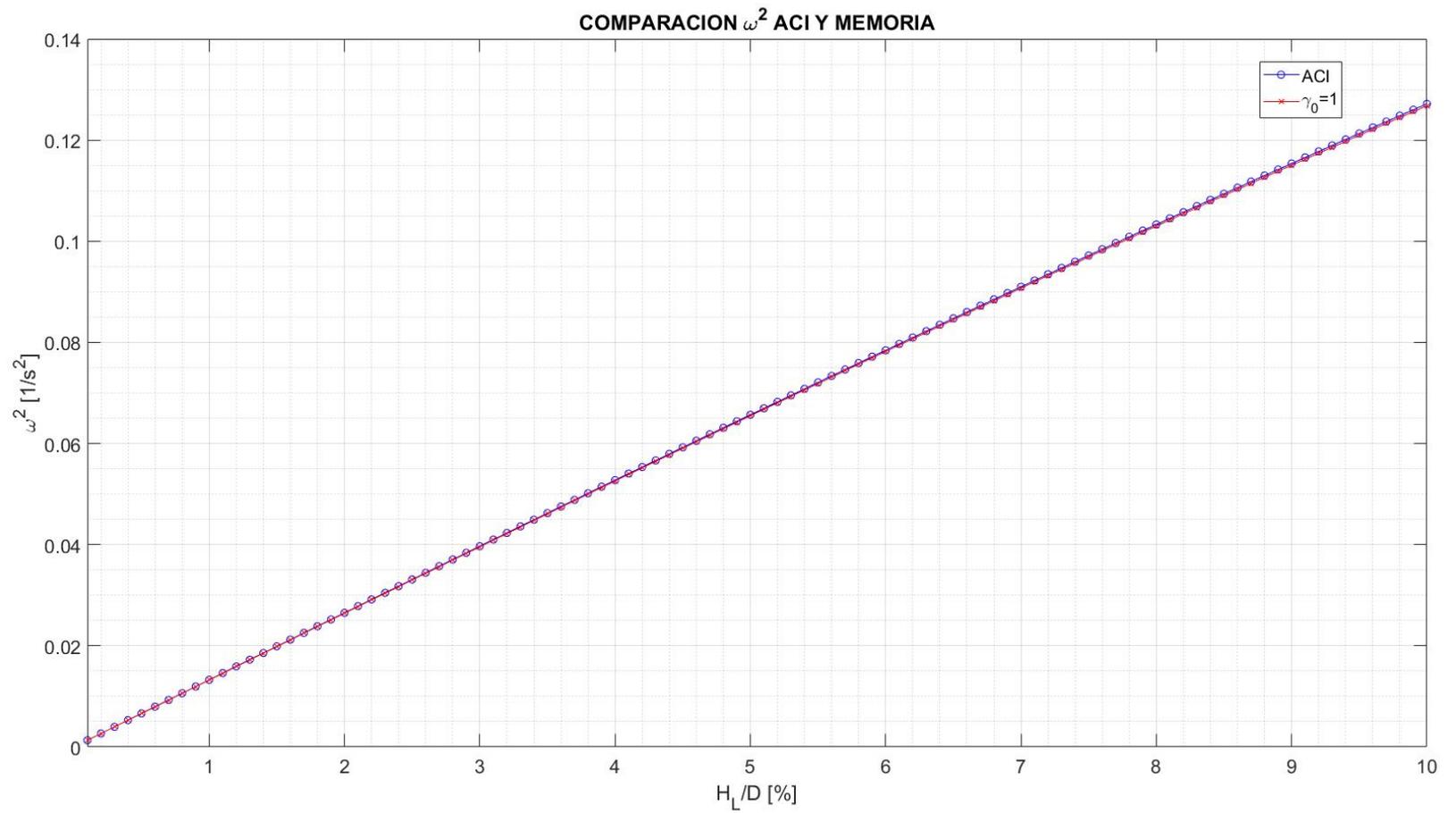


Figura 50: Gráfico comparativo entre valor de ω^2 de densidad homogénea memoria y ACI.

COMPORTAMIENTO ACI T_c PARA DIFERENTE H_L/D

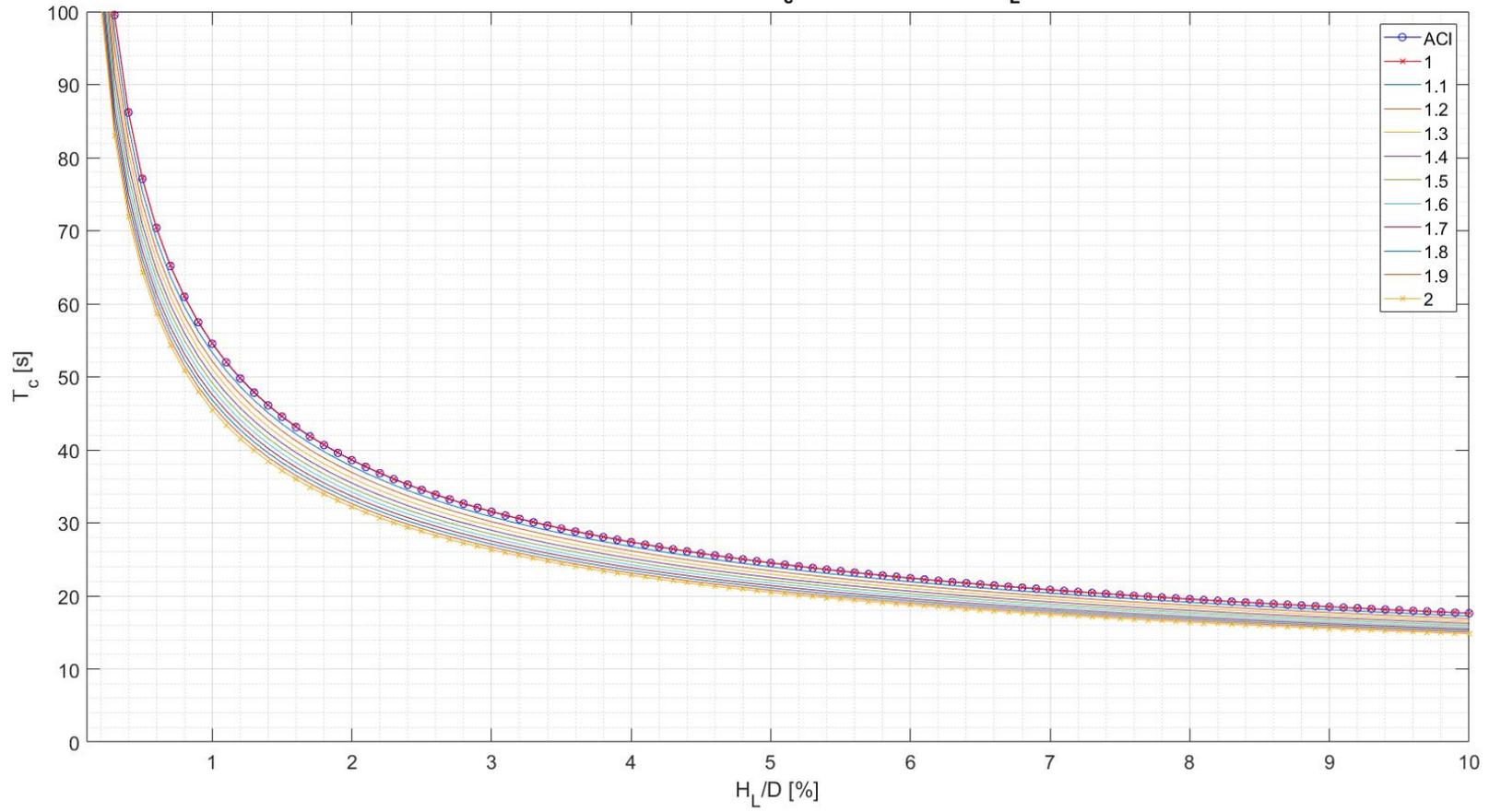


Figura 51: Gráfico comparativo para valores de T_c , para distintos γ_r , se incluye valor obtenido en ACI.

COMPARACION T_c ACI Y MEMORIA

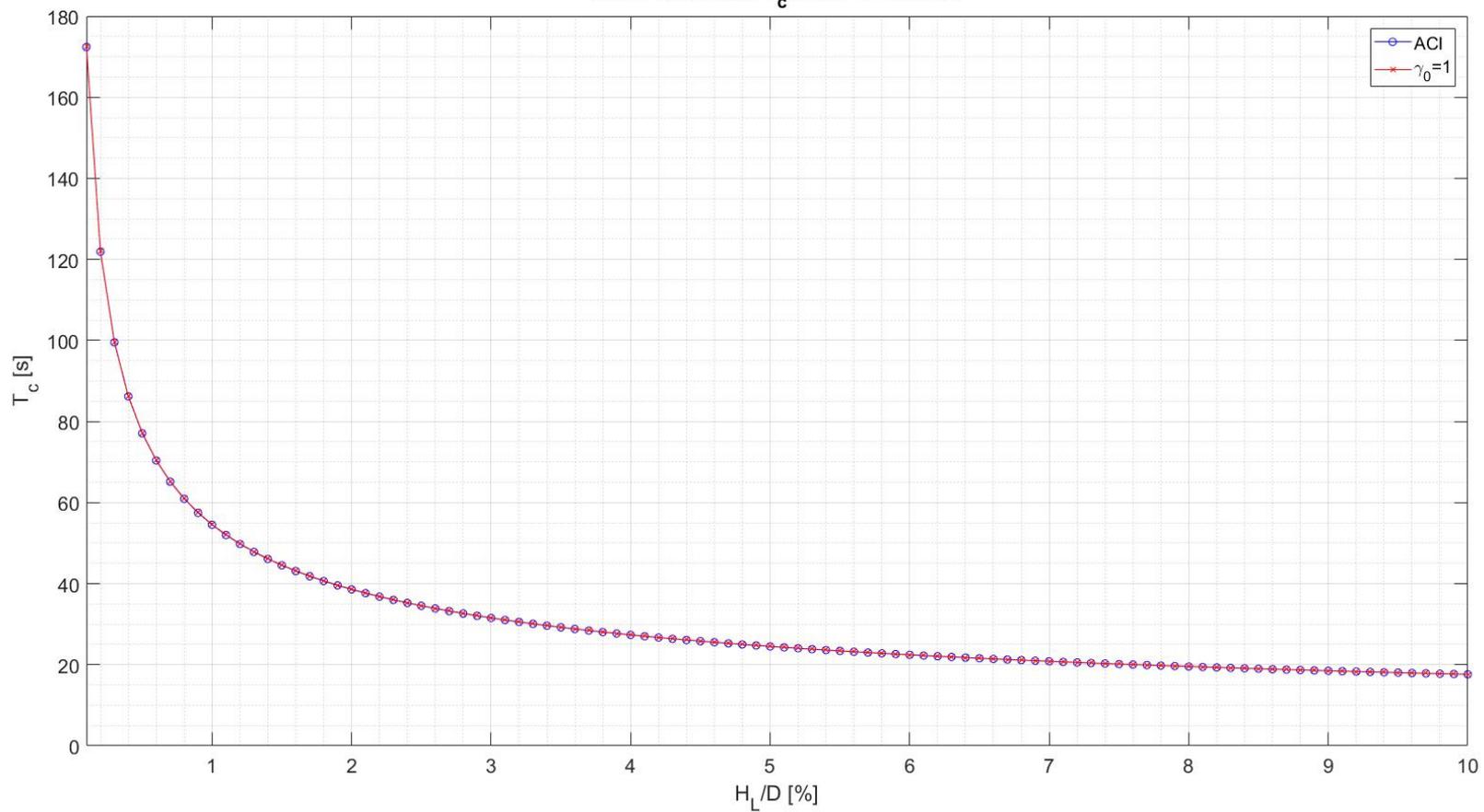


Figura 52: Gráfico comparativo entre valor de T_c de densidad homogénea memoria y ACI.