



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

DISEÑO DE UNA PLATEA DE CIMENTACIÓN CON MEJORAMIENTO DE
SUELO PARA TANQUE METÁLICO VERTICAL DE ALMACENAMIENTO DE
HIDROCARBURO LÍQUIDO - AEROPUERTO DE PUCALLPA

Línea de investigación:

**Desarrollo urbano-rural, catastro, prevención de riesgos, hidráulica y
geotecnia**

Modalidad de suficiencia profesional para optar el título profesional de
Ingeniero Civil

Autora:

Sulca Quispe, Maria Elena

Asesor:

Tello Malpartida, Omart Demetrio
(ORCID: 0000-0002-5043-6510)

Jurado:

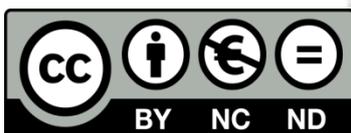
Ramos Flores, Miguel Angel
Jaramillo Tarazona, Francisco
Bedia Guillen, Ciro Sergio

Lima - Perú

2021

Referencia:

Sulca, M. (2021). *Diseño de una platea de cimentación con mejoramiento de suelo para tanque metálico vertical de almacenamiento de hidrocarburo líquido - Aeropuerto de Pucallpa* [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional UNFV. <http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/5465>



Reconocimiento - No comercial - Sin obra derivada (CC BY-NC-ND)

El autor sólo permite que se pueda descargar esta obra y compartirla con otras personas, siempre que se reconozca su autoría, pero no se puede generar obras derivadas ni se puede utilizar comercialmente.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

“DISEÑO DE UNA PLATEA DE CIMENTACIÓN CON MEJORAMIENTO DE SUELO PARA TANQUE METÁLICO VERTICAL DE ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBURO LÍQUIDO - AEROPUERTO DE PUCALLPA”

Línea de investigación:

Desarrollo urbano-rural, catastro, prevención de riesgos, hidráulica y geotecnia

Modalidad de suficiencia profesional para optar el título profesional de Ingeniero Civil

Autor

Sulca Quispe, Maria Elena

Asesor

Tello Malpartida, Omart Demetrio

(ORCID: 0000-0002-5043-6510)

Jurado

Ramos Flores, Miguel Angel

Jaramillo Tarazona, Francisco

Bedia Guillen, Ciro Sergio

Lima - Perú

2021

Dedicatoria

A la memoria de mi madre Elena, porque su ejemplo en vida fue mi guía para seguir adelante con mis estudios.

A mi hija Emilia, por ser mi motivo e inspiración para superarme cada día.

A mi esposo Luis por brindarme su apoyo para cumplir mi meta, a mi padre Vicente y a mi hermano Cristian por sus consejos.

A mis tíos Hilario, Dominga, Julia, Sonia e Irene por instruir mi camino profesional y darme un hogar cuando lo necesité.

Agradecimientos

A mi alma mater, Universidad Nacional Federico Villarreal por haberme aceptado ser parte de ella.

A los docentes de la Facultad de Ingeniería Civil por haber compartido sus conocimientos a lo largo de mi preparación profesional.

A la empresa Inspectra por la oportunidad de trabajo y la confianza que me tuvieron para participar en los proyectos de ingeniería.

A Dios por sus bendiciones, por cuidar y protegerme en todo este proceso.

INDICE

Resumen.....	9
Abstract.....	10
I. Introducción.....	11
1.1. Experiencia Laboral.....	12
1.2. Descripción de la Empresa.....	12
1.3. Organigrama de la Empresa.....	13
1.4. Áreas y funciones desempeñadas.....	14
II. Descripción de una actividad específica	16
2.1. Generalidades.....	16
2.2. Descripción del Problema	21
2.2.1. Objetivo General.....	21
2.3. Definición de teorías básicas (Marco Teórico).....	21
2.3.1. Conceptos técnicos.....	21
2.3.2. Casos de Referencias.....	24
2.3.3. Normatividad aplicada	28
2.3.4. Informe de Estudio de Suelos para la zona del proyecto	49
2.4. Resultados	50
2.4.1. Datos considerados para el diseño	50
2.4.2. Cargas actuantes del tanque	53
2.4.3. Esfuerzos actuantes en la cimentación	55
2.4.4. Material de suelo de reemplazo.....	57
2.4.5. Diseño de la cimentación	58
2.4.6. Diseño pernos de anclaje.....	80
III. Aportes destacables a la empresa.....	81
IV. Conclusiones.....	82
V. Recomendaciones.....	84
VI. Referencias	85
VII. Anexos.....	87
Anexo A: Análisis Sísmico de Tanque Metálico Vertical	88
Anexo B: Análisis por viento.....	93

Anexo C: Diseño de anillo de cimentación.....	94
Anexo D: Diseño de pilotes	100
Anexo E: Diseño de pernos de anclaje	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Organigrama de la empresa</i>	13
Figura 2 <i>Funciones del área de Ingeniería Civil</i>	15
Figura 3 <i>Ubicación de la Zona del Proyecto</i>	16
Figura 4 <i>Franja de Seguridad de la Pista de Aterrizaje</i>	17
Figura 5 <i>Ubicación del proyecto desde la pista de aterrizaje</i>	18
Figura 6 <i>Distribución de la Planta</i>	19
Figura 7 <i>Tanque vertical con Techo Fijo Cónico Auto Soportado</i>	20
Figura 8 <i>Caso de Referencia 1 - Ubicación de la planta existente</i>	24
Figura 9 <i>Caso de referencia 1 – anillo de cimentación</i>	25
Figura 10 <i>Caso de Referencia 2 – anillo de cimentación</i>	26
Figura 11 <i>Caso de Referencia 2 – Análisis Comparativo de Asentamientos</i>	27
Figura 12 <i>Cimentación con anillo de concreto</i>	31
Figura 13 <i>Platea de Cimentación Nivelada</i>	32
Figura 14 <i>Platea de Cimentación con Anillo Perimetral</i>	33
Figura 15 <i>Asentamiento Uniforme</i>	35
Figura 16 <i>Asentamiento Diferencial</i>	36
Figura 17 <i>Anclaje Típico con Silleta</i>	37
Figura 18 <i>Diagrama Sísmico para un Tanque</i>	38
Figura 19 <i>Cargas Estáticas Sobre la Cimentación</i>	41
Figura 20 <i>Momento de Volteo en Tanque</i>	42
Figura 21 <i>Cargas dinámicas - Esfuerzos vertical por Levante</i>	43
Figura 22 <i>Cargas Dinámicas - Esfuerzos Verticales Sobre la Cimentación</i>	44
Figura 23 <i>Dimensiones Mínimas Para Cimentación de Tanque</i>	46
Figura 24 <i>Combinaciones de cargas</i>	47
Figura 25 <i>Resistencia Requerida para Anclajes</i>	48
Figura 26 <i>Cuadro de Modulo de Balasto Interacción Suelo – Estructura</i>	51
Figura 27 <i>Diagrama de Fuerzas Horizontales en el Anillo de Cimentación</i>	56
Figura 28 <i>Esquema Elevación - de Material de Relleno</i>	57

Figura 29 <i>Esquema en Planta - de Material de Relleno</i>	58
Figura 30 <i>Modelamiento - Platea de Cimentación en SAP2000</i>	59
Figura 31 <i>Dimensiones Platea de Cimentación</i>	60
Figura 32 <i>Diagrama de Momento de Volteo</i>	61
Figura 33 <i>Modelamiento Cargas Actuantes – Condición Estática</i>	62
Figura 34 <i>Presión Actuante en el Suelo – Condición Estática</i>	63
Figura 35 <i>Asentamientos Actuantes – Condición Estática</i>	64
Figura 36 <i>Modelamiento Cargas Actuantes – Condición Sísmica</i>	65
Figura 37 <i>Presión Actuante en el Suelo – Condición Sísmica</i>	65
Figura 38 <i>Asentamientos Actuantes – Condición Sísmica</i>	66
Figura 39 <i>Platea de Cimentación - Momento Máximo Actuante</i>	68
Figura 40 <i>Platea de Cimentación - Cortante Máximo Actuante</i>	69
Figura 41 <i>Esquema - Platea de Cimentación</i>	70
Figura 42 <i>Dimensiones - Anillo de Cimentación</i>	72
Figura 43 <i>Esquema – Anillo de Cimentación</i>	73
Figura 44 <i>Caso de Pilote en Suelo Expansivo</i>	75
Figura 45 <i>Esquema - Platea con Pilotes</i>	76
Figura 46 <i>Diagrama – Capacidad de Carga por cada Pilote</i>	77
Figura 47 <i>Diagrama Cantidad de Pilotes - Planta</i>	78
Figura 48 <i>Distribución de Acero en Pilotes</i>	78
Figura 49 <i>Esquema - Perno de Anclaje</i>	80

ÍNDICIDE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Caso de referencia 3 – Análisis Comparativo Tipos de Cimentaciones</i>	27
Tabla 2 <i>Grupo Sísmico - Factor de Importancia</i>	39
Tabla 3 <i>Cuadro comparativo para clasificación del suelo</i>	39
Tabla 4 <i>Factor de Reducción Sísmica</i>	40
Tabla 5 <i>Datos geotécnicos</i>	50
Tabla 6 <i>Características del Concreto Armado</i>	52
Tabla 7 <i>Características del Tanque</i>	52
Tabla 8 <i>Datos de Entrada para Análisis Sísmico - API 650</i>	53
Tabla 9 <i>Esfuerzos Resultantes del Tanque por Carga Sísmica</i>	54
Tabla 10 <i>Cuadro de Resumen de Asentamientos – Platea de Cimentación</i>	70
Tabla 11 <i>Presupuesto – Platea de Cimentación</i>	71
Tabla 12 <i>Cuadro de Resumen de Asentamientos – Anillo de Cimentación</i>	74
Tabla 13 <i>Presupuesto - Anillo de cimentación</i>	74
Tabla 14 <i>Cuadro de Resumen de Asentamientos – Platea de Cimentación con Pilotes</i> ...	79
Tabla 15 <i>Presupuesto - Platea de Cimentación con Pilotes</i>	79
Tabla 16 <i>Tabla de resultados - Cimentaciones</i>	82

Resumen

Este Informe tuvo como objetivo explicar el diseño de una platea de cimentación con mejoramiento de suelo para minimizar los asentamientos diferenciales, mediante los cálculos de interacción suelo - estructura. Se planteó este tipo de cimentación para los tanques metálicos de almacenamiento de hidrocarburos, del proyecto “Ingeniería Básica Extendida para la futura Planta de Venta de Combustible Líquido para aeronaves”, en el Aeropuerto de Pucallpa; el suelo encontrado en la zona es del tipo arcilloso, de baja capacidad de soporte y que aumenta su volumen al humedecerse (suelo expansivo), siendo no apto para cimentar. Se desarrolló el diseño de la platea de cimentación en el software especializado SAP2000, y adicionalmente se comparó sus resultados con otros dos tipos de cimentaciones que son el anillo de cimentación y la platea de cimentación con pilotes, ambos fueron diseñados en una hoja de cálculo. Concluyendo que la platea de cimentación con mejoramiento de suelo es adecuada, porque presentó un buen comportamiento para minimizar los asentamientos diferenciales y un costo de construcción menor al de la platea con pilotes.

Palabras claves: Platea de cimentación, tanque de almacenamiento, suelo mejorado.

Abstract

This Report aimed to explain the design of a slab foundation with soil improvement to minimize differential settlements, through calculations of soil - structure interaction. Type of foundation was proposed for the storage tanks, of the project "Extended Basic Engineering for the future Liquid Fuel Sales Plant for aircraft", at Pucallpa Airport; the soil is of the clayey type, a poor support capacity and is prone to volume changes presence of moisture (expansive soil), and not suitable for a foundation. The design of the slab foundation in the software SAP2000 was developed, and its results were also compared with two other types of foundations that are the ring wall and the slab on piles, both were designed in a spreadsheet. It was concluded that the design of the slab foundation with soil improvement have good performance to reduce the differential settlements and cheaper to build than the slab on piles.

Keywords: Foundation plate, storage tank, improved soil.

I. Introducción

El presente informe comprende el Diseño de una Platea de Cimentación con Mejoramiento de Suelo para Tanque Metálico Vertical de Almacenamiento de Hidrocarburo Líquido, ubicado dentro de las instalaciones del Aeropuerto de Pucallpa. Este diseño es una alternativa de solución a las condiciones del tipo de suelo de la zona.

El informe ha sido dividido en cinco capítulos principales: Introducción, Descripción de una actividad específica, Aportes más destacables a la empresa, Conclusiones y Recomendaciones.

En la Introducción se da a conocer la experiencia laboral, descripción de la empresa donde laboró, organigrama de la empresa, así como el área y función que desempeñó durante su permanencia laboral.

En el capítulo Descripción de una actividad específica, se describe de manera detallada una actividad desarrollada durante la experiencia laboral. Se describe el problema con su objetivo, el marco teórico, casos de referencia y normativas. Finaliza este capítulo con la presentación de los resultados del análisis de la alternativa de solución.

Los Aportes más destacables a la empresa comprenden en destacar el aporte técnico que resultan ser adquiridos por conocimientos normativos y experiencia laboral en la disciplina de ingeniería civil.

Las Conclusiones y Recomendaciones están enfocados a los resultados obtenidos en el análisis de la alternativa de solución, así como comparaciones técnicas y económicas de otras posibles alternativas.

1.1. Experiencia Laboral

Experiencia laboral en el análisis y diseño estructural para diversos proyectos del Sector Saneamiento, Hidráulico e Industrial, a nivel de ingeniería conceptual, ingeniería básica e ingeniería de detalle.

Especialista de Ingeniería civil en la empresa privada INSPECTRA S.A bajo la supervisión del Líder del área. Participación en el desarrollo de los proyectos de ingeniería y colaboración entre distintas disciplinas. Desarrollo en el análisis y diseño de cimentaciones para tanques de almacenamiento, cubetos de contención, cimentación para bombas, entre otras estructuras necesarias para el funcionamiento de plantas de abastecimiento, refinería, terminales, grifos y reserva fría.

1.2. Descripción de la Empresa

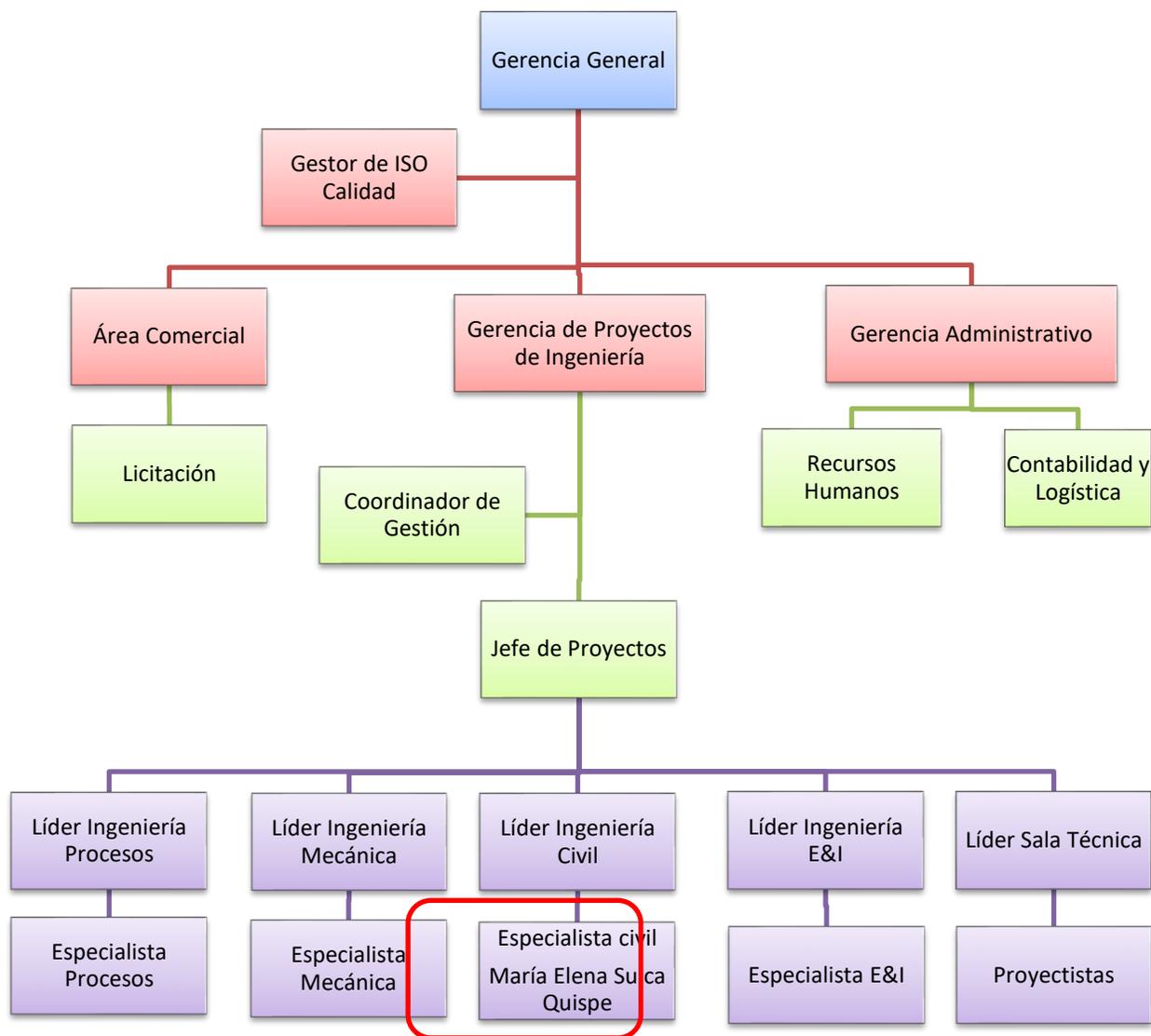
La empresa privada INSPECTRA S.A., tiene más de 20 años en el Perú ofreciendo *servicios de Ingeniería e Inspección* a la industria minera, de petróleo, químicas y de energía. Brinda servicios de ingeniería de diseño a nivel conceptual, básico y de detalle para instalaciones industriales en las cuales se incluye diseño de tanques, estructuras, sistemas de tuberías instrumentación y electricidad (www.inspetraperu.com).

1.3. Organigrama de la Empresa

Figura

1

Organigrama de la empresa



Fuente: Elaboración Propia

1.4. Áreas y funciones desempeñadas

He formado parte del área de ingeniería civil como especialista civil, realizando los análisis y diseños de diversos elementos estructurales de concreto armado y albañilería bajo supervisión del líder de área.

En el tiempo laborado he desarrollado diversos proyectos para el sector energía, minería e industrial, entre los que destacan:

- Plantas de Abastecimiento de combustibles para comercialización
- Estación de servicios de combustible para distribución a camiones mineros
- Plantas de almacenamiento para Consumidor Directo de Combustible para Reserva Fría de Centrales Hidroeléctricas.
- Ampliación de instalaciones en plantas de producción de GLP y Refinerías.
- Planta de almacenamiento para consumidor directo de combustibles para aviación

Las principales funciones como especialista fueron:

- Análisis y diseño de cimentación de tanques metálicos verticales para el almacenamiento de combustibles.
- Análisis y diseño de cimentación de tanques metálicos verticales para agua del sistema contra incendio.
- Análisis y diseño de muro de contención para contención de derrames en el área de los tanques de almacenamiento de combustibles.
- Análisis y diseños de tanque enterrado de concreto armado para la contención de drenaje industrial
- Análisis y diseño de cimentaciones del sistema de bombas para despacho y recepción de combustible.

- Análisis y diseño de estructuras secundarias: cerco perimétrico, casetas de guardianía y edificaciones administrativas.

Figura 2

Funciones del área de Ingeniería Civil



Fuente: Elaboración Propia

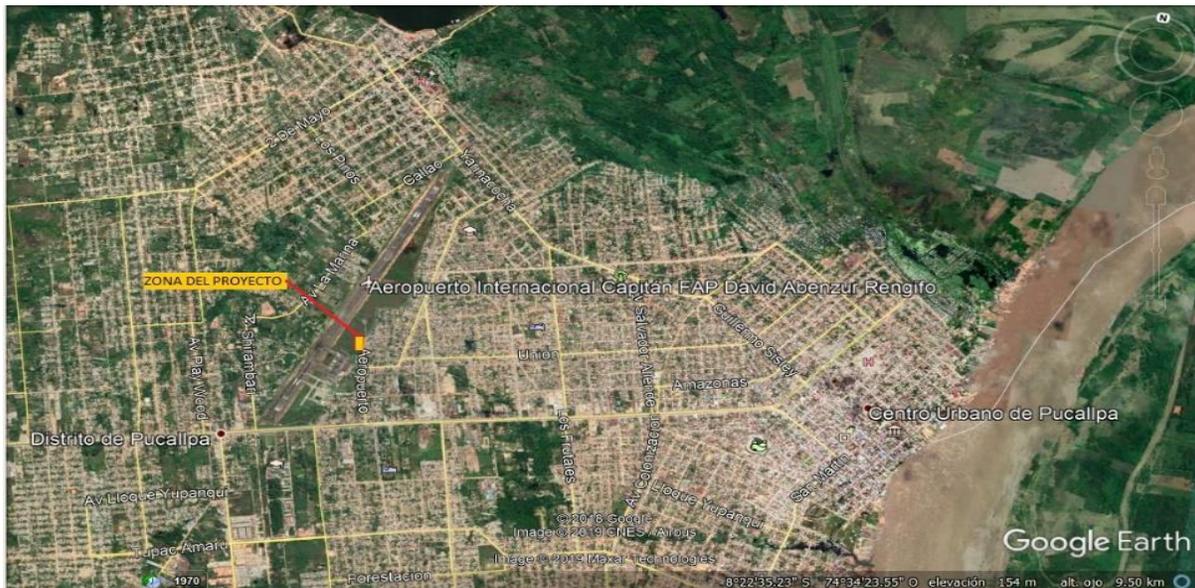
II. Descripción de una actividad específica

2.1. Generalidades

Debido a las restricciones de abastecimiento de combustible para aeronaves en la ciudad de Pucallpa, Aeropuertos del Perú (AdP) requiere contar con su propio servicio de abastecimiento de combustible, para mejorar los procesos de operaciones de las líneas aéreas. Para tales fines se desarrolló el Proyecto: “Ingeniería Básica Extendida para la futura Planta de Venta de Combustible Líquido para aeronaves”, del Aeropuerto Internacional “Capitán FAP David Abensur Rengifo” de la ciudad de Pucallpa, región de Ucayali. La zona del proyecto está ubicada a más de 200 metros de distancia con respecto al eje de la pista de aterrizaje y a más de 5.2 Km de la ciudad.

Figura 3

Ubicación de la Zona del Proyecto



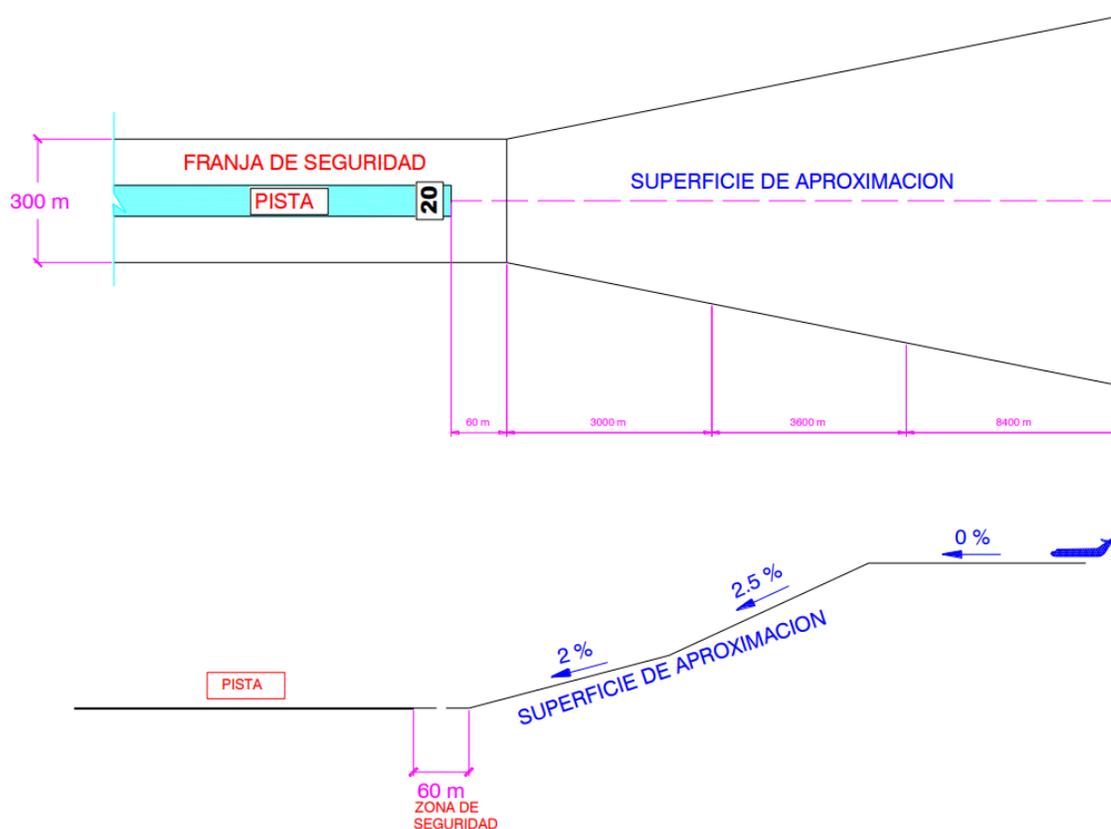
Fuente: Google Earth

De acuerdo con el Expediente de Determinación de las Superficies Limitadoras de Obstáculos del Aeropuerto “Cap. FAP David Armando Abensur Rengifo” de la ciudad de

Pucallpa, elaborado por la Dirección de Infraestructura Aeroportuaria de la Dirección General de Aeronáutica civil, visto en Resolución Directoral N°230-2006-MTC/12, la franja de seguridad libre de obstáculos para proteger a los aviones será de 300m ancho total (Ver Figura 4), obteniendo un ancho de 140 m desde el borde de la pista.

Figura 4

Franja de Seguridad de la Pista de Aterrizaje



Fuente: Resolución Directoral N°230-2006-MTC/12

La ubicación proyectada de la planta de abastecimiento de combustible se encuentra a una distancia de 200m desde el borde de la pista, cumpliendo con la distancia mínima (140m) indicada en la Resolución Directoral N°230-2006-MTC/12.

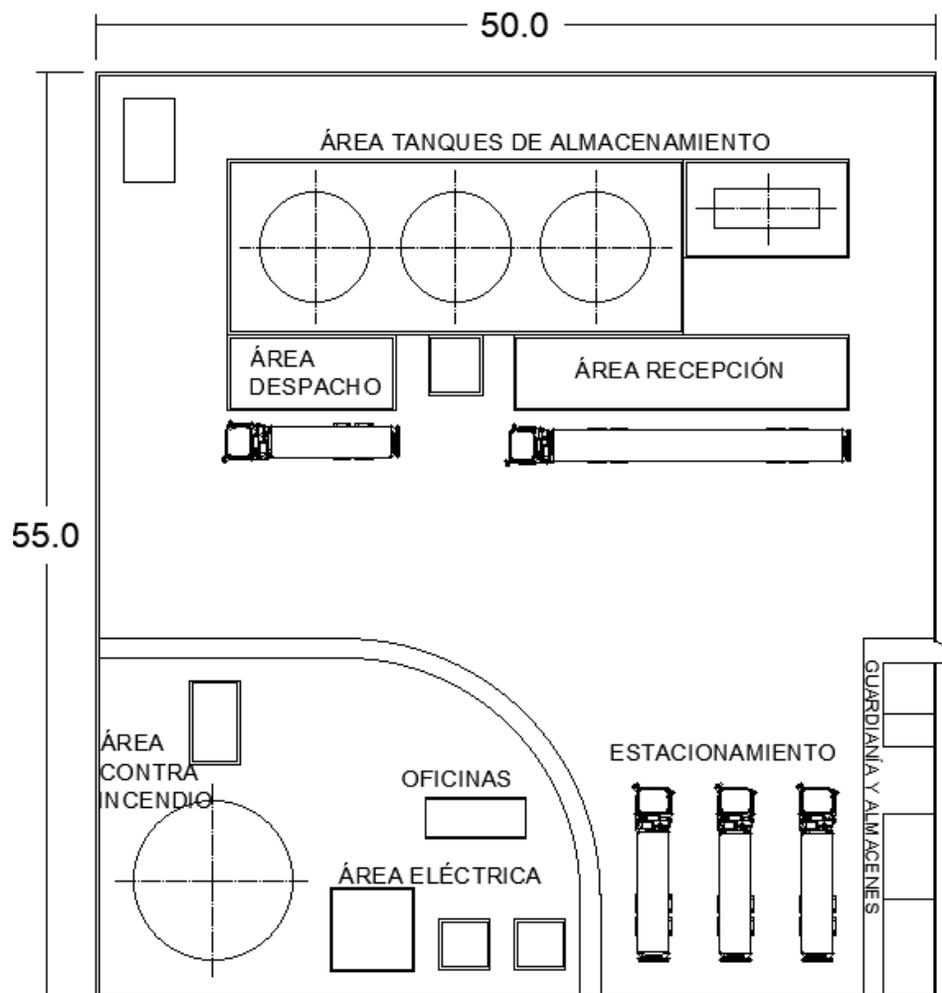
Figura 5

Ubicación del proyecto desde la pista de aterrizaje



Fuente: Google Earth

El área destinada para la infraestructura es de 2,750.0 m² (Ver Figura 6). La nueva planta contará con tres (03) Tanques metálicos verticales de almacenamiento de combustible líquido, un (01) tanque horizontal metálico de almacenamiento de combustible líquido, sistemas de bombas para recepción y despacho de combustible, un (01) tanque metálico vertical de almacenamiento de agua contra incendio, sistemas de tuberías para combustible y sistemas de tuberías para agua contra incendio, edificios administrativos, almacenes y cerco perimétrico.

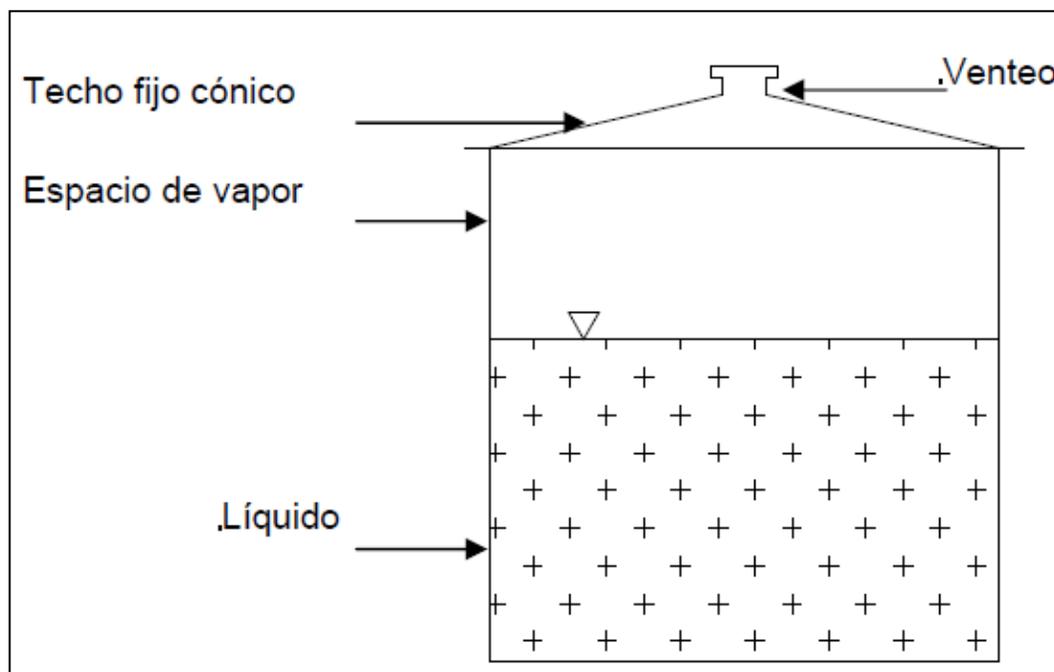
Figura 6*Distribución de la Planta*

Fuente: Elaborada por Inspectra.

La estructura principal de la Planta son los tanques metálicos vertical de techo fijo-cónico auto soportado (Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) que almacenarán combustible Jet A1 (Turbo A1). Estos tipos de tanques son recipientes de estructura metálica cilíndricas apoyadas sobre una cimentación de concreto armado. Se dice que un techo es auto soportado cuando se apoya en todo el perímetro de las paredes del tanque.

Figura 7

Tanque vertical con Techo Fijo Cónico Auto Soportado



Fuente: Elaborado por De San José, E. L. P., & Chiquitos-Santa Cruz, D. E.

Las características de cada tanque vertical del proyecto son las siguientes:

- Capacidad nominal : 129.42 m³
- Dimensiones generales:
 - Diámetro interior : 6.50 m
 - Altura : 3.90 m
- Fluido contenido
 - Tipo de combustible : Turbo A1

2.2. Descripción del Problema

El suelo, donde se apoyará la cimentación de los tanques, es del tipo arcilloso de alta plasticidad (CH). Es un suelo blando de baja capacidad de soporte (1.35Kg/cm²) y aumenta su volumen al humedecerse (suelo expansivo). Uno de los mayores problemas es construir sobre suelos arcillosos expansivos. Este tipo de suelo son considerados no aptos para cimentar; colocar estructuras sobre esta zona conduce a un asentamiento diferencial excesivo, provocando grietas en la cimentación e inestabilidad en la estructura.

¿De qué manera una platea de cimentación con mejoramiento de suelo podrá minimizar los asentamientos diferenciales?

2.1.1. Objetivo General.

Explicar el diseño de una platea de cimentación con mejoramiento de suelo para minimizar los asentamientos diferenciales, mediante cálculos de interacción suelo-estructura.

2.3. Definición de teorías básicas (Marco Teórico)

2.3.1. Conceptos técnicos.

Para fines del presente Informe se emplea las siguientes definiciones técnicas:

Asentamientos. – deformación descendente vertical del terreno producido por cargas que generan esfuerzos sobre el suelo.

Asentamiento diferencial. – diferencia de nivel entre dos cimentaciones adyacentes unidos por un elemento estructural, que pertenecen a la misma estructura.

Asentamiento diferencial Tolerable. – máximo asentamiento diferencial, que al ocurrir no produce daños visibles ni causa problemas a la estructura.

Asentamiento uniforme. – mismo nivel de asentamientos entre dos cimentaciones adyacentes unidos por un elemento estructural, que pertenecen a la misma estructura.

Cimentación. – parte inferior de una estructura y su función es transferir al suelo las cargas de la estructura.

Cimentación anular continua o anillo de cimentación. – cimentación superficial en la que el Perímetro es mayor o igual a diez veces su ancho.

Cimentación por Platea o Losa de Cimentación. – cimentación constituida por una losa rígida sobre la cual se apoya la estructura.

Cimentación Profunda. - Aquella que transmite cargas a capas más profundas del suelo mediante pilotes, pilares u otros elementos.

Cimentación Superficial. - Aquella en la cual la relación Profundidad/Ancho (D_f / B) es menor o igual a 5.

Combustible líquido. – considera a los hidrocarburos líquidos que tienen punto de inflamación superior a los 37.8 °C.

Estudio de Mecánica de Suelos (EMS). - Conjunto de exploraciones e investigaciones de campo, ensayos de laboratorio y análisis de gabinete que tienen por objeto estudiar el comportamiento de los suelos sobre la cual se apoyará una estructura.

Interacción suelo estructura. – se refiere al comportamiento del suelo ante la presencia de una estructura.

Materiales seleccionados. - todo tipo de suelo compactable, con partículas no mayores de 7,5 cm (3”), con 30% o menos de material retenido en la malla $\frac{3}{4}$ ”, con un contenido de material que pasa la malla 200 menor al 50%, con IP no mayor a 6 y sin elementos distintos de los suelos naturales.

Planta. – conformado por un sistema de tanques, bombas, tuberías y todo equipo asociado al almacenamiento y manejo de hidrocarburos líquidos.

Planta de Venta de almacenamiento. – lugar donde los líquidos son recibidos en tanques desde camiones cisterna y luego almacenados con el propósito de ser distribuidos.

Presión Admisible. - Máxima presión que la cimentación puede transmitir al terreno sin que ocurran asentamientos excesivos (mayores que el admisible).

Refinería. – planta o instalación donde combustibles líquidos son producidos en escala comercial a partir del petróleo, gasolinas naturales u otras fuentes de hidrocarburos.

Relleno Controlado o de Ingeniería. - Son aquellos que se construyen con Material Seleccionado, compactado y controlado.

Suelo arcilloso. – es aquel suelo en el que predomina la arcilla sobre otras partículas de otros tamaños.

Suelo Expansivo. - Suelos que al ser humedecidos sufren una expansión que pone en peligro a las estructuras cimentadas sobre ellos.

Tanque metálico vertical. - conocidos como Tanque API 650 por su normativa de diseño y fabricación, se emplea para almacenar diferentes tipos de líquidos tóxicos, combustibles e inflamables, son de gran capacidad de almacenaje y están presentes en la mayoría de las industrias.

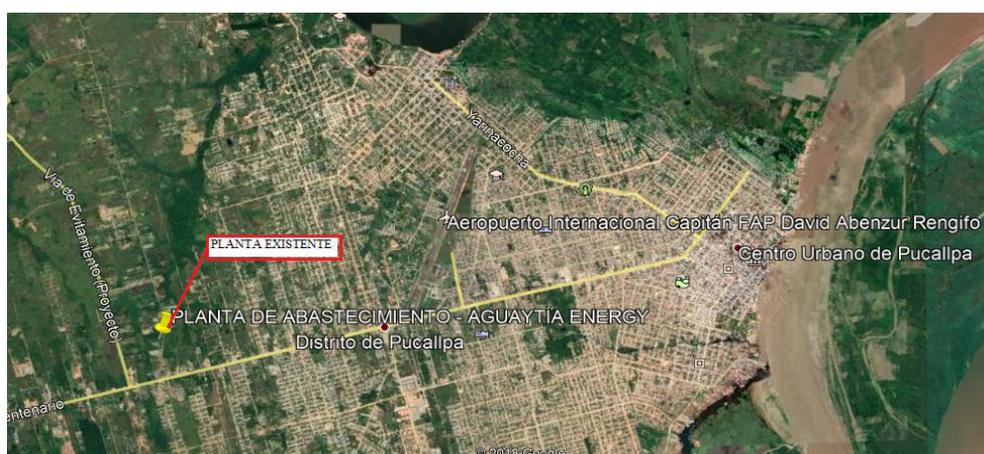
Turbo AI o Jet AI. - es un tipo de combustible usado para aeronaves a turbinas y turbo hélice, como aviones comerciales (pasajeros-carga) y helicópteros. En el Perú, este combustible es producido por las plantas de Refinería Pampilla, Talara, Pucallpa e Iquitos.

2.3.2. Casos de Referencias

Caso de Referencia 1: En la misma Ciudad de Pucallpa, se conoce que existen tanques metálicos con cimentaciones tipo anillo de concreto armado apoyados sobre un suelo de relleno controlado.

Figura 8

Caso de Referencia 1 - Ubicación de la planta existente



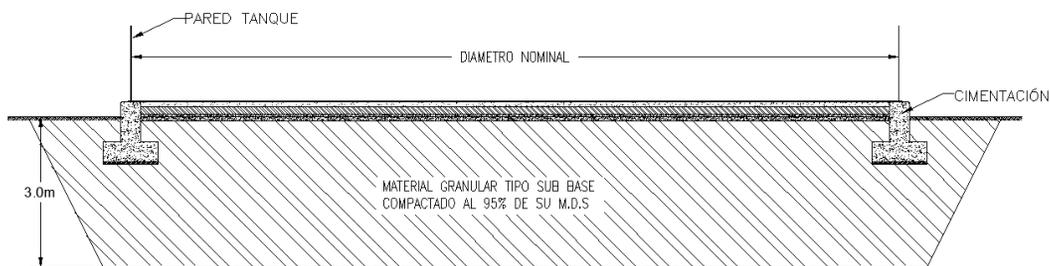
Fuente: Obtenida de Google Earth.

Se toma como referencia la Planta de Abastecimiento – Aguaytía, donde se ha proyectado tanques metálicos para la planta de venta de gasolina. El estudio de suelos realizado en esa zona indicaba la existencia de suelo arcillo de baja capacidad de soporte; por lo que brindó las siguientes recomendaciones para la cimentación de los tanques:

Se cimentará por medio de un anillo de concreto armado, apoyado sobre un estrato de relleno controlado en un espesor de 3.00 m.

Figura 9

Caso de referencia 1 – anillo de cimentación



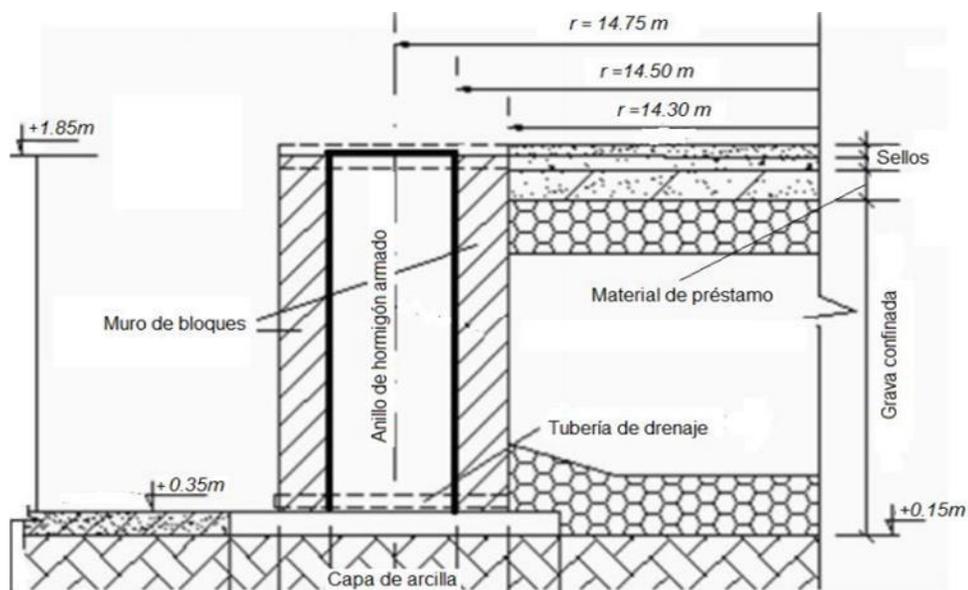
Fuente: Esquema de cimentación elaborado por *Inspectra*

Caso de Referencia 2: “Comparación de asentamientos por métodos geodésicos y la modelación numérica. Caso de Estudio”, elaborado por Acosta González Luis E. En esta investigación se realizó un análisis comparativo entre los valores de asentamientos determinados por métodos geodésico (nivelación de alta precisión) y los obtenidos por análisis de elementos finitos del software Geostudio 2012, durante la prueba hidráulica de un tanque vertical de almacenamiento de combustible, ubicado en el área industrial de la región niquelífera de la Provincia Holguín - Cuba. (Acosta González Luis E, 2018).

La cimentación del tanque consiste en un anillo de concreto armado de 0.90m de ancho y a 1.40m de desplante. La cimentación se apoya sobre un estrato homogéneo de arcilla de 6.10 m de profundidad.

Figura 10

Caso de Referencia 2 – anillo de cimentación



Fuente: Elaborado por Acosta González Luis E.

- Para el cálculo de asentamientos se empleó la herramienta del módulo SIGMA/W del software Geoestudio 2012.
- Para la determinación de las alturas de los puntos de referencia y de control fue usada la nivelación geométrica de alta precisión, debido a que la cimentación se apoya sobre suelos arcillosos de baja compresibilidad. Las observaciones se iniciaron durante la prueba hidráulica desde el llenado gradual de agua hasta la capacidad nominal del tanque.

El análisis comparativo (Método numérico vs. Método geodésico) se realizó tomando los resultados de asentamientos promedios determinados por el método geodésico con los desplazamientos obtenidos del modelamiento determinístico SIGMA/W.

Figura 11

Caso de Referencia 2 – Análisis Comparativo de Asentamientos

Método/ Ciclo	Asentamiento máximo absoluto (mm)							$\Delta_{\text{máx}}$ (mm)
	1	2	3	4	5	6	7	
Geodésico	0	10	31	55	87	95	91	0
Numérico	10	22	35	48	67	67	68	27.6

Fuente: Elaborado por Acosta González Luis E.

El Informe concluyó una buena correlación entre los valores de asentamientos obtenidos por el método geodésico y los calculados por el método numéricos, encontrando la mayor diferencia de -27.6mm considerado como admisible.

Caso de Referencia 3: Libro “Above Ground Storage Tanks API 650”. El autor del libro realiza recopilaciones sobre las aplicaciones, ventajas y desventajas según el tipo de cimentación que pueda optar el diseñador:

Tabla 1

Caso de referencia 3 – Análisis Comparativo Tipos de Cimentaciones

Tipo de cimentación	Descripción
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Proporciona una base plana para la construcción de tanques • Proporciona una base para el anclaje • Reduce al mínimo el asentamiento diferencial y de bordes • Distribuye bien las cargas concentradas • Proporciona una resistencia al levantamiento mediante el ajuste del ancho de anillo.
Anillo de concreto armado	Desventajas
	<ul style="list-style-type: none"> • Relativamente costoso

	Otros	<ul style="list-style-type: none"> • Ineficaz o costoso donde los suelos son pobres • Requiere acero de refuerzo para ser efectivo • Requiere diseño del esfuerzo del acero causado por las presiones activas del suelo • Tiene las mismas ventajas que un anillo de concreto armado • Proporciona una base plana para la construcción del tanque. • Puede proporcionar una base de anclaje • Minimiza el asentamiento del borde y la cubierta diferencial. • Previene la erosión del suelo de soporte debajo del tanque
Losa de concreto armado	Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Puede ser usada sobre pilotes
	Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo • Su alto costo limita su uso solo a tanques pequeños • Losas sujetas a agrietamiento en suelos cambiantes o sedimentables

Fuente: Libro “Above Ground Storage Tanks API 650”

2.3.3. Normatividad aplicada

Para realizar los diseños de cimentación para los tanques metálicos que almacenan hidrocarburos, se han utilizado las siguientes normativas:

2.3.3.1. Decreto Supremo N° 052-93-EM

El Ministerio de Energía y Minas aprobó el “Reglamento de Seguridad para almacenamiento de Hidrocarburos” mediante Decreto Supremo N° 052-93-EM y sus sucesivas modificatorias. El reglamento es de aplicación para almacenadoras de hidrocarburos, líquidos inflamables y combustibles líquidos, o líquidos residuales, excepto si son sólidos a 37.8°C o más.

El *Artículo 34 del DS 052-93* señala que; “Para el proyecto de las fundaciones (cimentaciones), un completo conocimiento de las condiciones del suelo debe ser obtenido, requiriéndose por lo menos las siguientes determinaciones: Capacidad portante del suelo, riesgo

de flotación o licuefacción, asentamientos totales y diferenciales esperados”. Las cimentaciones deben ser diseñadas para minimizar la posibilidad de asentamientos diferenciales.

Asimismo, OSINERGMIN, es la entidad encargada de supervisar, fiscalizar y brindar permisos de funcionamiento a aquellas personas o empresas que quieran realizar una actividad del sector hidrocarburos, para comercializar o para consumo directo, debiendo acreditar el cumplimiento de normas técnicas de seguridad y medio ambiente, siendo ésta de aplicación obligatoria. De acreditarlo, OSINERGMIN emite el Informe Técnico Favorable (ITF) o Registro correspondiente para instalar, modificar u operar instalaciones de almacenamiento.

2.3.3.2. *American Petroleum International - API 650*

Al carecer de normatividad peruana, OSINERGMIN solicita documentación que acredite que el Tanque y su cimentación han sido diseñados y construido bajo la normativa internacional API Standard 650 o sus equivalentes, siendo el API 650 una fuente muy confiable para el diseño de los tanques cilíndricos vertical que almacenan hidrocarburos líquidos. El API ha realizado muchos aportes para mejorar la seguridad y la confiabilidad ambiental. Frecuentemente se comete errores en los diseños de ingeniería, esto a menudo genera altos costos, vida útil más corta de la estructura, daños ambientales o accidentes y lesiones graves a las personas.

A. Tipos de cimentaciones

Las cimentaciones son diseñadas y construidos de acuerdo con las recomendaciones del estándar API 650 - Anexo B. A continuación, se describen dos (02) tipos de cimentaciones de concreto armado para tanques, según el estándar API 650.

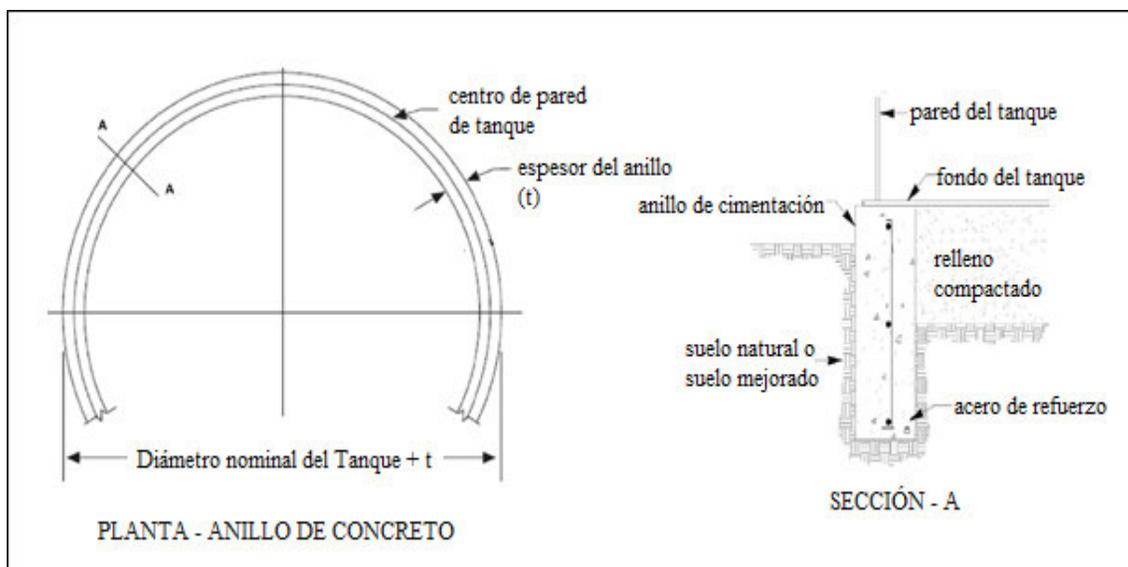
A.1. Cimentación de Anillo de Concreto Armado

Este cimiento consiste en un anillo de concreto (ver **Figura 12** *Cimentación con anillo de concreto*) con acero estructural, ubicado en el perímetro del tanque, confinando el material de relleno dentro del mismo. Este cimiento es utilizado, especialmente, cuando los tanques tienen techos auto soportantes, estos tienden a acumular grandes cargas en la pared lo que hace necesario una cimentación para soportar la pared.

Un cimiento anular de concreto proporciona una buena distribución de las cargas que transmiten las paredes del tanque, como también una superficie sólida y nivelada. También permite la colocación de pernos de anclaje para sostener la estructura ante fuerzas de levante.

Cuando se diseña el anillo de concreto, debe ser diseñada de manera que la capacidad de suelo permitido no sea excedida. La desventaja de los muros de anillo de concreto es que suelen ser frágiles ante los asentamientos diferenciales.

La norma API 650 recomienda que la cimentación deberá ser diseñada estructuralmente usando la norma internacional ACI 318 (American Concrete International)

Figura 12*Cimentación con anillo de concreto*

Obtenida de Standard API 650 – Sección B.4

A.2. Platea de cimentación

Este tipo de cimentación consiste en una losa de concreto armado, se utiliza cuando la capacidad de soporte del suelo requiere un área de soporte mayor que la del fondo del tanque; es decir, cuando el suelo tiene baja capacidad de soporte, es propenso a asentamientos diferenciales, o sí se tuviera que utilizar pilotes para soportar el tanque, ya sea por capacidad de carga o por el riesgo de licuefacción del suelo.

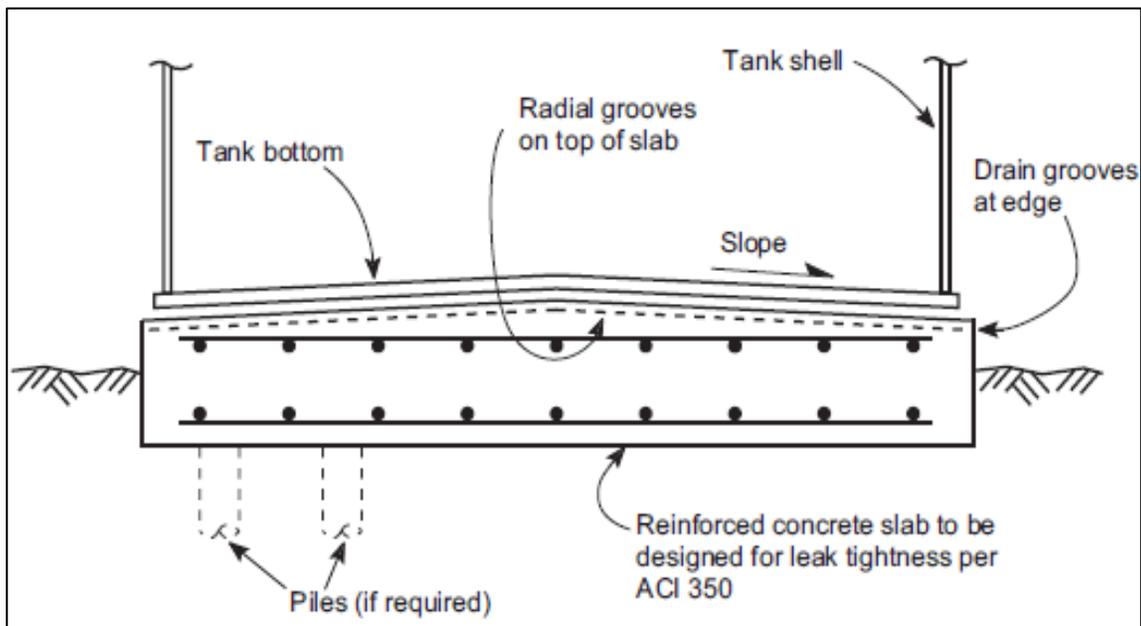
El estándar API 650 en la sección B.4.4 recomienda que cuando se utilice este sistema (losa o losa con pilotes) el diseño estructural del mismo debe de diseñarse conforme a la norma internacional ACI 318.

La platea de cimentación puede resultar como una losa nivelada donde se apoyará directamente la estructura del tanque (Ver **Figura 13**) o una losa conformada por un anillo

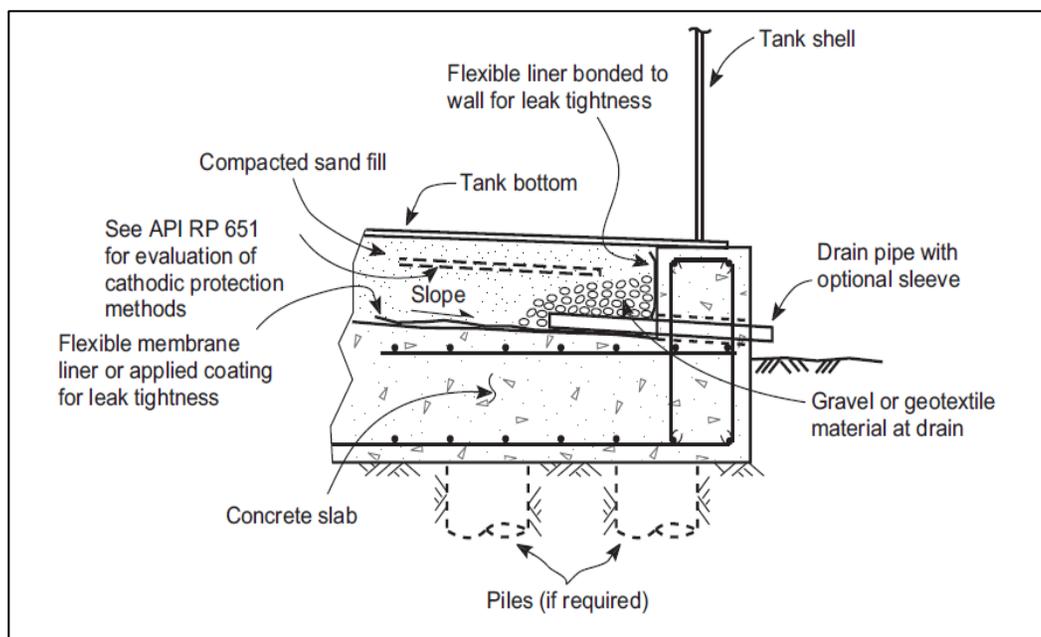
perimetral (Ver **Figura 14**), esto nos permitirá colocar gravas para detectar fugas y/o colocar los pernos de anclaje.

Figura 13

Plata de Cimentación Nivelada



Fuente: Standard API 650 – Anexo I

Figura 14*Plata de Cimentación con Anillo Perimetral*

Fuente: Standard API 650 – Anexo I

B. Consideraciones para el diseño de cimentaciones

B.1. Estudio de Mecánica de Suelos

Se resalta la importancia de contar con un adecuado Estudio de Suelos en cualquier área donde se ubicarán los tanques. El informe de suelos deberá contener como mínimo las condiciones del suelo, la capacidad de soporte y los asentamientos esperados. Estos se determinan a partir de perforaciones del suelo, pruebas de carga, muestreo y ensayos de laboratorio.

Cuando las condiciones de subrasante son inadecuadas para soportar el tanque sin asentamiento excesivo, se deben considerar uno o más de los siguientes métodos generales para mejorar las condiciones del suelo:

- Retirar el material inadecuado y reemplazar con material adecuado compactado. El material de relleno deberá ser recomendado por un ingeniero geotécnico calificado.

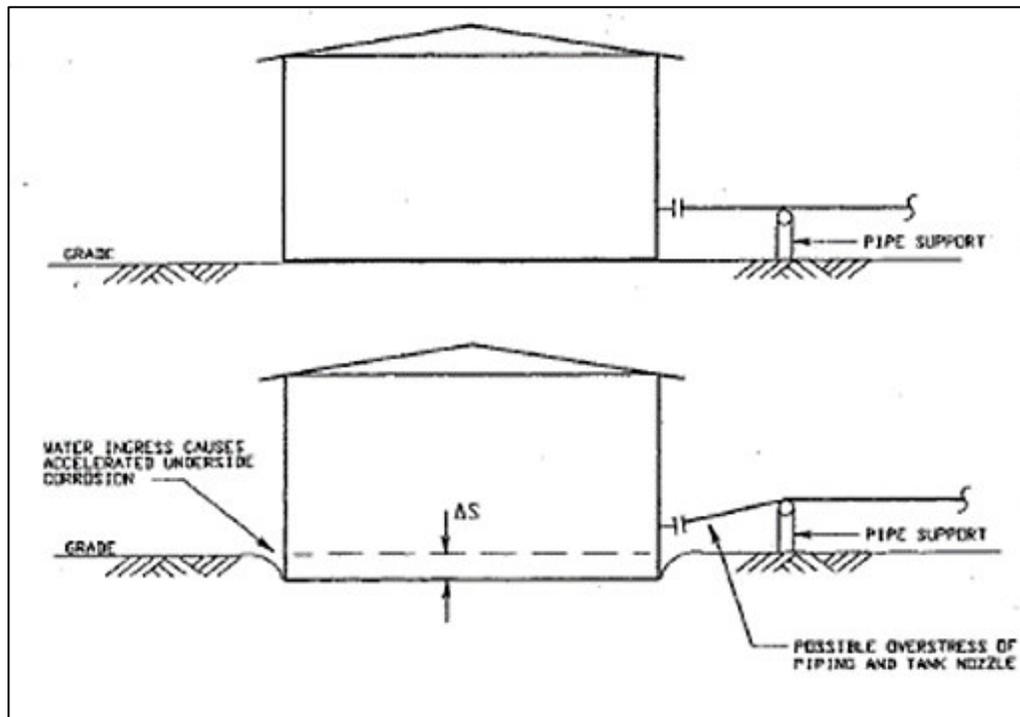
- Construir una losa que distribuirá la carga sobre un área suficientemente grande del material blando para que la intensidad de la carga esté dentro de los límites permitidos y no se produzca un asentamiento excesivo
- Transferencia de la carga a un material más estable mediante pilotes o pilares de cimentación. Esto implica una losa de hormigón armado para distribuir la carga del tanque inferior
- Mejorar las propiedades del suelo mediante vibro-compactación, vibro-reemplazo o compactación dinámica profunda.
- Usar métodos de estabilización del material blando por métodos químicos o inyección de lechada cemento

B.2. Asentamientos máximos tolerables

Con un ángulo de inclinación relativamente pequeño, el tanque comienza a verse extraño. Esto puede hacer que el público, los trabajadores o cualquier otra persona comiencen a cuestionar la seguridad del tanque. Asimismo, se debe considerar las conexiones de tuberías al tanque.

Los asentamientos de la cimentación del tanque deberán estar dentro de los siguientes límites permisibles:

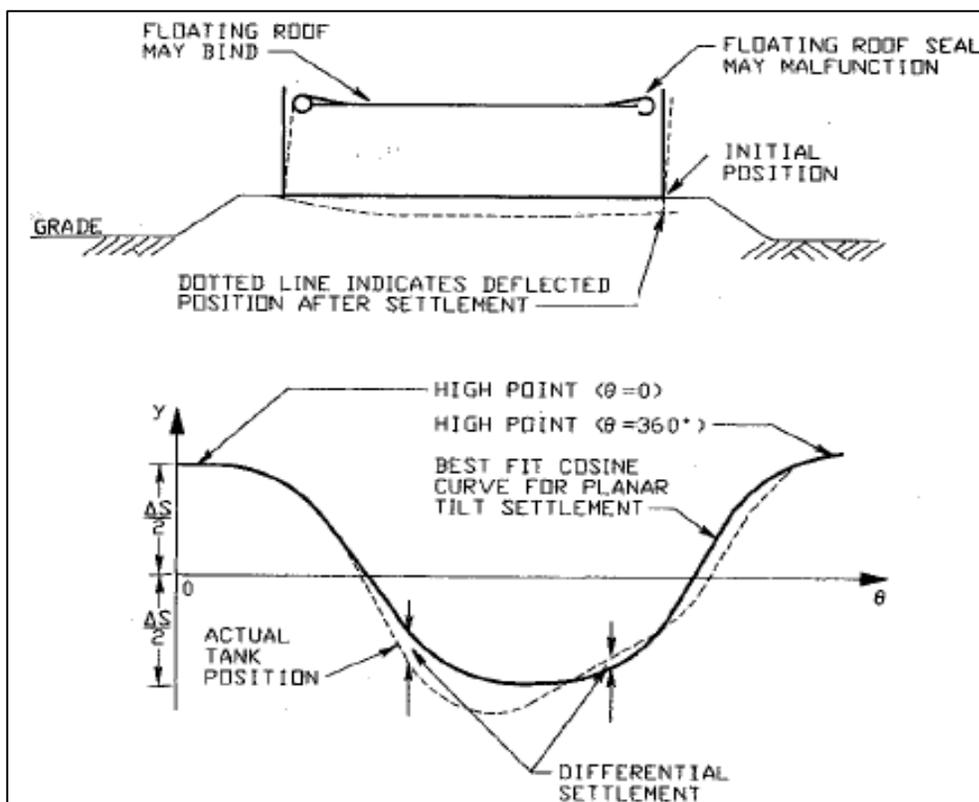
- Asentamiento uniforme máximo de 50 mm (2 pulg.). Este tipo de asentamiento ocurre cuando el suelo es compresible, el tanque se hundirá lento y uniformemente. El asentamiento no debe continuar hasta un punto en el que el fondo del tanque esté debajo de la superficie del terreno circundante. Este tipo de asentamiento cuando son excesivos puede afectar las interconexiones (tuberías, boquillas).

Figura 15*Asentamiento Uniforme*

Fuente: Libro "Above Ground Storage Tanks API 650"

- Asentamiento diferencial máximo de 13 mm por cada 10 m (1/2 pulg. por 32 ft) de circunferencia. El fondo del tanque ya no es una estructura plana. El asentamiento diferencial de resulta más serio que el asentamiento uniforme, ya que causa una desviación local de la estructura, lo que produce grandes tensiones locales.

Figura 16

Asentamiento Diferencial

Fuente: Libro "Above Ground Storage Tanks API 650"

B.3. Sistemas de anclaje

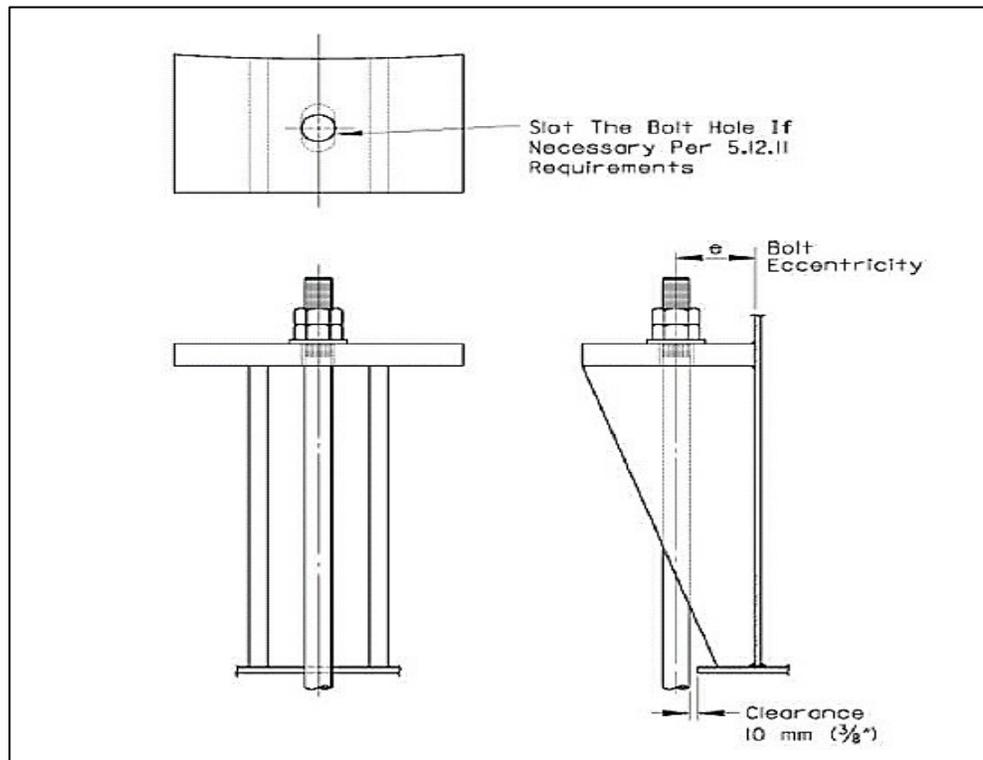
- Tanque auto anclado (simplemente apoyado), cuando las fuerzas externas no pueden desestabilizar al tanque, es decir permanece estable.
- Tanque anclado mecánicamente, cuando las fuerzas externas logran desestabilizar al tanque y se requiere anclar a la cimentación.

Los anclajes consisten en varillas de acero fijadas a la cimentación, las cuales se fijan en silletas que, a su vez, se encuentran unidas a la pared del tanque (ver **Figura 17**). Estos tienen la

finalidad de resistir las cargas que tienden a levantar el tanque. El anclaje bajo cargas cíclicas en concreto fisurado deberá cumplir con los requisitos mínimos de ACI 318 Capítulo 17.

Figura 17

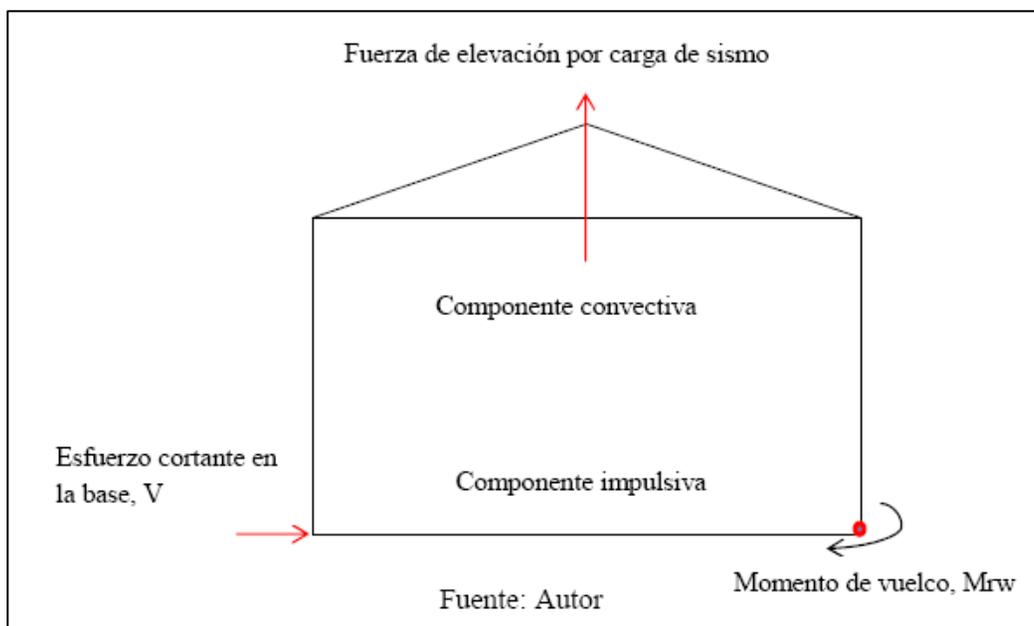
Anclaje Típico con Silleta



Obtenida del Standard API 650 – Sección 5

B.4. Método de Diseño Sísmico en el tanque

Se aplica el procedimiento de diseño recomendado por el Estándar API 650 para determinar la fuerza sísmica y el momento de volteo, como resultados de la respuesta de las masas hidrodinámicas al movimiento lateral del suelo.

Figura 18*Diagrama Sísmico para un Tanque*

Elaborado por Gonza Sánchez (2014)

La componente impulsiva es la parte del líquido, que se encuentra en la parte baja del tanque, la cual se mueve como si fuera una masa sólida. La componente convectiva es la parte del líquido que se encuentra en la parte superior del tanque, la cual es libre para formar olas o chapoteos (Gonza Sanchez, 2014).

Aceleración del suelo: Para zonas fuera de EE.UU, se utilizará el método indicado en el ítem E.4.3 del API-650 "SITES NOT DEFINED BY ASCE 7 METHODS". La aceleración máxima del terreno "Sp" es el equivalente del factor de zona "Z" de la norma E.030 del RNE.

El factor de Importancia "I" se clasifica según su importancia de funcionalidad y si se cuenta con sistemas adicionales de protección (sistemas contra incendio, estructuras de contención:

Tabla 2*Grupo Sísmico - Factor de Importancia*

Grupo Sísmico	I	Descripción
Grupo Sísmico III	1.50	tanques esenciales que son esenciales su servicio después de un terremoto
Grupo Sísmico II	1.25	tanques que pueden representar un peligro para el público y carecen de los controles secundarios a evitar la exposición pública
Grupo Sísmico I	1.00	tanques no asignados en el grupo I o II

Fuente: Standard API 650 – Anexo E.

El standard API 650 clasifica los tipos de suelo según la velocidad propagación de ondas. La misma que es equivalente a la clasificación de suelos indicado en la norma E.030 del RNE.

Tabla 3*Cuadro comparativo para clasificación del suelo*

Perfil del Suelo E.030	Velocidad de propagación de ondas (Vs)	Site Class API 650
So	> 1500 m/s	A
S1	760 m/s a 1500 m/s	B
S1	500 m/s a 760 m/s	C
S2	360 m/s a 500 m/s	C
S2	180 m/s a 360 m/s	D
S3	< 180 m/s	E
S4	Se requiere efectuar un estudio específico del sitio	F

Fuente: Elaboración propia

El factor de reducción sísmica “R” para este tipo de estructuras se clasificará según su sistema de anclaje (ver **Tabla 4**).

Tabla 4

Factor de Reducción Sísmica

Sistema de anclaje	Rwi (impulsivo)	Rwc (convectivo)
Autoanclado	3.5	2
Mecánicamente anclado	4	2

Fuente: Standard API 650 – Anexo E

B.5 Esfuerzos actuantes sobre la cimentación

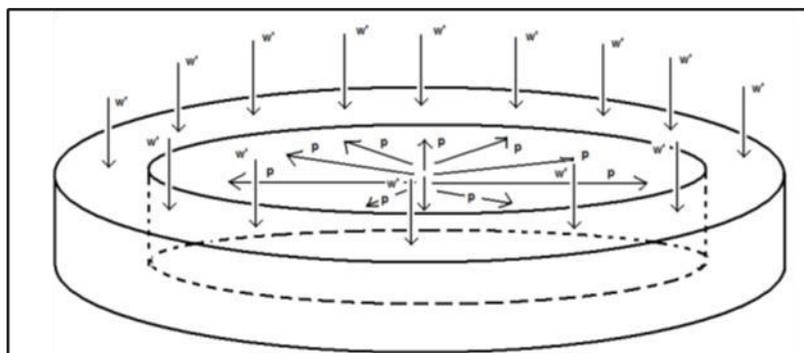
La cimentación de concreto estará sometido a esfuerzos verticales y esfuerzos horizontales, los esfuerzos verticales lo resisten el concreto y, los esfuerzos horizontales lo resisten el acero de refuerzo.

Por Cargas estáticas: son todas las cargas que no varían su magnitud durante el transcurso del tiempo; es decir, son cargas durante el tiempo de operación de la estructura. Se clasifica:

- *Esfuerzos horizontales (P):* estas cargas se originan por el empuje activo del suelo confinado de la cimentación.
- *Esfuerzos Verticales (W):* es el peso del techo y la pared de la estructura metálica (wt) más peso de líquido que actúan sobre la cimentación.

Figura 19

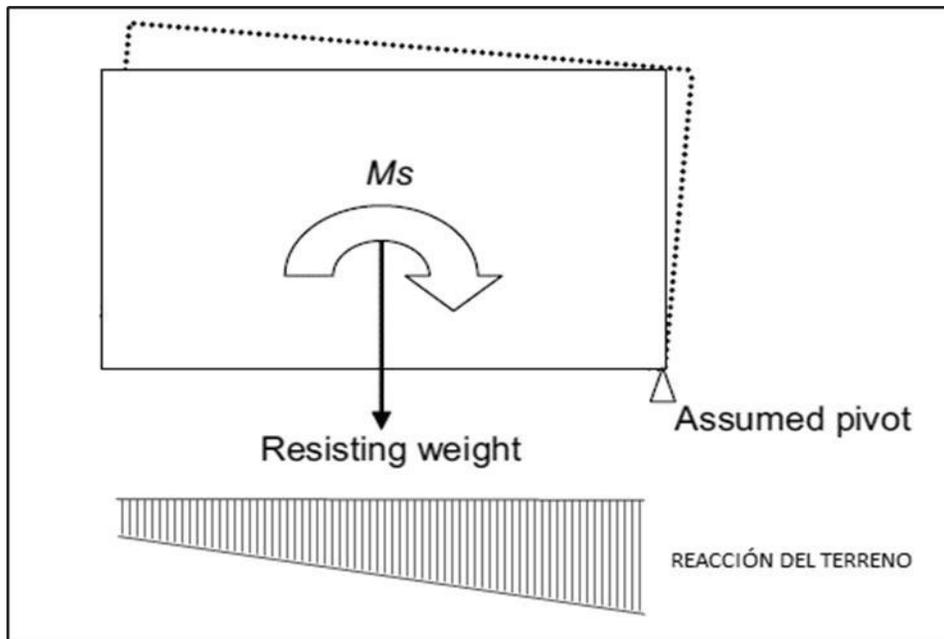
Cargas Estáticas Sobre la Cimentación



Fuente: Guía para el Diseño Estructural de Cimientos y Anclajes (De León Arreaga, 2010)

Por Cargas dinámicas: son aquellas cargas que actúan sobre la estructura en forma repentina, variando su magnitud. Esta carga actuará sobre la cimentación como:

- *Momentos de volteo (M):* momento externo desestabilizante que se desarrolla en la base el tanque metálico cuando está sometido a eventos de sismo o viento. Es decir, el líquido contenido y la estructura se comportan como un cuerpo rígido y trata de voltear alrededor de la base.

Figura 20*Momento de Volteo en Tanque**Fuente:* Standard API 650 – Anexo E

Este momento genera sobre la cimentación los siguientes esfuerzos:

- *Esfuerzos Verticales por Levante (U):* es la fuerza hacia arriba generada por el momento de volteo y que trata de levantar la estructura.

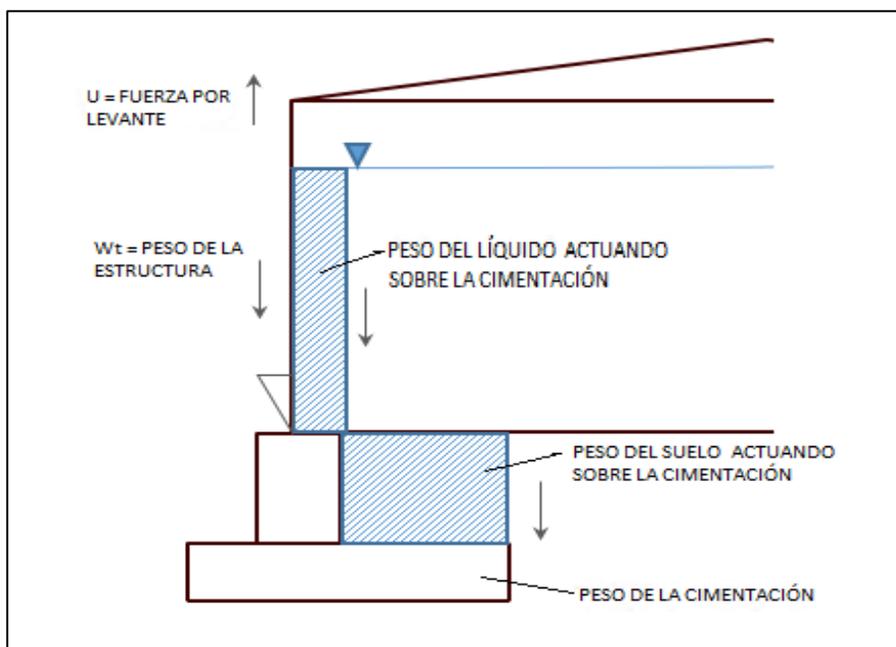
$$U = [4 \times M_{rw}/D] - W_2 (1 - 0.4A_r)$$

La fuerza de levante en todo el perímetro sería:

$$bt' = U/\pi D$$

Figura 21

Cargas dinámicas - Esfuerzos vertical por Levante



Fuente: Elaboración propia, tomando como referencia el Libro “Above Ground Storage Tanks API 650”

Cuando el tanque se encuentra anclado a la cimentación, ésta debe ser diseñada para resistir el levantamiento, para garantizar la estabilidad al volteo del tanque. El peso del producto y suelo apoyado directamente sobre la cimentación se puede usar para resistir la elevación máxima del ancla en la base, siempre que la cimentación esté diseñada para resistir esta carga excéntrica.

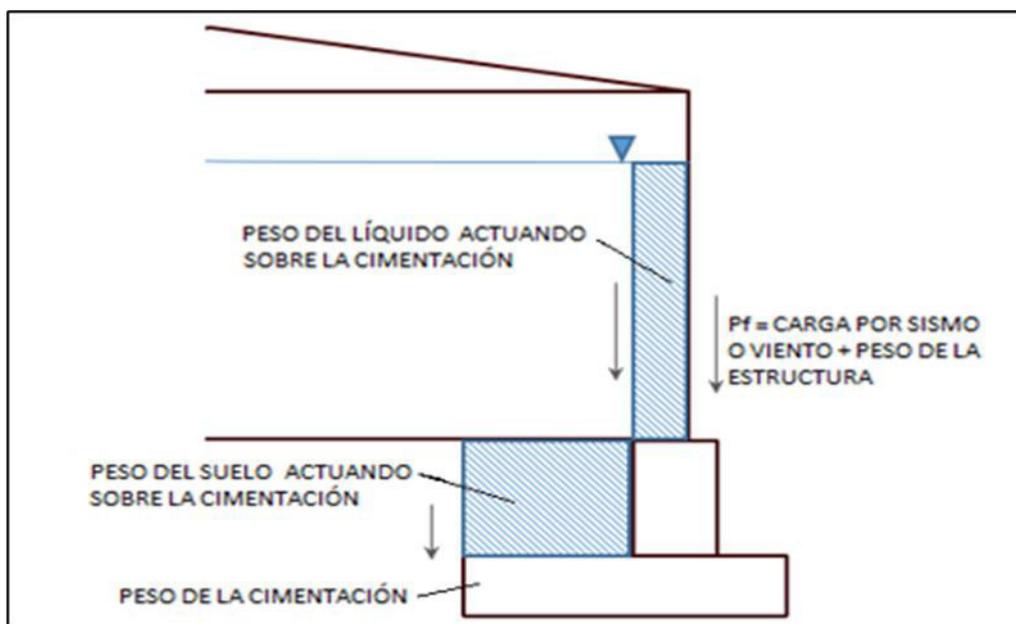
- *Esfuerzos Verticales sobre la cimentación (Pf):* Esfuerzo de compresión originado por el momento de volteo entre el área de la base, más el peso de la estructura (wt) mayorada por la aceleración vertical (Av).

$$P_f = \left(w_t(1 + 0.4A_v) + \frac{1.273M_{tw}}{D^2} \right)$$

La cimentación debe ser diseñada para resistir y transmitir al suelo las máximas cargas generadas por el momento más el peso del líquido y suelo apoyado directamente sobre la cimentación.

Figura 22

Cargas Dinámicas - Esfuerzos Verticales Sobre la Cimentación



Fuente: Elaboración propia, tomando como referencia el Libro “Above Ground Storage Tanks API 650”

También la estructura debe ser capaz de soportar las cargas de viento. Estas cargas son aplicadas en función de la altura y el lugar de emplazamiento de la estructura. Para nuestro caso, resulta ser de menor importancia que las fuerzas por Sismo.

B.6 Verificación de Estabilidad

- Factor de Seguridad al deslizamiento. El cortante sísmico calculado “V” no deberá exceder su resistencia al corte:

$$V_s = \mu(W_s + W_r + W_f + W_p)(1.0 - 0.4A_v) \quad \text{Resistencia al corte}$$

Siendo:

W_s = Peso de la pared del tanque

W_r = Peso del techo del tanque

W_f = Peso de fondo del tanque

W_p = Peso del líquido contenido

A_v = Aceleración vertical

- Factor de Seguridad por Volteo. El momento de volteo actuante no deberá exceder a la resistencia de la estructura.

Para Plateas de cimentación, la relación de estabilidad de volteo para el sistema de tanque anclado mecánicamente, excluyendo los efectos sísmicos verticales, debe ser mayor igual a 2.0.

$$\frac{0.5D_x W_T}{M_s} \geq 2.0$$

Siendo: $W_T = W_s + W_r + W_f + W_p$

Para anillos de cimentación de volteo se verificará como:

$$\frac{W_{cim} + W_{p'} + W_{suelo}}{bt'} \geq 2.0$$

Siendo:

W_{cim} = Peso de la cimentación

$W_{p'}$ = Peso del líquido por encima de la cimentación

W_{suelo} = Peso del suelo sobre la cimentación

bt' = Fuerza de levante en el perímetro

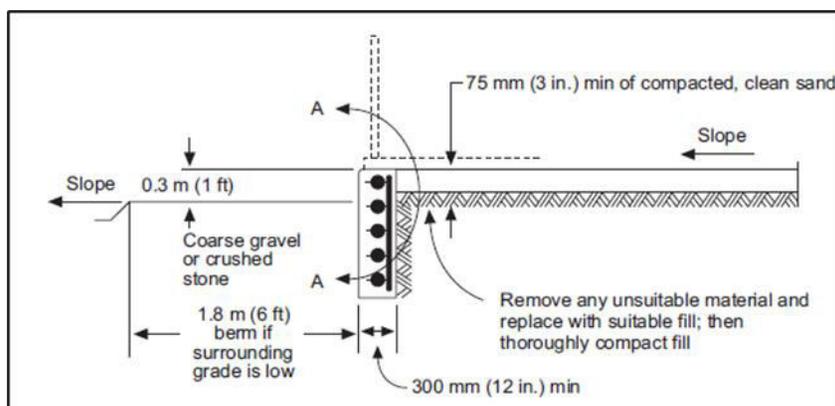
B.7 Criterios de pre-dimensionamiento para la cimentación

Como mínimo, el fondo de la cimentación se ubicará a 0.6 m (2 pies) debajo de la subrasante. La superficie superior de la cimentación debe estar al menos 0.3 m (1 pie) sobre la superficie del terreno circundante; esto proporcionará un drenaje adecuado, ayudará a mantener seco el fondo del tanque y compensará algunos pequeños asentamientos. El ancho de la cimentación no debe tener menos de 300 mm (12 pulg.) de espesor y deberá tener barras de refuerzo. Cuando el ancho de la pared del anillo excede los 460 mm (18 pulg.), se debe considerar el uso de una base debajo de la pared. Las zapatas también pueden ser útiles para la resistencia a las fuerzas de elevación. La resistencia del concreto debe ser de al menos 20 MPa (3000 lb/ in.2) a los 28 días.

Asimismo, debajo del fondo metálico (plancha) del tanque se deberá colocar una capa de arena limpia de 75mm de espesor.

Figura 23

Dimensiones Mínimas Para Cimentación de Tanque



Fuente: Standard API 650 – Anexo B

2.3.3.3. American Concrete International ACI 318

Una pared circular debe reforzarse contra los cambios de temperatura y contracción y reforzarse para resistir la presión lateral del relleno confinado más la sobrecarga del producto. El ACI 318 recomienda valores de refuerzos por tensión y cuantía mínima requerida. Puede requerirse acero vertical adicional para elevación o resistencia a la torsión.

El anillo perimetral se analizará como una estructura tipo muro. Se deberá proporcionar como mínimo el acero requerido para los cambios de temperatura y contracción de 0.0025 para refuerzo transversal y como mínimo 0.0012 para refuerzo longitudinal. Las cimentaciones deben ser diseñadas de acuerdo con el Capítulo 20 de la norma ACI 318.

La presión admisible del suelo deberá obtenerse bajo cargas de servicio. La resistencia del concreto armado deberá obtenerse con las máximas combinaciones de cargas.

Figura 24

Combinaciones de cargas

Combinación de carga	Ecuación	Carga primaria
$U = 1.4D$	(5.3.1a)	D
$U = 1.2D + 1.6L + 0.5(L_r \text{ ó } S \text{ ó } R)$	(5.3.1b)	L
$U = 1.2D + 1.6(L_r \text{ ó } S \text{ ó } R) + (1.0L \text{ ó } 0.5W)$	(5.3.1c)	$L_r \text{ ó } S \text{ ó } R$
$U = 1.2D + 1.0W + 1.0L + 0.5(L_r \text{ ó } S \text{ ó } R)$	(5.3.1d)	W
$U = 1.2D + 1.0E + 1.0L + 0.2S$	(5.3.1e)	E
$U = 0.9D + 1.0W$	(5.3.1f)	W
$U = 0.9D + 1.0E$	(5.3.1g)	E

Fuente: Norma ACI 318

Los pernos de anclaje serán diseñados de acuerdo con el procedimiento y recomendaciones del capítulo 17 del ACI 318.

Figura 25

Resistencia Requerida para Anclajes

Modo de falla	Un anclaje	Grupos de anclajes	
		Anclaje individual en un grupo	Anclajes como grupo
Resistencia del acero en tracción	$\phi N_{sa} \geq N_{ua}$	$\phi N_{sa} \geq N_{ua,i}$	
Resistencia al arrancamiento del concreto en tracción	$\phi N_{cb} \geq N_{ua}$		$\phi N_{cbg} \geq N_{ua,g}$
Resistencia a la extracción por deslizamiento en tracción	$\phi N_{pn} \geq N_{ua}$	$\phi N_{pn} \geq N_{ua,i}$	
Resistencia al desprendimiento lateral del concreto en tracción	$\phi N_{sb} \geq N_{ua}$		$\phi N_{sbg} \geq N_{ua,g}$
Resistencia de adherencia de anclaje adherido en tracción	$\phi N_a \geq N_{ua}$		$\phi N_{ag} \geq N_{ua,g}$
Resistencia del acero en cortante	$\phi V_{sa} \geq V_{ua}$	$\phi V_{sa} \geq V_{ua,i}$	
Resistencia al arrancamiento del concreto por cortante	$\phi V_{cb} \geq V_{ua}$		$\phi V_{cbg} \geq V_{ua,g}$
Resistencia al desprendimiento del concreto por cabeceo del anclaje por cortante	$\phi V_{cp} \geq V_{ua}$		$\phi V_{cpg} \geq V_{ua,g}$

Fuente: Norma ACI 318

2.3.3.4. Norma E.050 del RNE

La norma E.050 del RNE no recomienda cimentar sobre arcillas expansivos. Las estructuras cimentadas sobre estos tipos de suelos están sometidas a grandes fuerzas generadas por la expansión, las cuales provocan levantamiento, agrietamiento y ruptura de la cimentación y de la estructura.

Para suelos expansivos la norma E.050 recomienda las siguientes alternativas:

- Reemplazo de suelo, cuando se encuentran a poca profundidad. Estos serán retirados en su totalidad y reemplazados por relleno controlado.
- Cimentaciones profundas (pilotes, micropilotes, cajones de cimentación entre otros) cuando existan suelos expansivos que impidan realizar cimentaciones superficiales.

2.3.4. Informe de Estudio de Suelos para la zona del proyecto

El informe fue elaborado en octubre del 2018. De la revisión del informe de estudio de suelo para la zona del proyecto se resume lo siguiente:

- Hasta la profundidad de 3.0 m, se encuentra estratos de arcilla de alta plasticidad (CH), tiene baja capacidad de soporte para la cimentación de los tanques y el suelo de la zona se define como suelo altamente expansivo.

Para este tipo de suelo, de baja capacidad de soporte, el Estudio de Suelos plantea como solución plateas de cimentación, dado que este tipo de cimentaciones harán que la distribución de los esfuerzos de la estructura se distribuya en forma constantes en toda el área para no sufrir asentamientos diferenciales excesivos que puedan dañar la estructura proyectada. El Informe de Estudio de Suelos, realizó la siguiente recomendación:

- *Opción 1:* Platea de cimentación con uñas (altura de profundidad de 1.0m) en el borde del perímetro para confinar el suelo expansivo.

Considerando que la profundidad de suelo expansivo es de 3.0m y tomando como referencia las recomendaciones de la norma E.050 (ver ítem 2.2.3.4), se solicitó una segunda opción a fin de seleccionar una alternativa viable:

- *Opción 2:* Reemplazar el estrato de suelo expansivo, hasta una profundidad de 2.5m por debajo de la platea de cimentación. En total 3.50m desde la superficie del terreno.

2.4. Resultados

Se requiere seleccionar y diseñar una cimentación adecuada, para resistir las cargas actuantes de los tanques de almacenamiento de hidrocarburos líquido, debiendo considerar el menor costo de diseño y mejor método constructivo, tomando como referencia los estándares conocidos, descritos en el ítem 2.2.

Como primer paso, para el diseño de la cimentación, debemos tener definido características del suelo y los resultados de las cargas actuantes del tanque.

2.4.1. Datos considerados para el diseño

Tabla 5

Datos geotécnicos

Descripción	Resultado
Perfil de suelo	S3
Capacidad de carga admisible	$\sigma_{adm} = 1.35 \text{ Kg/cm}^2$
Profundidad de cimentación	De = 1.00 m
Peso específico	$\rho_s = 1.86 \text{ gr/cm}^3$
Ángulo de Fricción	$\phi = 17.0^\circ$
Nivel freático	No presenta
Índice plástico	30 %
Profundidad material reemplazo	2.50m por debajo de la cimentación
Potencial de expansión	Alto hasta 3.0m
Cemento	Tipo I

Información obtenida del Estudio de Suelos

Tomando como referencia la capacidad de carga admisible del suelo, se realiza una correlación para obtener el módulo de balasto:

Figura 26

Cuadro de Modulo de Balasto Interacción Suelo – Estructura

Modulo de Reaccion del Suelo Datos para SAFE					
Esf Adm (Kg/Cm ²)	Winkler (Kg/Cm ³)	Esf Adm (Kg/Cm ²)	Winkler (Kg/Cm ³)	Esf Adm (Kg/Cm ²)	Winkler (Kg/Cm ³)
0.25	0.65	1.55	3.19	2.85	5.70
0.30	0.78	1.60	3.28	2.90	5.80
0.35	0.91	1.65	3.37	2.95	5.90
0.40	1.04	1.70	3.46	3.00	6.00
0.45	1.17	1.75	3.55	3.05	6.10
0.50	1.30	1.80	3.64	3.10	6.20
0.55	1.39	1.85	3.73	3.15	6.30
0.60	1.48	1.90	3.82	3.20	6.40
0.65	1.57	1.95	3.91	3.25	6.50
0.70	1.66	2.00	4.00	3.30	6.60
0.75	1.75	2.05	4.10	3.35	6.70
0.80	1.84	2.10	4.20	3.40	6.80
0.85	1.93	2.15	4.30	3.45	6.90
0.90	2.02	2.20	4.40	3.50	7.00
0.95	2.11	2.25	4.50	3.55	7.10
1.00	2.20	2.30	4.60	3.60	7.20
1.05	2.29	2.35	4.70	3.65	7.30
1.10	2.38	2.40	4.80	3.70	7.40
1.15	2.47	2.45	4.90	3.75	7.50
1.20	2.56	2.50	5.00	3.80	7.60
1.25	2.65	2.55	5.10	3.85	7.70
1.30	2.74	2.60	5.20	3.90	7.80
1.35	2.83	2.65	5.30	3.95	7.90
1.40	2.92	2.70	5.40	4.00	8.00
1.45	3.01	2.75	5.50		
1.50	3.10	2.80	5.60		

Fuente: Tesis de maestría “Interacción Suelo-Estructuras: Semi-espacio de Winkler”, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcela España. 1993 (Autor Nelson Morrison)

Tabla 6*Características del Concreto Armado*

Descripción	Característica
Peso específico	$\gamma =$ 23,535.72 N/m ³
Resistencia del concreto	$f'c. =$ 28.0 MPa
Módulo elasticidad del concreto	$E =$ 2.487x10 ¹⁰ N/m ²
Resistencia del acero	$f_y =$ 420.0 MPa

Tabla 7*Características del Tanque*

Descripción	Característica
Diámetro	$D =$ 6.50m
Altura pared	$H_t =$ 3.90 m
Altura del líquido	$H_l =$ 3.40 m
Peso específico combustible	$\gamma_{comb} =$ 7600 N/m ³
Sistema de anclaje	Anclado mecánicamente
Cantidad de pernos de anclaje	$Cant. =$ 8
Diámetro ubicación pernos	$D_p =$ 6.72 m

Fuente: Tanque metálico, elaborado por Inspectra

2.4.2. Cargas actuantes del tanque

La mayor carga actuante sobre el tanque ocurrirá cuando éste se encuentra lleno y ocurra un evento de sismo. Las cargas de viento sobre el tanque tienen resultados menores en comparación con las fuerzas sísmicas.

A. Cargas sísmicas

Para determinar los esfuerzos que actúan sobre la cimentación se ha realizado el análisis sísmico en una hoja de cálculo, siguiendo el procedimiento del API 650. Conociendo las características del tanque, el producto contenido, la zonificación y estudio de suelo se considera la siguiente información para el cálculo de cargas sísmicas.

Tabla 8

Datos de Entrada para Análisis Sísmico - API 650

Datos del Tanque		
Diámetro	D =	6.50m
Altura pared	Ht =	3.90 m
Peso pared	Ws =	49,062.46 N
Peso techo	Wr =	16,721.15 N
Peso fondo	Wf =	20,442.96 N
Peso del combustible	Wp =	857,467.94 N
Esfuerzo de fluencia plancha	Fy =	250.0 MPa
Datos del contenido		
Altura del líquido	Hl =	3.40 m
Peso específico combustible		7600 N/m ³
Datos sísmicos		
Aceleración máxima del suelo	Z = Sp =	0.25
Clasificación de suelo		Clase E

Grupo Sísmico (SUG)		Grupo I
Factor de importancia	I =	1
Factor de reducción impulsivo	Rwi =	4
Factor de reducción convectivo	Rwc =	2

Con los datos de entrada se procedió a realizar los cálculos sísmicos (Ver Anexo 01), obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 9

Esfuerzos Resultantes del Tanque por Carga Sísmica

Descripción	Resultados	
Cortante Basal máximo probable	V =	152,466.1 N
Momento de volcamiento sobre la pared del anillo	Mrw =	243,333.73 N-m
Momento de volcamiento sobre la base del tanque	Ms =	382,159.89 N-m
Aceleración vertical	Av	0.423
Peso de la pared y techo actuando en el perímetro	wt =	3,221.47 N/m

Se verifica la resistencia al deslizamiento. El cortante basal calculado “V” no deberá exceder de la fuerza de resistencia al corte “Vs”

$$V_s = 313,638.76 \text{ N}$$

$$FSD = V_s/V = 313,638.76/152,466.10 = 2.06 > 1.50 \dots \text{Conforme}$$

B. Cargas de Viento

La carga exterior (presión o succión) ejercida por el viento se supondrá estática y perpendicular a la superficie sobre la cual actúa. La presión debido al viento (P_h) se obtendrá mediante la siguiente expresión:

$$P_h = 0.005 C V_h^2$$

De los cálculos realizados (Ver Anexo 02) se obtuvieron los siguientes resultados:

Fuerza lateral por viento $F_v = 2.257 \text{ ton} < > 22,133.61 \text{ N}$

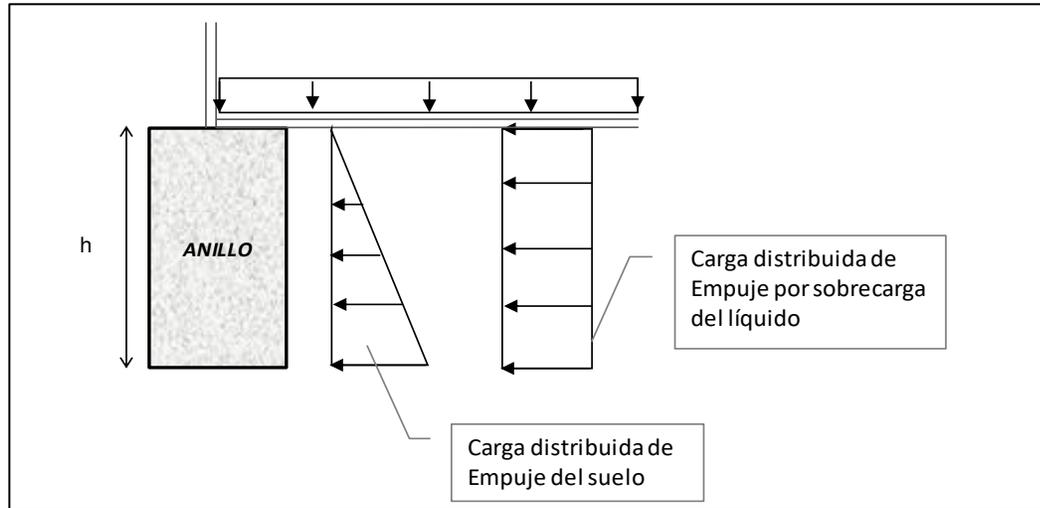
Se puede observar que la Fuerza lateral por viento (**22,133.61 N**) resulta despreciable en comparación con las Fuerza lateral por Sismo (**152,444.8 N**). En ese sentido, se procederá a diseñar la cimentación considerando las Cargas Sísmicas

2.4.3. Esfuerzos actuantes en la cimentación

Esfuerzo Horizontal. Es el resultado del empuje activo del suelo de relleno más el empuje por sobrecarga del líquido actuando sobre la cimentación.

Figura 27

Diagrama de Fuerzas Horizontales en el Anillo de Cimentación



Elaboración propia

Coefficiente activo del suelo

$$K_0 = 0.71$$

Empuje del relleno

$$E_R = \gamma_s \times K_0 \times \frac{h^2}{2}$$

$$E_R = 6,453.63 \times h^2 \text{ N/m}$$

Empuje por sobrecarga

$$E_{s/c} = \gamma_l \times K_0 \times H \times h$$

$$E_{s/c} = 24,982.07 \times h \text{ N/m}$$

Siendo "h" la altura del anillo que confina el suelo por debajo de la base del tanque

Esfuerzo Vertical producido por cargas dinámicas. Los esfuerzos verticales se obtendrán con el momento de volcamiento producido por las cargas sísmicas.

- Esfuerzo vertical por levante

$$U = 103,286.57 \text{ N}$$

$$b't = U/L = 5,058.02 \text{ N/m}$$

- Esfuerzo vertical sobre la cimentación

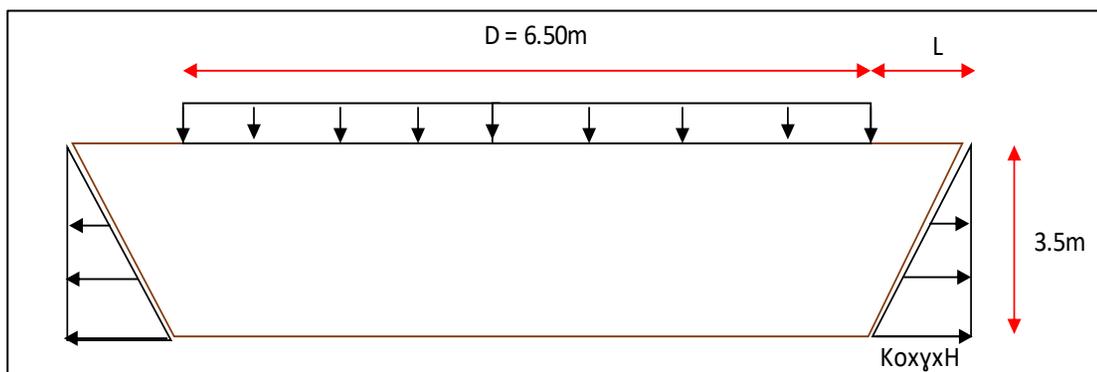
$$P_f = 11,098.23 \text{ N/m}$$

2.4.4. Material de suelo de reemplazo

El Estudio de suelos recomienda reemplazar el suelo, con potencial de expansión alto, por un material de mejor calidad. Debido a los esfuerzos que genera el material de relleno, se requiere calcular la longitud de relleno “L” desde el extremo de la base.

Figura 28

Esquema Elevación - de Material de Relleno



Elaboración propia

$$L = K_o \gamma H = 0.71 \times 1.85 \times 3.5$$

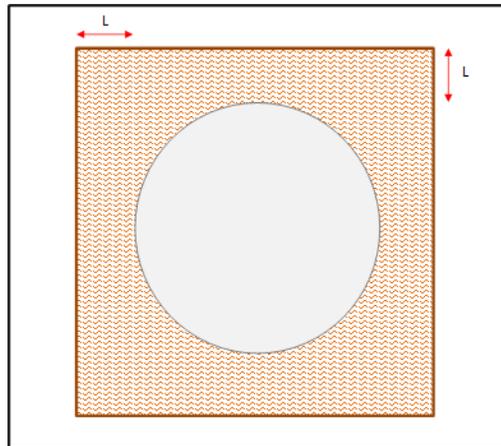
$$L = 4.60 \text{ m}$$

$$\text{Área de sección cuadrada} = (6.5 + 2 \times 4.6) = 15.70\text{m}$$

Se requiere reemplazar un suelo de relleno, como mínimo $L = 4.60\text{m}$ desde el perímetro de la base de la cimentación.

Figura 29

Esquema en Planta - de Material de Relleno



Elaboración propia

El material de relleno será un suelo tipo A-1, A-2 ó A-3, con índice de plasticidad $\leq 10\%$

2.4.5. Diseño de la cimentación

De acuerdo con las recomendaciones del Estudio de Suelos se efectuó el diseño de una platea de cimentación. Adicionalmente, para el presente informe, se plantea un breve análisis comparativo (costo – beneficio) con otras 2 soluciones de cimentación.

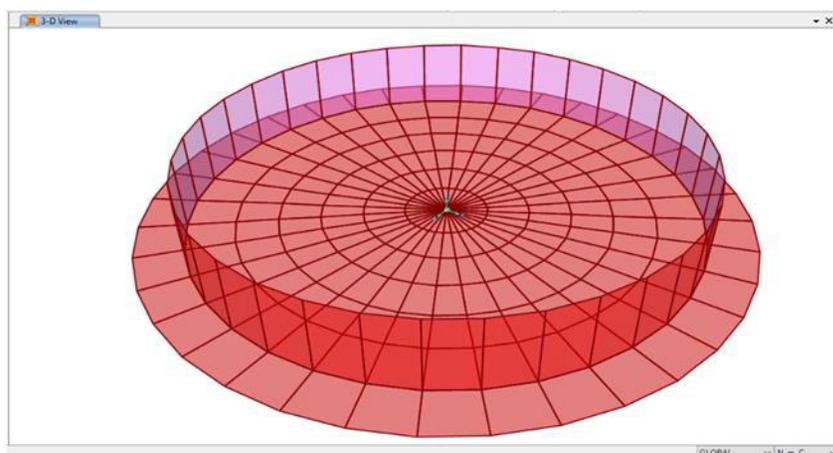
- a. Platea de cimentación sobre un suelo de relleno controlado
- b. Anillo de concreto armado sobre un suelo de relleno controlado
- c. Platea de cimentación con pilotes de concreto armado

2.4.5.1. *Platea de cimentación sobre un suelo de relleno controlado*

El diseño se realizará bajo el modelamiento de elementos finitos con el software SAP2000, esto con la finalidad de visualizar la interacción suelo-estructura mostrando los esfuerzos resultantes y asentamientos esperados.

Figura 30

Modelamiento - Platea de Cimentación en SAP2000



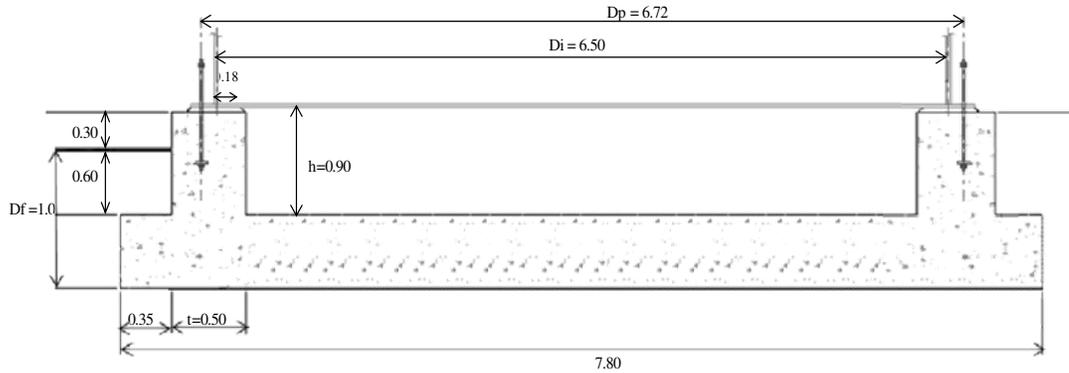
Fuente: Elaboración propia

Para la cimentación tipo Platea, el EMS recomienda una profundidad de desplante de 1.0m. Para tal fin se selecciona la losa con anillo perimetral. Se considera un módulo de balasto $k = 2.83 \text{ Kg/cm}^3$. La cimentación tendrá un anillo perimetral en su superficie, la misma que confinará el suelo en su interior.

- Dimensiones de la cimentación

Ancho del anillo $t = 0.50 \text{ m}$

Alto anillo $h = 0.90 \text{ m}$

Figura 31*Dimensiones Platea de Cimentación*

Fuente: Elaboración propia

- Empuje actuante horizontal en el anillo

$$E_R = 5,808.267 \text{ N/m}$$

$$E_s/c = 24,982.07 \text{ N/m}$$

Fuerza de tracción en el anillo

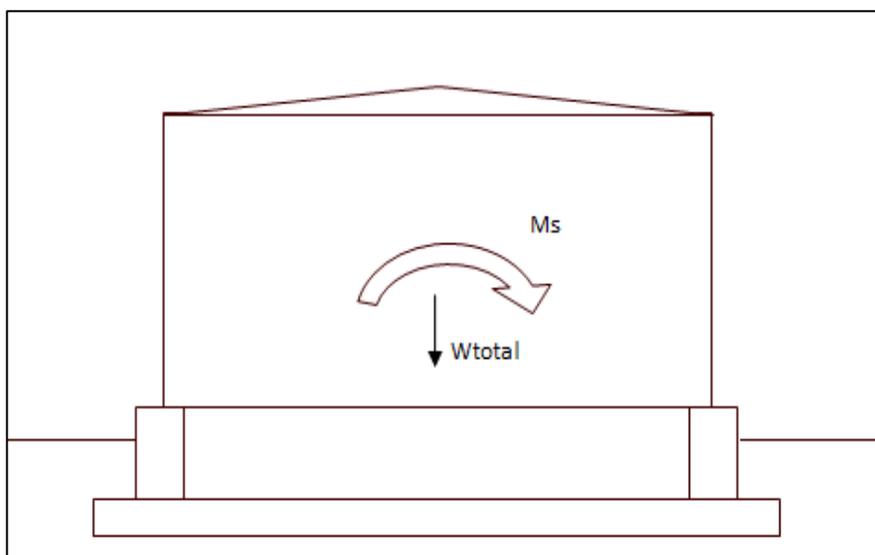
$$F = E_R + S_e = 26,462.20 \text{ N/m}$$

$$T = \frac{F \times D}{2}$$

$$T = 86002.2 \text{ N}$$

- Resistencia al volteo por Sismo

Para cimentaciones con platea, se deberá verificar que el momento resistente del tanque más su contenido sea 2 veces mayor al Momento máximo por sismo en la base “Ms”.

Figura 32*Diagrama de Momento de Volteo*

Fuente: Standard API 650 – Anexo E

Como el tanque está anclado mecánicamente, se considerará el peso de la cimentación.

$$W_{total} = W_s + W_r + W_f + W_p + W_{cim}$$

$$\text{Momento resistente} = 0.5D \times W_{total}$$

Peso de la pared	$W_s =$	49.06 KN
------------------	---------	----------

Peso del fondo	$W_f =$	20.44 KN
----------------	---------	----------

Peso del techo	$W_r =$	16.72 KN
----------------	---------	----------

Peso del combustible	$W_p =$	857.47 KN
----------------------	---------	-----------

Peso de la cimentación	$W_{cim} =$	599.35 KN
------------------------	-------------	-----------

Momento Resistente al volteo	Frv =	5014.88 KN-m
---	--------------	---------------------

$$FSV = 5014.88/382.16 = 13.12 > 2 \dots \dots \text{Conforme}$$

- Presión actuante y asentamientos

Al ser un elemento tipo losa, se realiza el diseño en un software especializado SAP2000 v.21. Este software realiza su análisis en base a elementos finitos y nos permite obtener la presión actuante, el asentamiento esperado y los esfuerzos en el concreto armado.

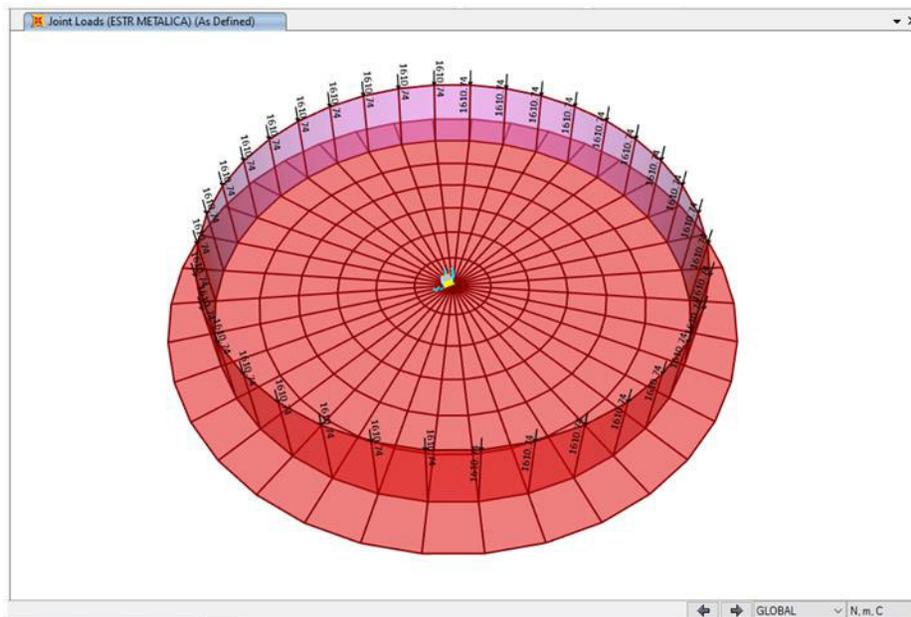
Condición estática

La mayor carga se produce durante la prueba hidráulica hasta la altura máxima de la pared del tanque.

Peso del agua	$W_{\text{agua}} = 38.24 \text{ KN/m}^2$
Peso del tanque metálico	$W_{\text{estructura}} = w_t = 3.22 \text{ KN/m}$
Peso suelo interior	$W_{\text{suelo_int}} = 16.43 \text{ KN/m}^2$
Peso de suelo exterior	$W_{\text{suelo_ext}} = 10.95 \text{ KN/m}^2$

Figura 33

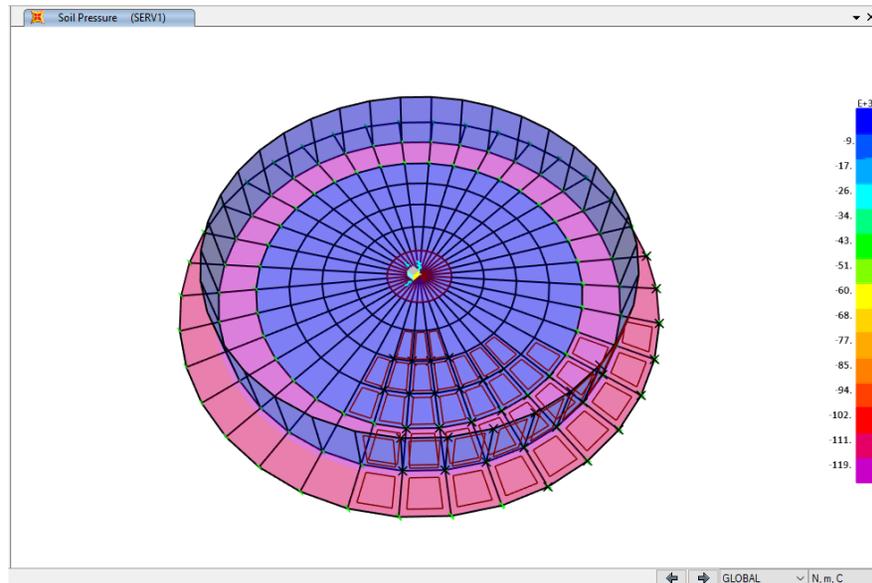
Modelamiento Cargas Actuantes – Condición Estática



Presión máxima durante la prueba hidráulica (Tanque con agua)

Figura 34

Presión Actuante en el Suelo – Condición Estática

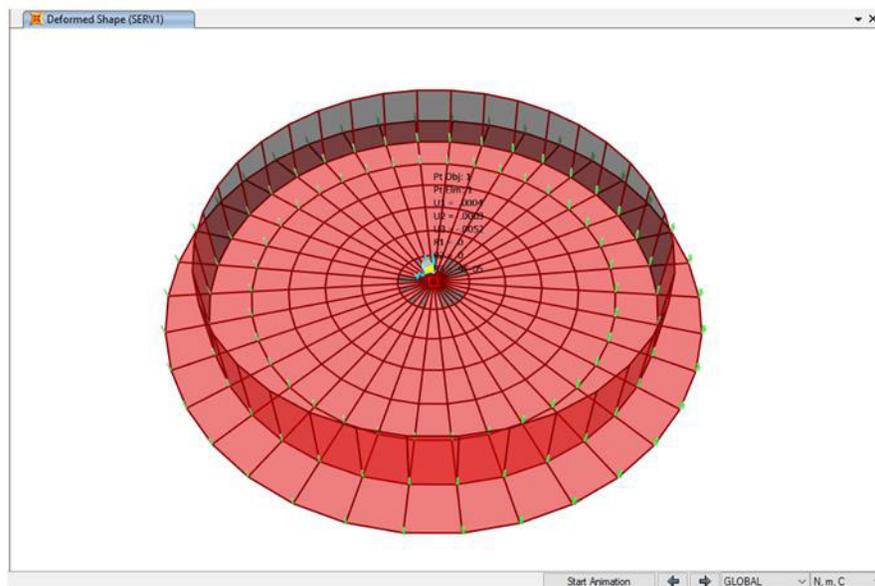


Presión Suelo = 0.11 MPa = 1.10 Kg/cm²

$\sigma_{\text{actuante}} = 1.10 \text{ Kg/cm} < \sigma_{\text{admisible}} = 1.35 \text{ Kg/cm}^2 \dots \dots \dots \text{conforme}$

Asentamiento máximo

Durante la prueba hidráulica se espera un asentamiento uniforme.

Figura 35*Asentamientos Actuantes – Condición Estática*

$$\Delta_{\text{máx uniforme}} = 5.2.\text{mm} < \Delta_{\text{máx admisible}} = 50\text{mm}$$

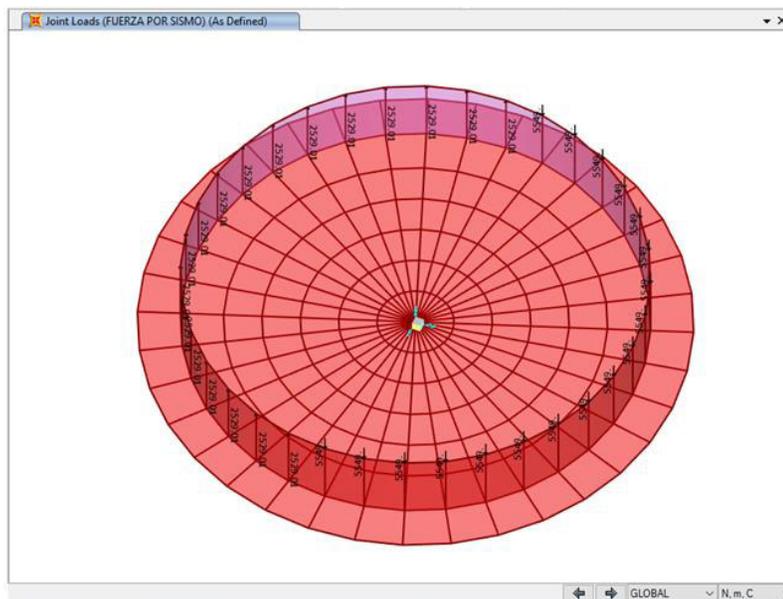
Condición sísmica

La mayor carga se produce cuando el tanque se encuentra lleno de combustible y ocurre un evento sísmico

Peso del combustible	$W_{\text{liq}} = 25.84 \text{ KN/m}^2$
Peso del tanque metálico	$W_{\text{estructura}} = w_t = 3.22 \text{ KN/m}$
Peso suelo interior	$W_{\text{suelo_int}} = 16.43 \text{ KN/m}^2$
Peso de suelo exterior	$W_{\text{suelo_ext}} = 10.95 \text{ KN/m}^2$
Esfuerzo vertical sobre la cimentación	$P_f = 11,098 \text{ N/m}$
Esfuerzo vertical por levante	$b't = U/L = 5,058.02 \text{ N/m}$

Figura 36

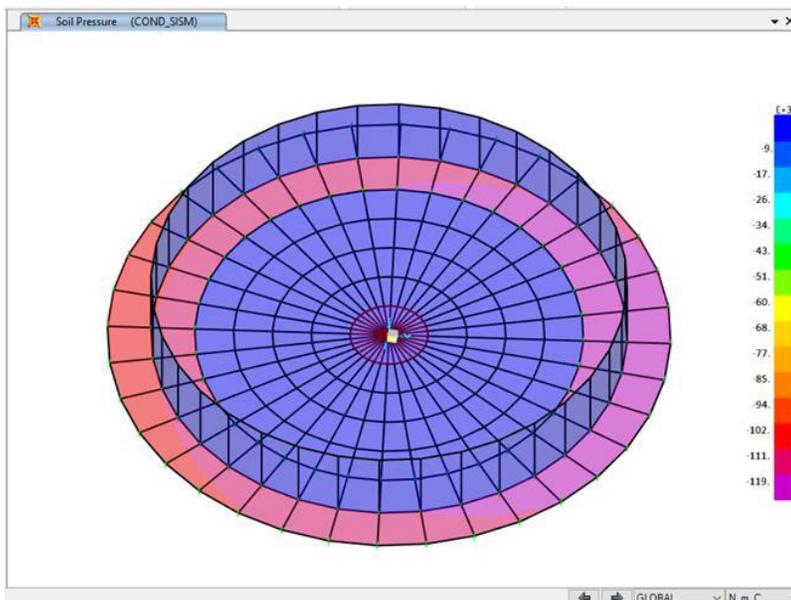
Modelamiento Cargas Actuantes – Condición Sísmica



Presión máxima cuando se produce el evento de sismo esperado (Tanque con líquido)

Figura 37

Presión Actuante en el Suelo – Condición Sísmica



Presión suelo (+) = 0.121 Mpa = 1.20 Kg/cm²

Presión suelo (-) = 0.105 Mpa = 1.05 Kg/cm²

$\sigma_{actuante (+)} = 1.20 \text{ Kg/cm}^2 < \sigma_{admisible} = 1.80 \text{ Kg/cm}^2 \dots\dots\dots \text{conforme}$

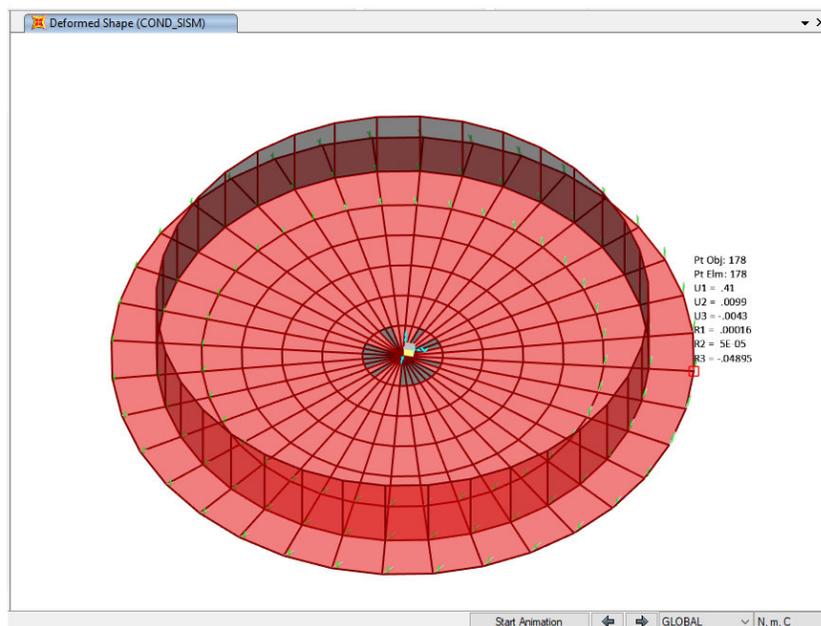
$\sigma_{actuante (-)} = 1.05 \text{ Kg/cm}^2 > 0 \dots\dots\dots \text{no existe levante de la cimentación}$

Asentamiento máximo

Durante un evento de sismo se produce el máximo asentamiento diferencial

Figura 38

Asentamientos Actuantes – Condición Sísmica



$$\Delta 1 = 4.30 \text{ mm}$$

$$\Delta 2 = 3.80 \text{ mm}$$

En una longitud L=10.0m el asentamiento máximo diferencial es:

$$\Delta_{\text{máx_dif}} = 0.50 \text{ mm} < \Delta_{\text{máx_admisible}} = 13 \text{ mm} \dots\dots\dots \text{Conforme}$$

- Refuerzo en la cimentación

Anillo perimetral

Acero longitudinal

Combinación de carga 1.4 veces la carga muerta

$$A_s = \frac{T_u}{\Phi f_y} \text{ (cm}^2\text{)}$$

$$A_s = \frac{1.40 \times T_u}{0.9 \times F_y}$$

$$A_s = 3.19 \text{ (cm}^2\text{)}$$

Acero mínimo

$$A = 0.0025 \times b \times h$$

$$A_{\text{min 1}} = 11.25 \text{ (cm}^2\text{)}$$

Se requiere: $A_s = 11.25 \text{ (cm}^2\text{)}$

El acero que se dispondrá será: $8 \Phi 5/8''$

Acero transversal

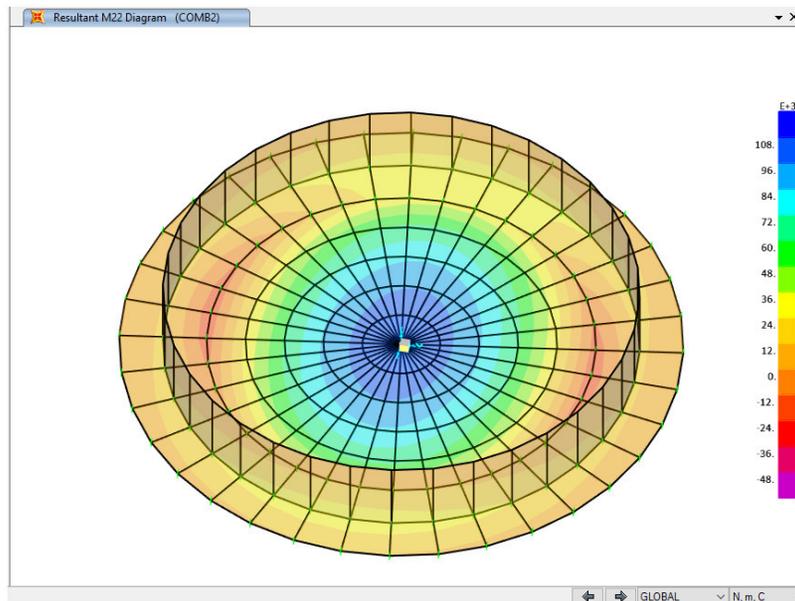
$$A_{st} = (0.0012 \times b \times 100) / 2$$

$$A_{st} = 3.00 \text{ (m}^2\text{)/m}$$

Estribos $1/2'' @ 30 \text{ cm}$

Losa

Momento actuante, $M_u (+) = 102.43 \text{ KN-m}$

Figura 39*Plata de Cimentación - Momento Máximo Actuante*

$$A_{\text{Snecesario}} = \frac{Mu}{\phi f_y \left(d - \frac{a}{2} \right)}$$

$$a = \frac{As \times f_y}{0.85 \times f'_c \times b}$$

Para $a = 1.25 \text{ cm}$ $a = 1.22 \text{ cm}$ $As = 6.9 \text{ cm}^2$

Verificación por Refuerzo mínimo

Para $a = 1.25 \text{ cm}$ $a = 1.22 \text{ cm}$ $As = 6.9 \text{ cm}^2$

Verificación por Refuerzo mínimo

$$A_{\text{Sminimo}} = 0.0018 b_w d$$

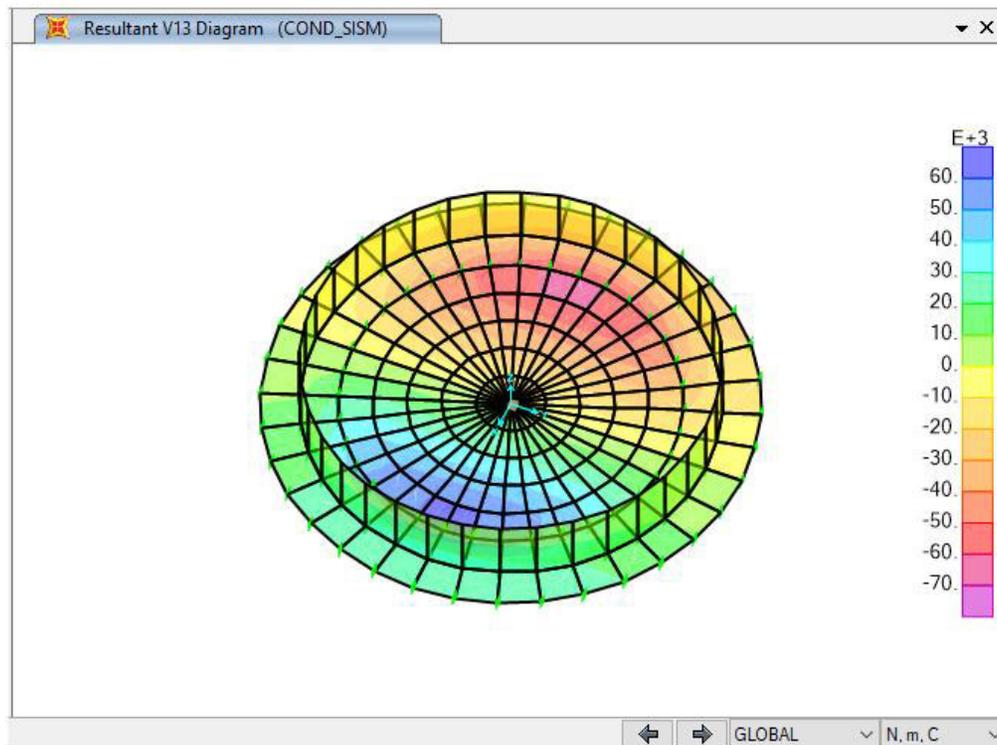
$$As_{\text{min}} = 7.2 \text{ cm}^2$$

Se adoptará $As = 7.2 \text{ cm}^2$ Varillas de $\phi \ 5/8'' @ 25$ refuerzo superior e inferior

Cortante máximo actuante, $V_u = 60.78 \text{ KN}$

Figura 40

Plata de Cimentación - Cortante Máximo Actuante



Verificación por Cortante

$$V_u = 60.78 \text{ KN}$$

Resistencia a Cortante del Concreto

$$V_c = 0.17 \times \sqrt{f'_c} \times b_w \times d$$

$$V_c = 359.46 \text{ KN}$$

$$\Phi = 0.75 \quad \text{Factor de reducción por cortante}$$

Se debe cumplir que:

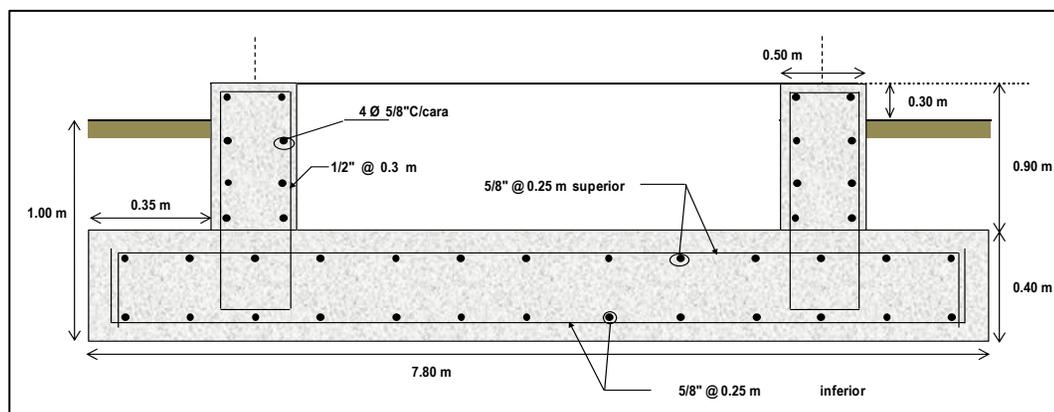
$$\Phi V_c \geq V_u$$

$$269.60 \text{ KN} \geq 60.78 \text{ KN} \quad \text{Cumple}$$

- Esquema de la cimentación

Figura 41

Esquema - Placa de Cimentación



- Cuadro resumen de asentamientos

Tabla 10

Cuadro de Resumen de Asentamientos – Placa de Cimentación

Asentamientos máximos	Actuante	Permisible	Resultado
Asentamiento uniforme	5.2 mm	50 mm	Conforme
Asentamiento diferencial	0.52 mm	13 mm	Conforme

- Presupuesto

Se calcula el costo directo de construcción.

Tabla 11*Presupuesto – Platea de Cimentación*

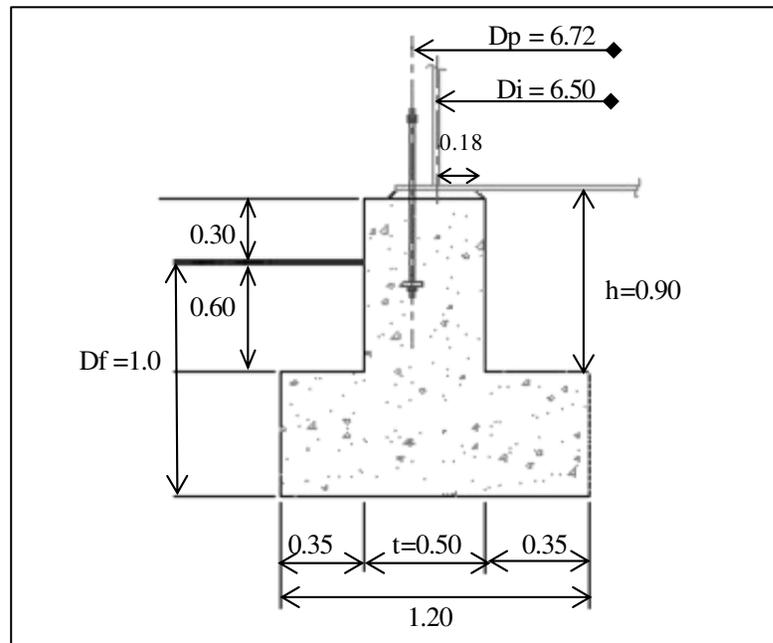
Partidas	Und.	Cant.	P.U	TOTAL (S/.)
Movimiento de tierra				
Excavación mat. Suelto	m3	535.0	8.95	4,788.25
Eliminación material excedente	m3	625.0	29.75	18,593.75
Relleno compactado c/ material de préstamo	m3	665.0	62.4	41,496.00
Obras de concreto				
Concreto $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$	m3	30.0	332.9	9,987.00
Acero de refuerzo $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$	Kg	3000.0	4.3	12,900.00
Encofrado y desencofrado normal	m2	40.0	54.6	2,184.00
COSTO TOTAL DIRECTO				S/89,950.00

2.4.5.2. Anillo de concreto armado sobre suelo de relleno controlado

Representa la cimentación mayormente usada para tanques metálicos vertical. Al tratarse de una cimentación convencional los cálculos fueron realizados en una hoja de Excel (Ver Anexo 03), obteniendo los siguientes resultados:

- Dimensiones de la cimentación

Para anillos con espesor mayor de 0.46m se deberá considerar zapatas (Standard API 650).

Figura 42*Dimensiones - Anillo de Cementación*

- Resistencia al volteo por Sismo

Se verifica que la Fuerza de Resistencia al volteo F_{rv} deberá ser mayor a la fuerza vertical por levante “bt”.

$$FSV = 36.12/5.06 = 7.14 > 2.0 \dots \text{Conforme}$$

- Presión actuante y asentamientos

Condición estática

$$\sigma_{actuante} = 0.49 \text{ Kg/cm} < \sigma_{admisible} = 1.35 \text{ Kg/cm}^2 \dots \text{conforme}$$

Asentamiento máximo

$$\Delta_{\text{máx uniforme}} = 36.75 \text{ mm} < \Delta_{\text{máx admisible}} = 50 \text{ mm}$$

Condición sísmica

$$\sigma_{actuante (+)} = 0.52 \text{ Kg/cm}^2 < \sigma_{admisible} = 1.80 \text{ Kg/cm}^2 \dots \text{conforme}$$

$\sigma_{\text{actuante}} (-) = 0.38 \text{ Kg/cm}^2 > 0 \dots\dots\dots$ no existe levante de la cimentación

Asentamiento diferencial máximo

$$\Delta 1 = 39.0 \text{ mm}$$

$$\Delta 2 = 28.5 \text{ mm}$$

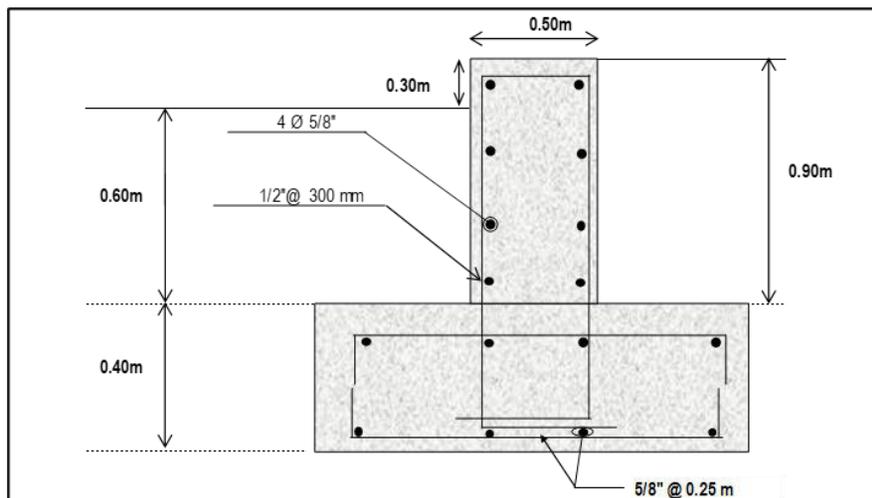
En una longitud $L=10.0\text{m}$ el asentamiento máximo diferencial es:

$$\Delta_{\text{máx_dif}} = 10.5\text{mm} < \Delta_{\text{máx_admisible}} = 13 \text{ mm} \dots\dots\dots$$
Conforme

- Esquema de la cimentación

Figura 43

Esquema – Anillo de Cimentación



- Cuadro resumen de asentamientos

Tabla 12

Cuadro de Resumen de Asentamientos – Anillo de Cimentación

Asentamientos máximos	Actuante	Permisible	Resultado
Asentamiento uniforme	36.5 mm	50 mm	Conforme
Asentamiento diferencial	10.5 mm	13 mm	Conforme

- Presupuesto

Tabla 13

Presupuesto - Anillo de cimentación

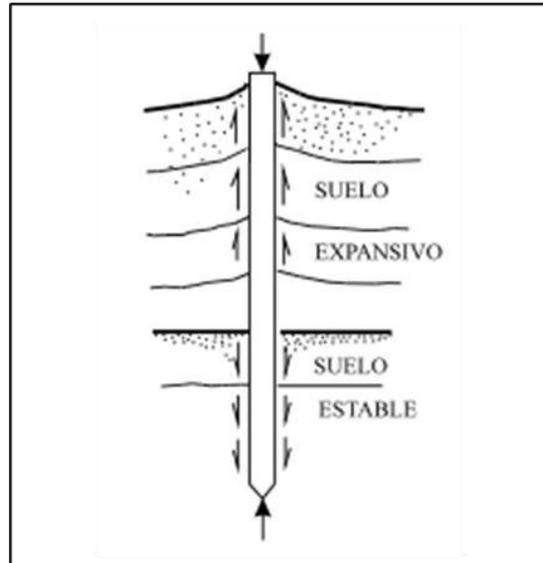
Partidas	Und.	Cant.	P.U	TOTAL (S/.)
Movimiento de tierra				
Excavación mat. Suelto	m3	535.0	8.95	4788.25
Eliminación material excedente	m3	625.0	29.75	18593.75
Relleno compactado c/ material de préstamo	m3	665.0	62.4	41496.00
Obras de concreto				
Concreto f'c = 280 Kg/cm2	m3	20.0	332.9	6658.00
Acero de refuerzo fy= 4200 Kg/cm2	Kg	1800.0	4.3	7740.00
Encofrado y desencofrado normal	m2	40.0	54.6	2184.00
COSTO TOTAL DIRECTO				S/81,460.00

2.4.5.3. *Platea de cimentación con pilotes de concreto armado*

Para este caso no se realizará reemplazo de suelo por debajo de la cimentación; sino, se optará por pilotes hasta sobrepasar la profundidad de suelo expansivo y altamente compresible.

Figura 44

Caso de Pilote en Suelo Expansivo



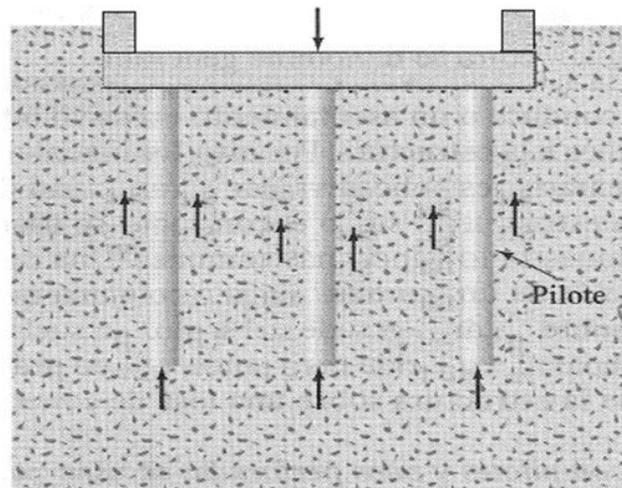
Fuente: Paper Cimentaciones profundas (Alva Hurtado, Jorge)

- Configuración de platea con pilotes

Para el diseño se considera la misma configuración de platea de cimentación del ítem 2.3.4.1, y estará soportada por los pilotes.

Figura 45

Esquema - Platea con Pilotes



- Capacidad de carga y cantidad de pilotes

La capacidad de carga última de un pilote estará conformada por la sumatoria de resistencia a la fricción (Q_f) y la resistencia en la punta (Q_p), entre un factor de seguridad igual a 2.5.

Peso máximo total que soportará los pilotes:

Peso total = 2,445.0 KN

Los cálculos fueron realizados en una hoja Excel (Ver Anexo 04), obteniendo los siguientes resultados:

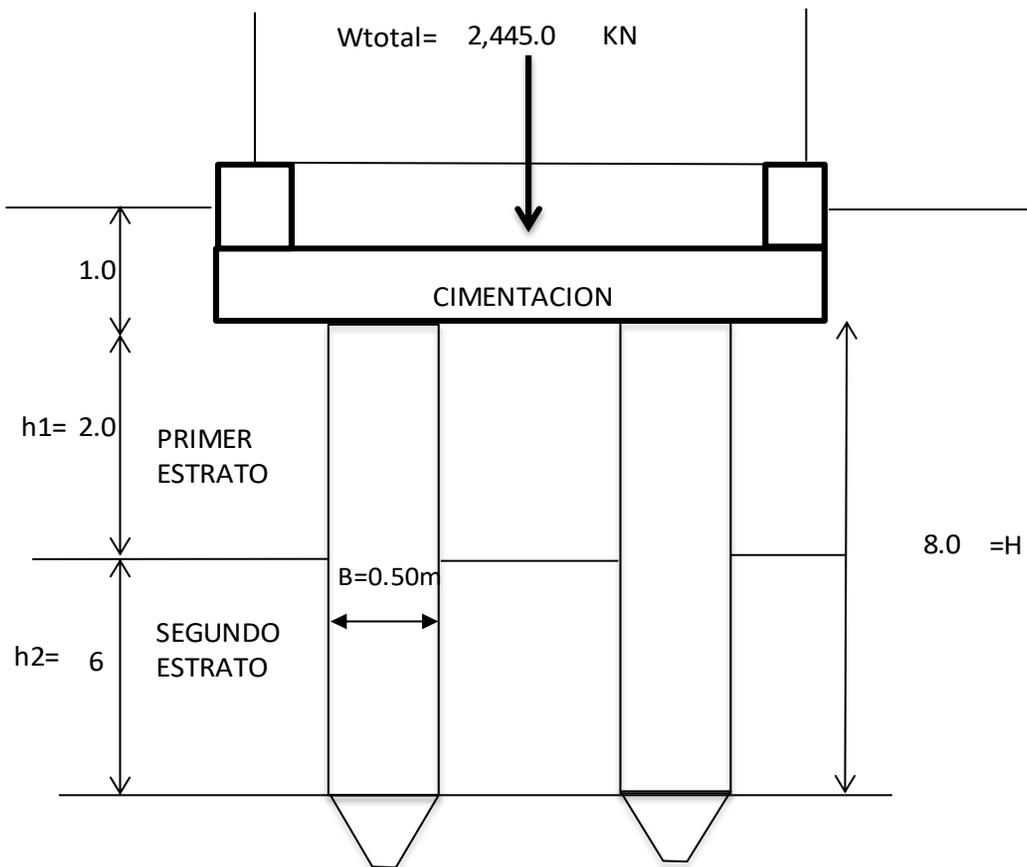
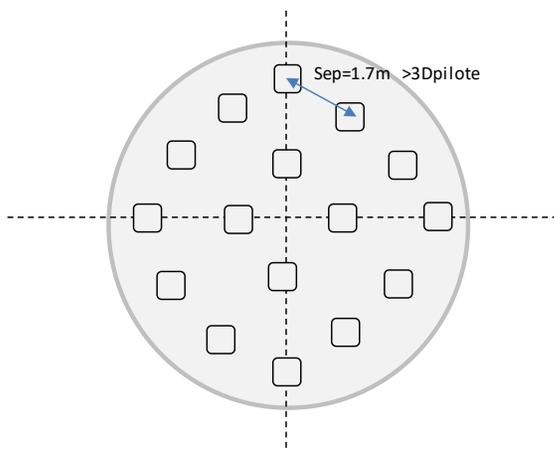
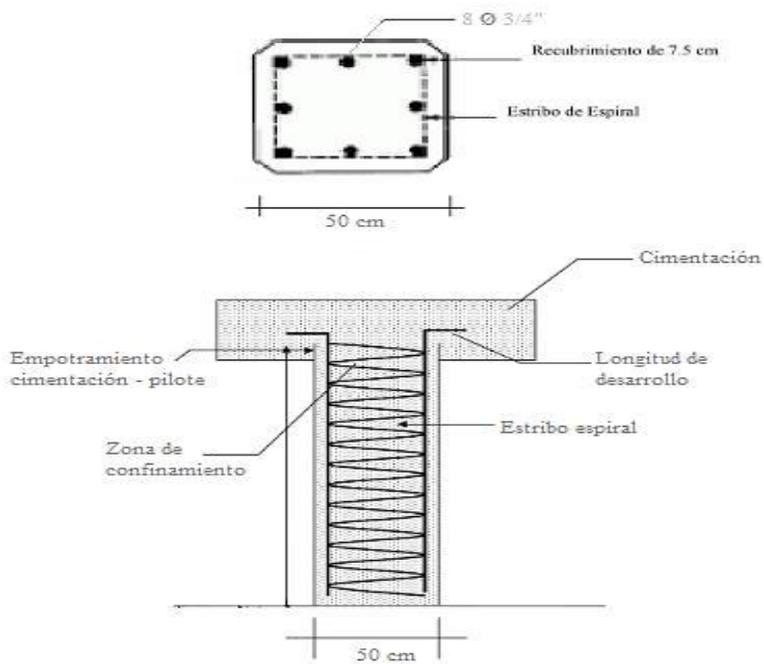
Figura 46*Diagrama – Capacidad de Carga por cada Pilote*

Figura 47*Diagrama Cantidad de Pilotes - Planta*

Número de pilotes requerido = 16 unidades

- Acero de refuerzo en pilotes

Figura 48*Distribución de Acero en Pilotes*

- Asentamiento máximo actuante:

Tabla 14

Cuadro de Resumen de Asentamientos – Platea de Cimentación con Pilotes

Asentamientos máximos	Actuante	Permisible	Resultado
Asentamiento uniforme	1.68 mm	50 mm	Conforme
Asentamiento diferencial	0.17 mm	13 mm	Conforme

- Presupuesto
Se calcula el costo directo de construcción.

Tabla 15

Presupuesto - Platea de Cimentación con Pilotes

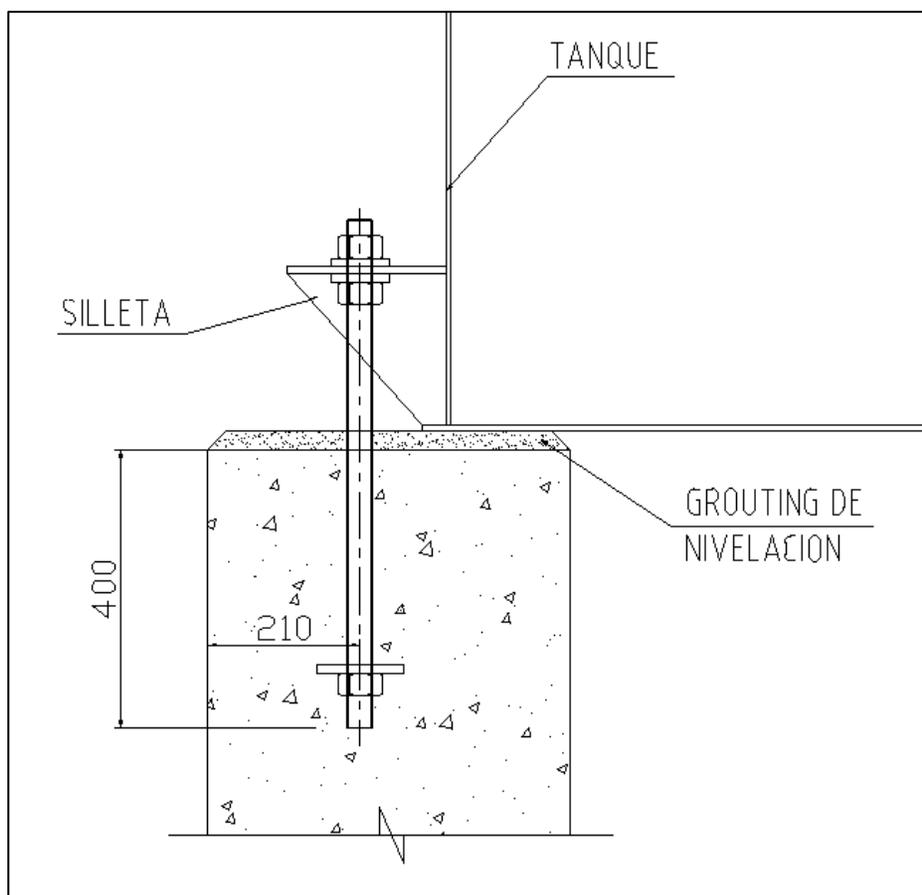
Partidas	Und.	Cant.	P.U	TOTAL (S/.)
Movimiento de tierra				
Excavación mat. Suelto	m3	33.2	8.95	297.0
Eliminación material excedente	m3	40.0	29.75	1,190.00
Pilotes "in situ"				
Transporte, puesta en obra y retirada de equipo	Glb.	1.0	20,000.0	20,000.0
Pilote de concreto armado	ml	144.0	580.0	83,520.0
Descabezado de pilotes	Und.	16.0	45.0	720.0
Obras de concreto				
Concreto f'c = 280 Kg/cm ²	m3	30.0	332.9	9,987.0
Acero de refuerzo fy= 4200 Kg/cm ²	Kg	3000.0	4.3	12,900.0
Encofrado y desencofrado normal	m2	40.0	54.6	2,184.0
COSTO TOTAL DIRECTO				S/130,800.0

2.4.6. Diseño pernos de anclaje

El tanque metálico estará mecánicamente anclado a la cimentación con 8 pernos de $\varnothing 1 \frac{1}{4}$ ". El diseño fue realizado en una hoja de cálculo (Ver Anexo 05), obteniendo el siguiente esquema:

Figura 49

Esquema - Perno de Anclaje



III. Aportes destacables a la empresa

Los aportes más destacables que brinde a la empresa fueron los siguientes:

- Realizar los diseños estructurales de las cimentaciones con las últimas versiones de las normas API 650 ed. 2018 y ACI 318-14.
- Participación en la mejora de las hojas de cálculos para diseñar las cimentaciones convencionales tipo anillo, para tanques metálicos vertical.
- Tener la capacidad de realizar diseños nuevos tipo platea de cimentación con software especializado SAP2000.
- Participación en la mejora de hoja de cálculo para el análisis sísmico en tanques metálicos vertical, con procedimiento API 650.
- Comunicación con el líder de área sobre la importancia de buscar soluciones para suelos que no son recomendados para cimentar, de acuerdo con la Norma E.050 del RNE.
- Comunicación constante con las otras disciplinas para evitar interferencias en los planos.

IV. Conclusiones

De acuerdo con lo desarrollado en el presente Informe, se alcanza las siguientes conclusiones:

- Existen varios tipos de cimentación para tanques superficiales API 650, la selección de ellos depende de las condiciones del suelo y la que brinde mejores facilidades durante construcción.
- Del análisis realizado para las alternativas de cimentaciones se puede obtener los siguientes resultados:

Tabla 16

Tabla de resultados - Cimentaciones

TIPO DE CIMENTACIÓN	Δ UNIFORME MÁXIMO	Δ DIFERENCIAL MÁXIMO	COSTO CONSTR.
Platea con mejoramiento de suelo	5.2 mm	0.52 mm	S/89,950.00
Anillo + mejoramiento suelo	36.5 mm	10.5 mm	S/81,460.00
Platea con pilotes	1.68 mm	0.17 mm	S/130,800.00

Asentamiento uniforme máximo permitido = 50mm

Asentamiento diferencial máximo permitido = 13mm cada 10 m.

- Los asentamientos de las cimentaciones analizadas se encuentran dentro del límite tolerable (Asentamiento Uniforme \leq 50mm, Asentamiento diferencial \leq 13mm por cada 10.0m). El anillo de cimentación con mejoramiento de suelo resulta ser el de menor costo de construcción; sin embargo, presenta asentamientos cerca a los límites tolerables. Es decir,

su comportamiento podría ser incierto. La Platea de cimentación con pilotes tiene un buen comportamiento frente a los asentamientos; sin embargo, resulta tener el mayor costo de construcción. Esta alternativa de cimentación requerirá equipos especiales para la construcción de pilotes.

- La cimentación seleccionada (Platea) para el proyecto “Planta de almacenamiento de combustible para aeronaves” resulta aceptable, porque tiene un buen comportamiento para minimizar los asentamientos diferenciales ($0.52\text{mm} < 13\text{mm}$) y tiene un costo de construcción aceptable. La platea con mejoramiento de suelo puede resultar de mayor facilidad de construcción por no requerir equipos especiales en comparación con la construcción de pilotes.
- Actualmente no se cuenta con normativas peruanas para el diseño de estructuras que contienen líquidos, cuyo comportamiento durante un sismo/viento generan sobre-esfuerzos a la cimentación. Para estos diseños se suele usar normatividad internacional conocidas y realizar interpretaciones para ajustar a los parámetros sísmicos/viento peruanos.

V. Recomendaciones

- Cuando se encuentren suelos expansivos de poca profundidad se recomienda el retiro total del material y su reemplazo con relleno controlado compactado o la construcción de pilotes de concreto armado.
- El tipo de suelo para relleno deberá ser seleccionado por el ingeniero geotécnico, según disponibilidad de la zona y compactado al 95% de la máxima densidad. Para realizar un mejoramiento de suelo, durante la etapa de construcción, se debe compactar por capas máximas de 30 cm para asegurar la densificación del suelo.
- De requerir una cimentación de menor costo, se puede optar por la cimentación tipo anillo previo a un análisis más riguroso de los asentamientos diferenciales. Consultar las necesidades del cliente, ya que de esto depende definir y diseñar la mejor opción que se ajuste técnica y económicamente.
- Para una larga vida útil de un tanque de almacenamiento estándar API 650 es de vital importancia darle el mantenimiento necesario periódicamente, para ello existe la norma API 653 donde exige los parámetros necesarios de mantenimiento y reparación. La Norma API 650 es constantemente actualizada, se recomienda diseñar con las últimas versiones.
- Lo más recomendable sería contar con normativas peruanas para el diseño de tanques de almacenamiento de líquidos, a fin de obtener parámetros adecuados y evitar posibles interpretaciones erróneas de normativas internacionales.

VI. Referencias

- Acosta, L., Desdín, S., Cano, Y. y Rivas, E. (2017). *Monitoreo geodésico de los asentamientos en tanques verticales de almacenamiento de combustibles*. Minería y Geología.
<https://www.redalyc.org/journal/2235/223551846002/html/>
- Alberto, J. (2012). *Diseño de un tanque de almacenamiento atmosférico de 20 000 bls de capacidad* [Tesis de pregrado, Universidad Veracruzana]. Red de Repositorios Latinoamericanos. <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/679449>
- American Petroleum International (2018). *Welded Tanks for Oil Storage*. (13^{era} ed.). API Standard 650.
- Cedeño, M. (2009). *Diseño Sismo resistente de tanques de acero soldados, para almacenamiento atmosférico y a baja presión de líquidos* [Tesis de maestría, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital Institucional de la Escuela Politécnica.
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8490>
- Coello, C. (2017). *Análisis y mejoramiento de suelo arcilloso arenoso suelto*. [Tesis de maestría, Universidad de Especialidades Espíritu Santo]. Repositorio digital de la Universidad de Especialidades Espíritu Santo UEES.
<http://repositorio.uees.edu.ec/123456789/1941>
- Comité ACI 318 (2014). *Requisitos de Reglamento para concreto estructural (ACI 318SUS-14)*. American Concrete Institute.
- Das, B. y González, S. R. C. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. (4^{ta} ed.). Cengage Learning.
- De León J. (2010). *Guía para el diseño estructural de cimientos y anclajes de tanques de almacenamiento tipo API 650*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de

- Guatemala]. Biblioteca digital Universidad de San Carlos de Guatemala.
http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3131_C.pdf
- Decreto Supremo N° 052-93-EM. Reglamento de Seguridad para almacenamiento de hidrocarburos (18 de noviembre de 1993). Diario Oficial El Peruano.
- Gonza, V. (2014). *Diseño y cálculo de un tanque para almacenamiento de petróleo para 3000 BBLs* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Dirección de Bibliotecas y Recursos para el aprendizaje y la investigación.
<http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/3711>
- Hurtado, J. (1993). *Cimentaciones Profundas*. Jorgealvahurtado
<https://www.jorgealvahurtado.com/files/DisenoCimentacionesAlva.pdf>
- Hurtado, J. (2 de mayo de 2018). *Estudios Geotécnicos en la ciudad de Pucallpa*. Jorgealvahurtado. <https://jorgealvahurtado.com/files/EstudiosGeotecnicosPucallpa.pdf>
- Myers, P. (1997). *Aboveground storage tanks*. McGraw-Hill Education.
- Resolución Ministerial N° 355-2018-Vivienda (27 de octubre de 2018). Norma Técnica E.030 - Diseño Sismorresistente. Reglamento Nacional de Edificaciones. Diario Oficial El Peruano.
- Resolución Ministerial N° 406-2018-Vivienda (30 de noviembre de 2018). Norma Técnica E.050 - Suelos y cimentaciones. Reglamento Nacional de Edificaciones. Diario Oficial El Peruano.
- Sánchez, D. y Reyes, E. (Febrero 2005). Comportamiento Sísmico de Tanques de Almacenamiento de Líquidos de gran capacidad ubicados en Zonas Sísmicas (1a. Parte). *Reporte del proyecto de Investigación SIP-20060825, IPN. México*.
http://sappi.ipn.mx/cgpi/archivos_anexo/20050505_2322.pdf

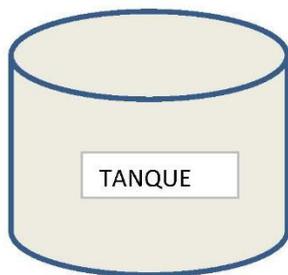
VII. Anexos

Anexo A: Análisis Sísmico de Tanque Metálico Vertical

ANÁLISIS SÍSMICO DE TANQUE METÁLICO VERTICAL - PROCEDIMIENTO API 650

1) DATOS

1.1 Características del tanque



$$HT = 3.9 \text{ m}$$

$$D = 6.50 \text{ m}$$

HT =	3.900 m	altura total
H =	3.400 m	altura máxima líquido
D =	6.500 m	diámetro

1.2 Características del contenido

$\hat{\rho}_a =$	9806.65 N/m ³	densidad del agua-test
G =	0.775	Gravedad específica del contenido
$\hat{\rho}_l =$	7600.15 N/m ³	densidad del contenido

1.3 Características del Tanque

Ws =	49,062.46 N	peso paredes del tanque
Wr =	16,721.15 N	peso del techo
Wf =	20,442.96 N	peso del fondo
fy =	250.00 Mpa	Esfuerzo fluencia de la plancha
Wrs =	16,721.15 N	Peso de techo actuando en las paredes
Hrcg =	0.25 m	altura desde top_shell al centro de gravedad techo
$\mu =$	0.40	coeficiente de fricción

2) PESO Y ALTURA EQUIVALENTE

2.1 Centro de gravedad

ALTURA CENTRO DE GRAVEDAD (CUERPO):

$$X_s = 1.700 \text{ m}$$

ALTURA CENTRO DE GRAVEDAD (TECHO):

$$X_r = 4.150 \text{ m}$$

2.2 Pesos equivalente

$$H/D = 0.523$$

Peso total del líquido:

$$W = \rho d^2 H g_L / 4 = 857,467.94 \text{ N}$$

$$D/H = 1.91$$

$$W_i / W = \frac{\tanh(0,866 (D / H))}{0,866 (D / H)} = 0.562$$

$$W_c / W = 0,23 (d / H) \tanh(3,67 / (d / H)) = 0.421$$

$$W_i = 481,472.2 \text{ N}$$

$$W_c = 361,157.5 \text{ N}$$

2.3 Alturas equivalente

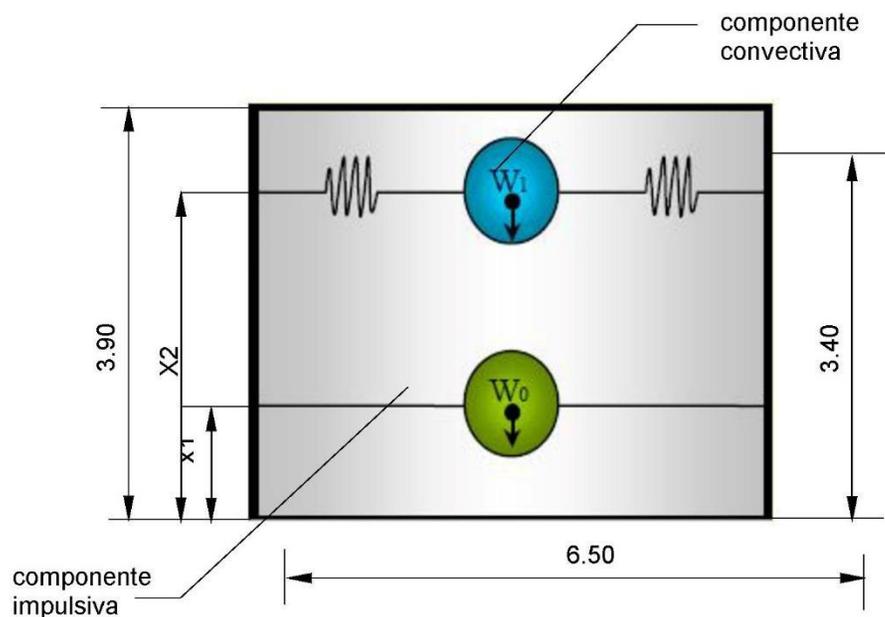
Centro de acción para Momento de Volteo en el anillo

$$X_i / H_L = 0.375$$

$$X_c / H_L = 1 - \frac{\cosh(3,67 / (D / H)) - 1}{(3,67 / (D / H)) \sinh(3,67 / (D / H))} = 0.612$$

$$X_i = 1.2750 \text{ m}$$

$$X_c = 2.0819 \text{ m}$$



Centro de acción para Momento de Volteo en losa

$$X_{is}/H = 0.375*(1.0+1.33*((0.866D/H)/\tanh(0.866D/H)-1.0)) = 0.7655$$

$$X_{cs}/H = 1 - \frac{\cosh(3.67/(D/H)) - 1.937}{(3.67/(D/H)) \sinh(3.67/(D/H))} = 0.7586$$

$$X_{is} = 2.603 \quad \text{m}$$

$$X_{cs} = 2.579 \quad \text{m}$$

3) ANÁLISIS SÍSMICO

3.1. Parámetros sísmicos

Para zonas fuera de EE.UU, se utilizará el método indicado en el ítem E.4.3 del API-650 "SITES NOT DEFINED BY ASCE 7 METHODS"

a. Aceleración horizontal máxima del terreno

Probabilidad de 10% ser Excedido en 50 años

Sp = Aceleración máxima del suelo

Sp= Z = Z2 El Sp se considera como el factor de zona "Z".

Sp = 0.25

b. Factor de Importancia (I)

Seleccionar el factor de importancia del Tanque en función del grupo sísmico (SUG).

Grupo Sísmico = Group I

Factor de Importancia (I) = 1.00

c. Clasificación de suelo

Pefil del Suelo = S3 CLASE E

Periodo de Suelo Tp= 1.00 s

Factor de Suelo S = 1.40

Clasificación de suelo

Perfil de Suelo	Velocidad propagación de ondas (Vs)	Site Class
		API 650
So	> 1500m/s	A
S1	760 m/s a 1500 m/s	B
S1	500 m/s a 760 m/s	C
S2	360 m/s a 500 m/s	C
S2	180 m/s a 360 m/s	D
S3	< 180 m/s	E
S4	Se requiere efectuar un estudio específico de sitio	F

3.2 Parámetros de respuesta del Suelo

Ss = Parámetro de aceleración espectral, periodo = 0.2 seg, 5% amortiguamiento, Ss = 2.5Sp

Fa = Coeficiente de aceleración del sitio, periodo = 0.2 seg

$$Ss = 2.5Sp = 0.625 \quad Ss = 0.625 \quad Fa = 1.45$$

S1 = Parámetro de aceleración espectral, periodo = 1.0 seg, 5% amortiguamiento, S1 = 1.25Sp

Fv = Coeficiente de velocidad del sitio, periodo = 1.0 seg

$$S1 = 1.25Sp = 0.313 \quad S1 = 0.313 \quad Fv = 2.75$$

So = Parámetro de aceleración espectral, periodo = 0.0 seg, 5% amortiguamiento, So = 0.4Ss

$$So = 0.4Ss = 0.25 \quad (\text{Equivale a } Sp)$$

SD1 = Parámetro de respuesta de aceleración espectral, periodo = 1.0 seg. SDS = Q*Fv*S1

SDs = Parámetro de respuesta de aceleración espectral, periodo = 0.2 seg. SDS = Q*Fa*Ss

Q = 1. Factor de escala para aceleraciones espectrales

$$SD1 = 0.859 \quad SDS = 0.91$$

$$Ts = SD1/SDs = Fv*S1/Fa*Ss = 0.95 \text{ seg}$$

$$TL = 4.0 \text{ seg}$$

3.3 Periodos de Vibración

a) Modo impulsivo

Ti = periodo natural de vibración modo impulsivo

$$Ti = 0.128 \text{ seg}$$

b) Modo convectivo (Sloshing)

Ks = coeficiente del periodo convectivo

$$Ks = \frac{0.578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3.68H}{D}\right)}}$$

$$Ks = 0.5904$$

Tc = periodo natural de vibración modo convectivo

$$Tc = 1.8 * Ks * (D)^{1/2}$$

$$Tc = 2.7096 \text{ seg}$$

3.4 Factor de Reducción

Sistema de anclaje	Rwi (impulsivo)	Rwc (convectivo)
Autoanclado	3.5	2
Mecánicamente anclado	4	2

El tanque se encuentra: Mecánicamente anclado

Rwi=	4
Rwc=	2

3.5 Coeficientes de aceleración espectral

a) Coeficiente de aceleración para el modo impulsivo (A_i)

$$A_i = SDS * (I/R_{wi}) = 2.5 * Q * F_a * S_o (I/R_{wi})$$

$$A_i \geq 0.007$$

Para $S1 \geq 0.6$:

$$A_i \geq 0.5 S1 * (I/R_{wi}) = 0.625 S_p * (I/R_{wi})$$

$$A_i = 0.227 \quad g$$

b) Coeficiente de aceleración para el modo convectivo (A_c)

Cuando $T_c \leq T_L$

$$A_c = K * SD1 * (1/T_c) * (I/R_{wc}) = 2.5 * K * Q * F_a * S_o * (T_s/T_c) * (I/R_{wc}) \leq A_i$$

Cuando $T_c > T_L$

$$A_c = K * SD1 * (T_L/T_c^2) * (I/R_{wc}) = 2.5 * K * Q * F_a * S_o * (T_s * T_L/T_c^2) * (I/R_{wc}) \leq A_i$$

$$A_c = 0.2266 \quad g \leq A_i$$

c) Coeficiente de aceleración vertical (A_v)

$$A_v = 2/3 * 0.7 * SDS$$

$$A_v = 0.423 \quad g$$

3.6 Fuerza cortante en la base del tanque

a) Cortante impulsivo:

$$V_i = A_i (W_i + W_s + W_r + W_f)$$

$$V_i = 128,640.5 \quad N$$

b) Cortante convectivo:

$$V_c = A_c * W_c$$

$$V_c = 81,838.3 \quad N$$

c) Cortante Basal máximo probable:

$$V = (V_i^2 + V_c^2)^{1/2}$$

$$V = 152,466.1 \quad N$$

3.7 Momento de volcamiento en la base del tanque

a) Momento impulsivo:

$$M_i = A_i (W_i * X_i + W_s * X_s + W_r * X_r)$$

$$M_i = 173,729 \quad N\cdot m$$

b) Momento convectivo:

$$M_c = A_c * W_c * X_c$$

$$M_c = 170,381 \quad N\cdot m$$

c) Momento de volcamiento máximo probable en el anillo (M_{rw}):

$$M_{rw} = (M_i^2 + M_c^2)^{1/2}$$

$$M_{rw} = 243,333.73 \quad N\cdot m$$

d) Momento de volcamiento máximo probable en losa (M_s):

$$M_s = (M_{is}^2 + M_{cs}^2)^{1/2}$$

$$M_s = 382,159.89 \quad N\cdot m$$

Anexo B: Análisis por viento

ANÁLISIS POR VIENTO

Generalmente en el Perú, las cargas de viento resultan tener valores menores en relación a las fuerzas sísmicas que implican la gran masa del líquido.

Se utilizará el procedimiento indicado el RNE (Norma E020 - Cargas), para la fuerza lateral por viento:

3.7.4 CARGA EXTERIOR DE VIENTO

La carga exterior (presión o succión) ejercida por el viento se supondrá estática y perpendicular a la superficie sobre la cual se actúa. Se calculará mediante la expresión:

$$P_h = 0,005 C V_h^2$$

donde:

- P_h : presión o succión del viento a una altura h en Kg/m²
- C : factor de forma adimensional indicado en la Tabla 3.7.4
- V_h : velocidad de diseño a la altura h , en Km/h definida en 3.7.3

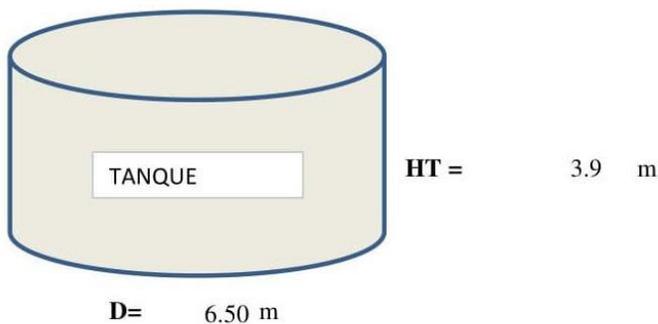
Velocidad máx.	Vh =	75 km/h	
Coficiente de Barlovento		2	
Presión debido al viento	Ph =	56.25 kg/m ²	
Área de contacto	Area =	40.13 m ²	
Fuerza lateral	Fv =	2.257 ton <>	22,133.61 N

Anexo C: Diseño de anillo de cimentación

DISEÑO DE ANILLO DE CIMENTACIÓN - TANQUE METÁLICO VERTICAL

1) Datos

1.1 Características del tanque



HT =	3.900 m	altura total
H =	3.400 m	altura máxima líquido
D =	6.50 m	diámetro nominal

1.2 Características del contenido

$\rho_a =$	9806.65 N/m ³	densidad del agua por prueba hidráulica
G =	0.775	Gravedad específica del combustible
$\rho_l =$	7600.15 N/m ³	densidad del combustible

1.3 Características de los materiales

$f_c =$	27.46 Mpa	resistencia del concreto
$f_y =$	420.00 Mpa	resistencia del acero
$\sigma =$	1.35 Kg/cm ²	presión admisible del suelo
$\rho_s =$	1.86 gr/cm ³	densidad del suelo
$\phi =$	17.00 °	Angulo de Fricción interna del suelo relleno
Df =	1.00 m	Profundidad de desplante
Ko =	0.71	coeficiente presión suelo de relleno
$\rho_c \text{ arm} =$	23,535.72 N/m ³	densidad del concreto
$\sigma =$	0.132 Mpa	presión admisible ultima del suelo
$\rho_s =$	18,240.18 N/m ³	densidad del suelo

1.4 Resultados del análisis sísmico

Ws =	49,062.46 N	peso paredes del tanque
Wr =	16,721.15 N	peso del techo
Wf =	20,442.96 N	peso del fondo
Mrw =	243,333.73 N-m	momento de volteo máximo probable anillo
wt =	3,221.47 N/m	peso de paredes y techo por longitud de tanque
Av =	0.423	Aceleración sísmica vertical
N	8.00	Número de pernos de anclaje

2) **Dimensiones preliminar del anillo**

Sí el ancho es mayor a 460 considerar una zapata
 $t = 0.50$ m ancho anillo
 $h = 0.90$ m alto anillo

3) **Fuerzas actuantes en el anillo**

$$E_R = \gamma_s \times K_o \times \frac{h^2}{2} = 5,227.44 \text{ N/m} \quad \text{Empuje del relleno}$$

$$S_c = \gamma \times K_o \times H \times h = 21,234.76 \text{ N/m} \quad \text{Empuje por sobrecarga del líquido}$$

4) **Espesor mínimo del anillo**

$$t_{\min} = \sqrt{\frac{M_u}{\phi \times \rho \times f_y \times (1 - 0.59 \omega) \times b}} \quad \text{ancho mínimo para el anillo}$$

$$M_u = 1.5 \times \left((E_R \times \frac{1}{3} \times h) + (S_c \times \frac{1}{2} \times h) \right) = 16,685.81 \text{ N-m}$$

$$t_{\min} = 0.130 \text{ m} < 0.50 \text{ m} \quad \text{Conforme}$$

5) **Fuerza de tracción en el anillo**

$$F = E_R + S_c = 26,462.20 \text{ N/m}$$

$$T = \frac{F \times D}{2}$$

$$T = 86002.2 \text{ N}$$

6) **Cálculo del acero**

6.1 Acero longitudinal

Combinación de carga 1.4 veces la carga muerta

$$A_s = \frac{T_u}{\phi f_y} \quad (\text{cm}^2)$$

$$A_s = \frac{1.40 \times T}{0.9 \times F_y}$$

$$A_s = 3.19 \text{ (cm}^2\text{)}$$

Acero mínimo

$$A = 0.0025 \times b \times h$$

$$A_{s_{\min_1}} = 11.25 \text{ (cm}^2\text{)}$$

Se requiere:

$$A_s = 11.25 \text{ (cm}^2\text{)}$$

El acero que se dispondrá será: **8** Φ **5/8"**
 En cada cara del anillo 4 Φ **5/8"**

6.2 Acero transversal

$$A_{st} = (0.0012 \times b \times 100) / 2$$

$$A_{st} = 3.00 \text{ (cm}^2\text{)/m}$$

Estribos (mínimo) **1/2"** @ **30** cm

7) **Esfuerzos verticales producido por cargas dinámicas**

7.1 Esfuerzo vertical sobre un anillo de cimentación

$$Pf = [wt(1+0.4Av) + 1.273Mrw/D^2]$$

$$Pf = 11098.23 \text{ N/m}$$

7.2 Esfuerzo vertical por levante

$$U = [4Mrw/D - W(1-0.4Av)]$$

$$U = 103,286.57 \text{ N}$$

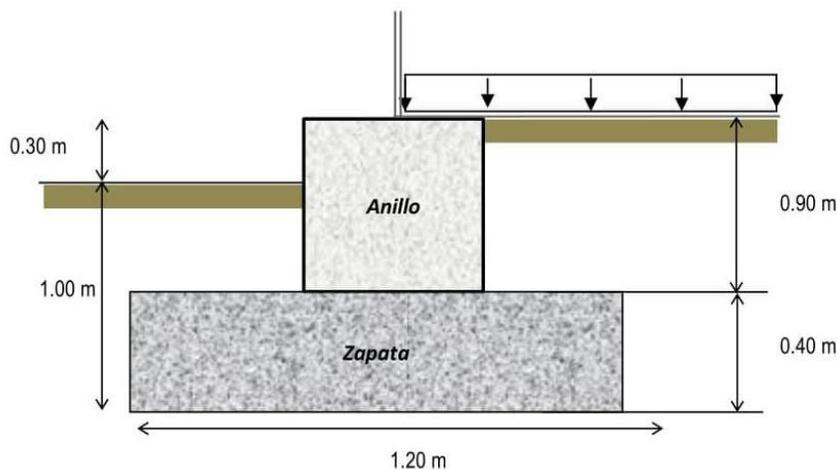
$$bt' = 5,058.02 \text{ N/m}$$

8) **Dimensiones de la cimentación****Anillo**

t	=	0.50	m
h	=	0.90	m
ht	=	0.30	m

Zapata 1

Ancho	=	1.20	m
Alto	=	0.40	m

9) **Resistencia al volteo por Sismo**

Peso del anillo	Wrw	=	10.59	KN/m
Peso del líquido sobre el anillo	$Wliq'$	=	4.65	KN/m
Peso de la zapata	Wz	=	11.30	KN/m
Peso suelo interior sobre zapata	$W \text{ Suelo Int}$	=	5.75	KN/m
Peso suelo exterior sobre zapata	$W \text{ suelo Ext}$	=	3.83	KN/m
Fuerza de resistencia al volteo	FR	=	36.12	KN/m

$$\text{Factor de seguridad (FS)} = FR / bt' = 7.14 \geq 2 \text{ Conforme}$$

10) **Presión sobre el suelo**

Presión admisible $\sigma_t = 1.35 \text{ Kg/cm}^2$
 Cargas temporales se incrementa 33% $\sigma_t = 1.80 \text{ Kg/cm}^2$

Pesos

wt	=	3.22	KN/m
bt' (levante)	=	5.06	KN/m
Pf (presión)	=	11.10	KN/m
Wliq	=	13.70	KN/m
W concreto	=	21.89	KN/m
W suelo interior	=	5.75	KN/m
W suelo exterior	=	3.83	KN/m
Wprueba hidráulica	=	22.95	KN/m

Condición estática

Tanque con combustible

Presión suelo = $\frac{48.38}{1.20} = 0.04 \text{ MPa} = 0.41 \text{ Kg/cm}^2 < 1.35 \text{ Kg/cm}^2$

Tanque con agua

Presión Suelo = $\frac{57.63}{1.20} = 0.05 \text{ MPa} = 0.49 \text{ Kg/cm}^2 < 1.35 \text{ Kg/cm}^2$

Condición sísmica

Tanque con combustibles durante el sismo

Presión suelo (+) = $\frac{59.48}{1.20} = 0.05 \text{ MPa} = 0.51 \text{ Kg/cm}^2 < 1.8 \text{ Kg/cm}^2$

Presión suelo (-) = $\frac{43.32}{1.20} = 0.04 \text{ MPa} = 0.37 \text{ Kg/cm}^2 < 1.8 \text{ Kg/cm}^2$

11) **Cálculo de asentamientos**

$$s_i = \frac{qB(1 - \nu^2)}{E_u} I_p$$

u = 0.4 número de poisson
 E = 15 MN/m² Módulo elasticidad del suelo
 Ip = 0.82 Factor de influencia

Asentamiento durante la prueba hidráulica

Δ uniforme = 32.928 mm

Asentamientos debido al Sismo

$\Delta_1 = 34.272 \text{ mm}$
 $\Delta_2 = 24.864 \text{ mm}$
 Δ diferencial = 9.408 mm

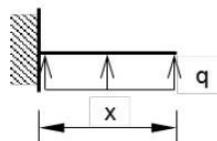
12) **Diseño de zapata**

Refuerzo mínimo a flexión:

$$A_{smin} = 0.0018 * b * h = 7.20 \text{ cm}^2 \quad (\text{Para todo el espesor de la zapata})$$

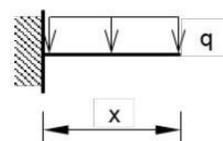
Refuerzo inferior en zapata:

$$\begin{aligned} s \text{ max} &= 5,054.35 && \text{kg/m}^2 \\ q &= 1,862.35 && \text{kg/m}^2 \\ x &= 0.60 && \text{m} \\ M &= 335.22 && \text{kg x m/m} \\ Mu &= 469.31 && \text{kg x m/m} \\ d &= 0.40 && \text{m} \\ A_{s \text{ inf}} &= 2.81 && \text{cm}^2 \\ \text{Utilizar} &&& \\ A_{s \text{ inf}} &= 7.20 && \text{cm}^2 \\ \text{Usar } \varnothing 5/8'' & @ && 25 \text{ cm} \end{aligned}$$



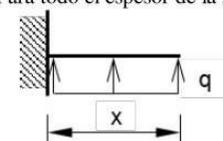
Refuerzo superior en zapata

$$\begin{aligned} q &= 3,192.00 && \text{kg/m}^2 \\ x &= 0.60 && \text{m} \\ M &= 574.56 && \text{kg x m/m} \\ Mu &= 861.84 && \text{kg x m/m} \\ d &= 0.40 && \text{m} \\ A_{s \text{ sup}} &= 5.21 && \text{cm}^2 \\ \text{Utilizar} &&& \\ A_{s \text{ sup}} &= 7.20 && \text{cm}^2 \\ \text{Usar } \varnothing 5/8'' & @ && 25 \text{ cm} \end{aligned}$$



Refuerzo transversal

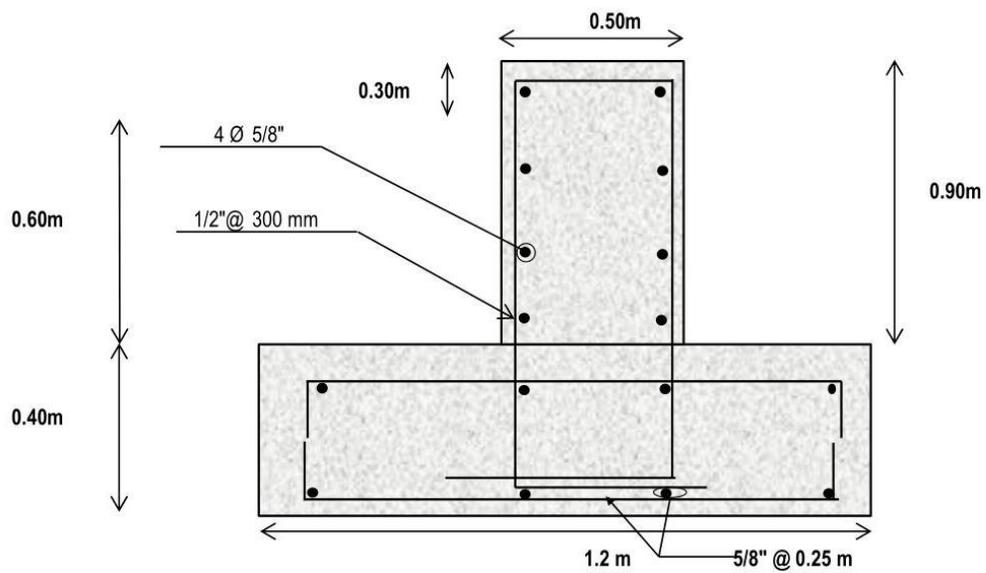
$$\begin{aligned} A_{smin} &= 0.0018 * B * h = 8.64 \text{ cm}^2/\text{m} \quad (\text{Para todo el espesor de la zapata}) \\ s \text{ max} &= 5,054.35 && \text{kg/m}^2 \\ q &= 1,862.35 && \text{kg/m}^2 \\ x &= 0.60 && \text{m} \\ M &= 335.22 && \text{kg x m/m} \\ Mu &= 469.31 && \text{kg x m/m} \\ d &= 0.33 && \text{m} \\ A_{s \text{ inf}} &= 2.81 && \text{cm}^2 \\ \text{Utilizar} &&& \\ A_{s \text{ inf}} &= 8.64 && \text{cm}^2 \\ \text{Usar } \varnothing 5/8'' & @ && 25 \text{ cm} \end{aligned}$$



Chequeo por corte en zapata

$$\begin{aligned} 0.85 * V_c &= 30,153.23 && \text{kg/m} \\ V &= 638.40 && \text{kg/m} \\ V_u &= 893.76 && \text{kg/m} \quad \text{OK} \end{aligned}$$

11) Esquema de la cimentación



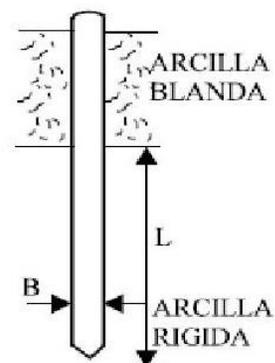
Anexo D: Diseño de pilotes

DISEÑO DE PILOTES

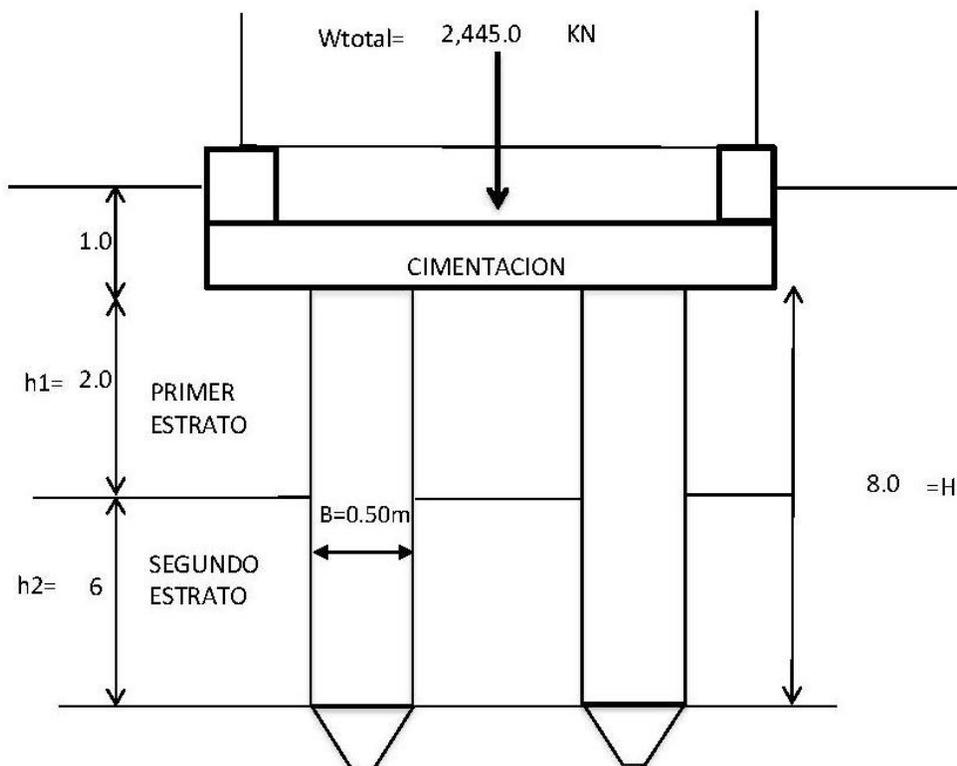
1) Datos

Peso máximo total que soportará los pilotes

Peso del agua =	Wagua =	1268.80 KN
Peso del tanque metálico =	Westr. =	86.22 KN
Peso suelo interior =	Wsuelo =	490.63 KN
Peso de cimentación =	Wcim=	599.35 KN
Peso total =	Wtotal =	2445.00 KN



Peso total sobre los pilotes	Pt (KN) =	2,445.00
Concreto	F'c (MPa)	280
Acero	Fy (MPa)	420
Ancho del pilote	B(m)	0.5
Perímetro de la sección	L(m)	2.00
Area del pilote	Ab(m2)	0.250



2) Factores de capacidad resistente

$\phi=$	Nc	Nq	Ny
0	5.7	1.0	0.0
5	7.5	1.6	0.5
10	9.6	3.7	1.2
15	12.9	4.4	2.5
20	17.7	7.4	5.0
25	25.1	12.7	9.7
30	37.2	22.5	19.7
34	52.5	36.5	35.0
35	57.8	41.4	43.4
40	93.7	81.1	100.4
45	172.3	173.3	297.5
48	258.3	287.9	730.1
50	347.5	415.1	1153.2

3) Cálculo de la resistencia por fricción (Qf)

Solo se considerará para el estrato firme

$$Q_f = Ab.(c.N_c + \gamma D_f N_q)$$

Qf para el segundo estrato:				
Enterramiento		Df	6.0	(m)
Densidad del suelo		$\gamma_{pt}(\text{Tn/m}^3)$	1.86	(Ton/m ³)
Angulo de fricción de suelo		$\phi=$	21	(°)
Diametro permisible del pilote		B	0.5	(m)
Cohesion del suelo		C	2.3	(Ton/m ²)
Factor de capacidad resistente-C		Nc	17.70	
Factor de capacidad resistente-S.Carga		Nq	7.4	
Factor de capacidad resistente-P.suelo		Ny	5.0	
		Qf1 =	30.82	(Ton)

4) Cálculo de la resistencia por punta (Qp)

$$Q_p = c.N_c.A_b$$

$$Q_p = 99.84 \text{ KN}$$

5) Cantidad de pilotes requeridos

Capacidad por punta:	Qp=	99.84 KN
Capacidad por fricción	Qf =	302.38 KN
$Q_u = (Q_p + Q_f)/2.5$	Qu=	160.89 KN
Número de pilotes:	n=W/Qu	16

Qu = Capacidad de carga admisible de un pilote

6) Cálculo de asentamientos por unidad de pilote

$$\Delta = \frac{Q}{L E_s} I_p$$

Asentamiento máximo uniforme

Q = carga del pilote	160.89 KN
L = longitud del pilote	8.0 m
Es = módulo de young del suelo	15 MN/m ²
Ip = factor de influencia	1.25

$$\Delta = 1.68 \text{ mm}$$

Asentamiento durante un sismo

Esfuerzo máx. vertical sobre la cimentación Pf =	11,098.00 N/m
Peso total por esfuerzo vertical =	226.63 KN
Peso fondo =	20.44 KN
Peso total del combustible =	857.45 KN
Peso suelo interior =	490.63 KN
Peso de cimentación =	599.35 KN
Peso total =	2,194.50 KN
Cada pilote soportará	137.16 KN

Esfuerzo máx. por levante b't =

Esfuerzo máx. por levante b't =	5,058.02 N/m
Fueza por levante =	-103.29 KN
Peso estructura =	86.22 KN
Peso total del combustible =	857.45 KN
Peso suelo interior =	490.63 KN
Peso de cimentación =	599.35 KN
Peso total =	1,930.36 KN
Cada pilote soportará	120.65 KN

Asentamiento máximo diferencial

Q 1 = carga del pilote	137.16 KN
Q 2 = carga del pilote	120.6 KN

$$\Delta_1 = 1.43 \text{ mm}$$

$$\Delta_2 = 1.26 \text{ mm}$$

$$\Delta_{\text{máx dif}} = 0.17 \text{ mm}$$

Anexo E: Diseño de pernos de anclaje

DISEÑO PERNOS DE ANCLAJE

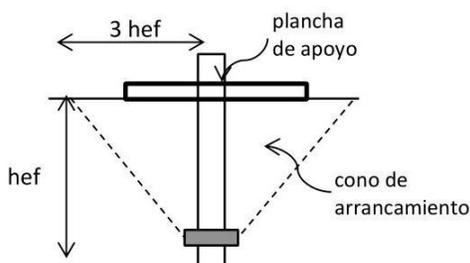
1.- Consideraciones mínimas necesarias

Material recomendado para Pernos de anclaje de acero A36, A307 (Grado B) y A325.

Resistencia del concreto $f'c \geq 210 \text{ Kg/cm}^2$

La separación (**S**) entre pernos no debe ser menor de $6d$. Se recomienda una separación de $3h_{ef}$, para evitar la interferencia entre los conos de arrancamiento por tracción.

Longitud de anclaje (h_{ef}) deberá ser como mínimo $8d$.



2.- Datos

2.1.- Cargas actuantes

$T_{bv} = 12,910.8 \text{ N}$ fuerza sísmica vertical en cada perno

$V_H = 19,058.3 \text{ N}$ fuerza sísmica horizontal

2.2.- Características del perno

$d = 1 \frac{1}{4} \text{ in}$ Diámetro del perno

$n = 1.00$ cantidad de pernos

Acero A307 Gr B $f_{yu} = 0.8 f_y = 200 \text{ MPa}$ Resistencia tracción

Distancia entre pernos

$S_1 = 255.00 \text{ cm} < 300 \text{ cm}$ separación máxima entre pernos

Longitud del perno

$h_{ef} = 40.00 \text{ cm}$

Distancia a los bordes

C1 = 21.00 cm

C2 = 29.00 cm

2.3.- Características del pedestal

$f'c = 27.5 \text{ Mpa}$

$b = 0.50 \text{ m}$

$h = 0.90 \text{ m}$

$\lambda_a = 1.0$ concreto de peso normal

3.- Cargas actuantes

3.1.- Combinaciones de cargas

a.- Para las cargas verticales

$$U_1 = 16,138.53 \text{ N}$$

La máxima Tensión vertical:

U =	16,138.53	N
-----	-----------	---

b.- Para las cargas laterales

$$U_1 = 23,822.83 \text{ N}$$

La máxima fuerza por Corte:

U =	23,822.83	N
-----	-----------	---

3.2.- Resumen de cargas actuantes

$$N_{ua,g} = 16,138.53 \text{ N}$$

Fuerza de tracción mayorada total grupo anclajes

$$V_{ua,g} = 23,822.83 \text{ N}$$

Fuerza cortante mayorada total grupo anclajes

Se deberá verificar que:

Resistencia del acero en tracción

$$\Phi N_{sa}$$

Resistencia al arrancamiento del concreto en tracción

$$\Phi N_{cbg}$$

Resistencia a la extracción por deslizamiento en tracción

$$\Phi N_{pn}$$

Resistencia al desprendimiento lateral del concreto

$$\Phi N_{sbg}$$

$$\geq N_{ua,g}$$

Resistencia del acero en cortante

$$\Phi V_{sa}$$

Resistencia al arrancamiento del concreto por corte

$$\Phi V_{cbg}$$

Resistencia al desprendimiento del concreto por corte

$$\Phi V_{cp}$$

$$\geq V_{ua,g}$$

La interacción de las fuerzas de tracción y cortante deberá satisfacer:

$$N_{ua,g} / \Phi N_n + V_{ua,g} / \Phi V_n \leq 1.2$$

4.- Diseño por tracción

4.1.- Resistencia del acero de un anclaje en tracción

Resistencia nominal de un solo anclaje en tracción N_{sa}

$$N_{sa} = A_{se,N} f_{uta}$$

$$A_{se,N} = 6.252 \text{ cm}^2$$

área transversal efectiva de un anclaje en tracción

$$f_{yu} = 200 \text{ MPa}$$

$$N_{sa} = 125.03 \text{ KN}$$

$$\Phi N_{sa} = 93.77 \text{ KN x anclaje}$$

Se debe cumplir que $\Phi N_{sa} \geq N_{ua,g} / \# \text{pernos}$

93.8 KN	\geq	16.1 KN	Conforme
---------	--------	---------	----------

4.2.- Resistencia al arrancamiento del concreto de un anclaje en tracción

Para un grupo de anclaje

$$N_{cbg} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \Psi_{ec,N} \Psi_{ed,N} \Psi_{c,N} \Psi_{cp,N} N_b$$

El cono de arrancamiento se formará por debajo de la superficie del pedestal.

En consecuencia el plano de falla es toda la sección transversal del pedestal.

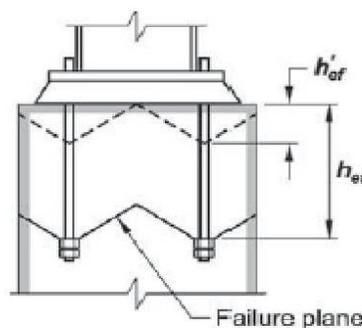
Por lo tanto, profundidad efectiva utilizada en los cálculos se limitan al mayor de:

$$h'_{ef} \begin{cases} C_{a,m\acute{a}x}/1.5 \\ S_{m\acute{a}x}/3 \end{cases}$$

$$C_{a,m\acute{a}x}/1.5 = 19.3 \text{ cm}$$

$$S_{m\acute{a}x}/3 = 85.0 \text{ cm}$$

$$\text{Se obtiene } h'_{ef} = 85.0 \text{ cm}$$



Siendo:

A_{Nc} = es el área proyectada de la superficie de falla de un anclaje

A_{Nco} = es el área máxima proyectada de la superficie de falla de un anclaje

$$A_{Nc} < nA_{Nco} \text{ Conforme}$$

$A_{Nc} =$	4,000.0 cm ²	$\Psi_{ec,N} =$	1.00	$e'_{N} =$	0.0
$A_{Nco} =$	14,400.0 cm ²	$\Psi_{ed,N} =$	0.75		
		$\Psi_{c,N} =$	1.00		
		$\Psi_{cp,N} =$	1.00		

N_b = Resistencia básica al arrancamiento del concreto de un anclaje en tracción

$$N_b = k_c \lambda_a (\sqrt{f_c}) h_{ef}^{1.5} \quad k_c = 10$$

$$N_b = 1299.56 \text{ KN}$$

Reemplazando datos se tiene:

$$N_{cbg} = \boxed{270.5 \text{ KN}}$$

$$\Phi N_{cbg} = \boxed{202.9 \text{ KN}} \text{ Reducción de resistencia del concreto}$$

Verificar que la resistencia de diseño del concreto sea mayor que la resistencia requerid

$$\Phi N_{cbg} > N_{ua,g}$$

$$202.9 \text{ KN} > 16.1 \text{ KN} \text{ Conforme}$$

4.3.- Resistencia a la extracción por deslizamiento en tracción

La resistencia nominal a la extracción por deslizamiento en tracción de un anclaje preinstalado, N_{pn} , no debe exceder:

$$N_{pn} = \Psi_{c,p} N_p$$

$\Psi_{c,p}$: Factor de modificación resistencia nominal para concreto fisurado

N_p : Resistencia a la extracción por deslizamiento

$$\Psi_{c,p} = 1$$

$$N_p = 8A_{b_{rg}} f_c$$

$A_{b_{rg}}$: área neta de apoyo cabezal del anclaje, o barra corrugada con cabeza

$$N_p = 254.0 \text{ KN}$$

$$\Phi N_p = 190.5 \text{ KN}$$

Se debe cumplir que: $\Phi N_p > N_{ua,g} / \# \text{pernos}$

$$190.5 \text{ KN} > 16.1 \text{ KN} \quad \text{Conforme}$$

4.5.- Resistencia al desprendimiento lateral del concreto en tracción

Se deberá verificar la resistencia nominal al desprendimiento lateral si se cumple que:

$$(a) h_{ef} > 2.5c_{a1} = 40.00 \text{ cm} > 52.50 \text{ cm} \quad \text{Conforme}$$

$$(b) s < 6c_{a1} = 255.00 \text{ cm} < 126.00 \text{ cm} \quad \text{Conforme}$$

No es necesario verificar la falla por desprendimiento

Sección de pedestal adecuada

5.- Diseño por cortante

5.1.- Resistencia del acero por cortante

Resistencia nominal de un anclaje en cortante, V_{sa}

$$V_{sa} = 0.6A_{se,v} f_{uta}$$

$$A_{se,v} = 6.252 \text{ cm}^2 \quad \text{área transversal efectiva de un anclaje a cortante}$$

$$f_{yu} = 200 \text{ MPa}$$

$$V_{sa} = 75.02 \text{ KN}$$

Cuando los anclajes se usan con platinas de apoyo inyectadas con mortero, la resistencia nominal V_{sa} debe multiplicarse por un factor igual a 0.80

$$0.8V_{sa} = 60.02 \text{ KN}$$

Factor de reducción de resistencia para anclajes dúctiles ($\Phi=0.65$)

$$\Phi 0.8V_{sa} = 39.01 \text{ KN}$$

Verifique que la resistencia del diseño sea mayor que la fuerza requerida asumiendo que V_{ua} se aplica a los pernos posteriores:

$$\Phi V_{sa} \geq V_{ua} / \# \text{pernos}$$

$$\boxed{39.0 \text{ KN}} \geq \boxed{23.8 \text{ KN}} \quad \text{Conforme}$$

5.2.- Resistencia al arrancamiento del concreto de anclaje a cortante

Para una fuerza cortante perpendicular al borde :

$$V_{cbg} = \frac{A_{vc}}{A_{vco}} \Psi_{ec,v} \Psi_{ed,v} \Psi_{c,v} \Psi_{h,v} V_b$$

Siendo:

A_{vc} = es el área proyectada de la superficie de falla sobre un lado del elemento

A_{vco} = es el área proyectada de la superficie de falla de un anclaje

$c_1 =$	21.00 cm	$\Psi_{ec,v} =$	1.00	$e'_v =$	0.0
$c_2 =$	29.00 cm	$\Psi_{ed,v} =$	0.98		
$A_{vc} =$	1,323.0 cm ²	$\Psi_{c,v} =$	1.2	anclaje con refuerzo	
$A_{vco} =$	1,984.5 cm ²	$\Psi_{h,v} =$	1.00		

V_b = Resistencia básica al arrancamiento por cortante del concreto de un anclaje

Debe ser menor de:

$$V_b = 0.6(l_e/d_a)^{0.2} (\sqrt{d_a}) \lambda_a (\sqrt{f_c}) (c_{al})^{1.5}$$

$$V_b = 3.7 \lambda_a (\sqrt{f_c}) (c_{al})^{1.5}$$

$$l_e = h_{ef} = 40.00 \text{ cm} < 8 d_a = 25.40 \text{ cm}$$

$$l_e = \boxed{25.40 \text{ cm}}$$

Se obtiene:

$$V_{b1} = 81.78 \text{ KN}$$

$$V_{b2} = 59.05 \text{ KN}$$



$$V_b = \boxed{59.0 \text{ KN}}$$

Reemplazando datos se tiene:

$$V_{cbg} = \boxed{46.1 \text{ KN}}$$

$$\Phi V_{cbg} = \boxed{34.6 \text{ KN}} \quad \text{Reducción de resistencia del concreto}$$

(i) Verificar que la resistencia de diseño del concreto sea mayor que la resistencia requerida

$$\Phi V_{cbg} > V_{ua,g}$$

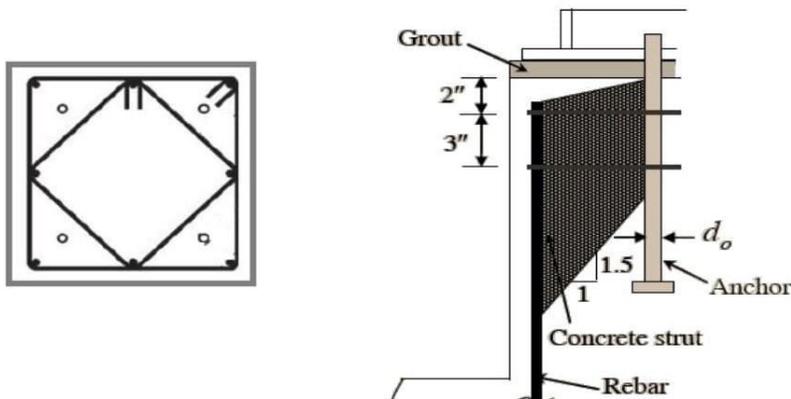
$$34.6 \text{ KN} > 23.8 \text{ KN} \quad \text{Conforme}$$

(ii) Diseño de refuerzo de anclaje

Cuando se coloquen pernos de anclaje en la parte superior de columnas o pedestales, los pernos deben estar circundados por refuerzo transversal que también rodee al menos cuatro barras verticales dentro de la columna o pedestal. El refuerzo transversal debe distribuirse dentro de los 10cm superiores de la columna o pedestal y debe consistir en al menos dos barras $\phi 1/2"$ o tres barras $\phi 3/8"$.

Un estribo que confine las barras longitudinales.

Colocar 2 estribos $\phi 1/2"$ o 3 estribos $\phi 3/8"$, distribuidas dentro de los 10 cm superiores del pedestal.



5.3.- Resistencia al desprendimiento lateral del concreto por el anclaje sometido a cortante

La resistencia nominal al desprendimiento por cabeceo del anclaje causado por cortante, V_{cpg} , no debe exceder:

$$V_{cpg} = k_{cp} N_{cpg}$$

$$A_{Nc} = 4,000.0 \text{ cm}^2$$

$$A_{Nco} = 14,400.0 \text{ cm}^2$$

$$N_{cpg} = 270.53 \text{ KN}$$

$$V_{cpg} = \boxed{541.1 \text{ KN}}$$

$$\Phi V_{cpg} = \boxed{405.8 \text{ KN}}$$

(i) Verificar que la resistencia de diseño del concreto sea mayor que la resistencia requerida

$$\Phi V_{cbg} > V_{ua,g}$$

$$405.8 \text{ KN} > 23.8 \text{ KN} \quad \text{Conforme}$$

6.- Interacción de las fuerzas de tracción y cortante

Se debe verificar que:

a.- Si $V_{ua}/\Phi V_n \leq 0.2$

$$V_{ua}/\#pernos = 23.82 \text{ KN}$$

$$\Phi V_n = \boxed{39.01 \text{ KN}}$$

$$V_{ua,g}/\Phi V_n = 0.61 > 0.2 \quad \text{no se permite usar la resistencia total por tracción } \Phi N_n \geq N_{ua}$$

$$\text{b.- Si } N_{ua,g}/\Phi N_n \leq 0.2$$

$$N_{ua,g}/\#\text{pernos} = 16.14 \text{ KN}$$

$$\Phi N_n = \boxed{93.77} \text{ KN}$$

$$N_{ua,g}/\Phi N_n = 0.17 \leq 0.2 \quad \text{entonces se permite usar la resistencia total en cortante } \Phi V_n \geq V_{ua}$$

La interacción de las fuerzas de tracción y cortante deberá satisfacer:

$$N_{ua,g}/\Phi N_n + V_{ua,g}/\Phi V_n \leq 1.2$$

$$0.78 \leq 1.2$$

Conforme

7.- Esquema de perno de anclaje

