



Solución geotécnica para el suelo de cimentación de las 7 torres de la villa panamericana

Geotechnical solution for the foundation soil of the 7 towers of the villa panamericana

Marco Antonio Hernández Aguilar, Ronald Saúl Vega López

Facultad de Ingeniería Universidad Ricardo Palma.

RECIBIDO: 31 de enero del 2023

ACEPTADO: 03 de junio del 2023

RESUMEN

El presente informe geotécnico ofrece un análisis exhaustivo de la solución geotécnica implementada para las bases de cimentación de las 7 torres en el complejo de la Villa Panamericana. Estas torres, que constan de tres de 19 pisos y cuatro de 20 pisos, fueron construidas como parte del proyecto de los Juegos Panamericanos 2019, en el distrito de Villa el Salvador en Lima, Perú. Cabe destacar, que este proyecto presenta desafíos estructurales de magnitudes sin precedentes en este tipo de depósitos transportados en el país, debido a las características de los suelos de origen eólico. Para realizar el análisis, se llevó a cabo una colaboración investigativa entre varias empresas especializadas en geotecnia. Se utilizaron diversas técnicas de exploración de campo para obtener información precisa sobre las características y el comportamiento del suelo de apoyo. Los resultados indican la presencia de suelos granulares del tipo arenas finas limpias pobremente gradadas poco húmedas con poca cantidad de finos, cuya consistencia, de estos suelos granulares del tipo SP, varían desde sueltos superficialmente, hasta medianamente densa y densa a mayor profundidad, sin la presencia de niveles freáticos. Se evaluaron diferentes alternativas para solucionar los problemas en el suelo de cimentación, y finalmente, se decidió reemplazar el suelo inapropiado con un relleno de concreto hidráulico hasta una profundidad de 3 metros, donde se apoya la platea de cimentación rígida de espesor 1m. Esta solución innovadora, fue aplicada debido a la magnitud de la estructura a construir, las restricciones de tiempo y las características del suelo.

Palabras clave: Villa panamericana, juegos panamericanos Lima 2019, solución geotécnica, depósitos eólicos, concreto fluido.

Como citar

M. A. Hernández Aguilar y R. S. Vega López, «Solución geotécnica para el suelo de cimentación de las 7 torres de la villa panamericana», *Perfiles Ingeniería*, vol. 19, n.º 19, pp. 91-108. jun. 2023.

ABSTRACT

This geotechnical report offers an exhaustive analysis of the geotechnical solution implemented for the foundation bases of the 7 towers in the Villa Panamericana complex. These towers, consisting of three 19-story towers and four 20-story towers, were built as part of the 2019 Pan American Games project, in the Villa el Salvador district of Lima, Peru. It should be noted that this project presents structural challenges of unprecedented magnitude in this type of deposits transported in the country, due to the characteristics of the soils of wind origin. To carry out the analysis, an investigative collaboration was carried out between several companies specialized in geotechnics. Various field exploration techniques were used to obtain precise information on the characteristics and behavior of the supporting soil. The results indicate the presence of granular soils of the clean, poorly graded, slightly humid sand type with little amount of fines, whose consistency, of these granular soils of the SP type, varies from loose on the surface, to moderately dense and dense at greater depth, without the presence of groundwater levels. Different alternatives were evaluated to solve the problems in the foundation soil, and finally, it was decided to replace the inappropriate soil with a hydraulic concrete fill to a depth of 3 meters, where the 1m-thick rigid foundation plate rests. This innovative solution was applied due to the magnitude of the structure to be built, time restrictions and soil characteristics.

Keywords: Pan American Villa, Lima 2019 Pan American Games, geotechnical solution, wind farms, fluid concrete.

Este artículo está publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional. (CC-BY 4.0)



1. INTRODUCCIÓN

El propósito principal de este estudio es realizar un análisis geotécnico detallado de la cimentación propuesta de las torres de la Villa Panamericana, un proyecto de construcción único de 7 torres de hasta 20 pisos en este distrito que forma parte del legado de los Juegos Panamericanos 2019. La Villa Panamericana en Lima es un complejo departamental que sirvió como residencia oficial de los atletas que participaron en los juegos panamericanos y parapanamericanos, llevados a cabo entre el 26 de julio y el 11 de agosto de 2019. El complejo cuenta con instalaciones habitacionales deportivas y servicios para aproximadamente 9,500 usuarios y tuvo un costo de alrededor de 180 millones de dólares. Está ubicado en el distrito de Villa El Salvador y fue inaugurado el 16 de marzo de 2019.

El área aproximada de la Villa Panamericana es de 20,000 metros cuadrados y consta de 1,096 departamentos distribuidos en siete torres, cuatro de las cuales tienen 20 pisos y tres tienen 19. Se enfrentó un desafío en el diseño de las bases de soporte de los siete bloques de departamentos debido a altura y las condiciones del terreno. Las cargas solicitadas superaban las 25,000 toneladas, lo que requería un análisis detallado.

Varias empresas especializadas en geotecnia colaboraron en investigaciones de campo y laboratorio para abordar el desafío de la cimentación de las torres. Utilizaron diversas técnicas de exploración para analizar el comportamiento geotécnico y caracterizar el suelo de apoyo. El enfoque se centra en desarrollar soluciones de cimentación adecuadas y cumplir con los estándares de seguridad y calidad. El objetivo principal es garantizar el funcionamiento a largo plazo de las torres, mitigando los riesgos geotécnicos y asegurando la integridad estructural.



Figura 1. Vista Panorámica de la ubicación de las 7 torres de la Villa Panamericana

2. ZONA DE ESTUDIO

La ubicación geográfica seleccionada para la construcción de las edificaciones de la Villa Panamericana se encuentra en lo que anteriormente era conocido como el Parque N° 26, específicamente en el Complejo Biotecnológico Lote Pz-26, ubicado en el Distrito de Villa El Salvador, dentro del Departamento de Lima. La zona de estudio cuenta con acceso a importantes avenidas principales. En el lado frontal, se encuentra la Av. Pastor Sevilla, mientras que en el lado izquierdo se encuentra la Av. 1 de mayo, y en el lado derecho se encuentra la Av. El Sol.

El área total de estudio abarca aproximadamente 449,277.82 m², con un perímetro lineal de 3,215.37 metros. Esta área comprende todo el espacio destinado para la implementación de las infraestructuras de la Villa Panamericana.

3. METODOLOGÍA

La metodología del estudio de mecánica de suelos sigue una serie de pasos que incluyen la recopilación de datos, investigación de campo, muestreo y ensayos de laboratorio, análisis e interpretación de resultados, diseño con recomendaciones y elaboración de un informe final que permita dar una solución geotécnica segura y estable para soportar las cargas aplicadas de las estructuras a construir.

El objetivo principal es evaluar la resistencia y estabilidad del suelo, brindando directrices para el diseño y la construcción del proyecto. Es importante tener en cuenta que la metodología puede adaptarse según las particularidades del proyecto y las regulaciones geotécnicas aplicables.

4. ESTUDIOS GEOTECNICOS REALIZADOS

Se realizaron estudios geotécnicos detallados antes de la construcción de las torres de la Villa Panamericana. Estos estudios fueron clave para determinar, entender y comprender el comportamiento y sus características del suelo y evaluar su capacidad de soporte.

Se utilizaron diversas técnicas de exploración para obtener información precisa sobre los suelos de la zona. La participación de múltiples empresas especializadas en geotecnia fue fundamental para obtener muestras representativas y resultados del campo. Cada empresa desempeñó un papel importante, aportando su experiencia para comprender mejor el suelo de apoyo de las cimentaciones de las 7 torres. Se resumen los trabajos de campo realizados por cada empresa, brindando información sobre las propiedades geotécnicas de los suelos.

El ingeniero Elizaldo Adelino Avila Brañes realizó diversos ensayos en marzo de 2016, que incluyeron 27 calicatas superficiales, 15 ensayos de penetración ligera, 7 calicatas profundas, 5 ensayos SPT, 1 línea sísmica y 1 refracción sísmica. [1]

En noviembre de 2016, Ferloza SAC realizó 5 perforaciones por lavado tipo wash boring, con ensayos SPT [2].

Geomaster SAC llevó a cabo su trabajo en enero de 2017, realizando 2 calicatas profundas, 3 líneas sísmicas del tipo MASW y 4 líneas de refracción sísmica. [3]

En marzo de 2017, el ingeniero Zenón Aguilar Bardales realizó una exploración geotécnica que incluyó 4 ensayos de penetración estándar SPT, 2 calicatas profundas, 1 calicata superficial, 5 perforaciones manuales con iwan auger, 5 pruebas geofísicas tipo MASW, 2 pruebas geofísicas tipo MAM y 2 líneas de refracción sísmica. [4]

Finalmente, en septiembre de 2017, MYM Consultores SRL realizó 14 perforaciones SPT por lavado tipo wash boring, 7 auscultaciones con cono Peck y 3 sondajes eléctricos SEV. [5]

Estos ensayos y trabajos realizados por diferentes especialistas y empresas proporcionaron datos y resultados suficientes para el estudio geotécnico completo y detallado de la zona en cuestión.

5. MARCO TEÓRICO

El estudio geotécnico del suelo de cimentación para las 7 torres de la Villa Panamericana y obras complementarias requirió el uso de diversas técnicas de exploración para obtener información sobre las características geotécnicas de los suelos en la zona. Se realizó un análisis detallado de los resultados obtenidos de los ensayos de campo, en colaboración con varias empresas especializadas en geotecnia. Además, se llevaron a cabo ensayos de laboratorio convencionales y especiales para determinar las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas de los suelos.

El procedimiento seguido en las distintas etapas del estudio ya sea ensayos de campo o de laboratorio, se basa en las directrices establecidas por la normativa peruana de Suelos y Cimentaciones (E.050) [6], la cual establece los requisitos y procedimientos para el diseño y construcción de cimentaciones y estructuras de soporte en el suelo. Esta normativa proporciona criterios de evaluación y diseño para la selección de los tipos y características de las cimentaciones y estructuras de soporte, teniendo en cuenta las particularidades del suelo y las cargas a las que estarán sometidas.

Se utilizaron técnicas establecidas, como las ecuaciones de Terzaghi y Peck, que permitieron determinar la capacidad de resistencia última y admisible del terreno [7], para el soporte de la cimentación y las ecuaciones de asentamientos diferenciales. Estos parámetros proporcionan una base para evaluar la capacidad del suelo en términos de soportar las cargas esperadas y predecir los posibles asentamientos diferenciales.

6. EXPLORACIÓN DE CAMPO

Proyectos de construcción de gran envergadura, como la Villa Panamericana, requieren estudios geotécnicos completos para evaluar las características del suelo y determinar las soluciones de cimentación adecuadas. Se ejecutaron distintos ensayos de campo, en participación conjunta con las distintas empresas, como la realización de calicatas a cielo abierto, ensayos de penetración estándar SPT, auscultación con cono tipo Peck, ensayos de penetración ligera DPL y además de ensayos no invasivos del tipo geofísicos, para obtener la información necesaria para definir la capacidad de carga, asegurar la estabilidad del terreno asegurando los cálculos de asentamientos y definir las profundidades de cimentación.

Solución geotécnica para el suelo de cimentación de las 7 torres de la villa panamericana

CALICATAS

Se llevaron a cabo un total de 32 calicatas, entre las empresas geotécnicas participantes, con una profundidad máxima de 8.0 m. y una profundidad mínima de 3.0 m. Estas calicatas tuvieron como objetivo reconocer y describir los diferentes estratos del suelo, (perfil estratigráfico) identificando aquellos que presentaban condiciones más críticas o que ofrecían mejores características para las cimentaciones de apoyo. Además, se recuperaron muestras representativas del tipo disturbadas y muestras inalteradas, como procedimiento de esta práctica.

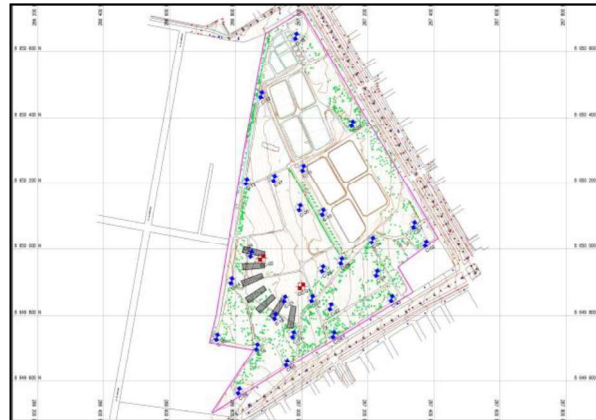


Figura 2. Plano de la ubicación de las calicatas realizadas. (fuente: propia)

Las muestras de suelo confirman la presencia de partículas de grano fino del tipo arenas finas pobremente gradadas limpias, húmedas, con poca cantidad de finos y sin presencia de gravas. En los estratos superficiales, estas arenas se encuentran en un estado suelto que se extienden hasta una profundidad que varía entre 0.6m y 0.9m. A continuación, se encuentra un estrato de arena de compacidad medianamente densa a densa, que se extiende hasta profundidades entre 3.0m y 5.8m. Subyaciendo las arenas presentan un estado de compacidad muy denso que se mantiene hasta el límite de las profundidades estudiadas, que alcanzan los 8.00 metros en las excavaciones de calicatas profundas.

ENSAYOS DPL

Se realizaron 15 ensayos de penetración dinámica ligera (DPL), como parte del estudio realizado por el ingeniero Elizaldo Adelino Ávila Brañes, donde alcanzó una profundidad máxima de estudio de 2.50m, de los cuales, se puede concluir que hasta una profundidad de 1 m. de ensayo DPL se obtuvo como promedio 12 golpes/10cm, lo que nos indica que es un suelo con una compacidad que va desde suelto a medianamente denso, y hasta una profundidad de 2 metros, se obtuvo como promedio 27 golpes/10cm, lo que nos indica que es un estrato medianamente denso [1]

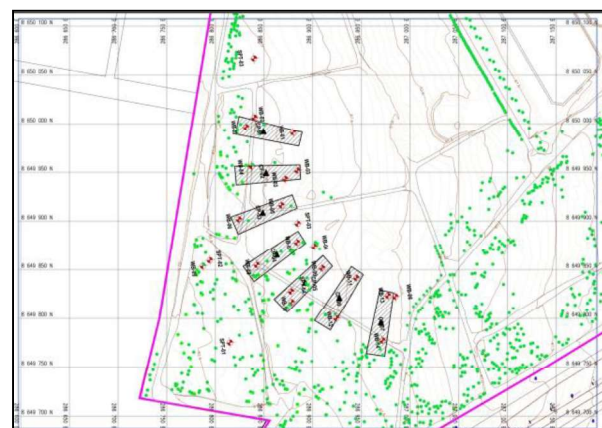


Figura 3. Plano de la Ubicación de los sondajes de perforación SPT y Cono tipo Peck (fuente:propia)

ENSAYOS SPT

Se realizaron un total de 28 ensayos de SPT en colaboración con distintas empresas geotécnicas, aplicando la normativa de procedimiento NTP 339.133 [6], en la figura 03 se puede observar la ubicación de los sondajes. Del total de ensayos, 19 se llevaron a cabo utilizando la técnica de lavado (wash boring). Se alcanzó una profundidad máxima de exploración de 15.45 metros, lo que permitió analizar la resistencia y compacidad relativa de los suelos arenosos en la zona de estudio. Además, se recuperaron muestras del suelo para su análisis en laboratorio, lo que posibilitó realizar pruebas adicionales.

A medida que se profundiza hasta los primeros 5 m., se puede observar una marcada diferencia en los valores del N_{SPT} entre dos zonas distintas. Los valores registrados varían entre 19 y 48 golpes/pie. En promedio, se obtuvo un valor de 34 golpes/pie, lo que corresponde a un ángulo de fricción de 37° . Esto indica que el suelo de cimentación en la zona de estudio se encuentra en un rango de densidad desde medianamente denso hasta denso.

A profundidades por debajo de los 5 m, se observa un aumento en los registros de golpes del ensayo, llegando incluso a valores de rechazo, valores de N superiores a 50. Estos resultados indican que el terreno presenta condiciones de densidad alta, desde densas hasta muy densas.

ENSAYO CONO TIPO PECK

Se realizaron 7 ensayos de penetración tipo Peck a cargo de la empresa MYM Consultores SRL. de estos ensayos, se observa que, hasta una profundidad de 3 m, los registros de golpes varían entre 10 y 80, lo cual indica una compacidad del suelo en un rango de suelto a medianamente denso. A medida que se profundiza, se registran un número creciente de golpes que superan el límite máximo establecido, lo que indica una mayor densificación del suelo en un estado denso a muy denso partir de los 3 metros [5].

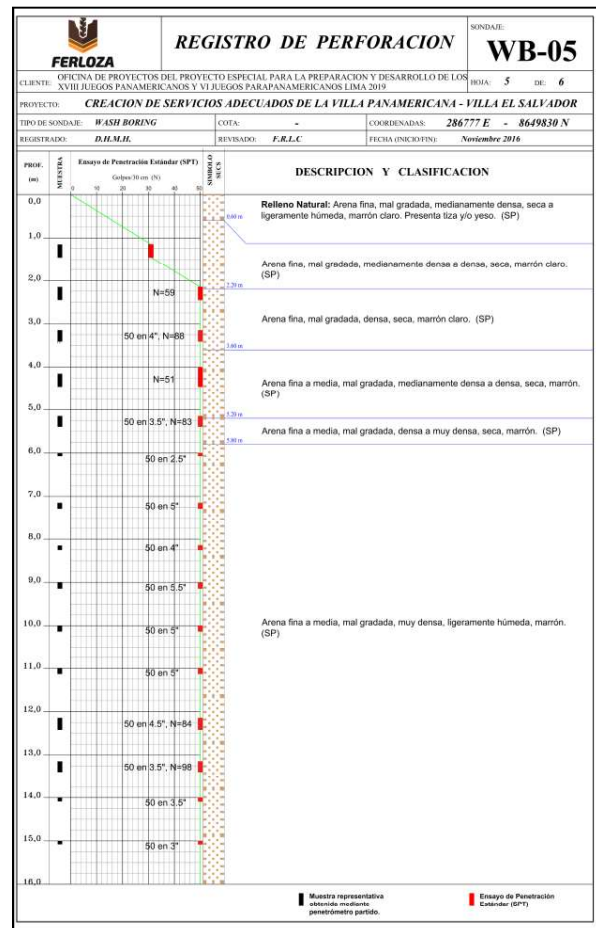


Figura 4 Grafica del ensayo del cono tipo Peck (fuente: FERLOZA)

Solución geotécnica para el suelo de cimentación de las 7 torres de la villa panamericana

ENSAYOS DE REFRACCION SISMICA Y MASW

En colaboración con las empresas especializadas en geotecnia, se llevaron a cabo un total de 7 líneas de refracción sísmica y 8 pruebas de ondas sísmicas de superficie (MASW).

Según los ensayos de refracción sísmica realizados en el área de estudio, se ha determinado que la estructura de subsuelo, hasta una profundidad de 30 metros son predominantemente de naturaleza granular, correspondientes a depósitos de arenas eólicas.

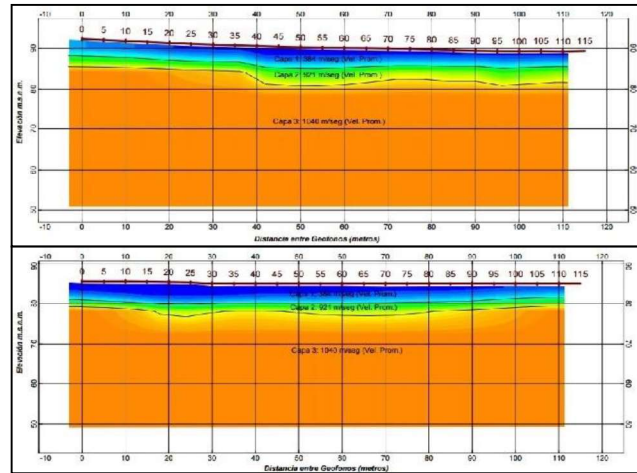


Figura 5 Resultados de la línea sísmica LS-01 Y LS03 (fuente: Geomaster SAC.)

Del resultado se observa que, en el subsuelo, a profundidades que varían entre 2.2 metros y 5 metros, se encuentran capas de arenas con baja densidad, que presentan una compacidad moderadamente densa y velocidades de ondas P de 384 m/s y ondas S de 350 m/s. Sin embargo, a partir de los 5 metros de profundidad, se han identificado estratos de arenas más densificados, donde la compacidad aumenta a medida que se profundiza en el subsuelo, con velocidades de ondas P de 921 m/s y ondas S de 500 m/s. Además, en la capa más profunda reconocida a profundidades superiores a 6 metros, se han encontrado estratos con una mayor densidad, con velocidades de ondas P de 1040 m/s y ondas S de 700 m/s.

1. ENSAYOS DE LABORATORIO

A continuación, se presenta un resumen de cada ensayo específico, destacando los hallazgos más relevantes.

ANALISIS GRANULOMETRICO

Según los análisis de granulometría realizados por las diferentes empresas, se determinó que el suelo en la zona del emplazamiento de la villa panamericana consiste en su totalidad en arena de origen eólico. Estos análisis revelaron que el suelo está compuesto principalmente por partículas de arena, con un porcentaje superior al 95%. Se observó una baja presencia de partículas finas en promedio 2.3% y no se encontraron

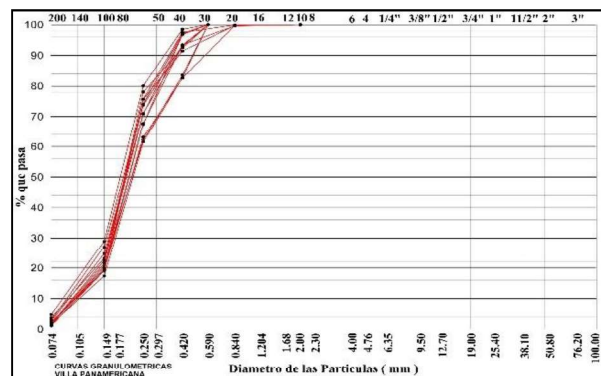


Figura 6 Grafica Granulometrica representativa de las arenas eolicas de la zona. (fuente: Pronia)

partículas de grava en el suelo, clasificados como un SP.

LIMITES DE CONSISTENCIA

Las características granulares de las muestras de suelo analizadas revelaron la presencia de arenas finas limpias con una baja cantidad de limos o arcillas sin presencia de límites de consistencia. ya que este tipo de suelos eólicos no presenta esta propiedad.

HUMEDAD NATURAL

Las humedades de los suelos granulares analizados, hasta una profundidad de 7.00 metros, promedian ligeramente más del 2.00%. Debido a la permeabilidad de las arenas y su baja cantidad de finos, la humedad no se retiene de manera significativa en el suelo, sino que tiende a ser transportada o evaporada. Esto indica que el suelo no presenta problemas de saturación o exceso de humedad en la zona analizada.

AGRESIÓN QUÍMICA DE SALES Y CLORUROS

El suelo de apoyo para la cimentación presenta concentraciones extremadamente bajas de sales solubles, cloruros y sulfatos. Esta característica es fundamental para garantizar la seguridad y prevenir posibles daños o corrosión en el concreto y la armadura de la cimentación. La baja presencia de estas sustancias químicas indeseables proporciona una base sólida y confiable para la construcción, asegurando la durabilidad y la integridad estructural de las edificaciones.

CORTE DIRECTO

En el caso del suelo friccionante, que está compuesto por arenas en el suelo de apoyo, se determinó, en el informe del ingeniero Elizaldo Adelino Ávila Brañes, para la calicata C-24 M-02 a una profundidad hasta 3.00 metros, utilizando un valor de densidad del suelo de 1.58gr/cm^3 , se obtiene un ángulo de fricción de 25.3° y una cohesión de 0.01 kg/cm^2 mediante el ensayo de corte directo. Estos resultados complementan la caracterización del suelo

Además, se cuentan con los resultados proporcionados por la empresa Geomaster, quienes llevaron a cabo el mismo ensayo. En el caso específico de la muestra C-01 - M-05 a una profundidad de 4.80 metros, usando una densidad del suelo de 1.67 gr/cm^3 se obtuvo un ángulo de fricción de 34.65° y una cohesión de 0.01 kg/cm^2 .

2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se llevará a cabo un análisis detallado de los suelos de apoyo, los cuales se componen de arenas normalmente consolidadas del tipo SP, con una compacidad que varía entre medianamente densa y densa. El propósito de este análisis es determinar el fondo de la cimentación, la capacidad portante máxima del suelo, la resistencia admisible y predecir los

Solución geotécnica para el suelo de cimentación de las 7 torres de la villa panamericana

asentamientos esperados, además de evaluar algún problema geotécnico que pueda presentarse.

PARÁMETROS DE DISEÑO DEL SUELO DE CIMENTACIÓN

A continuación, se presentarán los parámetros de diseño utilizados por cada estudio geotécnico, para determinar la capacidad portante del suelo y predecir los asentamientos diferenciales.

- ***Ing. ELIZALDO ADELINO AVILA BRAÑES***

El objetivo del estudio que realizó el ingeniero Ávila es determinar la resistencia del terreno para edificaciones convencionales, específicamente para pórticos de concreto armado de hasta 5 pisos. Se estima que el terreno deberá soportar cargas de aproximadamente 20 ton/m². Se proponen zapatas aisladas cuadradas de concreto armado con dimensiones de 2.0x2.0 metros y 2.5x2.5 metros, así como cimientos corridos con un ancho de 0.60 metros. A una profundidad de cimentación de 0.80 para cimientos corridos y 1.80m para zapatas aisladas. [1]

- ***GEOMASTER SAC.***

El enfoque del trabajo se centró en la solución para la cimentación de las estructuras de hasta 3 pisos y en las 7 torres altas de 20 y 19 pisos. Donde se planteó la solución del suelo de apoyo para las cimentaciones a construir. Se propone utilizar una platea o losa de cimentación para las torres de 20 pisos en el complejo habitacional Villa Panamericana, mientras que las demás estructuras utilizarán cimentaciones superficiales. Estas cimentaciones se apoyarán sobre depósitos de arenas eólicas finas mal gradadas en la zona. La elección de este tipo de cimentación se basa en consideraciones geotécnicas específicas y en la necesidad de garantizar una base sólida y estable para las estructuras. [3]

- ***MYM CONSULTORES SRL.***

El presente estudio de mecánica de suelos presenta la solución de cimentación para la construcción de los 7 edificios de departamentos, los cuales constan de 20 y 19 pisos, con estructura de concreto armado. Se propone utilizar plateas rígidas con dimensiones de 19.40 metros de ancho y 58.65 metros de largo como cimentación para dichos edificios, los parámetros de diseño se muestra a continuación. [5]

Tabla 1. Resumen de parámetros geotécnicos utilizados por empresa.

Empresa	Cimentación	Fondo de Cimentación	Peso Especifico	Angulo de Fricción	Cohesión	Módulo de Elasticidad
		D _F (m)	γ(ton/m ³)	φ°	C(kg/cm ²)	E(kg/cm ²)
Ing. Elizaldo Adelino Ávila Brañes	Zapata Aislada	1.80	1.60	25.00	0.01	1100
	Cimiento Corrido	0.80	1.60	25.00	0.01	1100
GEOMASTER SAC.	Cimentación Superficial	0.90 – 1.50	1.65	34.60	0.08	100 - 200
	Platea de Cimentación	0.50	1.65	34.60	0.08	100 - 200
MyM CONSULTORES SRL.	Platea de Cimentación	3.0	1.70	35.00	0.00	-

CAPACIDAD DE CARGA ADMISIBLE - ASENTAMIENTOS

Se han realizado los cálculos utilizando los datos obtenidos tanto en los ensayos de campo como en los ensayos especiales de laboratorio, con el fin de determinar la capacidad de carga última, capacidad admisible del suelo y los asentamientos diferenciales. Estos cálculos se realizaron siguiendo la experiencia y criterios establecidos por cada profesional a cargo.

- ***Ing. ELIZALDO ADELINO AVILA BRAÑES***

Según los valores obtenidos en su estudio de campo y laboratorio, se obtienen los siguientes valores de capacidad de carga admisible del terreno en base a los estudios de Terzaghi modificados por Vesic usando la siguiente formula.

$$Q_u = (S_c \cdot C \cdot N_c) + (0.5 \cdot S_g \cdot g \cdot B \cdot N_g) + (S_q \cdot q \cdot N_q)$$

$$Q_{adm} = (Q_u / FS)$$

En el cálculo de los asentamientos, este estudio consideró las características del terreno estudiadas, teniendo en cuenta que las deformaciones son elásticas y no esperando una consolidación secundaria. Se utilizaron las ecuaciones de Lambe & Whitman, y se adoptó un límite de asentamiento inicial de 1 pulgada (25 mm) [1], Usando la siguiente formula:

$$S = \frac{q_s \cdot B \cdot (1 - \mu^2) \cdot I_f}{E_s}$$

- ***GEOMASTER SAC.***

Tras analizar los criterios, se evaluó el comportamiento de la cimentación en relación con la capacidad de carga y el asentamiento diferencial. Basándose en el perfil estratigráfico obtenido

Solución geotécnica para el suelo de cimentación de las 7 torres de la villa panamericana

de las calicatas, los resultados de los ensayos de campo y laboratorio se llegaron a las siguientes conclusiones.

La capacidad de carga de una cimentación superficial, de acuerdo con las ecuaciones generales basadas en la teoría de Terzaghi y Peck, se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$q_{ult} = (0.5 \cdot \gamma_2 \cdot B \cdot N_\gamma \cdot S_\gamma) + (\gamma_1 \cdot D_f \cdot N_q \cdot S_q) + (C \cdot N_c \cdot S_c)$$

$$q_{adm} = (q_{ult} / FS)$$

Se ha observado que los suelos de apoyo en los primeros metros tienen un estado semi denso, lo que implica una disminución en los parámetros de resistencia. Esta condición se considera una falla localizada y es relevante considerarla al calcular y analizar la capacidad de carga y la estabilidad de la cimentación en esa área específica del terreno.

$$C' = (2/3 \cdot C)$$

$$\phi' = \text{arc.tang}(2/3 \cdot \text{tang}(\phi))$$

Después de realizar el análisis correspondiente, se ha determinado que los asentamientos en el suelo de apoyo son principalmente de naturaleza inmediata y se producen durante la etapa de construcción. No se prevén asentamientos significativos a largo plazo debido a procesos de consolidación del suelo. En el cálculo del asentamiento se utilizó la siguiente fórmula

$$S = \frac{\Delta q_s \cdot B \cdot (1 - \mu^2) \cdot I_f}{E_s}$$

S= Asentamiento instantáneo

μ =Relación de poisson= 0.30

E_s = Modulo de elasticidad = 50*(N+15) ton/m²

Δq_s = Esfuerzo neto transmitido

B= Ancho de la cimentación

I_f = Factor de influencia depende de L/B

El uso del módulo elástico es importante para calcular el asentamiento diferencial. En un estrato de arenas mal graduadas semi densas a 0.90m de profundidad, se utiliza un valor de $E=245 \text{ kg/cm}^2$. Para los asentamientos de la losa de cimentación, se consideran los estratos más profundos, donde la arena está medianamente densa con $E=245 \text{ kg/cm}^2$, y el estrato de arena más denso con $E=325 \text{ kg/cm}^2$ [3].

- **MYM CONSULTORES SRL.**

Para determinar la presión admisible de diseño, se realizaron análisis de las presiones admisibles de los materiales presentes en las profundidades activas de cimentación, incluyendo el relleno de reemplazo y las capas de arena densa a muy densa. Estos análisis permitieron establecer la carga máxima que el suelo puede soportar sin experimentar deformaciones excesivas o fallas. En el caso específico del depósito de arenas de consistencia densa a muy densa, se empleó la ecuación propuesta por Terzaghi, Peck y Mesri para calcular la presión admisible. En este estudio, se utilizó la siguiente ecuación para determinar dicha presión admisible.

$$Q_a = 0.096 \frac{(N_{60})^{1.4} \cdot f_{\delta} \cdot f_{NF} \cdot f_F}{B^{0.75}}$$

Q_a = Presión admisible.

$N_{60} = N \cdot f_l \cdot f_d \cdot f_E$.

N = Numero de golpes obtenido en el ensayo SPT dentro del espesor $B^{0.75}$

B = Ancho de la cimentación.

f_l = Factor de corrección por longitud de barras de ensayo SPT.

f_d = Factor de corrección por diámetro de barras de ensayo SPT.

f_E = Factor de corrección por energía.

f_{δ} = Factor de corrección por asentamiento $f_{\delta} = 1$, para $\delta = 2.5$ cm.

f_{NF} = Factor de corrección por nivel freático.

f_F = Factor de corrección por forma.

Se consideraron los siguientes datos para el análisis: se obtuvieron $N=50$ golpes (cantidad de golpes para considerar ensayo de rechazo) en la prueba SPT para el estrato denso de apoyo. Además, se estableció un asentamiento máximo tolerable de 5 cm, lo que da lugar a un factor de corrección por asentamiento de $f_{\delta}=2$. Estos datos son relevantes para evaluar la capacidad de carga y la estabilidad de la cimentación en el estudio [5].

Solución geotécnica para el suelo de cimentación de las 7 torres de la villa panamericana

Tabla 2. Resumen de resultado de capacidad de carga y asentamientos por empresa.

Empresa	Estructura	Profundidad Cimentación	Ancho de Cimentación	Capacidad Última	Capacidad Admisible	Asentamiento
		D _f (m)	B(m)	Q _u	Q _{adm}	S(cm)
Ing. Elizaldo Adelino Ávila Brañes	Cimiento Corrido	0.80	0.80	2.10	0.70	0.04
	Zapata Cuadrada	1.80	2.0	5.40	1.80	0.29
	Zapata Cuadrada	1.80	2.50	5.70	1.90	0.38
GEOMASTER SAC.	Cimiento Corrido	0.90	0.70	3.19	1.05	1.51
		1.50	0.70	4.22	1.41	1.51
	Zapata Cuadrada	0.90	1.20	4.11	1.40	1.97
		1.50	1.20	5.99	2.00	1.97
	Platea de Cimentación con sótanos	0.50	14x60	11.92	3.97	7.04
		0.50	15x15	10.81	3.60	7.04
MyM Consultores SRL.	Concreto Pobre Ciclópeo	3.00	-	-	3.00	5.0
	Mortero Fluido	3.00	-	-	3.00	5.0
	Relleno Granular	3.00	-	-	2.00	5.0
	Relleno Estructural	3.00	-	-	3.00	5.0
	Suelo Natural	3.00	-	-	3.00	5.0

3. ALTERNATIVAS Y SOLUCIÓN GEOTÉCNICA PARA EL SUELO DE CIMENTACIÓN

En función de los estudios realizados, se proporciona a continuación las especificaciones y detalles geotécnicos de las opciones de estabilización propuestas para la cimentación de las estructuras a construir que incluyen edificaciones de 3 a 5 pisos y las 7 torres de 19 y 20 pisos. Donde Geo Master SAC para las 7 torres propone 2 sótanos y losa de cimentación y MYM propone suelo o material de reemplazo sin sótanos.

SOLUCIÓN 01: RELLENO CONTROLADOS

Los rellenos controlados se presentaron como una opción de solución geotécnica para los suelos de cimentación en la Villa Panamericana. A continuación, se detallan los aspectos de ingeniería que deben considerarse en su configuración, según los estudios de mecánica de suelos realizados:

- ***GEO MASTER SAC.***

Se propone la siguiente solución de estabilización, que se basa en el uso de rellenos controlados y la implementación de plateas de cimentación como base para las estructuras de las torres de 20 y 19 pisos a construir. Estos dos aspectos fundamentales se enfocan en asegurar la estabilidad de las cimentaciones planificadas. Las especificaciones técnicas se muestran a continuación:

1. Para edificaciones de 3 a 5 pisos, en el escenario en el que la cimentación esté proyectada sobre arenas sueltas y contaminadas, se requerirá realizar una sobre excavación del suelo suelto y contaminado hasta alcanzar la capa de arena limpia y semi a compacta, para alcanzar la cota de cimentación de 0.90m a 1.50m se utilizarán rellenos controlados con material de cantera selecto, como afirmado, el cual se colocará en capas compactadas hasta alcanzar una densidad que asegure al menos un 95% de su máxima densidad seca según el método del Proctor modificado. Cada capa compactada tendrá un espesor máximo de 0.25m y se someterá a pruebas de control de densidad para su verificación. También se propone uso de sub-cimiento de baja resistencia $f'c=100 \text{ Kg/cm}^2$ desde la zona de excavación hasta el nivel de la cimentación
2. Para las 7 torres de 19 y 20 pisos, se propone dos sótanos, de 3m de altura cada uno, una vez excavado y haber alcanzado la arena densa a muy densa, sobre excavar 0.50m y colocar la platea de cimentación. [3].

- ***MYM CONSULTORES SRL.***

El estudio en referencia, plantea la recomendación de utilizar una cimentación tipo platea con un espesor mínimo de 1.00 metro. Se establece que las cargas de apoyo para la transmisión de esfuerzos deben apoyarse sobre material granular, específicamente arenas densas a muy densas. Se sugiere que la profundidad mínima de cimentación se realice en un corte de al menos 3.00 metros por debajo del punto más bajo del terreno en cada ubicación de los edificios, en cada caso se recomienda que el corte alcance al menos los estratos de arena más densos.

A continuación, se detallan las características técnicas de las opciones de estabilización del fondo de cimentación para soportar la platea que formará parte de la estructura de las torres de 20 y 19 pisos:

1. Conformación de una base de apoyo de solado de concreto ciclópeo con capacidad de $f'c=100 \text{ kg/m}^2$
2. Se propone la colocación de 3 capas superpuestas de 1 metro de espesor cada una, de mortero fluido o relleno de concreto hidráulico fluido. Este tipo de relleno proporciona estabilidad y resistencia, contribuyendo a soportar las cargas y prevenir asentamientos diferenciales. Con un diseño que garantice una resistencia uniforme de al menos 10 kg/cm^2 .

Solución geotécnica para el suelo de cimentación de las 7 torres de la villa panamericana

3. Propuesta 1 de relleno controlado: consistirá en capas de grava arenosa, bien o mal graduada, con características específicas como porcentaje de partículas finas, límite líquido, tamaño máximo de partículas, contenido de sales solubles no deberá exceder de 1,000 p.p.m. El tamaño máximo del material de relleno no deberá exceder de 1/3 del espesor de la capa de relleno a compactar. El material se colocará en capas horizontales de espesor máximo de 0.25 m y se compactará al menos al 95% de la MDS según el ensayo Proctor modificado, con una capacidad de carga de 1.00 a 2.00 kg/cm². La capa superior del terreno arenoso, donde se aplicará el relleno, también se compactará al 95% de su MDS. Además, se requerirá un sobrecanto mínimo de 1.00 m en todo el perímetro de la platea.

4. Propuesta 2 de relleno estructural reforzado: consistirá en capas de grava arenosa, bien graduada limpia a ligeramente limosa o ligeramente arcillosa, con características específicas como porcentaje de partículas finas no mayor al 8%, límite líquido no mayor a 25, índice de plasticidad no mayor de 4, tamaño máximo de partículas de no más de 3 pulgadas, CBR mayor de 80 al 95%, contenido de sulfatos solubles inferior a 1,000 p.p.m. y contenido de sales solubles totales inferior a 5,000 p.p.m. Este material se colocará en capas horizontales de espesor máximo de 0.25 m y se compactará al menos al 95% de la MDS según el ensayo Proctor modificado. Además, entre cada capa de relleno de 0.25 m se instalará una malla biaxial con una resistencia mínima de 400 kn/ml. Con una capacidad admisible de 3.0 kg/cm² La capa superior del terreno arenoso, donde se aplicará el relleno, se compactará al 95% de su MDS. Asimismo, se requerirá un sobrecanto mínimo de 1.00 m en todo el perímetro de la platea [5].

SOLUCIÓN 02: RELLENO FLUIDO

El relleno de concreto hidráulico fluido, se propuso como una solución geotécnica, por parte de la empresa MyM Consultores SRL., para conformar una base de apoyo firme y estable para la platea de cimentación. Esta alternativa se seleccionó como la opción definitiva para la construcción de la base de cimentación para los 7 edificios.

La decisión de utilizar el relleno de concreto hidráulico se basó en la necesidad de agilizar el proceso de estabilización de la base de apoyo debido a las restricciones de tiempo. A pesar de que esta opción implicaba un costo mayor en comparación con otras alternativas consideradas, se decidió elegir esta opción para evitar retrasos en la ruta crítica de estabilización del suelo. El proyecto inició en enero de 2018 y se requería que la obra estuviera lista para febrero de 2019.



*Figura 7. Vista de la conformación de las capas de relleno hidráulico fluido.
(fuente: Geomaster SAC.)*

En comparación con métodos convencionales, la construcción del relleno de concreto hidráulico resultó ser más rápida y eficiente. Esta elección permitió acelerar el proceso de estabilización y cumplir con los plazos establecidos para la finalización del proyecto.

La ejecución consistió en la remoción superficial de las arenas de relleno contaminadas y en estado sueltas hasta una profundidad de 3 metros, donde se alcanza un estrato en estado denso del suelo arenoso.

El procedimiento involucró el vertido de una lechada de cemento autocompactante con características específicas en tres capas superpuestas, cada una con un espesor de 1 metro, dentro de un área de 19.40 metros de ancho y 58.65 metros de largo. Esta lechada se extendió y conformó una capa sólida con una capacidad de carga de 10 kg/cm², capaz de soportar las cargas de servicio estimadas en 25000 toneladas del peso de las estructuras. Sobre estas capas de concreto fluido se estableció la platea de cimentación con las mismas dimensiones [5].

CONCLUSIONES

- El área estudiada muestra un suelo homogéneo compuesto principalmente por arenas pobremente gradadas y con escasa presencia de finos o gravas del tipo SP. En la superficie, hasta una profundidad de 0.60m a 0.90m, el suelo se encuentra suelto y contaminado. A partir de los 3.0 metros de profundidad, hay un cambio en la compacidad del estrato arenoso, pasando de medianamente denso a denso, aunque conservando las características arenosas. Entre los 5 m y los 8 m de profundidad, se encuentran estratos más densos, desde denso hasta muy denso, siendo este último el estrato de mayor estabilidad. No se encontró napa freática hasta una profundidad máxima de 15.45 metros

- Según los ensayos de penetración estándar (SPT) y percusión dinámica ligera (DPL), se observa que hasta una profundidad de 5 metros se encontró un estrato con una compacidad que varía de medianamente denso a denso. A profundidades mayores a 8 metros, se encontraron estratos altamente densificados y de consistencia muy densa. En el caso del ensayo DPL, hasta una profundidad de 2.50 m. se encontró un estrato de compacidad medianamente densa.

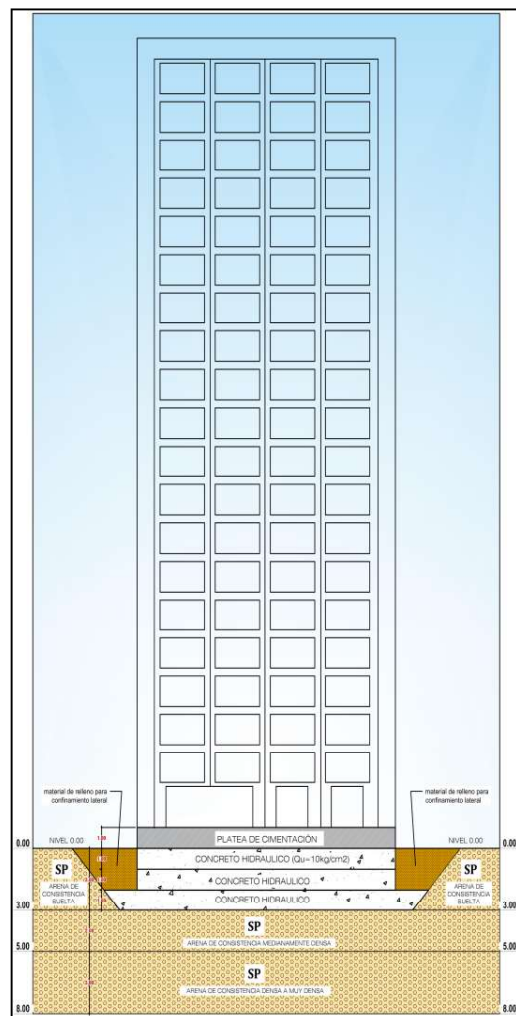


Figura 8 Esquema de Solución Geotécnica.
(fuente: propia)

Solución geotécnica para el suelo de cimentación de las 7 torres de la villa panamericana

- Considerando que el suelo de apoyo hasta los 3m de profundidad, tienen baja resistencia y problemas de asentamientos por las grandes cargas de las 7 torres, se concluyó en reemplazar o retirar ese suelo, ya sea usando sótanos o colocando otro de mejores características geotécnicas.
- Se ha llegado a la conclusión de que la mejor opción para la cimentación de la estructura es el reemplazo del suelo de apoyo, utilizar una losa de cimentación con dimensiones de 19.40 m de ancho y 58.65 m. de largo. Esta decisión se basa en las características geotécnicas de los suelos de apoyo en la zona. Asimismo, se propone emplear una técnica de estabilización que implica la aplicación de tres capas de concreto fluido hidráulico a una profundidad de 3.0 metros. Esta solución se llevará a cabo en el estrato de arenas finas limpias, este estrato se caracteriza por tener una consistencia densa y proporcionará una base sólida para la estructura.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso de cemento normal tipo I, para la dosificación de la mezcla para la fabricación del concreto de las cimentaciones, debido a los resultados que determinan bajas concentraciones de sales solubles y sulfatos.
- Para todas las estructuras que conformen este proyecto las cimentaciones se deben apoyar en las arenas medianamente densas a densas, en los casos de cimentaciones superficiales se deberá sobre excavar y hacer rellenos controlados en capas compactadas o colocar sub cimiento de concreto pobre hasta alcanzar la cota de cimentación de 0.90m a 1.50m.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ávila Brañes, Elizaldo Adelino; «Estudio de suelos con fines de cimentación Parque N°26 Biotecnológico Proyecto Villa Panamericana, » 2016.
- [2] F. Loyola y J. P. Zamora Beyk, «Servicio de ejecución de perforaciones, ensayos de campo y toma de muestras en le terreno del proyecto "Creacion de servicios adecuados de la Villa Panamericana",» FERLOZA, 2016.
- [3] M. A. Hernandez Aguilar, «Evaluacion Geotecnica del suelo de cimentacion para la construccion de edificios de 20 pisos de altura mediante calicatas y ensayos geofisicos, » GEOMASTER SAC., vol. 1, 2016.
- [4] Z. Aguilar Bardales, «Estudios geotecnicos con fines de cimentacion para las estructuras de las torres de la villa panamericana, » 2017.
- [5] M. Martinelli Montoya, «Estudio de Mecanica de suelos Villa Deportiva Panamericana Parque N°26, Villa el Salvador, » MyM CONSULTORES SRL., 2017.
- [6] R. N. d. Edificaciones, «Normal E.050 Suelos y Cimentaciones, » SENCICO, 2020.
- [7] Braja M Das, «Fundamentos de Ingenieria Geotecnica, » Mexico, vol. Cuarta Edicion, 2013.