



CARACTERIZACIÓN DEL SUELO DE CIMENTACIÓN PARA LA AMPLIACIÓN DE LA BASE CIENTÍFICA MACHU PICCHU EN ANTÁRTIDA

CHARACTERIZATION OF THE FOUNDATION SOIL FOR THE EXPANSION OF THE SCIENTIFIC BASE MACHU PICCHU IN ANTARCTICA

Marco Antonio Hernández Aguilar
Ronald Saúl Vega López
Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú

RECIBIDO: 15 de octubre de 2023.

ACEPTADO: 11 de diciembre de 2023.

RESUMEN

El presente informe presenta un análisis geotécnico de los suelos en el área de la base científica peruana Machu Picchu, ubicada en Punta Crepín, en la península de la Antártida. Los trabajos desarrollados forman parte de los estudios de suelos necesarios para definir las condiciones de cimentación de la futura ampliación e instalación de nuevos módulos de investigación en la base. Durante la expedición ANTAR XXVI en 2019, se llevó a cabo la campaña geotécnica final para realizar un reconocimiento detallado de los suelos que servirán de soporte de las cimentaciones a definir en la base peruana. Estos ensayos de campo y de laboratorio permitirán caracterizar los suelos en estudio. Los resultados obtenidos revelan que, en Punta Crepín, se encuentra una capa superficial compuesta por gravas polimícticas con intercalaciones de areniscas medias masivas, características de las terrazas marinas. Estos suelos abarcan la mayor parte de la extensión de la base. Además, se ha identificado una estructura predominante de grava en los estratos subyacentes, resultado de la erosión de los depósitos morrénicos y la formación de un sistema aluvial-fluvial. Esta formación con buena capacidad de carga se aprovechará para la cimentación de los nuevos módulos científicos en la base, que garantice la estabilidad de las estructuras a construir.

Palabras clave: Mecánica de Suelos, base científica peruana Machu Picchu, Antártida, Geotecnia, Punta Crepín, depósitos morrénicos.

Cómo citar

M. A. Hernández Aguilar y R. S. Vega López, «Caracterización del suelo de cimentación para la ampliación de la base científica 'Machu Picchu' Antártida», *Perfiles_Ingeniería*, vol. 19, n.º 20, pp. 49–72, ene. 2024.

ABSTRAC

This report presents a geotechnical analysis of the soils around the Peruvian scientific base Machu Picchu, located in Punta Crepin, on the Antarctic Peninsula. The work carried out is part of the soil studies necessary to define the foundation conditions for the future expansion and installation of new research modules at the base. During the ANTAR XXVI expedition in 2019, the final geotechnical campaign was carried out to carry out a detailed reconnaissance of the soils that will support the foundations to be defined in the Peruvian base. These field and laboratory tests will allow the soils under study to be characterized. The results obtained reveal that, in Punta Crepin, there is a superficial layer composed of polymictic gravels with intercalations of massive medium sandstones, characteristics of marine terraces. These soils cover most of the base area. In addition, a predominant gravel structure has been identified in the underlying strata, a result of the erosion of moraine deposits and the formation of an alluvial-fluvial system. This formation with good load capacity will be used for the foundation of the new scientific modules at the base, which guarantees the stability of the structures to be built.

Keywords: Soil Mechanics, Machu Picchu Peruvian scientific Base, Antarctica, Geotechnics, Punta Crepin, morrenic deposits.

© Los autores. Este artículo Open Access esta publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional. (CC-BY 4.0)



1. Introducción

La Antártida es un continente de suma importancia para las diferentes áreas científicas y de ingeniería, ya que su conformación natural nos permite estudiar los efectos de los cambios climáticos y la evolución geológica.

La base científica establecida por el Estado peruano, miembro consultivo del Tratado Antártico desde el año 1981, denominado Machu Picchu (ECAMP), tiene como principal propósito realizar estudios geográficos, geológicos, climatológicos y biológicos.

En el marco de la expedición peruana ANTAR XXVI en el año 2019, un grupo de ingenieros peruanos realizó una campaña de estudios geotécnicos complementarios para analizar las formaciones de los estratos superficiales y su capacidad para soportar cargas en futuras expansiones del campamento de investigación de la base. Es importante destacar que estos estudios fueron una continuación de investigaciones similares realizadas en expediciones anteriores.

La expedición fue un esfuerzo colaborativo entre diversas instituciones peruanas y permitió obtener información sobre esta región tan remota. En esta ocasión, se abordará el resumen de la información geotécnica de la punta Crepín con el fin de conocer los hallazgos y su relevancia para la comprensión de las características geotécnicas de los suelos existentes en la zona de estudio.

Figura N° 1. Vista de la ubicación de la base científica peruana en la Antártida



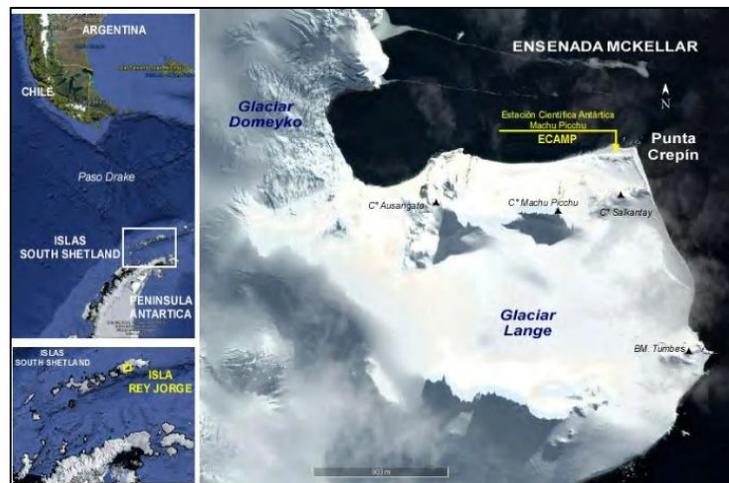
Fuente: INGEMET

2. Zona de Estudio

La base científica peruana denominada Machu Picchu se encuentra ubicada en la Antártida, específicamente en la Península norte de la Antártida, en la bahía de Almirantazgo, isla Rey Jorge. Esta base científica fue inaugurada en el año 1989 y se ha convertido en una plataforma importante para la investigación científica en la región, con un enfoque en la biología marina, la meteorología, la glaciología, entre otros campos de estudio.

La ubicación de la base es estratégica, ya que se encuentra en una zona que es sensible a los cambios climáticos y permite estudiar los efectos del calentamiento global y la evolución de los ecosistemas antárticos. La base cuenta con equipamientos y tecnología sofisticada para realizar investigaciones en una de las áreas más aisladas del mundo.

Figura N° 2. Ubicación de la zona de estudio



Fuente: INGEMET

3. Metodología

La geotecnia desempeña un papel crucial en el estudio de las propiedades del suelo y las rocas. En la base científica Machu Picchu de Punta Crepín, se realiza un estudio geotécnico exhaustivo debido a las características geológicas y geotécnicas del área. Se caracterizan el suelo y las rocas, se estudia la geología y geomorfología, se analizan las cargas y sollicitaciones, y se evalúa la estabilidad del terreno. Estos estudios garantizan la seguridad y estabilidad de las estructuras, y facilitan el diseño de los nuevos módulos de investigación en la Antártida.

La metodología de estudio geotécnico puede variar según las necesidades y particularidades del proyecto, pero en general de mayor importancia se toman los siguientes pasos.

- **Recopilación de información:** se recopila toda la información disponible sobre la zona, como mapas geológicos, estudios previos, etc.
- **Estudio de campo:** se realizan investigaciones de campo para obtener información sobre las propiedades geotécnicas del suelo y de las rocas presentes en la zona.
- **Estudio de laboratorio:** se realizan pruebas de laboratorio para determinar las propiedades geotécnicas del suelo y de las rocas.
- **Análisis de datos:** se realiza la evaluación de la estabilidad del suelo, para lo que se utilizan teorías de capacidad de carga y asentamientos diferenciales, con el propósito de determinar su capacidad última de carga y capacidad admisible del terreno.

4. Informes Geotécnicos

La base científica Machu Picchu en punta Crepín, ubicada en la Antártida, ha sido objeto de varios estudios geotécnicos a lo largo de los años. Estos estudios se han enfocado en evaluar la estabilidad del terreno, las propiedades del suelo y las rocas, así como en diseñar medidas de protección y mitigación para garantizar la seguridad de la base.

En la X Expedición Peruana a la Antártida-Segunda Etapa ANTAR X durante el verano austral de 1999, se realizaron trabajos de geología. En ese contexto, se llevaron a cabo estudios geofísicos que utilizaron los métodos de Resistividad Geoeléctrica y Sísmica de Refracción. Este informe geofísico presenta los resultados y las interpretaciones obtenidas a partir de estos métodos [1].

En el año 2013, se llevó a cabo la expedición ANTAR XXII, que tuvo como objetivos desarrollar un proyecto de glaciología en Punta Crepín, actualizar los estudios técnicos geotécnicos para fortalecer la infraestructura antártica nacional, y evaluar la Estación Científica Antártica Machu Picchu [2].

En el año 2019, en la expedición ANTAR XXVI, se programó una ampliación del estudio de mecánica de suelos, con el fin de plantear los estudios preliminares para la expansión de la base científica, la cual incluiría la instalación de nuevos módulos de investigación. Para lograr este objetivo, se llevó a cabo una exploración geotécnica detallada y se realizaron los estudios de mecánica de suelos de la zona para garantizar la estabilidad de las cimentaciones sin problemas o fallas geotécnicas [3].

Figura N° 3. Zona posible de expansión de la base



Fuente: Elaboración propia

5. Marco Teórico

El estudio geotécnico de los suelos en la base científica peruana Machu Picchu implica la aplicación de diversas técnicas y métodos de exploración para obtener información relevante sobre las características geotécnicas de los suelos presentes en la zona. En este marco, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de la geología y geomorfología de la zona, mediante la realización de trabajos de campo como las calicatas. Estos ensayos permiten definir la estratigrafía de los suelos y obtener muestras representativas mediante el uso de técnicas normadas in situ. Además, se realizaron ensayos de laboratorio normales y especiales para determinar las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas de los suelos.

El procedimiento que se llevó a cabo en las distintas etapas del estudio siguió la normativa de Suelos y Cimentaciones Peruana (E.050) [4], que establece los requisitos y procedimientos para el diseño y construcción de cimentaciones y estructuras de soporte en el

Perfiles de Ingeniería Vol19 N°20, julio – diciembre 2023

suelo. La norma proporciona criterios de evaluación y diseño para la selección de tipos y características de cimentaciones y estructuras de soporte en función de las características del suelo y las cargas a las que estarán expuestas.

Se realizó un análisis de los suelos en condiciones críticas (saturados) para obtener los parámetros de resistencia y deformación del suelo de cimentación. Esto permitirá determinar la resistencia límite y admisible del suelo, así como los asentamientos esperados. Se emplearon métodos conocidos de capacidad de carga y estimación de asentamientos en todos los casos.

6. Alternativa de Módulos de Ampliación para la Base Científica

Existen varias alternativas para la instalación de los nuevos módulos en la base científica peruana Machu Picchu, que pueden considerarse en función de la disponibilidad de recursos y condiciones geotécnicas y climáticas de la zona. Por eso, se indican algunas posibles alternativas propuestas.

6.1 Construcción de módulos prefabricados

La construcción de módulos prefabricados fuera de la base, para su posterior transporte a la zona, pueden soportar las condiciones climáticas extremas de la Antártida. Además, pueden ser ensamblados de manera rápida y eficiente en la base.

6.2 Construcción de módulos modulares

Se puede considerar como una alternativa la construcción de módulos modulares, los cuales ofrecen una mayor flexibilidad en cuanto a la configuración y diseño. Además, pueden ser adaptados según las necesidades específicas de la base científica (ver Figura N° 4).

La elección de la alternativa más adecuada dependerá de diversos factores, como la rapidez de implementación, el costo, la durabilidad, la flexibilidad y la eficiencia energética, entre otros.

Figura N° 4. Proyección de la instalación de módulos



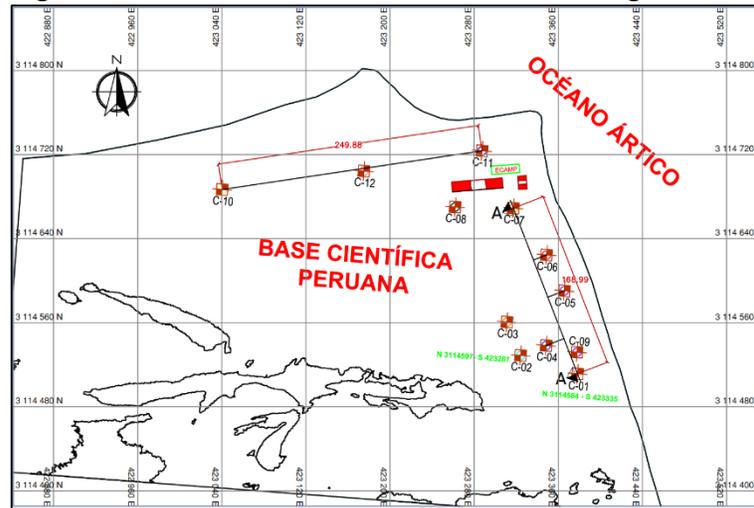
Fuente: Arq. Carlos A. Pastor Santa María

7. Exploración de Campo

La exploración de campo en la base científica peruana Machu Picchu es un proceso clave en la geotecnia y en la construcción de la infraestructura en la zona antártica. Este proceso se lleva a cabo para recopilar información sobre las condiciones del terreno y sus principales características estratigráficas del terreno de apoyo para la fundación de las cimentaciones que soportan las cargas solicitadas.

En esta última campaña de exploración geotécnica, se llevaron a cabo 12 excavaciones a cielo abierto. Por las condiciones de trabajo, se utilizó un telehandler proporcionado por la Compañía de Operaciones Antárticas del Ejército Peruano. Estas excavaciones, realizadas de acuerdo con las normas de seguridad, alcanzaron profundidades máximas de 3.0 metros de profundidad, se tomaron muestras de los estratos más significativos de las calicatas, tanto alteradas como no alteradas, las cuales se identificaron adecuadamente para luego enviarlas al laboratorio de mecánica de suelos en Lima, mediante el BAP Carrasco.

Figura N° 5. Plano de Ubicación de los sondeos geotécnicos



Fuente: Geomaster SAC

Se dispuso la distribución de las calicatas de manera estratégica con el fin de obtener una vista completa de la estratigrafía en la zona de estudio que se está considerando para la ubicación probable de las nuevas estructuras a construir en la base científica (ver Figura N° 5).

En resumen, la programación de campo incluyó los siguientes estudios:

- 1) Ejecución de doce (12) calicatas de exploración a cielo abierto
- 2) Clasificación manual visual de los suelos
- 3) Extracción de muestras disturbadas de la estratigrafía identificada
- 4) Extracción de muestras inalteradas de los estratos de suelos finos
- 5) Ensayos de densidad de campo con el cono de arena.
- 6) Determinación del perfil estratigráfico

8. Ensayos de Laboratorio

Se realizaron pruebas estándar y especiales en el laboratorio con las muestras traídas en el BAP Carrasco, que arribó al puerto del Callao. Estas pruebas siguieron las normas de mecánica de suelos y se utilizaron para determinar las propiedades físicas y mecánicas más importantes de las muestras.

Los ensayos de laboratorio se llevaron a cabo siguiendo las normas ASTM (American Society for Testing and Materials). Se recolectaron un total de veintiocho (28) muestras representativas de las doce (12) calicatas realizadas. Se presenta en la Tabla N° 1 el resumen de los resultados resumidos de los ensayos realizados.

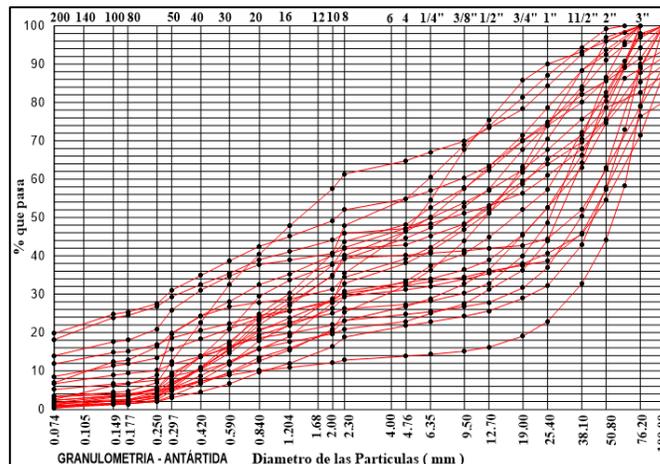
8.1 Análisis Granulométrico

El análisis de la granulometría del suelo en la base científica peruana Machu Picchu fue un proceso importante para entender sus características. Este análisis se realizó mediante el tamizado en seco y húmedo de las muestras obtenidas en la zona.

Los resultados obtenidos indicaron que el suelo en esta área se compone principalmente de suelos granulares, como gravas arenosas, gravas limosas y arenas, GP-GM y, en algunos sectores de la zona, se encontraron finos como el limo y la arcilla ML.

La buena gradación del suelo indica una distribución equilibrada de tamaños de partículas, lo que sugiere una resistencia adecuada y una baja deformación (ver Figura N° 6). Esta propiedad es determinante, ya que implica que el suelo puede soportar cargas sin experimentar deformaciones importantes. Por lo tanto, es apropiado para la construcción de estructuras que necesitan una base sólida y estable.

Figura N° 6. Curvas granulométricas de los suelos granulares del tipo GP/GP-GM hallados en el área



Fuente: Elaboración propia

8.2 Límites de Consistencia

Asimismo, se determinaron los Límites de Consistencia o Límites de Atterberg para las muestras extraídas, que incluye Límite Líquido (LL), el Límite Plástico (LP) y el Índice de Plasticidad (IP), según la normativa ASTM D 4318.

Los valores obtenidos de los límites de consistencia de las muestras evaluadas nos indican que, hasta una profundidad de 3.00 metros de exploración en la zona donde se encuentra instalada la base científica, no presenta límites de consistencia. Sin embargo, en las calicatas más alejadas donde termina el perímetro de la extensión de ampliación, que son las calicatas C-1, C-2, C-3 y C-4, se puede observar que a partir de 0.70m se hayan finos de alta plasticidad

Esta variación se debe a la ubicación cercana de la base en las costas del Mar Antártico, donde la erosión ha provocado la acumulación de partículas granulares, mientras que la humedad ha actuado como un agente de filtración que transporta la mayoría de las partículas finas y deja los suelos limpios de ellas. La presencia de finos plásticos en el área mencionada es una característica natural del suelo, resultado de la geología regional propia de la zona.

8.3 Humedad Natural

Luego de obtener información detallada sobre el perfil estratigráfico, se recogieron las muestras representativas para determinar su contenido de humedad natural. Esto nos permitió evaluar el estado de humedad del suelo natural, ya sea húmedo o saturado, y analizar los parámetros en su condición más desfavorable.

Según los resultados, se puede observar que la humedad es mayor cuando es considerable la cantidad de finos, y alcanza valores de 16.61% de humedad como máximo, ya que estos retienen o absorben la humedad, a diferencia de los suelos granulares que por condiciones naturales solo filtran la humedad y se ajustan a las condiciones climáticas del entorno.

8.4 Agresión Química de Sales y Cloruros

Los suelos que se encuentran en el área de instalación de los cimientos de las estructuras modulares pueden tener un efecto negativo en el concreto reforzado, debido a la presencia de

elementos químicos, como sulfatos y cloruros. Este efecto es causado por el agua subterránea que reacciona con el concreto, lo que puede generar deterioro debajo del nivel freático o en caso de infiltraciones de agua por lluvia o inundaciones.

Para evaluar el posible daño químico es necesario considerar los niveles de sulfatos y cloruros, mientras que las sales solubles totales pueden afectar mecánicamente la resistencia del cimiento debido al lavado de sales. Esto ocasiona pérdida de resistencia cortante de manera brusca.

Los resultados nos muestran una exposición a sulfatos de intensidad moderada para el agua del nivel freático, con valores de contenido de sulfatos solubles de 169.37 mg/L. para el nivel freático de la calicata 11 a una profundidad de 2.60 metros, y 84.64 mg/L. para el nivel freático en la calicata 9 a una profundidad de 2.80 metros. Estos se encuentran subyacentes en el subsuelo dentro del área de la base. Además, se analizó el agua de mar, lo que arrojó como resultado una exposición severa frente al contenido de sales solubles con valores de 3872.96 mg/L. Dichos resultados nos indican las condiciones del terreno y las decisiones a priori que debemos considerar para la mitigación de problemas a futuro con el diseño de las cimentaciones.

8.5 Densidad por Cono de Arena

El ensayo de densidad de cono con arena es un método utilizado para determinar la densidad de un suelo *in situ*. En la base científica peruana, se realizó este ensayo para medir el estado de compacidad de los suelos naturales. El ensayo consistió en llenar un hoyo con arena calibrada y luego medir su volumen y el peso de la muestra que salió del hoyo. Estos valores permiten calcular tanto la densidad natural como la densidad seca del suelo. En los suelos que circundan el área de la base, se pudo determinar la densidad en los estratos descubiertos por las calicatas. Se determinó, para las calicatas de la C1 a la C9, posible zona de expansión de la base, a una profundidad estándar de 1.20 metros una densidad promedio de 2.041 gr/cm³ y, para las calicatas C10 a la C12, se determinó a la profundidad de 1.20 una densidad promedio de los suelos de 2.073 gr/cm³. Se puede determinar que la consistencia del suelo a una profundidad de 1.20 metros se encuentra en estado denso a muy denso.

8.6 Corte Directo

El ensayo de corte directo es una prueba de laboratorio que se utiliza para determinar la resistencia al corte de un suelo. Para las muestras obtenidas de la base peruana Machu Picchu, se realizó dicho ensayo para obtener los parámetros geotécnicos de ángulo de fricción (ϕ°) y cohesión (C).

El ensayo consiste en aplicar una carga sobre una muestra de suelo, de sección cuadrada de 6 cm de lado y una altura de 2 cm, de forma que se produzca un corte en el mismo, y medir la fuerza necesaria para que esto ocurra. Se realizó el ensayo en la calicata C02 muestra 04 a una profundidad de 1.25m a 2.00m, con una densidad de 1.75 gr/cm³, lo que permitió obtener un valor de ángulo de fricción de 31.24° y una cohesión de 0.05 kg/cm². Además, se ensayó para la C11 muestra 03, con una densidad de 1.75 gr/cm³, a una profundidad de 2.20 m a 2.60 m, y se obtuvo un ángulo de fricción de 33.95° y una cohesión de 0.10 kg/cm². Se muestra el resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio en la Tabla N° 1.

Tabla N° 1. Resumen de resultados de laboratorio

N° de Sonda / Calicata	Tipo de Muestra - #	Profundidad de Muestra (m)	Clasificación (AA SHT O)	Clasificación (SUCS) (1)	Grava (%)	Arenas (%)	Limo / Arcilla (%)	LL	LP	IP	Contenido de Humedad (%)	Esfuerzos Efectivos		Contenido Sales Solubles (p.p.m.)	Contenido Sulfato Solubles (p.p.m.)	Contenido de Cloruros Solubles (p.p.m.)
												Cohesión Kg/cm ²	Ángulo de Fricción (°)			
C - 01	MAB 01	0.00 -1.20	A-1-a	GP-GM	70.67	22.71	6.62	17.90 %	NP	0.00%	12.76 %	-	-	-	-	-
	MAB - 02	1.20 -2.60	A-1-b	GM	48.03	32.21	19.76	20.20 %	NP	0.00%	8.29%	-	-	307.20	57.39	65.91
	MAB - 03	2.60 -3.00	A-1-a	GP	60.64	37.03	2.33	NP	NP	NP	10.99 %	-	-	-	-	-
C - 02	MAB - 01	0.00 -0.35	A-1-a	GP	74.69	22.98	2.34	NP	NP	NP	7.01%	-	-	-	-	-
	MAB - 02	0.35 -0.75	A-1-a	GP-GM	56.27	36.85	6.87	NP	NP	NP	9.63%	-	-	-	-	-
	MAB - 03	0.75 -1.25	A-4	SM	1.35	56.35	42.3	NP	NP	NP	12.73 %	-	-	-	-	-
	MAB - 04	1.25 -2.00	A-1-a	GP-GC	70.55	17.65	11.8	21.70 %	17.20 %	4.50%	6.75%	0.05	31.24	1068.00	103.31	273.99
C - 03	MAB - 01	0.00 -0.60	A-4	ML	0.67	22.63	76.71	NP	NP	NP	12.73 %	-	-	-	-	-
	MAB - 02	0.60 -1.30	A-1-b	GM	58.15	27.9	13.95	18.00 %	NP	0.00%	7.35%	-	-	-	-	-
C - 04	MAB - 03	0.50 -0.75	A-2-4	SM	0.19	65.21	34.6	NP	NP	NP	16.61 %	-	-	-	-	-
	MAB - 04	0.75 -1.35	A-1-b	GM	54.19	27.62	18.2	20.10 %	NP	0.00%	8.20%	-	-	-	-	-
	MAB - 05	1.35 -2.20	A-1-a	GP	69.23	30.21	0.56	NP	NP	NP	8.84%	-	-	-	-	-
C - 05	MAB - 01	0.00 -1.00	A-1-a	GP	87.18	12.4	0.42	NP	NP	NP	3.82%	-	-	-	-	-
C - 06	MAB - 01	0.00 -1.00	A-1-a	GP	76.85	22.09	1.06	NP	NP	NP	4.04%	-	-	-	-	-
C - 07	MAB - 02	0.30 -0.80	A-1-a	GP	76.9	22.26	0.84	NP	NP	NP	3.77%	-	-	-	-	-
	MAB - 03	0.80 -1.60	A-1-a	GP	81.18	17.95	0.87	NP	NP	NP	3.44%	-	-	-	-	-
C - 08	MAB - 02	0.70 -2.85	A-1-a	GP	57.83	40.44	1.72	NP	NP	NP	3.81%	-	-	-	-	-
C - 09	MAB - 02	0.30 -1.10	A-1-a	GP-GM	69.72	21.74	8.55	NP	NP	NP	10.27 %	-	-	-	-	-
	MAB - 03	1.10 -1.60	A-1-a	GP-GM	64.58	30.31	5.11	NP	NP	NP	5.85%	-	-	-	-	-
	MAB - 04	1.60 -2.80	A-1-a	GP	67.17	31.47	1.36	NP	NP	NP	3.69%	-	-	-	-	-
C - 10	MAB - 01	0.00 -0.80	A-1-a	GP	79.12	20.24	0.64	NP	NP	NP	3.13%	-	-	-	-	-
	MAB - 02	0.80 -1.20	A-2-4	SM	1.95	80.68	17.37	NP	NP	NP	9.76%	-	-	-	-	-
	MAB - 03	1.20 -2.45	A-1-b	SP	38.68	57.94	3.38	NP	NP	NP	8.17%	-	-	-	-	-
C - 11	MAB - 01	0.00 -0.50	A-1-a	GP	73.83	22.93	3.23	NP	NP	NP	4.82%	-	-	-	-	-
	MAB - 02	0.50 -2.20	A-1-a	GP	59.88	39.14	0.98	NP	NP	NP	3.46%	-	-	-	-	-
	MAB - 03	2.20 -2.60	A-1-a	GP	65.6	31.82	2.58	NP	NP	NP	9.33%	0.1	33.95	87.11	169.27	5.79
C - 12	MAB - 02	0.75 -1.75	A-1-a	SP	52.08	46.29	1.63	NP	NP	NP	4.92%	-	-	-	-	-
	MAB - 03	1.75 -3.00	A-1-a	GP	60.85	38.87	0.28	NP	NP	NP	3.66%	-	-	-	-	-

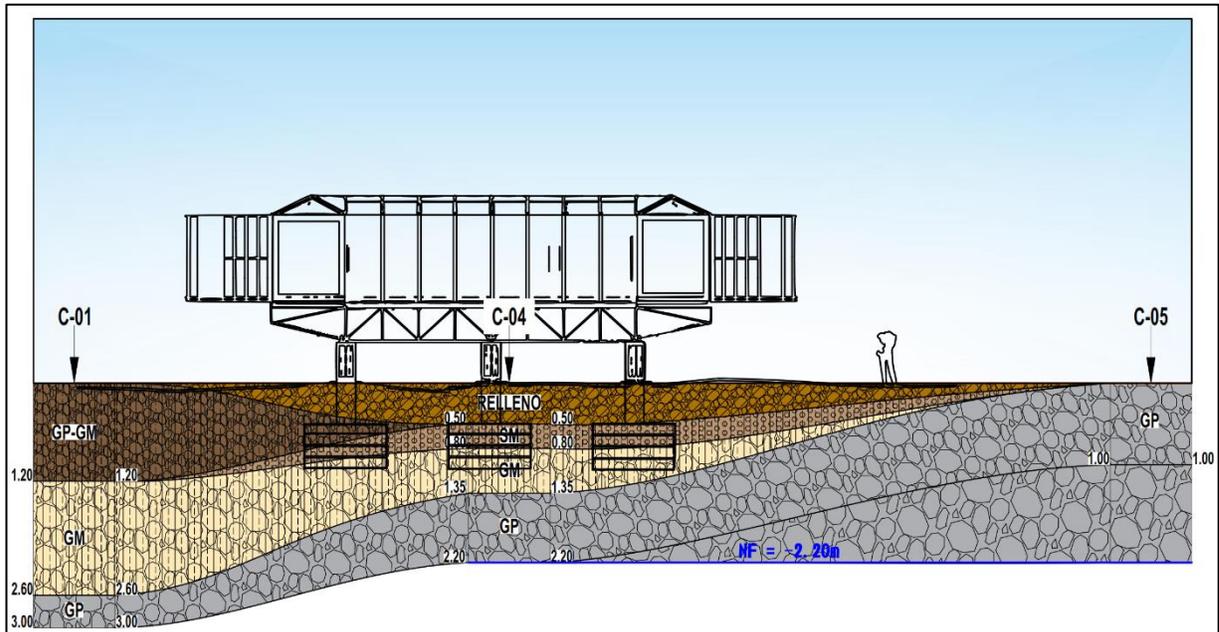
Elaboración propia

9. Caracterización Geotécnica

La caracterización geotécnica de los suelos de la base científica Machu Picchu se refiere a la descripción y evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del suelo en esa zona. Esta caracterización incluye la realización de diferentes tipos de ensayos geotécnicos para determinar la resistencia del suelo, la compacidad, el contenido de humedad, la granulometría, los límites de consistencia, la permeabilidad y otros factores importantes que pueden influir en el comportamiento del suelo en la construcción de estructuras. La información obtenida a partir de la caracterización geotécnica es fundamental para el diseño y construcción de las obras de infraestructura en la base científica.

De las excavaciones de 12 calicatas, con profundidades de hasta 3 metros cada una, se pudo determinar que, en la zona estudiada, los suelos presentan una superficie de hasta 0.80 metros con una composición principalmente de arena con gravas del tipo SP y gravas arenosas con pocos finos limosos clasificados como GP-GM en estado suelto. En algunos sectores se encontraron suelos finos limos arenosos del tipo ML, específicamente en la calicata 03. A partir de los 2.0 metros de profundidad, los suelos son predominantemente gravas arenosas limpias con poco contenido de finos y alto contenido de humedad debido a la presencia del nivel diámetro, con algunas gravas angulosas y otras subredondeadas con una densidad de valores mayores a 2.0 gr/cm^3 . Estos suelos son clasificados como GP. Se determinó que los suelos granulares gruesos del tipo GP-GM son adecuados para soportar cargas y presentan poca deformación debido a su densidad media a alta y saturación por escorrentías superficiales de deshielos. A partir de una profundidad de 1.0 metro, se considera que estos suelos tienen la freático. Estos materiales gruesos tienen un alto porcentaje de gravas y bolones de hasta 8" de capacidad necesaria para soportar las cargas de las estructuras a construir [3].

Figura N° 3. Vista del Perfil estratigráfico de la posible zona de fundación de los nuevos módulos en la base científica peruana Machu Picchu



Fuente: Elaboración propia

10. Análisis de Resultados

Se procederá a analizar los suelos de soporte, para obtener la capacidad de resistencia y deformación del suelo gravo arenoso con baja cantidad de limo (GP-GM), que corresponden a los suelos utilizados para la cimentación, dentro del rango de los esfuerzos transmitidos. Se llevarán a cabo los cálculos correspondientes en los estratos seleccionados a partir del uso de los parámetros obtenidos del ensayo especial de laboratorio corte directo.

10.1 Parámetros de Diseño del Suelo de Cimentación

Según los resultados de laboratorio realizados en las muestras extraídas de las calicatas C-01 hasta C-12, se han determinado los siguientes parámetros para el suelo de apoyo GP-GC de la C-02, Muestra 04, que corresponde al suelo de cimentación más crítico de la zona de estudio, ubicado entre 1.25m y 2.0m de profundidad.

Según el perfil estratigráfico de la zona, se encontraron rellenos no controlados y suelos poco contaminados hasta 1 metro de profundidad. A partir de esto se determinó que el suelo de

cimentación se proyecte a profundidades mayores a 1 metros, por lo que evitará el material suelto o de relleno, y sea sobre un suelo granular del tipo GP a GP-GM, en condiciones semi densas a densas. Este tipo de terreno tiene una configuración granular que le confiere una excelente capacidad de carga.

Se aplicará un coeficiente de seguridad de 3 para determinar la capacidad de carga admisible en los estratos y prevenir variaciones en la resistencia del suelo y asentamientos perjudiciales. Durante los trabajos se alcanzó el nivel freático a profundidades de 2.2 m en la C-02 y hasta 2.90 m en la C-09, pero los suelos granulares gruesos no presentan riesgo de licuación y los suelos finos en el primer estrato no presentan problemas de consolidación [3].

10.2 Capacidad de Carga Admisible

De acuerdo a la teoría de Terzaghi y Peck (1967) y los parámetros de Vesic (1971) [5], se aplicará la ecuación de capacidad de carga general última para cimentaciones superficiales de cualquier tipo, y, además, se utilizará un factor de seguridad (FS) de 3 para determinar la capacidad admisible. Las ecuaciones correspondientes se presentan a continuación.

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

$$q_{adm} = q_{ult} / FS.$$

Debido a la naturaleza semi-densa del suelo de cimentación, se estima que la falla podría ser localizada, lo que podría ocasionar asentamientos elásticos instantáneos a corto plazo. Por esta razón, es necesario trabajar con parámetros de resistencia reducidos. El suelo en cuestión es de tipo gravas pobremente gradadas con presencia de arena y una baja cantidad de finos y bolonerías.

$$C' = (2/3 * C)$$

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

Tabla N° 2. Parámetros geotécnicos

Suelo de apoyo		GP-GM
Ancho de cimentación		B = 1.00 m.
Fondo de cimentación		D _F =1.00 m.
Peso específico 1		$\gamma_1=1.90$ Ton/m ³
Peso específico 2		$\gamma_2=2.05$ Ton/m ³
Nivel Freático		NF=2.20m.
CORTE DIRECTO	Angulo de Fricción	$\Phi = 31.24^\circ$
	Cohesión	c = 0.05 Kg/cm ²
	Módulo de poisson	$\mu = 0.33$
	Módulo de elasticidad	E _s = 600 Kg/cm ²

Elaboración propia

Los resultados indican que los suelos de apoyo de la cimentación presentan una resistencia media a alta al esfuerzo cortante. Estos suelos son de tipo granular grueso, transportados por procesos aluviales y coluviales, y consisten en gravas, arenas y bolones de consistencia media a densa. Los suelos se encuentran húmedos y están expuestos a cambios climáticos extremos debido a la cobertura de hielo en invierno. En síntesis, los parámetros geotécnicos utilizados se muestran en la tabla N° 2 [3].

10.3 Asentamientos

Las características elásticas del suelo de apoyo se determinaron a partir de datos bibliográficos (Bowles), correspondientes al tipo de suelo en el que se asientan las cimentaciones existentes. Los asentamientos instantáneos bajo carga uniforme se han calculado utilizando la teoría elástica que propone la siguiente ecuación:

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

Es

En el suelo de apoyo recomendado, que es del tipo gravas pobremente gradadas con arena y pocos finos, se esperan asentamientos instantáneos durante la construcción, pero no se esperan asentamientos a largo plazo debido a la consolidación del suelo.

La carga aplicada en la cimentación se ha calculado con un esfuerzo vertical máximo transmitido al suelo de 1.85 Kg/cm², y se ha considerado un Módulo de Elasticidad promedio del material de cimentación (Es) de 600 Kg/cm², y una relación de Poisson de 0.33. Según estos parámetros, el asentamiento ha sido estimado y calculado, lo que dio como resultado:

$$S=4.73\text{mm} = 0.473\text{cm}$$

Se ha observado que, en todos los casos, los asentamientos elásticos instantáneos son menores a 25.4 mm, que es el límite permisible para el tipo de estructura existente. Por lo tanto, no hay riesgo de falla por asentamiento [3].

Tabla N° 3. Resultado de Capacidad de Carga y Asentamiento

TIPO DE CIMENTACIÓN	TIPO DE SUELO	D _f (m)	B (m)	Q _u (Kg/cm ²)	Q _{adm} (Kg/cm ²)	S (cm)
CUADRADA	GP-GM	1.00	1.00	5.55	1.85	0.473
RECTANGULAR	GP-GM	1.00	1.00	5.25	1.75	

Elaboración propia

11. Conclusiones

1. Se determinó que el área investigada tiene un suelo heterogéneo con suelos de rellenos poco contaminados y depósitos de suelos gruesos y finos. Los suelos superficiales tienen gravas arenosas con limos y arcillas, mientras que los suelos a profundidades de hasta 3.0 m corresponden a materiales granulares gruesos formados de gravas con arenas mal graduadas y con presencia de bolonerías. En algunos sectores, las gravas tienen caras redondeadas y en otros son angulosas. Se encontraron suelos sueltos no apropiados para la cimentación de estructuras a construir hasta una profundidad de 0.80m. La clasificación de los suelos varía entre GP y GP-GM.

2. Los suelos que conforman la base científica en general son húmedos, debido a las filtraciones de las aguas superficiales de los deshielos y tienen un nivel freático que hace que los suelos estén saturados entre las profundidades de 2.20 m a 2.90 m. El suelo recomendado para la cimentación es el suelo granular grueso de gravas arenosas con pocos limos del tipo GP a GM, que se encuentran a partir de una profundidad de 1.0 m y presentan mayor resistencia, baja deformación, mayor densidad y mayor estabilidad.
3. Según los análisis químicos realizados, el suelo de fundación es moderadamente agresivo y la exposición a iones de cloruro es moderada. El contenido de sales solubles es insignificante y se recomienda el uso de Cemento Tipo II ASTM 150M con una relación de agua/cemento máximo de 0.50 o un mínimo de f' de 28MPa. Sin embargo, los resultados del agua del mar muestran valores altos de sulfatos, sales totales y cloruros, lo que indica un ataque severo. Dado que el concreto estará en contacto frecuente con la humedad y será sometido a ciclos de congelamiento y deshielo, se clasifica como clase F3 para el ACI 318-14.

12. Recomendaciones

El suelo que estará en contacto con el suelo de fundación se humedecerá y compactará el material en contacto con la cimentación para reducir los asentamientos instantáneos. Si se encuentran bolonerías al nivel de la cimentación, se retirarán y rellenarán con concreto fluido. Al llegar al fondo de cimentación, se colocará una capa nivelante de 0.10m de espesor debido al alto porcentaje de agregado grueso.

Se debe evitar cimentar sobre rellenos no controlados y se debe alcanzar la profundidad del depósito granular grueso natural. El nivel de fondo de cimentación no debe ser menor de 1 m desde el nivel actual del terreno.

Se recomienda utilizar cemento tipo V o HS y aditivos para contrarrestar los ataques de sales, cloruros y sulfatos. Para prevenir el ciclo de hielo y deshielo dentro del concreto, se sugiere el uso de impermeabilizantes e incorporador de aire. También se aconseja utilizar acelerantes de fraguado para evitar el congelamiento del agua y plastificantes para controlar la proporción de agua y cemento, así como obtener una resistencia elevada en poco tiempo.

Se recomienda evaluar dos problemas geotécnicos que pueden afectar la estabilidad de las estructuras a construir. El primero se refiere a la erosión del suelo en la zona cercana al mar, lo que hace necesario evaluar y establecer medidas de protección y estabilización del suelo para evitar un posible fenómeno de socavación. El segundo problema es la formación de una quebrada de descarga en la zona del cerro, que requiere un análisis de estabilidad del talud y la implementación de un sistema de encausamiento y retención de aguas para evitar deslizamientos que afecten la zona de las estructuras a construir.

Referencias bibliográficas

- [1] T. W. Pari Pinto y B. Zavala Carrión, «Estudio Geofísico de los Suelos en Punta Crepi - Estacion Científica Peruana Machu Picchu (Isla Rey Jorge Antártida),» *Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET)*, 1999.
- [2] Luis Cerpa, «Estratigrafía de Punta Crepin, Isla Rey Jorge, Islas South Shetland, Antártida,» *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú (SGP)*, 2013.
- [3] M. A. Hernández Aguilar y A. Sotil Chávez, «Estudio de Mecánica de Suelos con fines de Cimentación en la Estación Científica Antártida Machu Picchu (ECAMP) e la Isla Rey Jorge en la Antártida.,» *Geomaster SAC.*, 2019.
- [4] R. N. d. Edificaciones, «Normal E.050 Suelos y Cimentaciones,» *SENCICO*, 2020.
- [5] Braja M Das, «Fundamentos de Ingeniería Geotécnica,» *México*, vol. Cuarta Edición, 2013.

Marco Antonio Hernández Aguilar

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Ingeniero Civil CIP 064415, graduado en la Universidad Ricardo Palma 1985 – 1991, Magíster en Ciencias de la Ingeniería, con mención en Ingeniería Geotécnica por la Universidad Católica de Río de Janeiro - Brasil. 1993 – 1995. Gerente General de Geo Master Ingenieros Consultores S.AC. 1997 – a la actualidad. Consultor Geotécnico de obras de Diseños de Presas de Relave, Estabilización de Taludes, Colocación y Monitoreo de Instrumentación Geotécnica de Campo, estudio y Evaluación de Capacidad Portante, Evaluación Geotécnica del subsuelo mediante perforaciones diamantinas, Estudios Geotécnicos para plantas de tratamientos de aguas residuales, agua de mina y depósitos de relaves, evaluación y diseños de pavimentos, trabajos geotécnicos para estudios hidrogeológicos, para tanques de combustibles. Docente Universitario de los cursos de Mecánica de Suelos I y II en el Pre-grado de la Universidad Ricardo Palma, desde el año 2000 a la actualidad, además de los cursos de titulación profesional para la carrera de ingeniería civil.

Autora corresponsal: marco.hernandez@urp.edu.pe.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1534-428X>

Ronald Saúl Vega López

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Bachiller en Ingeniería Civil con estudios realizados en la Universidad Ricardo Palma Lima, Perú; con enfoque en las especialidades de mecánica de suelos, geotecnia, pavimentos y minería. Cuento con experiencia en el desarrollo y estructuración de proyectos de mecánica de suelos con fines de cimentación y pavimentación, participación en los estudios de ensayos de campo del tipo (SPT, DPL, CPT, refracciones sísmicas, ensayos de densidad de cono, permeabilidad), participación en los ensayos de laboratorio e interpretación de resultados. Uso de los distintos softwares para la representación gráfica y explícita de los distintos resultados del proyecto.

ronald.vega@urp.edu.pe.

Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-3498-5586>.

Contribución de autoría

Los dos coautores del presente artículo Marco Hernández y Ronald Vega, hemos trabajado en colaboración constante en la elaboración del artículo desde la recopilación de datos, organización metodológica, conclusiones y recomendaciones de la investigación.

Financiamiento

La presente investigación ha sido realizada con recursos propios de los coautores de la investigación.

Conflicto de intereses

Los autores no tienen ningún conflicto de interés.

Responsabilidad ética y legal

Los autores confirman que los datos utilizados en esta investigación son del trabajo realizado por ellos y asumen la responsabilidad ética y legal de los mismos.

Correspondencia: marco.hernandez@urp.edu.pe.