

La conservación de la Llaqta Inca de Písaq (Cusco, Perú), desde la geotecnia

The Geotechnical Conservation of the Inca Llaqta of Písaq (Cusco, Peru)

Amparo Abarca Ancori

Maestra en Arquitectura

Profesora Auxiliar Tiempo Completo de la Escuela Profesional de Arquitectura y Urbanismo de la Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura, Universidad Nacional del Altiplano, Perú

aabarca@unap.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0003-0206-4705>

Fecha de recepción: 17 de febrero de 2023

Fecha de aceptación: 22 de mayo 2023

Sugerencia de citación: Abarca Ancori, Amparo.

La conservación de la Llaqta Inca de Písaq (Cusco, Perú), desde la geotecnia.

La Tadeo DeArte 9, n.º 11, 2023: en prensa. <https://doi.org/10.21789/24223158.1970>

Resumen

Se desconocen las técnicas Inca que perennizaron la conservación de Písaq, aunque posiblemente aplicaron factores geotécnicos. Por ello, conocer la geotecnia Inca es el objetivo de investigación, considerando: 1) condiciones locales de emplazamiento, 2) características físicas y mecánicas de los suelos de fundación y 3) capacidad de carga. Los factores fueron observados *in situ* y en laboratorio, utilizando equipos y procedimientos estandarizados y no destructivos. Los resultados revelaron dos estratos: 1) Rellenos Controlados Inca (RCI), conformados por gravas bien graduadas (GW), y 2) macizo rocoso ígneo del tipo andesita shoshonítica, cuya resistencia *in situ* es 714 kg/cm² y en laboratorio es 689 kg/cm². Presentan ángulos de fricción de 31.20° y 44.72° y densidades de 2.02 y 2.60 Tn/m³, respectivamente, con 6.95 kg/cm² de capacidad de carga para 1.156 kg/cm² de esfuerzo vertical. Se considera que los Inca, basados posiblemente en sabiduría ancestral, operaron empíricamente factores geotécnicos que hoy constituyen técnicas ingenieriles estandarizadas.

Palabras clave: bienes culturales; conocimiento; conservación; Llaqta Inca de Písaq; geotecnia; arte.

Abstract

The Inca techniques that served to preserve Písaq perennially are unknown, although geotechnical factors were possibly involved. Therefore, the objective of this research is to know the Inca geotechnics considering: 1) The local conditions of emplacement, 2) the physical and mechanical characteristics of the foundation soils and 3) the load

capacity. The factors were analyzed *in situ* and in the laboratory, using standardized and non-destructive equipment and procedures. The results revealed two strata: 1) Inca Controlled Fills (RCI, in Spanish) made up of well-graded gravels (WG), and 2) igneous rock mass of the shoshonite andesite type, whose resistance *in situ* is 714 kg/cm² and in the laboratory is 689 kg/cm². They also have friction angles of 31.20° and 44.72° and densities of 2.02 and 2.60 Tn/m³, respectively, with a load capacity of 6.95 kg/cm² for 1.156 kg/cm² of vertical effort. It is considered that the Incas, possibly based on ancestral knowledge, empirically operated geotechnical factors that today are considered standardized engineering techniques.

Keywords: Cultural assets; Knowledge; Conservation; Llaqta Inca de Písaq; Geotechnics; Art.

Introducción

Písaq es un bien cultural de relevancia en Perú (figura 1) y de trascendencia para el mundo, similar a Machupicchu (Rodríguez-Pascua *et al.* 2020). La conservación en su contexto original, para evitar exposición a riesgos y consecuencias de excavaciones, se impone en la gestión del patrimonio arqueológico internacional. Y para la normativa arqueológica peruana, es un recurso cultural no renovable, incluidos el suelo y el subsuelo —objeto de investigación—, considerados patrimonio inmueble.

Figura 1. Emplazamiento y características de la Llaqta Inca de Písaq-Calca (Cusco, Perú)



Fuente: Amparo Abarca A.

A pesar de ello, Písaq tuvo intervenciones de conservación y restauración arqueológica, con intensiva apertura de calicatas a cielo abierto, al igual que Machupicchu (Astete y Bastante 2020). Con ello, los suelos de fundación estuvieron expuestos a cambios de humedad que modificaron su función estructural; al tiempo, se desconocía el manejo de los suelos de fundación Inca (K. Wright *et al.* 2002), pues las investigaciones estuvieron enfocadas en la superficie, ninguna en geotecnia (Vilímek *et al.* 2007).

La geotecnia considera condiciones locales, propiedades físicas y mecánicas de los suelos y las capacidades de soporte (Das 2015). Factores que, al ser expuestos a condiciones distintas a las planteadas originalmente, podrían generar colapso de las estructuras de cimentación (Kuroiwa 2016), ocasionar levantamientos o hundimientos y provocar la falla de edificios (Foraboschi y Vanin 2014). Es esta una situación a la que no pueden exponerse los bienes culturales, el patrimonio y la identidad de Perú.

Adicionalmente, se requiere de técnicas que mejoren y controlen las condiciones naturales del suelo: compactación, encaje y drenaje (Lambe y Whitman 2004), pues la geotecnia es una práctica de la imaginación y de la inteligencia, de la prudencia y del

sentido de la observación (Juárez y Rico 2005). Por consiguiente, para la conservación de estructuras históricas (Krentowski, Chyzy y Dunaj 2017), el manejo de la geotecnia es trascendente (Carlotto, Cárdenas y Fidel 2009).

Los suelos de fundación de la Llaqta Inca de Písaq tuvieron que ser operados artificialmente para cumplir función estructural. Wright y Valencia (2006) estiman que los Incas en Machupicchu dedicaron el 60% del trabajo a ese propósito (Cedeño 2008), y Písaq no es la excepción: tuvieron que observar, medir y comprender fenómenos para la modelación y definición de acciones (Sáez 2010), como la construcción de edificios sismorresistentes (Carocci, Macca y Tocci 2021). Para ello debieron utilizar, además, los suelos de acuerdo con sus características físicas y mecánicas, determinantes en la capacidad de carga. El fin era así garantizar la conservación del sistema suelo-cimiento-edificio Inca, con mínima colisión ambiental (Bergamo et al. 2016).

¿Cómo lograron estas técnicas? Seguramente, aprendiendo de los fracasos de antecesores y de los propios (Adam y Buitrago 2018), pero sin duda lograron constituir un verdadero paradigma de la ingeniería ancestral (Astete y Bastante 2020). Consecuentemente, ¿conocían los Incas de geotecnia? Es este el objetivo que busca resolver la investigación, es decir, el enfoque en estructuras históricas del subsuelo (Saloustros *et al.* 2015), cuya futura intervención debería merecer análisis de riesgo, supervisada por especialistas experimentados (Krentowski, Chyzy y Dunaj 2017), por su importancia «*histórica, cultural y espiritual*», que obliga a utilizar métodos inocuos a la naturaleza patrimonial de Písaq y al medio ambiente cobijador (Vilímek et al. 2020).

Esta investigación es parte de la tesis de Maestría en Conservación de Monumentos y Centros Históricos, realizada en la Facultad de Arquitectura y Artes Plásticas (FAAP) de la Universidad Nacional San Antonio Abad de Cusco, Perú. Revela el conocimiento y manejo Inca de las condiciones locales y las características de suelos, para emplazar sus Llaqtas y garantizar su conservación; una praxis Inca vigente para Llaqtas del siglo XXI, donde la investigación del suelo y el subsuelo es trascendental para la perennidad de edificios.

Métodos

La investigación está enmarcada en la geotecnia (ciencia de la Ingeniería), en la línea de arquitectura y urbanismo, cuyo objeto de investigación es la Llaqta de Písaq, del periodo Inca. Se consideran trabajos de campo (observación y ensayos *in situ*), laboratorio (ensayos de caracterización física y mecánica de suelos y roca) y gabinete (abstracción, interpretación y explicación sistémica para la comprobación de hipótesis) (figura 2).

Figura 2. Ensayos con PDL, esclerómetro, compresión simple, granulometría y humedad.



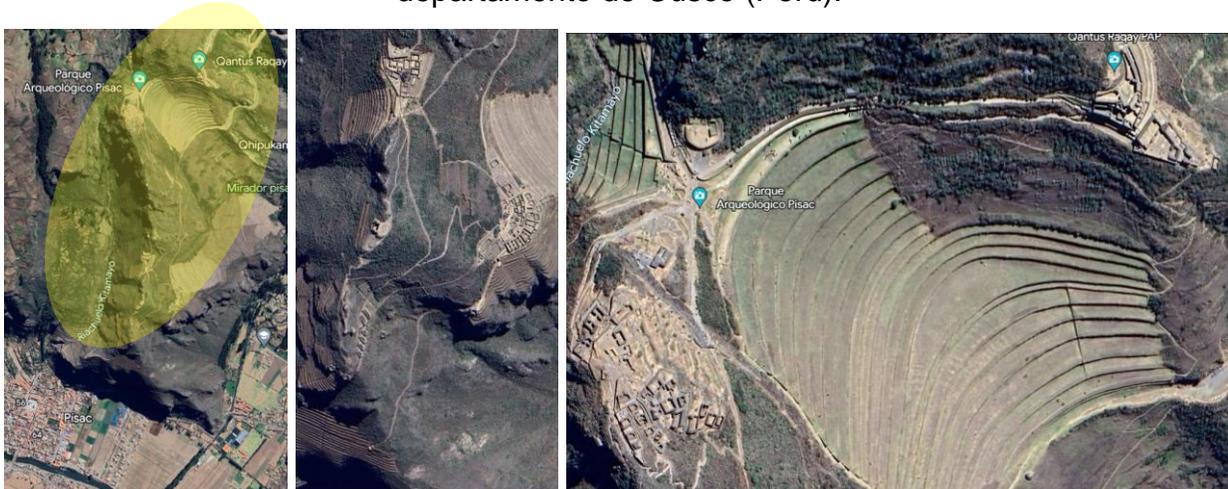
Fuente: Amparo Abarca A.

Está enfocada en el conocimiento del suelo y el subsuelo del emplazamiento de Písaq, cuyo trabajo y manejo Inca habría garantizado su conservación, según la hipótesis de la investigación. Para la comprobación de tal hipótesis se recurre a tres factores de la geotecnia, los cuales aseguran la selección de suelos competentes para la habitabilidad, cuya atención hoy es aventajada por la concepción de edificios *per se*, aunque exponiéndose a desastres de deslizamientos y derrumbes.

Llaqta Inca de Písaq

La Llaqta Inca de Písaq (figura 3) fue construida en el siglo xv como propiedad del gobernante Inca Pachacutec; está ubicada en el departamento de Cusco y provincia de Calca, al suroeste de Perú y al extremo oriental del Valle Sagrado de los Incas. Se encuentra a 3300 m s.n.m. y estuvo conectada a Cusco por una red de caminos. En el siglo xvi fue invadida por los españoles, tras su llegada a Cusco. Hoy está declarada como Patrimonio Cultural de la Nación Peruana.

Figura 3. Localización de la Llaqta Inca de Písaq, provincia de Calca, departamento de Cusco (Perú).



Fuente: Google Earth.

Análisis de las condiciones locales de emplazamiento

Las condiciones locales de emplazamiento se analizaron considerando cinco factores:

- 1) **Geología:** Se evaluó con ensayos de resistencia *in situ*, en los afloramientos rocosos ígneos, utilizando el equipo esclerómetro o martillo de Schmidt, de marca ELE Internacional, serie 1K0104, en las posiciones A y B; equipo validado por la NTP 339.181 y la ASTM C 805. Se busca conocer la resistencia de los macizos rocosos sobre los que se emplazó la Llaqta de Písaq.
- 2) **Clima:** Se utilizó la información reportada en el Plan Maestro del Parque Arqueológico de Písaq, publicado por la Dirección Regional de Cultura Cusco-Perú (Instituto Nacional de Cultura Cusco 2005), con la finalidad de determinar la influencia de este en la selección del emplazamiento Inca.
- 3) **Nivel freático:** Se determinó utilizando el equipo penetrómetro dinámico ligero (DPL), de marca Pinzuar, validado por la NTP 339.159 y la DIN 4094, con el propósito de verificar la presencia o no de agua en el emplazamiento de Písaq y su incidencia en la conservación de la Llaqta.
- 4) **Efecto sismo:** Se verificó con los equipos: penetrómetro dinámico ligero (DPL) de marca Pinzuar; validado por la NTP 339.159 y la DIN 4094, y esclerómetro, de marca ELE Internacional, Serie 1K0104, en las posiciones A y B; equipo validado por la NTP 339.181 y la ASTM C 805. Se busca conocer si el emplazamiento natural presentaba o no algún tipo de trabajo artificial Inca que encare los probables efectos de sismos.
- 5) **Relieve:** Se precisó con el equipo penetrómetro dinámico ligero (DPL), de marca Pinzuar, validado por la NTP 339.159 y la DIN 4094, con el propósito de determinar

si las condiciones naturales del suelo y el subsuelo del emplazamiento de Písaq habrían sido trabajadas artificialmente por los Incas para su habitabilidad.

Caracterización física y mecánica de los suelos de fundación

Factor evaluado *in situ* con los equipos penetrómetro dinámico ligero (DPL), de marca Pinzuar (NTP 339.159-DIN 4094), y esclerómetro, de marca ELE Internacional, Serie 1K0104, en las posiciones A y B (NTP 339.181-ASTM C 805). El primero para caracterizar la estratigrafía del suelo (¿natural o artificial?), y el segundo para determinar las propiedades mecánicas.

Se extrajeron muestras alteradas en bolsa (NTP 339.159), para la caracterización de suelos (NTP 339.134) en laboratorio, como contenido de humedad (NTP 339.127-ASTM D 2216), peso específico (NTP 339.131-NTP 400.021-ASTM D 854), granulometría (NTP 339.128-ASTM D 422) y compresión simple no confinada (NTP 339.039).

Determinación de la capacidad de carga de los suelos de fundación

La capacidad de carga se calculó utilizando el método de Meyerhof, considerando el largo, ancho y la profundidad del plano de cimentación y la altura de encaje, con un factor de seguridad de 3 y una aceleración máxima horizontal de 2.5. Se consideraron los ángulos de fricción (Φ) y las densidades (γ) de suelos y rocas de fundación de la Llaqta de Písaq.

Resultados y discusión

Condiciones locales de emplazamiento

- 1) Geología:** Conformada por roca ígnea del tipo andesita shoshonítica, correspondiéndole un perfil de suelo S1 (roca), con velocidad de propagación de ondas de corte entre 500 y 1500 m/s; concordante con la NTP E.030 y con Ramírez y Alejano (2004), que la consideran como buena a excelente como suelo de apoyo, por su baja compresibilidad y expansión y elevada permeabilidad. Adicionalmente, es estratégica la aportación de la geología en la obra Inca (Martín *et al.* 2020); en consecuencia, los Incas habrían seleccionado una geología de roca dura para el emplazamiento de la Llaqta de Písaq, lo cual garantizaba estabilidad y seguridad física para la habitabilidad y, en consecuencia, para la conservación perenne de la Llaqta. Esta sabiduría ancestral Inca, que se habría concentrado en asegurar primero la base que sustentaría los cimientos, es parte de lo conocido como “cultura de prevención” y “vivir en armonía con la naturaleza” (Tavera 2020).
- 2) Clima:** Písaq está entre 2900 y 3800 ms.n.m., con un clima templado y una temperatura que oscila entre los 2 °C y los 21 °C. Las precipitaciones pluviales son estacionales (noviembre a marzo), con 790 mm de intensidad, 60% de humedad y baja nubosidad. Estas condiciones son encaradas con Rellenos Controlados

Inca (RCI), que posibilitaron la infiltración del agua al subsuelo, patrón constructivo Inca recurrente en las Llaqtas, entre ellas, Machupicchu (K. R. Wright 2013). La elección Inca de un clima seco para el emplazamiento de Písaq se debe posiblemente a evitar desequilibrios gravitacionales; ejecutando, además, eficientes sistemas de drenaje tanto superficiales como subterráneos, que, entre varias técnicas Inca, “son solo una parte del sólido trabajo de ingeniería..., pero esencial” (K. Wright, McEwan y Wright 2006) para la habitabilidad en las propiedades de la nobleza Inca como Tipón, Písaq y Machupicchu.

3) Nivel freático: Los Incas eligieron el emplazamiento de Písaq por la inexistencia de nivel freático; probablemente, debido a que el Inca Pachacutec experimentó dificultad para resolver las ciénagas y los manantiales sobre las que estaba construido Cusco antes de su intervención (Rostworowski 2011). Se considera un nivel de alto riesgo, pues la presencia de humedad disminuye la resistencia a compresión de suelos granulares y materiales de construcción (Foraboschi y Vanin 2014). Se concuerda con el hecho de que hoy la evaluación previa del nivel freático “es una de las cuestiones científicas clave en la evaluación del impacto de la capacidad de carga de los cimientos” (Chen, Liu y Wang 2022), y los Incas hace 500 años lo habrían considerado, previo al emplazamiento de la Llaqta Inca de Písaq. Resulta entonces que los Incas nos estarían presentando lecciones que bien pueden aplicarse en el siglo XXI, de manera previa a la habitabilidad.

4) Efecto Sismo: Písaq está ubicada en Cusco, catalogada como zona sísmica de categoría 2, cuyas intensidades sísmicas frecuentes oscilan entre II y V. Presenta un factor de aceleración máxima horizontal de 2.5, conforme a lo determinado por Tavera, Agüero y Fernández (2016). Frente a esta demanda sísmica, los Incas implementaron los Rellenos Controlados Inca (RCI) y edificios sismorresistentes, cuya geometría es eficaz respecto de edificios esbeltos (Milani y Valente 2015).

Así mismo, los ensayos de compresión simple no confinada del E2 muestran un valor promedio de 689 kg/cm²; valor elevado respecto a los 210 kg/cm² que la NTP E.060 define como óptima. Además, los parámetros más significativos contra una acción sísmica son la compresión y tracción (Saloustros *et al.* 2015); en efecto, garantizan un comportamiento resistente y demanda sísmica amplia (Safkan *et al.* 2017), para edificios, estructuras y cimientos (Barmenkova, 2019).

Respecto a los RCI E1, los resultados muestran que constituyen la estrategia técnica Inca más significativa para reducir el efecto sismo, pues tienen el propósito de disminuir las conexiones de los cimientos con el suelo, “fuente de los efectos sísmicos” (Mendoza, Ruge y Caicedo 2018). Por esta razón, probablemente los Incas implementaron cimentaciones superficiales y sin ningún tipo de conexión rígida a los suelos de fundación (Barmenkova 2019). Lo anterior explica que el terremoto de 1650 en Cusco, producto de la falla Zurite-Huarocondo-Tambomachay (ZHT), no reportara daños en las Llaqtas Inca como Písaq y Machupicchu (Rodríguez-Pascua *et al.* 2020). Y ello evidencia que la praxis constructiva Inca tenía relación con la conciencia del potencial destructivo de los

sismos (Carocci *et al.* 2021); por ello, se hipervaloraron las condiciones locales para la conservación de los edificios (Benmansour *et al.* 2021).

Además de todo ello, hoy está demostrado que la frecuente ocurrencia de sismos en el mundo ha permitido comprender que “los desastres en las ciudades son debidos únicamente al tipo de suelos y a la calidad de las construcciones” (Tavera 2010). Probablemente por ello los Incas habrían elegido una geología de roca dura, pues, a decir de Tavera (2010), “los suelos no compactos magnifican las amplitudes de las ondas sísmicas y, con ello, la intensidad del sacudimiento del suelo. Dados estos escenarios, el desastre es seguro”.

- 5) Relieve.** Los resultados muestran que los relieves abruptos y empinados del emplazamiento de Písaq fueron transformados y habilitados artificialmente por los Incas, con la operación de Rellenos Controlados Inca (RCI), cuya función multipropósito permitió nivelar superficies, distribuir uniformemente cargas verticales y coleccionar y drenar las aguas pluviales hacia el subsuelo. Para Torres (1996), son los andenes que infiltran el agua hacia la roca y su evacuación al río Vilcanota. En suma, la elección de las condiciones locales formaría parte de las tradiciones arquitectónicas andinas (Gavazzi 2012), constituidas por conocimientos vernáculos, expresados en componentes constructivos notables (Urbina *et al.* 2018). Ello posibilitó encarar eficientemente condiciones espaciales y climáticas adversas (Vilímek *et al.* 2020), logrando una cartografía sagrada y orgánica en las Llaqtas Inca (Mormontoy 2001), integradas a geofomas como las montañas, para constituir “geosímbolos de referencia” en el territorio de los Andes (Williams y Castellanos 2020).

Características físicas y mecánicas de los suelos de fundación

Los suelos de fundación en la Llaqta Inca de Písaq presentan dos estratos: por un lado, Estrato 1 (E1), Relleno Controlado Inca (RCI), conformado por gravas bien graduadas (GW) del sustrato rocoso ígneo, en capas de granulometría descendente, cuyo espesor, en promedio, está en función del tipo de estructura: muros de contención de 2.70 m, plataformas agrícolas de 2.70 m, recintos de 0.50 m, plazas de 0.40 m y patios de 0.30 m; por otro lado, el Estrato 2 (E2), el macizo rocoso ígneo andesita shoshonítica.

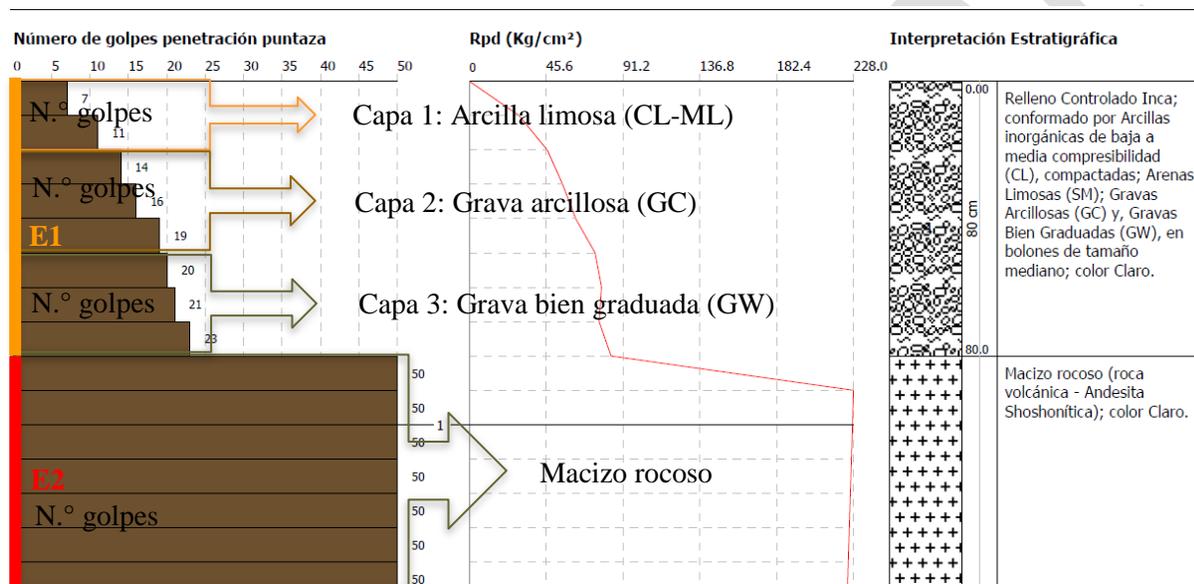
En los resultados de investigaciones arqueológicas se denomina el E1 como líticos de diferente tamaño (Rosa 2004). También como suelo compacto con bastante grava y piedra, con lentes de gravilla (Estrada 2007). Además, como tierra con piedra angulosa de diferente tamaño (Cáceres 2010). Finalmente, como líticos de diferente tamaño que forman parte del relleno. Y al E2 lo denominan como formación geológica, no distinguiéndose estratos sino capas de suelo (Álvarez 2011).

Esta estratigrafía (E1 y E2) presenta parámetros geotécnicos como ángulos de fricción (Φ) y densidades (γ), obtenidos de correlacionar el golpeo penetrométrico y las características de los suelos. Así, las arcillas consolidadas se reconocen a partir de 4 a 6

golpes para profundizar 10 cm; las arenas, de 6 a 9 golpes; las gravas arcillosas, gravas arenosas y gravas, de 9 a 23 golpes; y al contacto con la roca, el golpeo rebota.

Tanto el Φ como γ determinan la capacidad de carga (Das 2015); con mayor incidencia, el Φ (Mendoza, Ruge y Caicedo 2018). En la figura 4 se presenta por primera vez la estratigrafía de los suelos de fundación Inca en Písaq. Las investigaciones arqueológicas realizadas por Álvarez (2011), Estrada (2007) y Rosa (2004), a pesar de la intensa excavación a cielo abierto como en Machupicchu (Astete y Bastante 2020), no detallan la estratigrafía de fundación.

Figura 4. Perfil estratigráfico característico de Recintos en la Llaqta Inca de Písaq.



Fuente: Elaboración propia.

El estrato 1 (E1) está conformado a su vez por varias capas, integradas predominantemente por suelos granulares (SW y GW), que se presentan en la tabla 1 y la figura 5. Esto evidencia que los suelos de fundación de la Llaqta Inca de Písaq fueron trabajados artificialmente, mejorando su conformación para el control de condiciones naturales. Manejo que hoy se recomienda para evitar la ocurrencia de deslizamientos, derrumbes, caída de rocas, entre otros, ejecutando tratamiento de taludes como lo hicieron los Incas hace cinco siglos (INGEMET 2020).

Tabla 1. Clasificación de suelos estrato 1, Relleno Controlado Inca (RCI).

Muestra	N.º	Estrato	Prof.	CA %	LP %	LL %	IP	Cu	Cc	Clasificación SUCS
1	C-01	E-01	0.00-0.90	2.20	NP	NP	NP	428.72	255.43	GP

Nota: CA: contenido de agua; LP: límite plástico; LL: límite líquido; IP: índice de plasticidad; Cu: coeficiente de uniformidad; Cc: coeficiente de curvatura; SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos; GP: grava mal graduada.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Conformación de Rellenos Controlados Inca (RCI) en plataformas agrícolas en Písaq (izquierda y centro) y Machupicchu (derecha), Estrato 1 (E1) de los suelos de fundación.



Fuente: Amparo Abarca A.

La tabla 2 muestra los parámetros geotécnicos del E1 y E2, cuyo propósito es resolver desniveles y asegurar bases sólidas para los alzados de mampostería (Rodríguez y Daza 2021); una información desconocida hasta la fecha. La tabla 3 presenta los Pesos Unitarios o densidad del E2 (roca ígnea andesita shoshonítica), coincidentes a los 2700 kg/m³ presentados por Puelles (2010) —en Astete y Bastante (2020)—, y similares a la densidad de la roca andesita sana (Bieniawski 1989).

Tabla 2. Ángulos de fricción y densidades promedio de correlaciones penetrométricas.

Llaqta Inca de Písaq	Φ (°)	γ tn/m ³	γ_{sat} tn/m ³
E1: Gravas (GW)	31.20	2.02	2.18
E2: Andesita shoshonítica	44.72	2.60	-

Nota: E1 y E2 = estrato 1 y 2; Φ = ángulo de fricción; γ = densidad; γ_{sat} = densidad saturada.
 Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Pesos Unitarios (densidad) de Estrato 2: macizos rocosos

Llaqta Inca de Písaq	Peso Unitario (kg/cm ³)			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
Andesita shoshonítica	2.69	2.76	2.77	2.72

Nota: A mayor densidad, mayor capacidad de carga.
 Fuente: Elaboración propia.

En ambos estratos (E1 y E2), la densidad es competente frente a 1.90 kg/cm³, de roca ígnea sana (Ramírez y Alejano 2004), corroborada por la elevada resistencia que presentan los macizos rocosos ígneos, verificados *in situ* con el equipo esclerómetro (tabla 4) y ratificados con ensayos de compresión simple no confinada en laboratorio (tabla 5), con valores superiores a los 210 kg/cm², según exige hoy la NTP E.060 de concreto armado.

Tabla 4. Resistencia de macizos rocosos (E2): correlaciones esclerométricas.

Llaqta Inca de Písaq	Resistencia en kg/cm ²									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	Promedio
Andesita Shoshonítica	714	714	714	714	652	-	-	-	-	701.6

Nota: P = Prueba.
 Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Resistencia de macizos rocosos (E2): compresión simple no confinada.

Llaqta Inca de Písaq	Resistencia (kg/cm ²)			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
Andesita shoshonítica	670.85	745.38	651.59	689

Nota: P = Prueba.
 Fuente: Elaboración propia.

Capacidad de carga

La carga vertical promedio de los edificios en la Llaqta Inca de Písaq, calculada en la investigación, es de 1.156 kg/cm². De acuerdo con la NTP E.050, la capacidad de carga debe tener un valor similar o superior a este; de lo contrario, puede ocasionar daños significativos en las estructuras de mampostería (Saloustrós *et al.* 2015). La tabla 6 presenta la capacidad de carga de los suelos de fundación Inca, calculados con el Método de Meyerhof. Esta capacidad de soporte guarda relación directa con el tipo de geología elegido por los Incas para la Llaqta de Písaq.

Tabla 6. Cálculo de capacidad de carga de suelos de fundación.

Parámetros de cálculo (kg/cm ²)												
Llaqta Inca de Písaq	FNq	FNc	FNg	Sc	Dc	Sq	Dq	Sg	Dg	Pu	Pa	
	Con parámetros geotécnicos críticos a 1.50 metros de profundidad											
	9.93	19.76	6.03	1.58	1.39	1.29	1.19	1.29	1.19	1.19	5.69	1.90
	Con parámetros geotécnicos óptimos a 1.50 metros de profundidad											
23.76	36.12	22.83	1.79	1.45	1.39	1.23	1.39	1.23	1.23	20.84	6.95	
Con parámetros geotécnicos óptimos a 2.50 metros de profundidad												
23.76	36.12	22.83	1.79	1.75	1.39	1.38	1.39	1.38	1.38	35.04	11.68	

Fuente: Elaboración propia.

Nota: FNq = factor de capacidad de carga por sobrecarga efectiva; FNc = factor de capacidad de carga por cohesión; FNg = factor de capacidad de carga por gravedad; Sc, Sq, Sg = factores de forma; Dc, Dq = factores de profundidad; Pu = presión última (capacidad de carga última); Pa = presión admisible (capacidad de carga admisible).

Los resultados corresponden a cálculos con valores críticos (desfavorables) y con valores óptimos. En ambos casos, las capacidades de carga, o presión última (Pu) y presión admisible (Pa), superan la carga vertical actuante de 1.156 kg/cm², constituyendo así suelos de fundación competentes. Esto concuerda con la tesis de Puelles (2010), que considera la roca ígnea como suelos con buena capacidad portante (Astete y Bastante 2020).

Por otro lado, en suelos granulares y roca es trascendente el nivel de confinamiento. Los Incas lo lograron con eficientes técnicas de encaje, soterramiento y compactación (Álvarez 2011). Adicionalmente, soterraron hiladas de muro (figura 3), incluso muros de

contención para soportar estructuras mayores. Estas técnicas constructivas Incas, recurrentes en sus Llaqtas como Machupicchu (Champi 2007, 2008, 2009), logran la solidez estructural del sistema suelo-cimiento-edificio.

En la cresta de la montaña rocosa ígnea existen edificios asentados directamente sobre el macizo rocoso. Significa lo anterior que la utilización de los Rellenos Controlados Inca (RCI) probablemente fue selectiva, de acuerdo con el nivel de altura de la montaña, las condiciones del relieve y el requerimiento estructural de soporte de los edificios; característica recurrente en las Llaqtas Inca.

Figura 6. Confinamiento de cimentaciones Inca.



Fuente: Amparo Abarca A.

Nota: De izquierda a derecha, Písaq, Machupicchu y Saqsaywaman, cimentación directa, óptima compactación y soterramiento de hiladas de muro.

Finalmente, utilizando el método de Meyerhof, se realizaron los cálculos de los asentamientos (tabla 7), reportando valores inferiores al tolerable de 2.54 cm, según la NTP E.050. Se concuerda con Puelles (2010), que considera que los anchos de cimientos Inca (0.80 y 0.90 m) permitieron mejor estructuración de muros, incrementar el área de distribución y transmisión de las cargas, mayor coeficiente de seguridad y prever posibles asentamientos diferenciales (Astete y Bastante 2020).

Tabla 7. Cálculo de asentamientos de los suelos de fundación.

	Estratos	Z	Método	Wc (cm)	Ws (cm)	Wt (cm)
Llaqta Inca de Písaq	Con parámetros críticos					
	2	3.60	Schmertmann	0.084	0.033	0.117
	Con parámetros óptimos					
	2	3	Schmertmann	0.154	0.064	0.216

Fuente: Elaboración propia.

Nota: 2 = Estrato 2; Z = Prof. promedio del Estrato 2 (E2); Método = John H. Schmertmann [investigador más representativo en el cálculo de asentamientos sobre suelos granulares, la variación de la deformación unitaria debido a la carga aplicada sobre el cimiento, a lo largo de la profundidad (Cier 2015)]; Wc = asiento de consolidación; Ws = asiento secundario; Wt = asiento total.

Conclusiones

Para la conservación de edificios históricos es fundamental el conocimiento y manejo de la geotecnia, empezando con la elección de selectas condiciones locales para el emplazamiento de edificios. Condiciones locales como el clima, en ausencia de precipitaciones pluviales intensas, coadyuvan a evitar desequilibrios gravitacionales en emplazamientos con pendiente.

La ausencia de nivel freático en suelos de fundación evita cambios en sus propiedades y la ocurrencia de fallas y/o asentamientos diferenciales de edificios. Así mismo, la elección de una geología de roca dura y la operatividad de Rellenos Controlados (ubicados entre el suelo y los edificios) garantizan óptima respuesta al efecto sismo.

Los relieves abruptos y empinados de macizos rocosos como emplazamiento de edificios son factibles; solo requieren labores de mejora para controlar su condición natural y garantizar la habitabilidad y uso. Son posibles mejoras como la estabilización de taludes con sistemas de contención y nivelación de superficies abruptas con Rellenos Controlados, conformados por material selecto.

La competencia geotécnica de suelos y rocas de fundación para cimentaciones depende de las propiedades físicas y mecánicas que estos presentan. Las rocas y gravas bien graduadas tienen densidades y ángulos de fricción con valores óptimos, que garantizan capacidades de carga elevadas, coadyuvadas por técnicas ingenieriles de confinamiento, encaje y compactación.

La utilización de los suelos, de acuerdo con sus propiedades físicas y mecánicas, garantizan la conservación de edificios. Así, se destaca el uso de rocas y gravas para cimiento por su elevada resistencia y casi nula posibilidad de modificar sus características frente a cambios de humedad y temperatura; en tanto los suelos finos como las arcillas se usan como ligante o sellante, por sus propiedades cohesivas.

Todas estas técnicas, relacionadas con la ingeniería en la especialidad de geotecnia, fueron aplicadas por los Incas para la conservación de la *Llaqta* de Pisaq hace más de 500 años. Se enfocaron en la elección de óptimas condiciones locales y en la preparación y mejora de los suelos de fundación, que hoy conocemos cumplen una función estructural que no puede trastocarse más.

Es trascendente que las intervenciones de conservación del Patrimonio Arqueológico consideren como punto de partida la investigación geotécnica e interdisciplinaria, y que sus resultados sean de difusión tanto en la academia como en la sociedad, por el contenido técnico que se heredó de la civilización Inca, cuya vigencia es indiscutible para la conservación de las ciudades del siglo XXI.

Referencias

- Adam, José M., y Manuel Buitrago. «Learning from Failures in an Emblematic Building in Valencia, Spain.» *Engineering Failure Analysis* 92 (2018): 418-29.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.06.023>.
- Álvarez, Lorena. «Informe de Proyecto de Investigación Sector Ajchapata, P.A. Písaq.» Cusco, Perú, 2011.
- Astete, Fernando, y José M. Bastante, eds. *Machupicchu: Investigaciones interdisciplinarias*. Vol. I. Cusco: Dirección Desconcentrada de Cultura Cusco, 2020.
- Bergamo, Orlando, Giuseppe Campione, Carmelo Cucchiara, y Giuseppe Russo. «Structural Behavior of the Old Masonry Bridge in the Gulf of Castellammare.» *Engineering Failure Analysis* 62 (2016): 188-98.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.02.007>
- Bieniawski, Z. Tadeusz. *Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering*. John Wiley & Sons, 1989
- Cáceres, Carmela. *Informe Final del Proyecto de Evaluación Arqueológica del Predio Chongo Grande Ubicado en el Centro Poblado de Písaq - Cusco*. Cusco, 2010.
- Carlotto, Víctor, José Cárdenas, y Lionel Fidel. «La geología, evolución geomorfológica y geodinámica externa de la ciudad inca de Machu Picchu, Cusco-Perú.» *Revista de La Asociación Geológica Argentina* 65, no. 4 (2009).
http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-48222009000800013
- Carocci, Carli F., Valeria Macca, y Chiara Tocci. «The Roots of the 18th Century Turning Point in Earthquake-Resistant Building.» En *History of Construction Cultures*, 623-30. CRC Press, 2021. <https://doi.org/10.1201/9781003173434-193>.
- Cedeño, Luisa. «El uso de las evidencias materiales en la investigación de la cultura celtibérica: la zona arqueológica de el ceremeño (Guadalajara, España).» *Trabajos de Prehistoria* 65 (2008): 93-114.
- Chen, Wenfeng, Qichao Liu, y Erlei Wang. «The Effect of the Water Table on the Bearing Capacity of a Shallow Foundation.» *Applied Sciences* 12, no. 13 (2022).
<https://doi.org/10.3390/app12136571>.

- Das, Braja M. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Cuarta edición.
https://www.academia.edu/37854899/Fundamentos_de_Ingenieria_Geotecnica_Braja_M_Das.
- Estrada, Gustavo. *Informe Parque Arqueológico Nacional de Písaq - Sector Qhosqa*.
Cusco: Perú, 2007.
- Foraboschi, Paolo, y Alessia Vanin. «Experimental Investigation on Bricks from Historical Venetian Buildings Subjected to Moisture and Salt Crystallization.» *Engineering Failure Analysis* 45 (October 2014): 185-203.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.06.019>.
- Gavazzi, Adine. *Microcosmos: visión andina de los espacios pre hispánicos*. Edited by Apus Graph Ediciones. Vol. 1. Lima: Apus Graph Ediciones SAC, 2012.
- INGEMET. «Evaluación de peligros geológicos por deslizamientos y reptaciones en los Sectores Hualcayan y Tambo (Canta). Región Lima, Provincia Canta, Distrito Canta.» Lima, Perú, 2020. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3039>.
- Instituto Nacional de Cultura Cusco. *Plan Maestro del Parque Arqueológico de Písaq*. Edited by Dirección Regional de Cultura Cusco. Cusco, Perú, 2005.
- Juárez, Enrique, y Alberto Rico. *Mecánica de Suelos*. Tomo I. Ciudad de México: Editorial LIMUSA, 2005.
- Krentowski, Janusz, Tadeusz Chyzy, y Piotr Dunaj. «Sudden Collapse of a 19th-Century Masonry Structure during Its Renovation Process.» *Engineering Failure Analysis* 82 (December 2017): 540-553. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.04.010>.
- Kuroiwa, Jorge. *Manual para la reducción del riesgo sísmico de viviendas en el Perú*. Editado por Construcción y Saneamiento Ministerio de Vivienda. Primera edición. Lima, Perú, 2016.
- Lambe, Terzaghi, and Whitman. *Mecánica de suelos*. Limusa: Ciudad de México, 2004.
- Mendoza, Claudia, Juan C. Ruge, y Beatriz Caicedo. "The Geological History Analysis of the Friction Angle in Transported Soils and Their Importance in the Bearing Capacity of Shallow Foundations." *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* 34 (enero de 2018).
<https://doi.org/10.23967/j.rimni.2017.8.003>.
- Ramírez, Pedro, y L. Alejano. *Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes*. Red Desir: 2004.

- Rodríguez, Miguel Ángel Tabales, y Pedro Gurriarán Daza. «La construcción del Alcázar de Sevilla. Replanteo, Cimentaciones y Murallas Fundacionales.» *Informes de la Construcción* 73, no. 563 (2021): 1-15.
<https://doi.org/10.3989/IC.78484>.
- Rodríguez-Pascua, Miguel Ángel, C. Benavente Escobar, L. Rosell Guevara, C. Grützner, L. Audin, R. Walker, B. García, y E. Aguirre. "Did Earthquakes Strike Machu Picchu?" *Journal of Seismology* 24, no. 4 (2020): 883-895.
<https://doi.org/10.1007/s10950-019-09877-4>.
- Rosa, Maritza. *Informe de Investigación Arqueológica Sector Andenes Qosqa - Parque Arqueológico de Písaq*. Cusco, Perú, 2004.
- Rostworowski, María. *Pachacutec Inca Yupanqui*. Lima: IEP, 2011.
- Sáez, Eduardo. *Fundamentos de geotecnia*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2010.
- Saloustros, Savvas, Luca Pelà, Pere Roca, y Jorge Portal. «Numerical Analysis of Structural Damage in the Church of the Poblet Monastery.» *Engineering Failure Analysis* 48 (February 2015): 41-61.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.10.015>.
- Tavera, Hernando, Consuelo Agüero, y Efraín Fernández. *Catálogo general de Isosistas Para Sismos Peruanos*. Lima, Perú, 2016.
<https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12816/791/Catalogo-general-de-isosistas-para-sismos-peruanos.pdf;jsessionid=71670773BB7263BD0AC716B3F286A7E9?sequence=5>.
- Tavera, Hernando. *Educando en la preparación ante terremotos y tsunamis: cuaderno de trabajo*. COOPI, 2010.
- Tavera, Hernando. *Terremotos-vs-Sismos-Hernando-Tavera*. Edited by Hernando Tavera. 1ra. edición digital. Lima, 2020.
<https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12816/4851/Terremotos-vs-sismos-Hernando-Tavera.pdf?sequence=5&isAllowed=y>.
- Urbina, Ana Simón, Ana Leonor Adán, Hernán Constanza Pellegrino y Sergio J. Roberto Izaurieta. «Architectural History of Tarapacá: Residential Strategies and Settlement Formation, Xth Century BC - XVIIth Century AD (South Central Andes).» *Estudios Atacameños* no. 58 (2018): 125-149.
<https://doi.org/10.4067/S0718-10432018005000802>.

Vilímek, Vít, Jan Klimeš, Ruth Verónica Ttito Mamani, José Bastante Abuhadba, Fernando Astete Victoria, y Piedad Zoraida Champi Monterroso. «Contribution of the Collaborative Effort of the Czech WCoE to Landslide Risk Reduction at the Machupicchu, Peru.» *Landslides* 17, no. 11 (2020): 2683-88.
<https://doi.org/10.1007/s10346-020-01509-0>.

Vilímek, Vít, Jiří Zvelebil, Jan Klimeš, Zdeněk Patzelt, Fernando Astete, Václav Kachlík, and Filip Hartvich. «Geomorphological Research of Large-Scale Slope Instability at Machu Picchu, Peru.» *Geomorphology* 89, no. 3-4 (2007): 241-257.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.12.004>.

Wright, Kenneth R. «Inca Foundations, Site Preparation, and Drainage at Machu Picchu.» *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 18, no. 2 (2013): 131-142. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)sc.1943-5576.0000146](https://doi.org/10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000146).

Wright, Kenneth, Gordon McEwan, y Ruth Wright. *TIPON Water Engineering Masterpiece of the Inca Empire*. Accessed September 2021.
<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85031032194&origin=resultslist&sort=plf->

Wright, Kenneth, Ruth Wright, Alfredo Valencia, y Gordon McEwan. *Moray Inca Engineering Mystery*. American Society of Civil Engineers, 2002.
<https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784410790>

po,