

INCIDENCIA DE LOS RELLENOS CONTROLADOS EN LA CONSERVACIÓN DE LOS EDIFICIOS INCA EN CUSCO

Incidence of controlled filling on the conservation of the Inca buildings in Cusco

Amparo Abarca Ancori^a, Hugo Anselmo Ccama Condori^a

^a Instituto de Investigación en Arquitectura y Construcciones, Universidad Nacional del Altiplano, Perú

RESUMEN – A nivel mundial, Asentamientos Humanos emplazados en laderas o explanadas, fácilmente son devastados por diversos factores adversos. Sin embargo, edificios del periodo Inca, en Cusco - Perú, se conservan en pie por más de cinco siglos. ¿qué hicieron los Inca para la conservación perenne de sus edificios? Existe un vacío de conocimiento. Por este motivo, se busca evaluar los Rellenos Controlados Inca (RCI), y su incidencia, en la conservación de los edificios en Machupicchu, Písaq y Saqsaywaman. El estudio analiza los suelos de fundación. Se utilizó equipos no invasivos, (Martillo de Shmith-MSh y Penetrómetro Dinámico Ligero-DPL); para caracterizar los RCI y la competencia geotécnica. Los resultados muestran que los edificios están emplazadas en geología de roca dura, sobre la cual se construyó artificialmente los RCI; los parámetros geotécnicos encontrados son competentes. Probablemente los Inca, eligieron suelos de fundación competentes y los mejoraron con RCI, para controlar la interacción suelo – cimiento – edificio.

ABSTRACT – Worldwide, human settlements located on hillsides or esplanades are easily devastated by various adverse factors. However, buildings of the Inca period, in Cusco - Peru, are preserved standing for more than five centuries. What did the Incas do for the perennial preservation of their buildings? There is a lack of knowledge. For this reason, we seek to evaluate the Inca Controlled Infill (ICF), and its impact on the conservation of buildings in Machupicchu, Písaq and Saqsaywaman. The study analyzes the foundation soils. Non-invasive equipment (Shmith Hammer-MSh and Dynamic Lightweight Penetrometer-DPL) was used to characterize the RCI and geotechnical competence. The results show that the buildings are located in hard rock geology, on which the RCIs were artificially built; the geotechnical parameters found are competent. The Inca probably chose competent foundation soils and improved them with RCIs to control the soil-foundation-building interaction.

Palabras Clave – Edificios Inca, cimientos, rellenos controlados.

Keywords – Inca buildings, foundations, controlled infills.

1 – INTRODUCCIÓN

Machupicchu, Písaq y Saqsaywaman, son bienes culturales relevantes para el Perú y el mundo (Rodríguez-Pascua et al., 2020). Una praxis de gestión del Patrimonio Arqueológico internacional, es conservar en sus contextos originales, con la finalidad de evitar riesgos de excavaciones. Adicionalmente, la norma peruana sobre arqueología, los concibe como recursos culturales no renovables, incluido el suelo y el subsuelo, por constituir patrimonio inmueble.

E-mails: aabarca@unap.edu.pe (A. Abarca), hccama@unap.edu.pe (H. Ccama)

ORCID: orcid.org/0000-0003-0206-4705 (A. Abarca), orcid.org/0000-0003-2886-7901 (H. Ccama)

Se desconoce, que el suelo y subsuelo de estas *Llaqtas* (antiguo poblado del Ande), fueron mejoradas artificialmente en el periodo Inca, para cumplir funciones de soporte de edificios. Desconocimiento evidenciado en la masiva exploración del suelo (calicatas) a campo abierto, para el desarrollo de intervenciones de investigación y conservación arqueológica (Astete y Bastante, 2020). Exponiéndolos a cambios de temperatura y humedad, modificando irreversiblemente su función estructural de cimiento (Wright, 2013).

Las intervenciones realizadas por las entidades tutelares, estuvieron enfocadas en las estructuras de la superficie, dejando de lado las investigaciones del subsuelo (Vilímek et al., 2007). Subsuelo estudiado en la presente investigación, recurriendo al campo de la geotecnia, que facilita conocer las condiciones locales, sus propiedades físico-mecánicas, y capacidad de soporte (Sáez, 2010). Sin este conocimiento previo del suelo de fundación para cimentar, podría generarse daños en las estructuras de los edificios (Kuroiwa, 2016), mínimamente provocar hundimientos o levantamientos y causar una falla estructural en el edificio (Foraboschi y Vanin, 2014). Adicionalmente, los suelos de fundación precisan de métodos que permiten mejorar y controlar las incertidumbres naturales del suelo. Entre estos se tienen: la compactación, los encajes y el drenaje (Lambe y Whitman, 2004). Estas razones definen al campo de la geotecnia, como la praxis de inteligencia, imaginación y un amplio sentido de observación (Juárez y Rico, 2005).

Los suelos de fundación de edificios históricos, tendrían que investigarse con mucha más prolijidad (Krentowski et al., 2017). En efecto, los suelos de fundación al cumplir función estructural de soporte, el desconocimiento de sus propiedades geotécnicas, podría exponer la conservación de edificios (Carlotto et al., 2009). En este sentido, los emplazamientos de Machupicchu, Pisaq y Saqsaywaman, probablemente se trabajaron artificialmente, como elemento de soporte estructural de los edificios.

Astete y Bastante (2020), Wright (2013), consideran que los Inca destinaron el 60% del trabajo a mejorar artificialmente los suelos de fundación. Así mismo observaron, midieron y comprendieron fenómenos, para definir acciones que garanticen solidez estructural de los cimientos (Sáez, 2010). Coadyuvado con la construcción de estructuras resistentes al sismo (Carocci et al., 2021); así también, utilizaron los suelos en función de sus propiedades físicas y mecánicas, que determinan la capacidad de carga o soporte (Carlotto et al., 2009), ello para controlar la interacción del suelo-cimiento-edificio; para garantizar la conservación del edificio (Krentowski et al., 2017). ¿Cómo se logró esta proeza? probablemente, gracias a los conocimientos propios y de sus antecesores (Adam y Buitrago, 2018); constituyendo ello, un extraordinario paradigma de la ingeniería y los saberes ancestrales (MINCUL, 2020).

Por tanto, evaluar la incidencia de los RCI, en la conservación de los edificios Inca en Machupicchu, Pisaq y Saqsaywaman en Cusco, es el objetivo de este trabajo de investigación; enfocada en el estudio de los suelos de fundación de estructuras históricas. Con dicho propósito se evaluaron: el emplazamiento, las características físico-mecánicas y la capacidad de carga de los suelos, utilizando métodos inocuos, no invasivos al ambiente natural y al edificio patrimonial de las *Llaqtas* Inca.

2 – MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 – Llaqtas Inca de Machupicchu, Pisaq y Saqsaywaman

Machupicchu, Pisaq y Saqsaywaman (Fig. 1), fueron construidos a partir de 1450, como propiedades del gobernante Inca Pachacutec (Wright, 2013). Están ubicados en la Cordillera Oriental de los Andes del Perú, específicamente en la región Cusco; se encuentran entre los 2250 y los 2972 metros sobre el nivel del mar. Estuvieron conectadas a Cusco, por una red de caminos y fueron abandonadas desde 1540, después de la conquista española de Perú (Vilímek et al., 2020). Manteniéndose intacta en el caso de Machupicchu, hasta que Bingham, la descubriese científicamente en 1911 (Astete y Bastante, 2020).

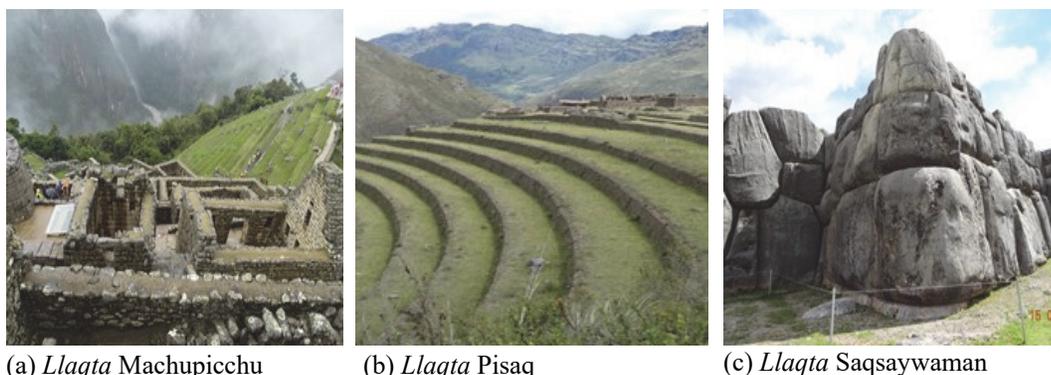


Fig. 1 – Vista panorámica de las *Llaqtas* Inca, objetos de estudio de la investigación.

2.2 – Evaluación del emplazamiento

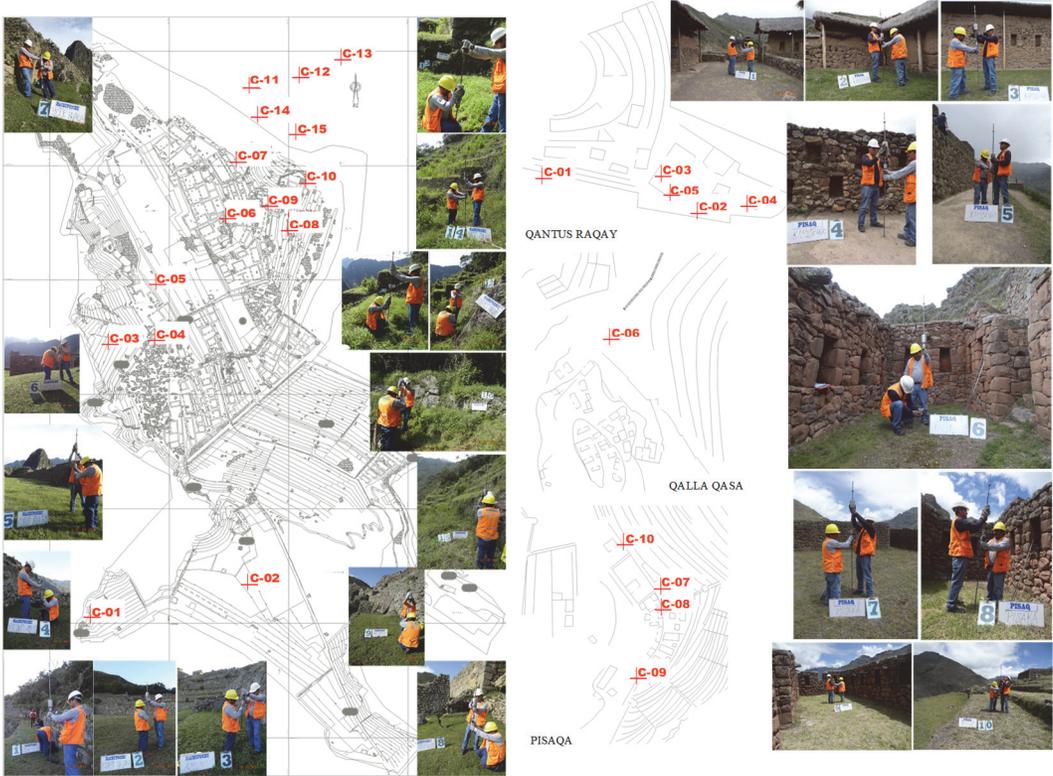
La evaluación del emplazamiento (condiciones locales), se realizó tomando en consideración cinco factores (geología, clima, nivel freático, efecto sismo y relieve), en la Fig. 2, se detallan los puntos de prospección en cada una de las *Llaqtas*.

a) *Geología*. La evaluación de resistencia, se realizó con ensayos *in situ*, en los afloramientos rocosos del batolito ígneo del tipo granodiorita en Machupicchu; en la ígnea, del tipo andesita shoshonítica en Písaq, y la sedimentaria del tipo caliza diorita en Saqsaywaman. Se utilizó el instrumento martillo de Schmidt o Esclerómetro (NTP 339.181, 2013). La información obtenida fue contrastada con los ensayos de compresión simple y corazón diamantino en laboratorio, y literatura especializada publicada.

b) *Clima*. Para conocer la climatología del lugar se revisó el Plan Maestro de Machupicchu 2015–2019, aprobada por resolución ministerial N° 134-2015-MC (Ministerio de Cultura, 2015) y resolución presidencial N° 070-2015-SERNANP (Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas). Así también se revisó los Planes Maestros de Písaq y Saqsaywaman. Información a partir de la cual, se realizan los análisis e interpretaciones que concluyen en la redacción de la teoría de la investigación.

c) *Nivel freático*. La evaluación se llevó a cabo con el ensayo DPL (NTP 339.159, 2001). Por la condición de patrimonio que ostentan las tres *Llaqtas* en estudio, el número de ensayos Penetrométricos autorizados y realizados fue restringido; así, en Machupicchu se realizaron quince (15) puntos de investigación; en Písaq diez (10), y en Saqsaywaman once (11). A partir de los treinta y seis (36) ensayos Penetrométricos, se determinaron el tipo de suelo, que fue contrastada con información de las excavaciones arqueológicas, la revisión de literatura especializada y la profusa observación *in situ*. Ello posibilitó determinar la existencia o no de nivel freático.

d) *Efecto sismo*. La evaluación se realizó con: Esclerómetro y Penetrómetro Dinámico Ligero. El Ensayo DPL utilizado, fue correlacionado directamente con el Ensayo de Penetración Estándar (SPT). La Norma Técnica Peruana (NTP E.030, 2016) sobre “Diseño Sismorresistente”, establece la clasificación de perfiles de suelos; especificando que, debe tomarse en cuenta el promedio ponderado de los Ensayos de Penetración Estándar, considerando los espesores de los estratos granulares. Por tanto, el promedio ponderado del número de golpes determina el Perfil de Suelo (Tipo) en las *Llaqtas* Inca en estudio. Esta información se complementó con el número promedio de rebote de los macizos rocosos ensayados con el Martillo de Schmidt, que determinan el tipo de Suelo. La velocidad de propagación de las ondas de corte, se determinó con ambos ensayos, que evidencian el efecto sismo.



(a) *Llaqta Machupicchu*

(b) *Llaqta Písac*



(c) *Llaqta Saqsaywaman*

Fig. 2 – Ubicación de los puntos de investigación *in situ* para los ensayos DPL y Esclerómetro

e) *Relieve*. La evaluación de la morfología de las montañas rocosas del emplazamiento de las *Llaqtas* Inca; se realizó en base a la cartografía; a partir de la cual, se caracterizó las condiciones locales como: pendientes, crestas, laderas; así también se caracterizó la infraestructura construida por los Inca. La información generada permitió comprender el relieve del lugar.

2.3 – Caracterización físico-mecánica de los suelos

Se utilizaron técnicas de exploración de campo (Ensayos de Suelos, Esclerométricos y DPL) para caracterizar física y mecánicamente los suelos de fundación, determinadas en la NTP E.050 (2018) de Suelos y Cimentaciones; ampliamente reconocidos y validados por la literatura especializada para la caracterización de suelos. Los resultados del ensayo DPL se contrastaron con las resistencias verificadas de los macizos rocosos en sus afloramientos, con el Esclerómetro. Para los ensayos se extrajeron muestras en bolsas de acuerdo a protocolos, para caracterizar los suelos en laboratorio (NTP 339.134, 1999). Los ensayos realizados fueron: compresión simple no confinada, granulometría, peso específico y contenido de humedad. Los suelos de fundación se clasificaron con el uso del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

2.4 – Determinación de la capacidad de carga

Para el cálculo se utilizó la teoría de Meyerhof; se consideró un ancho promedio de 1.20 x 1.00 metros, con una profundidad de 1.50 metros, dado que es el más recurrente. Los cálculos se realizaron para una condición crítica y óptima; calculándose también para una profundidad de 2.5 metros. Se utilizó una aceleración máxima horizontal de 2.5 y un factor de seguridad de 3. Los parámetros geotécnicos para el cálculo, provienen de las correlaciones Penetrométricas (DPL).

3 – RESULTADOS

3.1 – Evaluación del emplazamiento

a) *Geología*. Los resultados muestran que la geología de Machupicchu y Pisaq están constituidas por roca ígnea de los tipos granodiorita y andesita shoshonítica, respectivamente; en Saqsaywaman, roca sedimentaria del tipo caliza diorita. De acuerdo con la clasificación corresponde al tipo de suelo: S1 (Roca o suelos muy rígidos); con velocidades entre 500 a 1500 m/s de ondas de corte (Fig. 3).

b) *Clima*. Las *Llaqtas* de Machupicchu, Pisaq y Saqsaywaman, presentan climas templados, con temperaturas promedio que oscilan entre 12 a 21°C. El periodo de lluvias es estacionario (diciembre



(a) *Llaqta* Machupicchu

(b) *Llaqta* Pisaq

(c) *Llaqta* Saqsaywaman

Fig. 3 – Vista de ensayos de resistencia realizados con esclerómetro en los afloramientos rocosos



Fig. 4 – Vista de las condiciones climáticas

a marzo), con 2000, 790 y 734.8 mm de intensidad; 90, 60 y 64.3% de humedad respectivamente. Nubosidad alta en Machupicchu y baja en Pisaq y Saqsaywaman. Condiciones climatológicas que se muestra en la (Fig. 4).

Se encontró un conocimiento avanzado en el manejo de drenajes superficiales y subterráneos. Las difíciles restricciones de sitio que presentaban las *Llaqtas* Inca para su habitabilidad, coadyuvado por intensas precipitaciones pluviales, en montañas de pendiente empinada; no fueron impedimento para gestionar adecuadamente los suelos de fundación de sus edificios (Fig. 5).

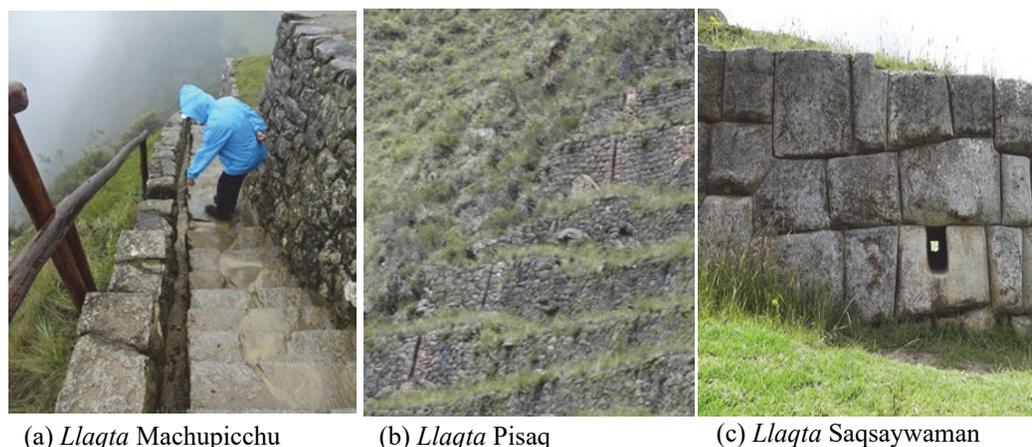


Fig. 5 – Vista de los Sistemas de evacuación superficial (canales) de las precipitaciones pluviales

Para gestionar la presencia de lluvias intensas en las *Llaqtas*, los Inca utilizaron los RCI, constituidos por fragmentos del substrato rocoso granodiorita, andesita shoshonítica, y caliza diorita. Fueron ejecutados en granulometría descendente, para nivelar las superficies abruptas de las montañas rocosas. Utilizados estratégicamente en patios, plazas y plataformas agrícolas, con el objetivo de infiltrar el agua (Fig. 6). Direccionándolo por canales subterráneos hacia colectores alejados de los cimientos Inca.

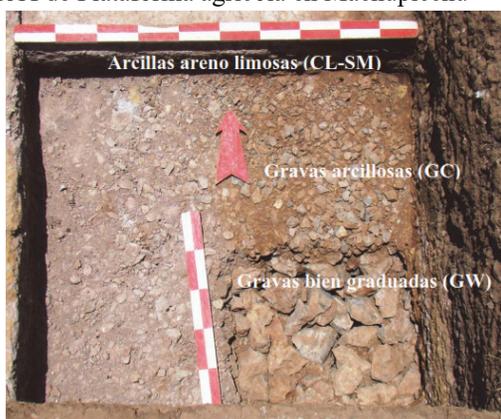
Esta técnica Inca, garantizó encarar exitosamente climas adversos, traducido en lluvias de mediana y alta intensidad; sin la ejecución de los RCI, probablemente las *Llaqtas* Inca no existirían hasta nuestros días. Los Inca, utilizando los materiales de acuerdo a sus propiedades, controlaron el drenaje del agua con materiales granulares, caracterizados por su elevada permeabilidad y poca o



(a) RCI de Plataforma agrícola en Machupicchu



(b) RCI de recinto



(c) RCI en plazas y patios, Saqsaywaman



(d) RCI en contención, Pisaq

Fig. 6 – Rellenos Controlados Inca

nula modificación por humedad. Situación distinta ocurre con los suelos finos (arcillas), que frente a cambios de humedad se contraen o expanden. Motivo por el cuál, seguramente los Inca no incluyeron este tipo de suelo en los RCI, constituidos por suelos gruesos, caracterizado por su elevada permeabilidad, alta resistencia y poca probabilidad de asentamientos diferenciales, que permitieron la conservación de las *Llaqtas*.

c) Nivel freático (NF). Los resultados revelan que no se cuenta con capas freáticas en los suelos de fundación de los edificios, debido a que los Inca eligieron emplazamientos en zonas rocosas tal como se evidenció en el estudio geológico. No obstante, lo que se encontró, fue la presencia de aguas superficiales provenientes de la lluvia, que hoy se infiltra peligrosamente en los suelos de fundación Inca, trastocados por las excavaciones arqueológicas, que no presentan estudios de densidad de suelos originales. Situación que constituye un problema grave que podría ocasionar fallas en las estructuras; problemas que en el periodo de la ocupación Inca fue resuelto con la implementación de drenajes superficiales y subterráneos, y la construcción de RCI.

d) Efecto Sismo. La investigación confirma que las *Llaqtas* Inca, se ubican en Zona 2 de categoría sísmica y una aceleración máxima horizontal de 0.25. Así mismo la clasificación sísmica en escala de Mercalli oscila de II a V de intensidad (NTP E.030, 2016). Frente a esta situación, los Inca ejecutaron los RCI para disminuir los efectos del sismo. Los resultados del E2 a compresión simple, revelan valores de 75609.27 kN/m² en Machupicchu, 67567.81 kN/m² en Pisaq y 27654.75

kN/m² en Saqsaywman; valores que están por encima respecto a la (NTP E.060, 2019) donde se especifica 20593.96 kN/m².

e) *Relieve*. Se evidencia que los relieves abruptos y empinados elegidos por los Inca para el emplazamiento de sus *Llaqtas*, fueron habilitados de manera artificial, con la ejecución de los RCI, multipropósito: permitió la nivelación de superficies, la distribución uniforme de cargas y filtrar las aguas de lluvia al subsuelo (Fig. 7). Los Inca eligieron levantar los edificios de las *Llaqtas*, en las crestas elevadas de las montañas rocosas, que presentan mayor seguridad y estabilidad.

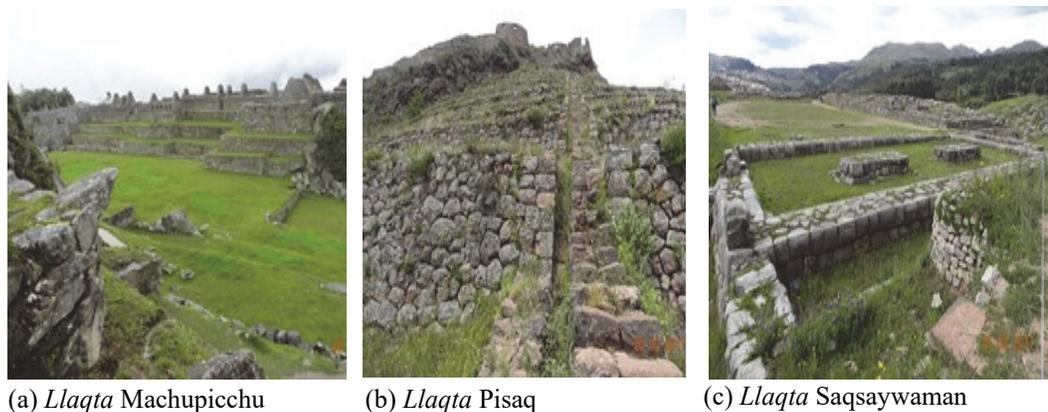


Fig. 7 – Vista de nivelación de relieves empinados con los RCI

3.2 – Caracterización físico-mecánico de los suelos

Se encontró dos estratos recurrentes: Estrato 1 (E1), RCI; que está conformado por gravas del sustrato rocoso, con granulometría descendente en las capas, el espesor promedio está relacionado al tipo de elemento: muro de sostenimiento 0.70 m., plataforma agrícola 1.10 m., recinto 0.40 m., plaza y patio 1.50 m. El Estrato 2 (E2), está conformado por los macizos rocosos (Fig. 8).

Se encontró que la conformación de los RCI fue estandarizada. Es decir, fueron construidos con gravas de diferente tamaño y en granulometría siempre descendente. Asegurando cumplan la función particular asignada. Así, para los sistemas de contención, se mantienen incólumes las capas de gravas bien graduadas (GW) y arenas (SW); incorporando dos capas adicionales de grava arcillosa (GC) y arcilla (CL), próximas al suelo de contacto con la superficie. Estas dos últimas capas, con la finalidad de compactar y sellar los RCI que recibirá junto con el E2, la carga vertical actuante del sistema de contención. Cabe precisar que, las arcillas utilizadas para sellar estos RCI, presentan elevada cohesión (arcillas consolidadas), verificada con el DPL. En efecto, se identificaron *in situ* con ensayos Penetrométricos en E1 arcillas consolidadas (4 a 6 golpes para profundizar 10 cm); gravas, gravas arenosas, gravas arcillosas (9 a 23); arenas (6 a 9); y en el E2, el martillo rebota.

Otra particularidad encontrada en la conformación de los RCI, es la conformación de éstos en plataformas agrícolas. Donde las capas de grava bien graduada (GW) y arena (SW), son recurrentes; sin embargo, se incorpora una capa adicional de suelo orgánico, para la función agrícola. Lo extraordinario en esta conformación es que, estas amplias plataformas permiten a su vez, infiltrar el agua de lluvia, plataforma tras plataforma, desde la parte superior, hacia el sub suelo alejados siempre de los cimientos de los recintos. Las plazas y patios mantienen la conformación estandarizada de los RCI; es decir, están constituidas por gravas (GW) y arenas (SW). Ello posibilita cumplir la función de colección y filtración de las aguas de lluvia hacia el sub suelo, fuera de los cimientos. El espesor del RCI, están basados a la geofoma del relieve y la solicitud de nivelación.

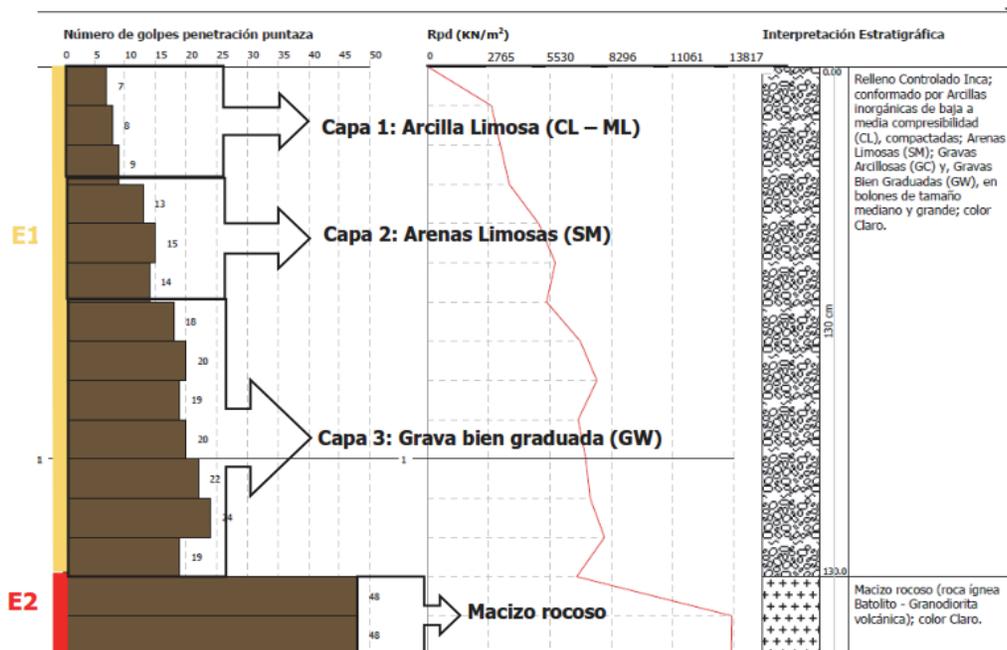


Fig. 8 – Estratigrafía tipo, constituidos por dos estratos, Estrato 1 (E1), RCI constituido por capas de suelos granulares de los substratos rocosos; Estrato 2 (E2), constituido por macizos rocosos

El E1, de los RCI, están compuestos, por varias capas de suelos granulares (Fig. 12), definidos como grava bien graduada (GW) en los ensayos de laboratorio (Tabla 1). De los resultados encontrados se puede advertir la ausencia de suelos finos como arcillas en la composición del E1, debido a que éstos modifican su volumen en presencia de humedad.

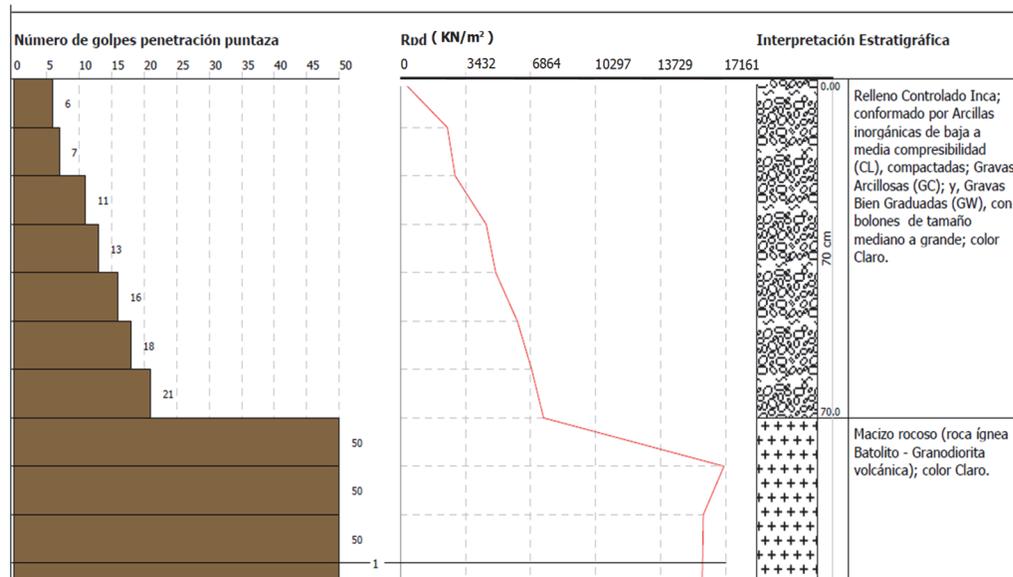


Fig. 9 – Estratigrafía típica de recinto en Machupicchu

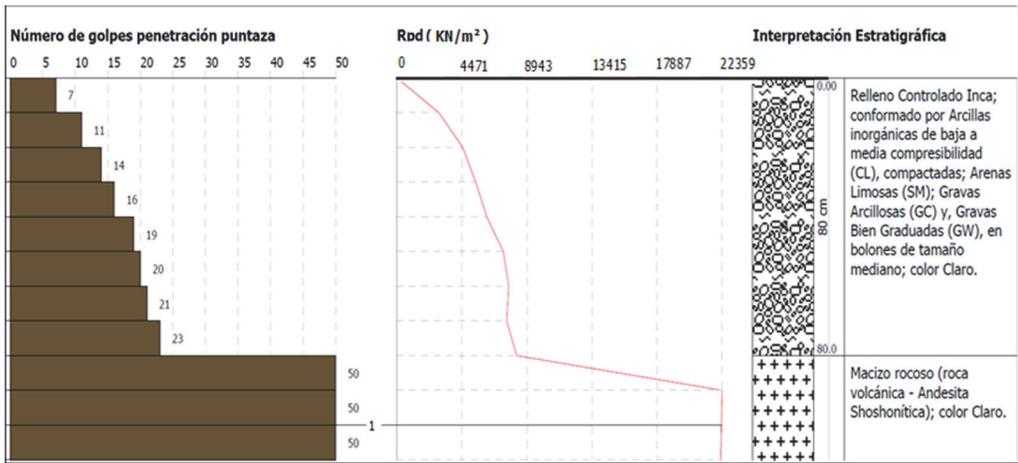


Fig. 10 – Estratigrafía típica de recinto en Písac

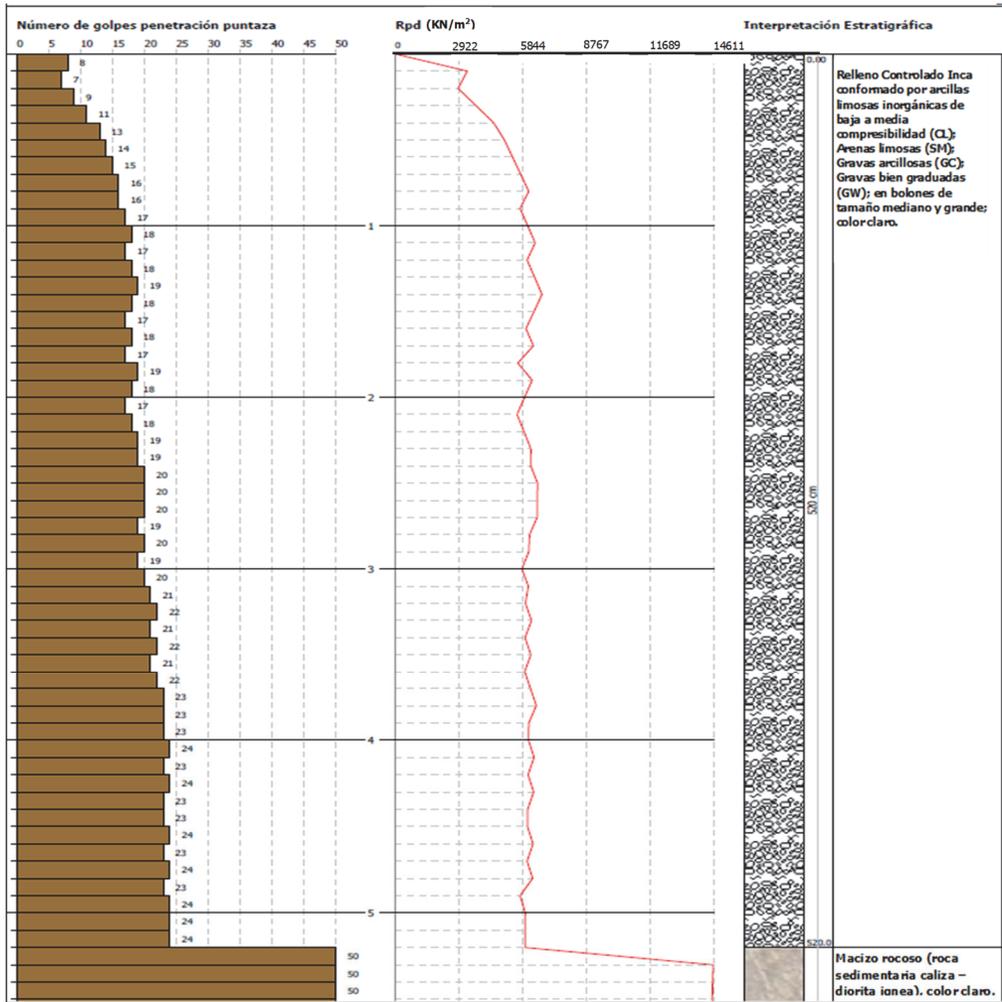


Fig. 11 – Estratigrafía típica de Plaza en Saqsaywaman

En las Fig. 9, 10 y 11 se presentan los estratos característicos de los suelos de los edificios Inca objetos de esta investigación; conformados principalmente por 2 estratos (E1 y E2), cuyas características físicas y mecánicas fueron determinadas por el número de golpes Penetrométricos para penetrar 10 cm de suelo.



Fig. 12 – Conformaciones características de RCI – E1

Tabla 1 – Características físicas del E1

<i>Llaqta</i>	Nro.	Prof.	Estrato	C.A. (%)	LP (%)	LL (%)	IP	Cc	Cu	Clasf.
Machupicchu	C-1	0.9 m	E1	2.4	---	---	---	144.6	341.2	GP
Písaq	C-1	0.9 m	E1	2.2	---	---	---	256.4	429.7	GP
Saqsaywaman	C-1	1.6 m	E1	1.9	---	---	---	149.5	381.7	GP

Nota: GP, Grava mal graduada; Cc, coeficiente de curvatura; Cu, coeficiente de uniformidad; IP, índice de plasticidad; LL, límite líquido; LP, límite plástico; C.A., contenido de agua.

La Tabla 2 muestra los resultados geotécnicos de ángulos de fricción y densidad (Φ y γ) del E1 y E2 para las tres *Llaqtas* estudiadas. Se encontró que los valores calculados son elevados. La Tabla 3 muestra la densidad (peso unitario) del E2, se puede evidenciar que en Písaq presenta una densidad superior con respecto a Machupicchu y Saqsaywaman. Sin embargo, se resalta que la densidad promedio de los suelos de las *Llaqtas* Inca es alta (suelo compacto); por lo que se afirma que los suelos son competentes.

Tabla 2 – Densidades promedio y ángulos de fricción

<i>Llaqtas</i>	Angulo de fricción, Φ (°)	Densidad, γ (kN/m ³)	Densidad saturada (kN/m ³)
Machupicchu			
Estrato 1: Gravas (GW)	30.00	18.63	21.08
Estrato 2: Roca ígnea granodiorita	38.00	22.94	-
Písaq			
Estrato 1: Gravas (GW)	32.10	20.69	21.67
Estrato 2: Roca ígnea andesita shoshonítica	45.71	25.39	-
Saqsaywaman			
Estrato 1: Gravas (GW)	31.10	20.59	21.37
Estrato 2: Roca sedimentaria caliza diorita	42.03	23.43	-

Tabla 3 – Densidad o peso unitario del E2 (macizo rocoso)

<i>Llaqtas</i>	Densidad (kN/m ³)			
	M - 1	M - 2	M - 3	Media
Machupicchu				
Estrato 2: Roca ígnea granodiorita	17.75	17.55	18.53	17.94
Pisac				
Estrato 2: Roca ígnea granodiorita	26.38	27.06	22.26	25.23
Saqsaywaman				
Estrato 2: Roca sedimentaria caliza diorita	23.34	22.45	25.30	23.69

Nota: A mayor peso unitario o densidad > resistencia.

En ambos estratos (E1 y E2), γ y Φ son competentes; corroborados por la alta resistencia de las rocas ígneas en Machupicchu y Pisac; y sedimentaria en Saqsaywaman, según los resultados de los ensayos DPL y Esclerómetros, presentados en la Tabla 4. Éstos últimos, son corroborados a su vez, por los resultados especificados en la Tabla 5; en ambos ensayos (Fig. 13), los valores están por encima de 20593.96 kN/m², establecidos actualmente por la Norma Técnica.



(a) Ensayo Esclerometrico



(b) Ensayo de Compresión

Fig. 13 – Vistas de los ensayos de resistencia de los macizos rocosos y laboratorio.

Tabla 4 – Correlaciones Esclerométricas del E2 – (Macizo rocoso)

Tipo roca <i>Llaqtas</i>	Resistencia en kN/m ²								
	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	Media
Roca ígnea grano diorita (Machupicchu)	28831.6	33931.0	-	-	-	-	-	-	31381.2
Roca ígnea andesita shoshonítica (Pisac)	70019.4	63939.3	-	-	-	-	-	-	66979.4
Roca sedimentaria caliza diorita (Saqsaywaman)	47954.5	45993.1	52073.3	60703.1	53250.1	57565.0	46973.8	38147.8	50332.5

Nota: Los valores obtenidos con DPL, fueron corroborados con el ensayo Esclerometrico *in situ*

Tabla 5 – Compresión simple del E2 – (macizos rocosos)

Tipo de Roca <i>Llaqtas</i>	Resistencia en kN/m ²			
	M - 1	M - 2	M - 3	Promedio
Roca ígnea granodiorita (Machupicchu)	76388.9	79923.2	70599.0	75609.2
Roca ígnea andesita shoshonítica (Pisaq)	65787.9	73096.8	63899.1	67567.8
Roca sedimentaria caliza diorita (Saqsaywaman)	30981.1	28082.3	23865.4	27654.7

Nota: Resistencias superiores a la norma (NTP E.060, 2019).

3.3 – Determinación de la capacidad de carga

Los resultados encontrados de carga ultima revelan que en Machupicchu, para una profundidad de 1.50 metros en condición crítica, presenta una presión de carga de 941.43 kN/m² y para la condición optima, una presión de carga de 1624.96 kN/m²; así mismo, para una profundidad de 2.50 metros en condición óptima presenta una presión de carga de 1624.96 kN/m². En Pisaq, para una profundidad de 1.50 metros en condición crítica, presenta una presión de carga de 557.99 kN/m² y para la condición optima una presión de carga de 2043.71 kN/m²; así mismo, para una profundidad de 2.50 metros en condición óptima presenta una presión de carga de 3436.25 kN/m². En Saqsaywaman, para una profundidad de 1.50 metros en condición crítica presenta una presión de carga de 306.94 kN/m² y para la condición optima una presión de carga de 259.87 kN/m²; así mismo para una profundidad de 2.50 metros en su condición de optima, presenta una presión de carga de 1761.27 kN/m². Todos los valores calculados se encuentran por encima de la carga vertical actuante del edificio (Fig. 14).

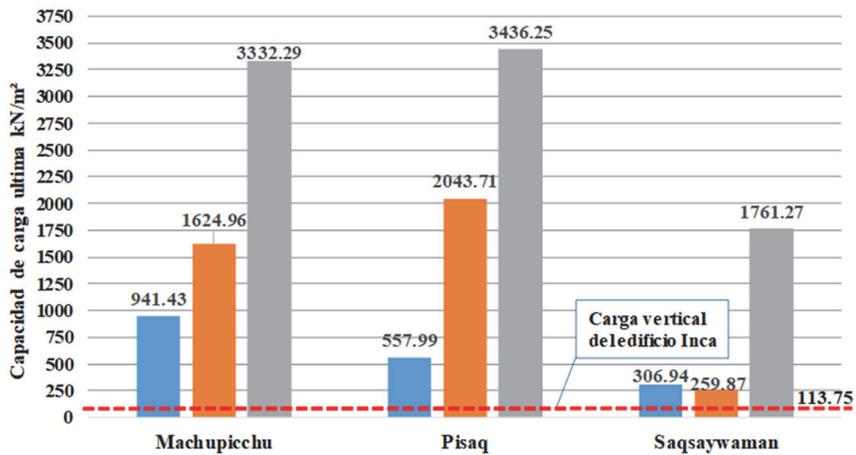


Fig. 14 – Capacidad de carga ultima

Los resultados encontrados de carga admisible revelan que en Machupicchu, para una profundidad de 1.50 metros en condición crítica presenta una presión de carga de 313.81 kN/m² y para condición optima una presión de carga de 541.32 kN/m²; así mismo para una profundidad de 2.50 metros en su condición de optima presenta una presión de carga de 1111.09 kN/m². En Pisaq, para una profundidad de 1.50 metros en su condición crítica presenta una presión de carga de 186.32 kN/m² y para la condición optima una capacidad de carga de 681.56 kN/m²; así mismo para una profundidad de 2.50 metros en su condición de optima presenta una presión de carga de 1145.41

kN/m^2 . En Saqsaywaman, para una profundidad de 1.50 metros en su condición crítica presenta una presión de carga de 101.98 kN/m^2 y para la condición óptima una presión de carga de 86.29 kN/m^2 ; así mismo para una profundidad de 2.50 metros en su condición de óptima presenta una presión de carga de 587.41 kN/m^2 . Todos los valores calculados se encuentran por encima de la carga actuante del edificio (Fig. 15).

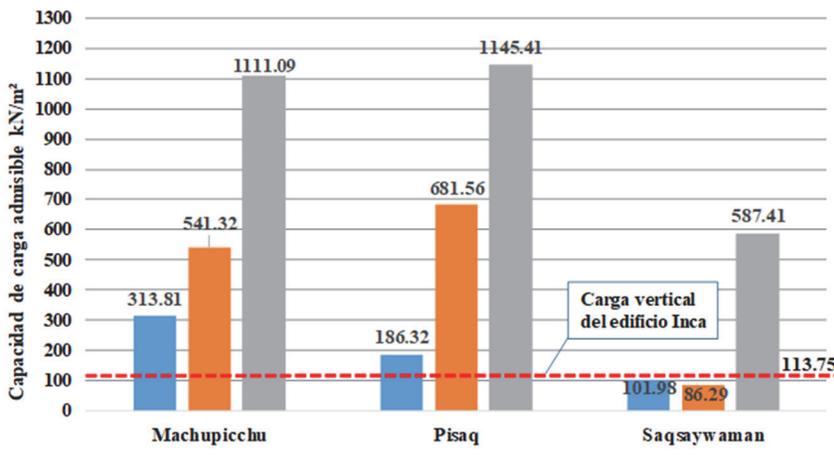


Fig. 15 – Capacidad de carga admisible

De acuerdo a los resultados encontrados de carga última y carga admisible, los estratos (E1 E2) son muy competentes, lo que permitió la conservación de los edificios Inca. Adicionalmente, cuando fuere necesario, la técnica constructiva utilizada fue enterrar las hiladas de los muros de contención para asegurar rigidez estructural de los edificios (Fig. 16).



(a) Machupicchu



(b) Saqsaywaman

Fig. 16 – Confinamiento de cimentaciones, con elevados niveles de compactación y soterramiento de hiladas de muro.

Los Inca, manejaron los parámetros de cimentación de manera prolija. Escogieron suelos de fundación de elevada capacidad de soporte donde se emplazaban sus edificios. Motivo por el cual, ejecutaron cimientos superficiales con una profundidad promedio de 1.50 m. Así mismo ejecutaron estructuras apoyadas directamente en el afloramiento de los macizos rocosos, como se muestra en la Fig. 17.

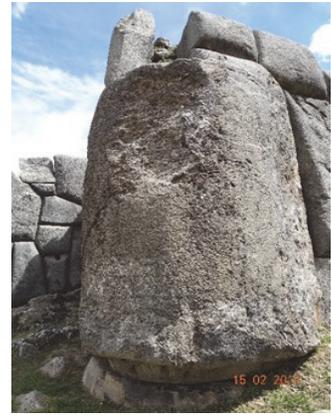
Finalmente, se realizó el cálculo de asentamientos, cuyos valores totales son los siguientes: en Machupicchu fue de 0.09 cm, en Pisaq de 0.11 cm y en Saqsaywaman de 0.20 cm. Verificándose



(a) *Llaqta Machupicchu*



(b) *Llaqta Písaq*



(c) *Llaqta Saqsaywaman*

Fig. 17 – Vista de la cimentación directa de superestructuras sobre los afloramientos rocosos

que presentan valores inferiores al tolerable a 2.54 cm. Se considera que los cimientos Inca con dimensiones de entre 0.80 y 0.90 de ancho, permitió mejorar la estructuración de los muros, y con esto mejorar la transmisión de cargas, dotándole mayor seguridad y evitar posibles fallas por asentamientos.

4 – DISCUSIONES

4.1 – Evaluación del emplazamiento

El emplazamiento de los edificios Inca se realizó en geología competente (macizos rocosos) tal como se evidencia en los resultados encontrados; esto es concordante con (Ramírez y Alejano, 2004), quienes sostienen que los Inca eligieron este tipo de suelos por su elevada permeabilidad y baja compresibilidad; ratificada por Rodríguez y Daza (2021). Las *Llaqtas* Inca de Písaq, Saqsaywaman y Machupicchu perduraron en el tiempo como efecto del tipo de geología elegida para los cimientos de sus edificios. Valorándose el aporte del campo geológico a las construcciones Inca (Carlotto et al., 2009).

Para Tavera (2020), la gran variedad de construcciones en las actuales ciudades, presentan alto riesgo; pues, no cumplen con los objetivos de durar y proteger de los peligros, como los terremotos. En este escenario, recomienda, estudiar “las experiencias y lecciones del pasado”; siendo la conservación perenne de las *Llaqtas* Inca, una referencia objetiva para fortalecer y guiar los asentamientos urbanos en el futuro. Machupicchu, Písaq y Saqsaywaman sobrevivieron a innumerables eventos sísmicos, por la naturaleza altamente sísmica del Perú (Tavera, 2020); frente a ello, la civilización Inca habría elegido una geología competente para cimentar sus *Llaqtas*. Adicionalmente, esto demuestra una cultura de prevención. Pues, los Inca lograron superar las experiencias desafortunadas de sus predecesores, en referencia a la exposición a riesgos, evitando emplazarse en suelos no competentes.

La gestión de riesgos de desastres, implican mucho más allá de las labores de preparación y respuesta. Es decir, a la civilización Inca, no sólo le bastó superar las dificultades de sus antecesores – y, de hecho, las propias-; sino, crear una cultura de “hacer las cosas bien”. Por ello, *Llaqtas* como Machupicchu y Písaq están emplazadas en geología de roca ígnea volcánica; y Saqsaywaman en roca sedimentaria del tipo caliza diorita; geologías calificadas como rocas muy competentes.

Otra virtud en la elección de macizos rocosos de geología competente para el emplazamiento de las *Llaqtas* Inca, es el respeto que los Inca tenían hacia la naturaleza, no invadiendo su propiedad. En efecto, eligieron montañas abruptas difíciles, pero no imposibles de gestionarlas para la

habitabilidad. Se alejaron de la tentación de ocupar espacios propios de la naturaleza como cauces de ríos, bofedales o áreas llanas de probable inundación, “áreas que históricamente fueron espacios de la naturaleza”.

Tavera (2020) no se equivoca, cuando afirma que, para determinar la vulnerabilidad de una ciudad, el paso inicial es la revisión de la calidad de los suelos de su emplazamiento y la cultura de prevención que posee la población. Esta praxis fue realizada en este estudio, para inferir científicamente que, las *Llaqtas* Inca están emplazadas en roca dura, con resistencias a compresión elevada. Coadyuvada por una arquitectura sismorresistente. Las *Llaqtas* Inca son la evidencia de que “El sismo en sí no mata”. Son más de cinco siglos que se mantiene en pie. Tavera (2020) afirma que “Lo que mata es el colapso de las viviendas mal construidas o levantadas sobre suelos inestables”. Consecuentemente, queda demostrado que la elección de una geología competente por los Inca, garantizó la conservación sostenible de las *Llaqtas*; lección que, de aplicarse, ayudaría en evitar escenarios de desastre, como Mirave y Aplao en Perú (Tavera, 2020).

La climatología de Machupicchu, Písac y Saqsaywaman, evidencia la presencia de precipitaciones pluviales de mediana y alta intensidad; condiciones que fueron encaradas con los RCI, que permitieron la filtración del agua al subsuelo (Wright, 2013); concordando con Astete y Bastante (2020). Para Wright (2013), “La solidez de la estructura de los edificios Inca es un ejemplo notable del ingenio inca frente a una topografía y un entorno natural desafiante”. Las difíciles restricciones de sitio que presentaban las *Llaqtas* Inca para su habitabilidad, coadyuvado por intensas precipitaciones pluviales, en montañas de pendiente empinada; requerían de un conocimiento avanzado en el manejo de drenajes superficiales y subterráneos. Encarándolos con la construcción de RCI.

Los RCI encontrados fueron ejecutados con fragmentos de substrato rocoso con granulometría descendente, para nivelar las superficies abruptas de las montañas rocosas. Fueron utilizados estratégicamente en patios, plazas y plataformas agrícolas con el objetivo de infiltrar el agua, direccionándolo por canales subterráneos hacia colectores alejados de los cimientos Inca. Esta técnica Inca garantizó encarar exitosamente climas adversos del lugar; sin cuya ejecución, probablemente las *Llaqtas* Inca no existiría hasta nuestros días. Pues, el enemigo de la estabilidad toda construcción, es el agua (Bouchard et al., 1992). Situación distinta ocurre con los suelos finos (arcillas), que frente a cambios de humedad se contraen o expanden; modificando su volumen en presencia o ausencia de lluvia (Jaramillo et al., 2022). Motivo por el cuál, seguramente los Inca no incluyeron este tipo de suelo en los RCI, constituidos por suelos gruesos, caracterizado por su elevada permeabilidad, alta resistencia y poca probabilidad de asentamientos diferenciales, que permitieron la conservación de las *Llaqtas*.

En las condiciones actuales, este prolijo trabajo de los RCI en Machupicchu, Písac y Saqsaywaman está expuesto al cambio climático. En efecto, considerando los análisis desarrollados en torno a la temperatura global por el Instituto Goddard de Estudios Espaciales, el incremento supera más de 1° Celsius desde el año 1880 (Jaramillo et al., 2022). Estas elevadas temperaturas, están generando en el patrimonio construido del mundo -entre otros-, el arenado de morteros en sus diversas presentaciones. Frente a lo cual, las *Llaqtas* Inca no serían la excepción. Constituyendo hoy, un riesgo no menor, debido a que los edificios no presentan cubiertas, por la causa descrita, estarían facilitando la infiltración de agua de lluvia a los cimientos, al igual que los pisos de recintos, constituidos por suelos finos (Carlotto et al., 2009).

Los Inca eligieron emplazamientos con ausencia de Nivel Freático; esto, probablemente se debió - a que los Incas - experimentaron dificultades para gestionar la presencia de manantiales (aguas subterráneas) sobre el cual está construido Cusco previo a su intervención, considerándolo de alto riesgo (Rostworowski, 2011). La existencia de NF aminora la capacidad de soporte de los suelos (Foraboschi y Vanin, 2014).

Para Chen et al. (2022), la presencia de Nivel Freático en suelos de fundación, conduce a diversos efectos, entre ellos: la “sumersión, salinización, deformación o destrucción de los cimientos de los edificios”. Precisamente estas consecuencias adversas a la conservación perenne de edificios,

fueron evitadas por los Inca, eligiendo macizos rocosos sin presencia de nivel freático para cimentar Machupicchu, Písaq y Saqsaywman. Garantizando así, competente capacidad de carga. Si la cohesión y el ángulo de fricción interna del suelo de fundación están expuestos a la presencia de nivel freático, sus valores disminuyen y con ello, su capacidad de carga (Chen et al., 2022; Carlotto et al., (2009). Por tanto, los Inca no se equivocaron al elegir macizos rocosos sin nivel freático. Eligieron suelos cuya porosidad, permeabilidad y su mejora con los RCI, posibilitaron competente capacidad de carga, garantizando el uso seguro de los edificios en las *Llaqtas* hasta nuestros días.

Para Sass y Viles (2022), el deterioro y la conservación del patrimonio construido es causado por la presencia de agua, cuyo efecto directo se advierte en la descomposición de piedras y rocas, consideran trascendental, conocer cómo las construcciones en piedra reaccionan en su entorno cambiante. De hecho, en su momento los Inca resolvieron ese dilema, como parte de la gestión perenne de sus *Llaqtas*, en pie hasta la actualidad. Por otro lado Sandrolini y Franzoni (2006), consideran como problema en la conservación de edificios históricos, a la humedad, entendida como presencia de agua que afecta la seguridad estructural, recomendando aplicar lo determinado en la Directiva del Consejo Europeo 89/106/CEE (21/12/88), que exige el uso de materiales cuya resistencia estructural garantice la salud humana. Los Inca, conocían de esta problemática; por ello, evitaron el Nivel Freático para cimentar sus *Llaqtas*.

La investigación muestra que los RCI fueron ejecutados para disminuir los efectos de sismos; complementando con edificios resistentes al sismo, cuya forma geométrica es rígida con respecto a la esbeltez del edificio (Ma et al., 2023). Garantizando la solidez frente a los esfuerzos sísmicos, de los cimientos y edificios (Sáez, 2010). Los RCI (E1), fueron la técnica de cimentación más importante, para disminuir los efectos de los sismos (Mendoza et al., 2018). Por tal razón, posiblemente, al haber elegido macizos rocosos como emplazamiento, sólo fue necesario ejecutar cimientos superficiales, sin alguna conexión rígida, al suelo de fundación (Bieniawski, 1989). Esto evidencia que la práctica constructiva Inca - al igual que en otros contextos territoriales -, tenían conciencia de lo devastador que puede ser un sismo (Carocci et al., 2021). Hipervalorándose la selección de los suelos con el fin de garantizar la solidez del edificio (Krentowski et al., 2017).

Los relieves abruptos y empinados donde se ubican las *Llaqtas*, fueron habilitados de manera artificial con la ejecución de los RCI; para múltiples propósitos, esto permitió la nivelación de superficies, la distribución uniforme de cargas y filtrar las aguas de lluvia al subsuelo (Carlotto, et al., 2009). En suma, elegir condiciones adecuadas del emplazamiento, formaría parte del conocimiento de los Andes (Sáez, 2010). Que encararon eficazmente las condiciones adversas del lugar (Vilímek et al., 2020). Consiguiendo avances significativos en cartografía sagrada, integrándose a las montañas, para constituirse como referencias (Molina-Gómez et al., 2022).

4.2 – Caracterización físico-mecánico de los suelos

Los conocimientos Inca, fundamentados en los conocimientos de la sabiduría ancestral transmitida de generación en generación (Carlotto et al., 2009); así como, de la experiencia propia; del ensayo y error, de la observación y profunda comprensión de los suelos de fundación elegidos para habitar, lograron comprender que, el comportamiento mecánico de la interacción suelo-estructura, “es crucial para la seguridad y solidez de las infraestructuras” (Ma et al., 2023). Hoy, se recurre a la caracterización físico-mecánico de los suelos con el fin de conocerlos.

Molina-Gómez et al. (2022) consideran decisiva la identificación de la estratigrafía del suelo para el análisis geotécnico de un determinado emplazamiento. En este contexto, este es el primer estudio que evalúa los suelos de fundación de los edificios y es punto de partida de todo análisis. Identificación que, además de caracterizar los estratos del suelo “reduce la probabilidad de falla de las estructuras geotécnicas” (Molina-Gómez et al., 2022).

El presente estudio identificó 2 estratos: Estrato 1 (E1), conformado por los RCI y el Estrato 2 (E2), conformado por los macizos rocosos. Las investigaciones previas realizadas por Astete y Bastante (2020), sólo describen el E1 como relleno de andenes. Como se advierte, la conservación

perenne de las *Llaqtas*, fue gestionada por los Inca desde la mejora de la conformación de los suelos. La técnica ampliamente utilizada es la compactación de suelos para incrementar su densidad que “mejora sus propiedades mecánicas” (Aboelela et al., 2022). En efecto, esta técnica ingenieril cuyo propósito es de amplia vigencia en la actualidad, fue utilizada por los Incas en Machupicchu hace más de 500 años, como una estrategia de mejora de suelos naturales. Mejora que lograron con la construcción artificial del E1 o RCI, cuyas características físico-mecánicas responden a parámetros geotécnicos competentes con múltiples funciones.

Los E1 y E2 se identificaron *in situ* con Ensayos Penetrométricos. En el E1 se encontró gravas, gravas arenosas, gravas arcillosas, arenas; esto concuerda con lo encontrado por Astete y Bastante (2020), que describen el E1 formado por líticos (gravas) de tamaño descendente en la base, seguido de arena y tierra orgánica. Así mismo, al correlacionar el número de golpes Penetrométricos y las características de los suelos de los E1 y E2, se obtuvo suelos competentes, esto concuerda con (Sáez, 2010). En su momento investigaciones arqueológicas, a pesar de realizar exploraciones con calicatas, producto de la intensa excavación en las *Llaqtas* Inca, limitaron la descripción del E1, como capas de los rellenos de andenes (Astete y Bastante, 2020).

4.3 – Determinación de la capacidad de carga

“La resistencia del suelo es de considerable importancia en la geotécnica”; ésta exige mínimamente, el conocimiento de la cohesión y la densidad de los suelos; así como, el valor de la carga vertical actuante (Keawsawasvong et al., 2021); conocimiento que hoy es facilitado por logística y tecnología de punta, para resolver con solvencia los cimientos de toda obra civil. Sin embargo; los Inca, sin contar con las facilidades y tecnología de hoy, resolvieron los cimientos magistralmente, en un emplazamiento de alta complejidad por las pendientes elevadas y relieves abruptos. Constituyendo su obra una verdadera proeza ingenieril. Más aún, por haber garantizado su perdurabilidad en el tiempo, trayendo consigo lecciones que no pueden ser ignoradas. Por el contrario, merecen ser difundidas al mundo por la trascendencia de su arquitectura perenne.

Los resultados de la capacidad de carga encontrados en este estudio, no es un hecho fortuito. Es resultado de la gestión Inca; se dieron el tiempo de acondicionar las montañas rocosas, de prepararlas, mejorarlas, protegerlas antes de cimentar. Las evidencias están a los ojos del mundo, en la armónica relación que lograron entre su obra artificial y la naturaleza. Obra artificial que fue prudente con los suelos de fundación; no sobrecargándola, como lo demuestran los valores calculados de la capacidad de carga última y admisible.

La carga actuante del edificio Inca calculado, fue menor a la capacidad de soporte del suelo (E1) constituido por los RCI. Esto concuerda con Saloustrós et al. (2015) quien menciona que las cargas verticales deben ser similar o superior a la resistencia del suelo, de lo contrario, la estructura puede sufrir fallas. Para Wright (2013), son criterios de durabilidad para una infraestructura sólida y bien concebida. Para Astete y Bastante (2020), es racionalidad constructiva andina con buena capacidad de soporte.

Para Acharyya y Dey (2023), el sistema de cimentación está influenciado por diferentes parámetros: y el ángulo de fricción, la profundidad del cimiento, la profundidad del empotramiento de la zapata, la profundidad de la capa de suelo suprayacente. Todos estos parámetros determinan la competencia de la capacidad de carga de la interacción suelo-cimiento. Los Inca, hace cinco siglos, ejecutaron estos parámetros. Para Ates y Sadoglu (2022): “Si la rigidez y la capacidad portante del suelo debajo de una superestructura no son eficientes para soportar las cargas de las estructuras, un remedio común es aumentar la profundidad de la zapata para transmitir las cargas a las capas de suelo que tienen una alta capacidad portante”. Situación que, en el caso de las *Llaqtas* Inca no fue necesario, por la elevada capacidad de soporte del suelo donde se emplazaban.

Cabe resaltar una característica singular de los RCI en su función de cimiento y soporte de la carga vertical actuante; su conformación por gravas bien graduadas disipa la “energía de contacto que surge de la deformación de contacto inelástico y las colisiones de partículas”. Contribuyendo a

mejorar la resistencia al corte de un suelo granular al absorber parte de la energía externa aplicada al suelo (Xie et al., 2023).

5 – CONSIDERACIONES FINALES

De acuerdo a lo evidenciado en los resultados de este estudio, se concluye que los Rellenos Controlados Inca (RCI) incide directa y positivamente en la conservación de los edificios; esto, sustentado en el conocimiento geotécnico Inca; que se deduce en la selección adecuada del emplazamientos de las *Llaqtas* Inca en geología de roca dura, climas adversos encarados con sistemas de drenaje, elección de suelos sin presencia de nivel freático, elección de lugares alejados del efecto sismo severo y relieves de montañas rocosas altamente trabajados para su habitabilidad y conservación perenne.

La caracterización físico-mecánica de los suelos de fundación encontrados muestran que el estrato - E1 - está conformado por suelos granulares provenientes de los propios macizos rocosos, cuyas características físicas y mecánicas son competentes, lograron una elevada capacidad de soporte frente a esfuerzos verticales actuantes; además posibilitaron distribuir con uniformidad las cargas, nivelar superficies, posibilitar la infiltración segura de las precipitaciones pluviales hacia sistemas de colección en el subsuelo, alejados de los cimientos y atenuación del efecto sismo severo. El estrato E2 está conformado por macizos rocosos. Por tanto los análisis realizados en este estudio permiten afirmar que los suelos de fundación son competentes, lo que se demuestra con la perdurabilidad de los edificios Inca hasta la actualidad; en suma su conservación.

La capacidad de carga actuante de los Edificios Inca, es menor a la capacidad del suelo constituido por los RCI, lo que garantiza que los edificios no presenten fallas. Esto evidencia la competencia óptima de los suelos de fundación. Coadyuvado con la construcción de edificios resistentes al sismo y técnicas ingenieriles de mejora de suelos, como la compactación, los encajes y drenajes, que consolidaron la función estructural de las construcciones Inca.

Considerando la función estructural que cumplen los suelos, trabajados artificialmente con (RCI), debería evitarse excavaciones a cielo abierto para no exponerlas a riesgos de colapso. En caso extremo, tendría que preverse un programa de reposición de RCI, con participación de especialistas en geotecnia y un equipo interdisciplinario en la especialidad, para conservar las características originales (estudios de densidad de suelos originales Inca). Los métodos no invasivos ni destructivos son los recomendados en la conservación del patrimonio edificado.

6 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aboelela, A. E.; Ebid, A. M.; Fayed, A. L. (2022). *Estimating the subgrade reaction at deep braced excavation bed in dry granular soil using genetic programming (GP)*. Results in Engineering, 13. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100328>
- Acharyya, R.; Dey, A. (2023). *Response of Skirted Strip Footing Resting on Layered Granular Soil Using 2-D Plane-Strain Finite Element Modeling*. Geotechnical and Geological Engineering, 41(3), 2185–2200. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02373-6>
- Adam, J. M.; Buitrago, M. (2018). *Learning from failures in an emblematic building in Valencia, Spain*. Engineering Failure Analysis, 92, 418–429. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.06.023>
- Astete, F.; Bastante, J. M. (2020). *Machupicchu investigaciones interdisciplinarias*: Vol. I (F. Astete & J. Bastante, Eds.). Ministerio de Cultura. Perú.
- Ates, B.; Sadoğlu, E. (2022). *Experimental and Numerical Investigation of Load Sharing Ratio for Piled Raft Foundation in Granular Soils*. KSCE Journal of Civil Engineering, 26(4), 1662–1673. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-1022-4>

- Bieniawski, Z. T. (1989). *Rock Mass Classifications A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering*. Wiley.
- Bouchard, J.-F.; Usselman, P.; Carlotto, V. (1992). *Machu Picchu : problemas de conservación de un sitio inca de ceja de selva*. Bulletin de l'Institut Français d'études Andines, 21(3), 905–927. <https://doi.org/10.3406/bifea.1992.1092>
- Carlotto, V.; Cárdenas, J.; Fidel, L. (2009). *La geología, evolución geomorfológica y geodinámica externa de la ciudad Inca de Machupicchu, Cusco-Perú*. In Revista de la Asociación Geológica Argentina (Vol. 65, Issue 4).
- Carocci, C. F.; Macca, V.; Tocci, C. (2021). *The roots of the 18th century turning point in earthquake-resistant building*. In History of Construction Cultures (pp. 623–630). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003173434-193>
- Chen, W.; Liu, Q.; Wang, E. (2022). *The Effect of the Water Table on the Bearing Capacity of a Shallow Foundation*. Applied Sciences (Switzerland), 12(13). <https://doi.org/10.3390/app12136571>
- Foraboschi, P.; Vanin, A. (2014). *Experimental investigation on bricks from historical Venetian buildings subjected to moisture and salt crystallization*. Engineering Failure Analysis, 45, 185–203. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.06.019>
- Jaramillo Morilla, A.; Mascort-Albea, E. J.; Romero-Hernández, R.; Soriano-Cuesta, C. (2022). *Climate change impacts on cultural heritage building foundations in Western Andalusia*. Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites III Symposium, 2022, 1079–1087. <https://doi.org/10.1201/9781003308867-85>
- Juárez, E.; Rico, A. (2005). *Mecánica de Suelos*: Vol. Tomo I. Editorial LIMUSA.
- Keawsawasvong, S.; Thongchom, C.; Likitlersuang, S. (2021). *Bearing Capacity of Strip Footing on Hoek-Brown Rock Mass Subjected to Eccentric and Inclined Loading*. Transportation Infrastructure Geotechnology, 8(2), 189–202. <https://doi.org/10.1007/s40515-020-00133-8>
- Krentowski, J.; Chyzy, T.; Dunaj, P. (2017). *Sudden collapse of a 19th-century masonry structure during its renovation process*. Engineering Failure Analysis, 82, 540–553. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.04.010>
- Kuroiwa, J. (2016). *Manual para la Reducción del Riesgo Sísmico de Viviendas en el Perú*. Ministerio de Vivienda, Ed.; Primera edición).
- Lambe, T.; Whitman, R. (2004). *Mecánica de Suelos*: Vol. I (LIMUSA, Ed.).
- Ma, X.; Lei, H.; Kang, X. (2023). *Examination of interface roughness and particle morphology on granular soil–structure shearing behavior using DEM and 3D printing*. Engineering Structures, 290. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116365>
- Mendoza, C.; Ruge, J. C.; Caicedo, B. (2018). *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. <https://doi.org/10.23967/j.rimni.2017.8.003>
- Ministerio de Cultura – (MINCUL) (2015). *Plan Maestro del Santuario Histórico de Machupicchu 2015 - 2019*: Vol. I. https://www.culturacusco.gob.pe/dmdocuments/machupicchu/PMSHM_DISENO_CONSOLIDADO.pdf

- Molina-Gómez, F.; Cordeiro, D.; Ferreira, C.; Viana da Fonseca, A. (2022). *Soil stratigraphy from seismic piezocone data and multivariate clustering in alluvial soil deposits*. Experience in the Lower Tagus Valley region. Cone Penetration Testing 2022 - Proceedings of the 5th International Symposium, CPT 2022, 584–590. <https://doi.org/10.1201/9781003308829-84>
- NTP 339.134. (1999). *Norma Técnica Peruana*. Métodos de Clasificación Suelos
- NTP 339.159. (2001). *Norma Técnica Peruana*. Método de Ensayo Normalizado para La Auscultación Con Penetrómetro Dinámico Ligero de Punta Cónica (DPL)
- NTP 339.181. (2013). *Norma Técnica Peruana*. Método de ensayo para determinar el número de rebote del concreto endurecido (esclerometría).
- NTP E.030. (2016). *Norma Técnica Peruana*. Diseño Sismorresistente del Reglamento Nacional de Edificaciones
- NTP E.050. (2018). *Norma Técnica Peruana*. Suelos y Cimentaciones.
- NTP E.060. (2019). *Norma Técnica Peruana*. Concreto Armado.
- Ramírez, P.; Alejano, L. (2004). *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*.
- Rodríguez, M. Á. T.; Daza, P. G. (2021). *La construcción del Alcázar de Sevilla. Replanteo, cimentaciones y murallas fundacionales*. Informes de la Construcción, 73(563), 1–15. <https://doi.org/10.3989/IC.78484>
- Rodríguez-Pascua, M. A.; Benavente Escobar, C.; Rosell Guevara, L.; Grütznér, C.; Audin, L.; Walker, R.; García, B.; Aguirre, E. (2020). *Did earthquakes strike Machu Picchu?*. Journal of Seismology, 24(4), 883–895. <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09877-4>
- Rostworowski, M. (2011). *Pachacutec Inca Yupanqui* (IEP, Ed.).
- Sáez, E. (2010). *Fundamentos de Geotecnia* (Pontificia Universidad Católica de Chile, Ed.).
- Saloustros, S.; Pelà, L.; Roca, P.; Portal, J. (2015). *Numerical analysis of structural damage in the church of the Poblet Monastery*. Engineering Failure Analysis, 48, 41–61. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.10.015>
- Sandrolini, F.; Franzoni, E. (2006). *An operative protocol for reliable measurements of moisture in porous materials of ancient buildings*. Building and Environment, 41(10), 1372–1380. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.023>
- Sass, O.; Viles, H. (2022). *Heritage hydrology: a conceptual framework for understanding water fluxes and storage in built and rock-hewn heritage*. Heritage Science, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00693-7>
- Tavera, H. (2020). *Terremotos vs. Sismos Frases y reflexiones para recordar* (H. Tavera, Ed.); 1ra edición digital). <https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12816/4851/Terremotos-vs-sismos-Hernando-Tavera.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- Vilímek, V.; Klimeš, J.; Ttito Mamani, R. V.; Bastante Abuhadba, J.; Astete Victoria, F.; Champi Monterroso, P. Z. (2020). *Contribution of the collaborative effort of the Czech WCoE to landslide risk reduction at the Machupicchu, Peru*. Landslides, 17(11), 2683–2688. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01509-0>
- Vilímek, V.; Zvelebil, J.; Klimeš, J.; Patzelt, Z.; Astete, F.; Kachlík, V.; Hartvich, F. (2007). *Geomorphological research of large-scale slope instability at Machu Picchu, Peru*. Geomorphology, 89(3–4), 241–257. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.12.004>

- Wright, K. R. (2013). *Inca Foundations, Site Preparation, and Drainage at Machu Picchu*. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 18(2), 131–142. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)sc.1943-5576.0000146](https://doi.org/10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000146)
- Xie, T.; Guo, P.; Stolle, D. (2023). *Thermodynamic basis of granular STZ model and its application in revealing shear resistance reduction mechanisms of granular soils under vibration*. Continuum Mechanics and Thermodynamics. <https://doi.org/10.1007/s00161-023-01244-6>