

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
ESCUELA DE POST GRADO**

**MAESTRÍA EN ARQUITECTURA
MENCIÓN EN CONSERVACIÓN DE MONUMENTOS Y CENTROS HISTÓRICOS**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN
ARQUITECTURA, MENCIÓN EN CONSERVACIÓN DE MONUMENTOS Y
CENTROS HISTÓRICOS**



**“ESTUDIO DE LOS CONOCIMIENTOS GEOTÉCNICOS EN EL PERIODO INCA,
CASOS, LLAQTAS INCAS DE MACHUPICCHU, OLLANTAYTAMBO, PISAQ,
RAQCHI, TIPÓN Y SAQSAYWAMAN, EN EL DEPARTAMENTO DE CUSCO, 2017”**

PRESENTA:

Br. en arquitectura ABARCA ANCORI, Amparo.

ASESOR: MGT. ARQ. RENÉ NAVARRO HALANOCCA

CUSCO, PERÚ
2018

DEDICADO A

LUIS, mi padre, sin igual.

+JULIA, mi madre, una mujer extraordinaria.

MARKO, mi amado esposo y, compañero de vida.

LUCÍA DE FÁTIMA, mi hija, poderoso motivo de vida.

JOSÉ LUIS, MARIBEL, ALFREDO Y ABELARDO, mis hermanos, por estar siempre
presentes.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS.

A GEOTEST PERÚ, por haber posibilitado mi incursión en la geotecnia, gracias a lo cual, pude conocer los extraordinarios contenidos de la geotecnia Inca.

A la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, por facilitar la ampliación de mis conocimientos académicos y, a los profesores de la Maestría, en especial al M.Sc. Arquitecto +Mario Castillo.

A mi asesor de investigación, M.Sc. René Navarro Halanoca, por su orientación y valioso tiempo dedicado a la supervisión de la presente tesis, por su amistad y disponibilidad de compartir su conocimiento.

Al Ing. Abelardo Abarca, por su continuo soporte en geotecnia y valiosos aportes de su experiencia y conocimiento durante el desarrollo de la presente investigación.

A la Dirección Regional de Cultura Cusco, por permitirme desarrollar esta investigación en los Monumentos Arqueológicos más emblemáticos del departamento de Cusco y de mucha restricción por su condición patrimonial; en especial al personal que me acompañó en el desarrollo de los ensayos de campo, por su apoyo y espíritu de colaboración.

Agradezco a los compañeros de trabajo de campo y laboratorio que tuve durante el desarrollo de la investigación, que forman parte de GEOTEST PERÚ, en especial a Wilbert, Calixto, Andrés y Yuri, por su apoyo incondicional.

Agradezco al Ing. Marko Ortega, por su ininterrumpido acompañamiento en mi interés cognitivo, cubriendo mis ausencias en el hogar, en su rol de esposo.

A Fray Dominico, Marco Antonio Nureña A., por la consecución de bibliografía especializada.

A toda mi familia y amigos por creer en mí.

ÍNDICE GENERAL

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.1 Situación problemática	12
1.2 Formulación del problema	13
1.3 Justificación de la investigación	14
1.4 Objetivos de la investigación	15
II. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.	17
2.1 Bases teóricas	18
2.2 Marco Conceptual	20
2.2.1 Patrimonio cultural y, patrimonio material inmueble	20
2.2.2 Patrimonio arqueológico	21
2.2.3 Recursos culturales no renovables	21
2.2.4 Zona arqueológica monumental	22
2.2.5 Geotecnia, estudio de la Pachamama	22
2.2.6 Macizos rocosos, Q´aqqas.	23
2.2.7 Suelos, Pachamama	32
2.2.8 Cimentación, conexión del Kay Pacha con el Uku Pacha	40
2.2.9 Cimentaciones sobre rellenos	41
2.2.10 Capacidad de carga	42
2.2.11 Asentamiento de una cimentación	43
2.2.12 Exploración del suelo (Pachamama)	46
2.2.13 Ensayos de Laboratorio	49
2.2.14 Investigación geotécnica	51
2.3 Antecedentes empíricos de la investigación (estado del arte)	52
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES	68
3.1 Hipótesis	69

3.2	Identificación de variables e indicadores	69
3.3	Operacionalización de variables	70
IV.	METODOLOGÍA	72
4.1	Ámbito de estudio: localización política y geográfica	73
4.2	Tipo y nivel de investigación	75
4.3	Unidad de análisis	77
4.4	Universo de estudio	77
4.5	Tamaño de muestra	77
4.6	Técnicas de selección de muestra	77
4.7	Técnicas de recolección de información	78
4.8	Técnicas de análisis e interpretación de la información	78
4.9	Técnicas para demostrar la verdad o falsedad de las hipótesis planteadas	79
V.	CASOS DE ESTUDIO	80
5.1	De las Condiciones Locales de Emplazamiento de las Llaqtas Incas	81
5.1.1	Geología	81
5.1.2	Características climatológicas	85
5.1.3	Nivel freático	86
5.1.4	Efecto del sismo	90
5.1.5	Relieve	100
5.1.6	Conclusiones	105
5.2	Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman	108
5.2.1	Descripción.	108
5.2.2	Ubicación y accesos	109
5.2.3	Topografía	113
5.2.4	Situación legal	117
5.2.5	Tipo de edificación	118

5.2.6	Movimiento de suelo	119
5.2.7	De la cimentación	120
5.2.8	Conclusiones	126
5.3	De la Investigación de Campo	129
5.3.1	Condiciones de frontera	130
5.3.2	Número de puntos de investigación	131
5.3.3	Profundidad de investigación en las Llaqtas Incas	132
5.3.4	Distribución de los puntos de investigación en las Llaqtas Incas	137
5.3.5	Ensayos In Situ	144
5.3.6	Extracción de Muestras representativas	156
5.3.7	Conclusiones	158
5.4	De los Análisis en Laboratorio	161
5.4.1	Características Físicas y Mecánicas	161
5.4.2	Perfil Estratigráfico	167
5.4.3	Correlaciones Penetrométricas	180
5.4.4	Peso Unitario	181
5.4.5	Resistencia a la Compresión No Confinada de Corazones Diamantinos de Macizos Rocosos de las Llaqtas Incas	182
5.4.6	Correlaciones Esclerométricas	188
5.4.7	Conclusiones de los análisis en Laboratorio	189
5.5	De las Condiciones de Cimentación	193
5.5.1	Tipo de cimentación de las Llaqtas Incas	193
5.5.2	Estratos de apoyo de la cimentación de las Llaqtas Incas	200
5.5.3	Parámetros Físico Mecánicos de los Suelos de Fundación de las Llaqtas Incas	220
5.5.4	Conclusiones	231

5.6 Del Análisis y los cálculos de Capacidad de Carga de los suelos de fundación de las Llaqtas	
Incas	232
5.6.1 De los cálculos de Capacidad de Carga	232
5.6.2 La cimentación Inca y las capacidades de carga de los suelos de fundación	246
5.6.3 Conclusiones	250
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	252
6.2 Conclusiones.	253
6.2.1 Comprobación de las Hipótesis.	253
6.2.2 Conclusiones Generales	261
6.2.3 Conclusiones Específicas	262
6.3 Recomendaciones	268
VII. BIBLIOGRAFÍA.	272
VIII. ANEXOS	280

Lista de Tablas

Tabla 2.1.: Clasificación de rocas

Tabla 2.2.: Escala de meteorización de rocas

Tabla 2.3.: Caracterización general de Rocas y Suelos

Tabla 2.4.: Ensayos de investigación In Situ

Tabla 2.5.: Ensayos de Laboratorio

Tabla 3.1.: Operacionalización de Variables Independientes

Tabla 3.2.: Operacionalización de Variable Dependiente

Tabla 5.1.: Características geológicas de las Llaqtas Incas

Tabla 5.2.: Características climatológicas de las Llaqtas Incas

Tabla 5.3.: Efecto nocivo del agua en las Llaqtas Incas

Tabla 5.4.: Recreación del Perfil estratigráfico y tratamiento del drenaje Inca en el Uku Pacha

Tabla 5.5.: Factores de Zona, “Z” de Llaqtas Incas

Tabla 5.6.: Condiciones Geotécnicas de las Llaqtas Incas

Tabla 5.7.: Categoría de Edificaciones y Factor de Uso de Llaqtas Incas

Tabla 5.8.: Regularidad estructural en las Llaqtas Incas

Tabla 5.9.: Emplazamiento de Llaqtas Incas en el seno de la Pachamama (Madre Tierra)

Tabla 5.10.: La Pachamama labrada y resaltada en el Kay Pacha (superficie)

Tabla 5.11.: Descripción de las Llaqtas Incas

Tabla 5.12.: Ubicación geográfica y accesos

Tabla 5.13.: Saneamiento Físico Legal de Llaqtas Incas

Tabla 5.14.: Ensayos realizados In Situ en las Llaqtas Incas

Tabla 5.15.: Profundidad de investigación alcanzada con Penetrómetro Dinámico Ligeró (PDL);

Llaqta Inca de Machupicchu

Tabla 5.16.: Profundidad de investigación alcanzada con Penetrómetro Dinámico Ligeró (PDL);
Llaqta Inca de Ollantaytambo

Tabla 5.17.: Profundidad de investigación alcanzada con Penetrómetro Dinámico Ligeró (PDL);
Llaqta Inca de Písaq

Tabla 5.18.: Profundidad de investigación alcanzada con Penetrómetro Dinámico Ligeró (PDL);
Llaqta Inca de Raqchi

Tabla 5.19.: Profundidad de investigación alcanzada con Penetrómetro Dinámico Ligeró (PDL);
Llaqta Inca de Tipón

Tabla 5.20.: Profundidad de investigación alcanzada con Penetrómetro Dinámico Ligeró (PDL);
Llaqta Inca de Saqsaywaman

Tabla 5.21.: Número de Ensayos realizados con Penetrómetro dinámico ligero en las Llaqtas
Incas

Tabla 5.22.: Muestras de Suelos de Llaqtas Incas para la Caracterización física y mecánica

Tabla 5.23.: Resumen de las Características Físicas de Rellenos Controlados Inca, RCI

Tabla 5.24.: Valoración del suelo Grava Mal Graduada, de los Rellenos Controlados Inca

Tabla 5.25.: Aptitud de suelos granulares y finos para Rellenos Controlados Inca

Tabla 5.26.: Espesor o potencia de los Rellenos Controlados Inca, RCI

Tabla 5.27.: Ángulos de Fricción y Densidades promedio de los Suelos de fundación de las
Llaqtas Incas

Tabla 5.28.: Comparación de densidades entre Rocas sanas y Macizos rocosos de las Llaqtas
Incas

Tabla 5.29.: Pesos Unitarios o Densidad de Macizos Rocosos de las Llaqtas Incas

Tabla 5.30.: Resistencia a Compresión de Macizos Rocosos de las Llaqtas Incas

Tabla 5.31.: Clasificación de Rocas de las Llaqtas Incas, a partir de su Resistencia a Compresión

Tabla 5.32.: Aptitud de macizos rocosos de las Llaqtas Incas para cimientos

Tabla 5.33.: Resistencia de macizos rocosos de las Llaqtas Incas, a partir de Ensayos Esclerométricos

Tabla 5.34.: Síntesis de Parámetros geotécnicos promedio de las Llaqtas Incas

Tabla 5.35.: Estratos de Apoyo de las superestructuras de la Llaqta Inca de Machupicchu

Tabla 5.36.: Estratos de Apoyo de las superestructuras de la Llaqta Inca de Ollantaytambo

Tabla 5.37.: Estratos de Apoyo de las superestructuras de la Llaqta Inca de Písaq

Tabla 5.38.: Estratos de Apoyo de las superestructuras de la Llaqta Inca de Raqchi

Tabla 5.39.: Estratos de Apoyo de las superestructuras de la Llaqta Inca de Tipón

Tabla 5.40.: Estratos de Apoyo de las superestructuras de la Llaqta Inca de Saqsaywaman

Tabla 5.41.: Parámetros geotécnicos de los suelos de fundación de la Llaqta Inca de Machupicchu

Tabla 5.42.: Parámetros geotécnicos de los suelos de fundación de la Llaqta Inca de Ollantaytambo

Tabla 5.43.: Parámetros geotécnicos de los suelos de fundación de la Llaqta Inca de Písaq

Tabla 5.44.: Parámetros geotécnicos de los suelos de fundación de la Llaqta Inca de Raqchi

Tabla 5.45.: Parámetros geotécnicos de los suelos de fundación de la Llaqta Inca de Tipón

Tabla 5.46.: Parámetros geotécnicos de los suelos de fundación de la Llaqta Inca de Saqsaywaman

Tabla 5.47.: Síntesis de Ángulos de fricción y Densidades: suelos de fundación de superestructuras Incas

Tabla 5.48.: Datos generales para cálculos de Capacidad de Carga

Tabla 5.49.: Datos Estratigráficos con parámetros geotécnicos críticos, de Llaqtas Incas

Tabla 5.50.: Carga actuante sobre los suelos de fundación de las Llaqtas Incas

Tabla 5.51.: Cálculo de Capacidad de Carga con parámetros geotécnicos críticos

Tabla 5.52.: Cálculo de Capacidad de Carga con parámetros geotécnicos óptimos

Tabla 5.53.: Cálculo de Capacidad de Carga con parámetros geotécnicos óptimos, a una profundidad de encaje 2.50 metros

Tabla 5.54.: Cálculo de Asentamientos, con Parámetros geotécnicos críticos

Tabla 5.55.: Cálculo de Asentamientos, con Parámetros geotécnicos óptimos

Tabla 5.56.: Resumen de Capacidades de Carga, con Parámetros geotécnicos críticos

Tabla 5.57.: Resumen de Capacidades de Carga, con Parámetros geotécnicos óptimos

Tabla 5.58.: Condiciones de Cimentación de superestructuras de Llaqtas Incas

Lista de Figuras

Figura 2.1: Grados de meteorización de las Q´aqqas de la Pachamama

Figura 2.2: Proceso de generación de Caos en macizos rocosos, Q´aqqas

Figura 2.3: Sistema de Fallas de formación en la Llaqta Inca de Machupicchu

Figura 2.4: Sistema de Diaclasas de formación en suelos de fundación de Llaqtas Incas

Figura 2.5: Macizos y afloramientos rocosos, en Llaqtas Incas

Figura 2.6: Registro de suelo residual derivado de rocas

Figura 2.7: Clasificación de Suelos SUCS

Figura 2.8: Suelos granulares: Gravetas, Arenas y Limos

Figura 2.9: Ensayos en Laboratorio de Suelos finos

Figura 2.10: Erosión superficial de Suelos en Llaqtas Incas

Figura 2.11: Asentamiento diferencial en la Llaqta Inca de Machupicchu

Figura 2.12: Proceso de Sufusión, en la Llaqta Inca de Machupicchu

Figura 2.13: Ensayos In Situ, con el equipo Penetrómetro Dinámico Ligero

Figura 2.14: Ensayos de Compresión Simple no Confinada

Figura 2.15: Monumento Arqueológico Pre Inka Choquepukio - Lucre (900-1300 DC)

Figura 4.1: Ubicación geográfica del ámbito de investigación

Figura 4.2: Localización geográfica de Llaqtas Incas investigadas

Figura 5.1: Geología de la Llaqta Inca de Machupicchu

Figura 5.2: Geología de la Llaqta Inca de Ollantaytambo

Figura 5.3: Geología de la Llaqta Inca de Pisaq

Figura 5.4: Geología de la Llaqta Inca de Raqchi

Figura 5.5: Geología de la Llaqta Inca de Tipón

Figura 5.6: Geología de la Llaqta Inca de Saqsaywaman

Figura 5.7: Sistemas de drenaje Inca en el Kay Pacha

Figura 5.8: Historial sísmico del ámbito de emplazamiento de las Llaqtas Incas 1688-1860

Figura 5.9: Historial sísmico del ámbito de emplazamiento de Llaqtas Incas 1880-2016

Figura 5.10: Movimiento de terreno de periodo largo y periodo corto

Figura 5.11: Zonificación sísmica del Perú

Figura 5.12: Características morfológicas de Llaqtas Incas

Figura 5.13: Características constructivas de Llaqtas Incas

Figura 5.14: Meteorización de macizos rocosos

Figura 5.15: Acciones de protección Inca de la Pachamama

Figura 5.16: Emplazamiento Inca en el seno de la Pachamama

Figura 5.17: Integración paisajística de la obra Inca

Figura 5.18: Características topográficas de la Llaqta Inca de Machupicchu

Figura 5.19: Características topográficas de la Llaqta Inca de Ollantaytambo

Figura 5.20: Características topográficas de la Llaqta Inca de Pisaq

Figura 5.21: Características topográficas de la Llaqta Inca de Raqchi

Figura 5.22: Características topográficas de la Llaqta Inca de Tipón

Figura 5.23: Características topográficas de la Llaqta Inca de Saqsaywaman

Figura 5.24: Edificación Inca Tipo

Figura 5.25: Contexto natural de las Llaqtas Incas

Figura 5.26: Sistema: Superestructura - macizo rocoso

Figura 5.27: Conformación de Cimientos Inca-Machupicchu

Figura 5.28: Conformación de Cimientos Inca – Ollantaytambo

Figura 5.29: Conformación de Cimientos Inca - Písaq

Figura 5.30: Conformación de Cimientos Inca - Raqchi

Figura 5.31: Conformación de Cimientos Inca - Tipón

Figura 5.32: Conformación de Cimientos Inca - Saqsaywaman

Figura 5.33: Distribución de puntos de investigación en la Llaqta Inca de Machupicchu

Figura 5.34: Distribución de puntos de investigación en la Llaqta Inca de Ollantaytambo

Figura 5.35: Distribución de puntos de investigación en la Llaqta Inca de Písaq

Figura 5.36: Distribución de puntos de investigación en la Llaqta Inca de Raqchi

Figura 5.37: Distribución de puntos de investigación en la Llaqta Inca de Tipón

Figura 5.38: Distribución de puntos de investigación en la Llaqta Inca de Saqsaywaman

Figura 5.39: Equipo Penetrómetro Dinámico Ligero

Figura 5.40: Ensayos In Situ, con el Equipo Penetrómetro Dinámico Ligero

Figura 5.41: Ensayos In Situ con Penetrómetro Dinámico Ligero, en la Llaqta Inca de Machupicchu

Figura 5.42: Ensayos In Situ con Penetrómetro Dinámico Ligero, en la Llaqta Inca de Ollantaytambo

Figura 5.43: Ensayos In Situ con Penetrómetro Dinámico Ligero, en la Llaqta Inca de Písaq

Figura 5.44: Ensayos In Situ con Penetrómetro Dinámico Ligero, en la Llaqta Inca de Raqchi

Figura 5.45: Ensayos In Situ con Penetrómetro Dinámico Ligero, en la Llaqta Inca de Tipón

Figura 5.46: Ensayos In Situ con Penetrómetro Dinámico Ligero, en la Llaqta Inca de Saqsaywaman

Figura 5.47: Ensayos Esclerométricos, en la Llaqta Inca de Machupicchu

Figura 5.48: Ensayos Esclerométricos, en la Llaqta Inca de Ollantaytambo

Figura 5.49: Ensayos Esclerométricos, en la Llaqta Inca de Písaq

Figura 5.50: Ensayos Esclerométricos, en la Llaqta Inca de Raqchi

Figura 5.51: Ensayos Esclerométricos, en la Llaqta Inca de Tipón

Figura 5.52: Ensayos Esclerométricos, en la Llaqta Real de Saqsaywaman

Figura 5.53: Muestras de Suelo para Laboratorio

Figura 5.54: Ensayos de Contenido de Humedad

Figura 5.55: Ensayos de Análisis Granulométrico

Figura 5.56: Serie de Tamices estándar para el análisis granulométrico

Figura 5.57: Estratigrafía característica de Rellenos Controlados Inca en Plataformas Agrícolas - Machupicchu

Figura 5.58: Gráfico del Perfil Estratigráfico típico en Muros de Contención de las Llaqtas Incas - Machupicchu

Figura 5.59: Gráficos del Perfil Estratigráfico típico en Muros de Contención de las Llaqtas Incas: Ollantaytambo y Písaq

Figura 5.60: Gráfico del Perfil Estratigráfico típico en Plataformas agrícolas de las Llaqtas Incas - Machupicchu

Figura 5.61: Gráficos del Perfil Estratigráfico típico en Plataformas agrícolas de las Llaqtas Incas: Ollantaytambo y Písaq

Figura 5.62: Gráfico del Perfil Estratigráfico típico en Recintos de las Llaqtas Incas - Machupicchu

Figura 5.63: Perfil Estratigráfico de Recintos de las Llaqtas Incas: Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman

Figura 5.64: Gráfico del Perfil Estratigráfico típico en Espacios abiertos Plaza de las Llaqtas Incas - Machupicchu

Figura 5.65: Perfil Estratigráfico de Plazas de las Llaqtas Inca: Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman

Figura 5.66: Gráfico del Perfil Estratigráfico típico en Espacios abiertos Patio de las Llaqtas Incas - Machupicchu

Figura 5.67: Perfil Estratigráfico de Patios de las Llaqtas Inca: Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman

Figura 5.68: Ensayos de Compresión Simple No Confinada, de suelos de fundación de la Llaqta Inca de Machupicchu

Figura 5.69: Ensayos de Compresión Simple No Confinada, de suelos de fundación de la Llaqta Inca de Ollantaytambo

Figura 5.70: Ensayos de Compresión Simple No Confinada, de suelos de fundación de la Llaqta Inca de Písaq

Figura 5.71: Ensayos de Compresión Simple No Confinada, de suelos de fundación de la Llaqta Inca de Raqchi

Figura 5.72: Ensayos de Compresión Simple No Confinada, de suelos de fundación de la Llaqta Inca de Tipón

Figura 5.73: Ensayos de Compresión Simple No Confinada, de suelos de fundación de la Llaqta Inca de Saqsaywaman

Figura 5.74: Patrón de Relleno Controlado Inca, RCI

Figura 5.75: Relleno Controlado Inca, RCI – Muros de contención - Machupicchu

Figura 5.76: Rellenos Controlados Inca, RCI - Plataformas Agrícolas - Machupicchu

Figura 5.77: Rellenos Controlados Inca, RCI – Recintos - Machupicchu

Figura 5.78: Relleno Controlado Inca, RCI – Plazas y Patios

Figura 5.79: Relleno Controlado Inca, RCI - Soterramiento y confinamiento de muros - Saqsaywaman

Figura 5.80: Tipos de apoyo de superestructuras en la Llaqta Inca de Machupicchu

Figura 5.81: Tipos de apoyo de superestructuras en la Llaqta Inca de Ollantaytambo

Figura 5.82: Tipos de apoyo de superestructuras en la Llaqta Inca de Písaq

Figura 5.83: Tipos de apoyo de superestructuras en la Llaqta Inca de Raqchi

Figura 5.84: Tipos de apoyo de superestructuras en la Llaqta Inca de Tipón

Figura 5.85: Tipos de apoyo de superestructuras en la Llaqta Inca de Saqsaywaman

Figura 5.86: Rellenos Controlados Inca, en sus contextos originales I - Písaq

Figura 5.87: Rellenos Controlados Inca, en sus contextos originales II - Písaq

Figura 5.88: Rellenos Controlados Inca, en sus contextos originales III - Písaq

Figura 5.89: Rellenos Controlados Inca, en sus contextos originales I - Ollantaytambo

Figura 5.90: Rellenos Controlados Inca, en sus contextos originales II – Ollantaytambo

INTRODUCCIÓN

Han pasado más de cinco siglos y, las superestructuras de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, continúan en pie; la explicación de tal perennidad, la abordamos en la presente investigación, a partir del estudio de tres factores: Condiciones Locales de Emplazamiento, Características Físicas y Mecánicas y, Capacidad de Carga, de los suelos de fundación. Los resultados obtenidos, demuestran que en el periodo Inca, el conocimiento geotécnico era avanzado; pues, se conocía de la cohesión de los Llinq'is (arcillas) y, de la dureza y resistencia de las Q'áqqas y Rumis (Rocas y gravas), empleándolos de acuerdo a sus potencialidades, e integrándose armónicamente con la Pachamama.

La investigación se llevó a cabo realizando Ensayos In Situ, con Sondeos de Penetrómetro Dinámico Ligero y Esclerómetro; Análisis de muestras en Laboratorio; contrastados con literatura especializada en geotecnia y arqueología; interpretada y sistematizada a partir de parámetros geotécnicos estándar; posibilitándome demostrar que el conocimiento de la geotecnia y su consecuente manejo, en el periodo Inca, son la razón de la Conservación de las Llaqtas Incas investigadas; pues, eligieron emplazamientos con suelos de alta competencia geotécnica, como son los macizos rocosos y, los operativizaron con un manejo técnico de materiales, que denominamos en esta investigación como: *Rellenos Controlados Inca, RCI*.

Se presenta un marco teórico con los conceptos más importantes que definen la condición patrimonial de las superestructuras Incas y, los principales componentes que determinan las propiedades de los suelos de fundación; así mismo, el desarrollar seis casos de estudio: Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman; permite demostrar la recurrencia estandarizada de estrategias y operación de técnicas Inca, que son confirmados por los valores de los parámetros geotécnicos hallados en los suelos de fundación de cada una de estas Llaqtas; lo que faculta comprobar las hipótesis planteadas, y, en consecuencia, certificar que en el Periodo Inca, se conocía y manejaba la Geotecnia, que garantizó la Conservación de las Llaqtas; conocimiento, que los poseciona como precursores de la geotecnia Peruana, de plena vigencia hoy.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Situación problemática

El desconocimiento de la geotecnia y su manejo, referidas a las condiciones locales, las características físicas y mecánicas, y, las capacidades de carga de los suelos de fundación en el periodo Inca; ponen en riesgo la conservación y perennidad del patrimonio arqueológico más representativo del departamento de Cusco; pues, si no se sabe sobre qué suelos y cómo están cimentadas las superestructuras Incas con más de cinco siglos de antigüedad, cualquier intervención de conservación y mantenimiento podría resultar atentatoria a futuro; ya que, los materiales componentes del suelo tienen propiedades distintas y comportamientos diferentes frente a cambios de temperatura y humedad.

Así mismo, si no se conoce el manejo geotécnico Inca operativizado en cada una de sus Llaqtas de élite, una simple apertura de trinchera podría significar la distorsión de las características de compactación de los suelos, o quizá en otro caso, alterar el nivel de confinamiento de la estructura suelo – cimiento - superestructura; o peor aún, remover los propios cimientos; y, si las acciones de intervención para su conservación no convocan la participación conjunta de un equipo profesional multidisciplinario, especializado en estructuras, hidráulica, geotecnia, ambiental, entre otros; se estaría coadyuvando negativamente a la pérdida irreversible de nuestro patrimonio ancestral heredado.

De hecho, las superestructuras Incas, fueron emprendidas con un avanzado conocimiento geotécnico, como punto de partida y garantía de perennidad; que lamentablemente a la fecha, poco o casi nada se investigó; los proyectos de intervención ejecutados están concentrados en la superficie, en lo visible, sin considerar el subsuelo; no hay una investigación oficial que refiera las condiciones locales que eligieron los Incas para el emplazamiento de sus Llaqtas, mucho menos sobre las características físicas y mecánicas que presentan sus suelos ni las capacidades de carga que les permitió asentar sus mega estructuras. La presente investigación intenta resolver ese desconocimiento, cuyos resultados serán el punto de partida para otras.

Finalmente, cabe referir que el desconocimiento de la geotecnia Inca, genera percepciones y apreciaciones oficiales bastante alejadas de la realidad; pues, se alude el mal estado de conservación de las Llaqtas Incas a “fallas geológicas”, a los “efectos de sismo”, a la “débil capacidad de carga”, entre otros argumentos; ignorándose las verdaderas causas que atentan irreversiblemente contra nuestro patrimonio y su conservación; por ello, es imprescindible contar con información objetiva y técnicamente sustentada, que permita enfocarse a la gestión tutelar en la solución integral del problema y, a tiempo; de lo contrario, seremos testigos de falsas reconstrucciones por la pérdida de lo original, apoyándonos en la memoria colectiva.

1.2 Formulación del problema

a. Problema general

Desconocimiento de la geotecnia Inca, desde las Condiciones Locales de Emplazamiento; las Características Físicas y Mecánicas; y, las Capacidades de Carga, de los suelos de fundación de las superestructuras de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, del departamento de Cusco.

b. Problemas específicos

1. Inadvertencia de las Condiciones Locales de Emplazamiento de los suelos de fundación de las superestructuras, de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman.
2. Desconocimiento de las Características Físicas y Mecánicas de los suelos de fundación de las superestructuras de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman.
3. Ignorancia de la Capacidad de Carga de los suelos de fundación de las superestructuras de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman.

1.3 Justificación de la investigación

La investigación, está orientada al conocimiento de la geotecnia Inca y su manejo; evidenciará en primer término, las condiciones locales que se eligieron para el emplazamiento de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman; verificando si se trata o no de zonas de alto riesgo sísmico, propensas o no a derrumbes o si constituyen zonas inundables; ello, permitirá orientar la gestión de su conservación, basada en información real. En segundo término, se dará a conocer las características físicas y mecánicas de los suelos de fundación; es decir, si están constituidos predominantemente por suelos finos o granulares o quizá por suelos mixtos; ello, permitirá intervenir con certeza en el subsuelo.

Conocer sobre qué tipo de suelo se está actuando, no sólo garantizará la eficacia de las intervenciones, sino sobre todo coadyuvará potencialmente a la conservación del patrimonio original, ya que, por ejemplo, los niveles de compactación y confinamiento de suelos granulares no serían trastocados y, en consecuencia, tampoco sus capacidades de carga; así mismo, se evitaría el contacto de suelos finos con el exceso de agua, para descartar probables hinchamientos del suelo. Por otro lado, el conocimiento de la capacidad de carga, con seguridad proporcionará a la gestión tutelar confianza para organizar los itinerarios de las visitas en cada una de las Llaqtas Incas; ojo, todo esto en condiciones normales y óptimas de la geotecnia Inca.

Sí, el manejo geotécnico Inca, en cada una de las Llaqtas no va acompañado a futuro de su pleno conocimiento y, gestado conjuntamente por un equipo multidisciplinario de profesionales, se corre el riesgo de la pérdida irreversible del patrimonio original edificado; pues, no se habrá tomado conciencia de la importancia de la geotecnia operativizada por los Incas, tampoco se habrá tomado las acciones necesarias para su continuidad; lo que expondría a mediano y largo plazo a la extinción del patrimonio más representativo del departamento de Cusco y del país. De ahí la importancia de esta investigación, que se constituye en el primero en el tema y, el punto de partida para otras en salvaguarda del patrimonio.

Esta investigación es importante también, porque además de evidenciar el avanzado conocimiento geotécnico de los Incas, comprobado en las óptimas condiciones locales de emplazamiento y los parámetros geotécnicos de los suelos de fundación, hallados en cada una de las Llaqtas Incas; expone la vigencia de dichos conocimientos para nuestra actualidad, proponiendo el reconocimiento a los Incas como los precursores de la geotecnia peruana y la consideración como parte del patrimonio industrial de la nación; así mismo, muestra la necesidad de la inclusión en la normatividad peruana, de la tipología pétreo Inca; coadyuvando así, a la conservación del patrimonio y la reafirmación de nuestra identidad Inca.

1.4 Objetivos de la investigación

a. Objetivo general

Conocer la geotecnia Inca, a partir de las Condiciones Locales de Emplazamiento; Características Físicas y Mecánicas; y, Capacidades de Carga de los suelos de fundación de las superestructuras de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman; utilizando tecnología contemporánea y, recurriendo a la lectura aún hoy visible, en sus contextos originales; para posibilitar hoy intervenciones acertadas, que garanticen la conservación del Patrimonio en Estudio.

b. Objetivos Específicos.

1. Identificar las Condiciones Locales de Emplazamiento de los suelos de fundación de las superestructuras de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman; a partir del estudio de sus contextos naturales; para certificar que el origen y naturaleza de los Suelos y Rocas de fundación, fueron determinantes en la conservación de las Llaqtas en estudio.
2. Conocer las Características Físicas y Mecánicas de los suelos de fundación de las superestructuras de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac,

Raqchi, Tipón y Saqsaywaman; realizando ensayos normalizados In Situ con los equipos Penetrómetro Dinámico Ligero y Esclerómetro, y, obteniendo muestras para su análisis y pruebas estándar en Laboratorio, utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS); para demostrar que las propiedades geotécnicas definieron la competencia del Suelo que soporta las superestructuras Incas en estudio.

3. Determinar la Capacidad de Carga de los suelos de fundación de las superestructuras de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman; utilizando pruebas estándar y ensayos normalizados en Laboratorio como Compresión Simple No Confinada; Correlaciones normalizadas de ensayos Esclerométricos y Penetrométricos; y, cálculos en gabinete, a partir de Parámetros Geotécnicos obtenidos; para probar que el comportamiento Esfuerzo – Deformación garantizó la estabilidad y los asentamientos permisibles de las superestructuras Incas en estudio.

II. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.

2.1 Bases teóricas

Considerando que la geotecnia Inca, es un proceso que involucra un conjunto de elementos que se interrelacionan e interactúan entre sí y, con otros fenómenos o procesos, la concebimos como un sistema complejo; es decir, “(...) *un sistema en el cual los procesos que determinan su funcionamiento son el resultado de la confluencia de múltiples factores que interactúan de tal manera que el sistema no es descomponible sino sólo semidescomponible*” (García, 2006, p.182). En este contexto, estratificamos los factores que directa o indirectamente determinan el funcionamiento de la geotecnia, donde cada nivel condiciona las dinámicas de los niveles adyacentes, por ejemplo los Suelos y Rocas, la cimentación y las superestructuras.

A su vez, el sistema geotecnia, está formado, a decir de García (2006) por “*subsistemas constituidos por elementos entre los cuales hay un mayor grado de interconexión con respecto a los otros elementos del mismo nivel. Estos subsistemas funcionan como sub totalidades, (...) que (...) constituyen la estructura de ese nivel particular del sistema*” (p. 184). En consecuencia, se advierte un conjunto de interacciones que ejercen influencia sobre un determinado nivel estratigráfico denominado condiciones de contorno o condiciones límite (García, 2006). Esas condiciones de contorno están identificadas como las Condiciones Locales de Emplazamiento de las superestructuras Incas que influirán en los tipos de suelo de fundación.

Este sistema geotécnico, sufre transformaciones -como todos- a lo largo del tiempo, lo que viene a denominarse principio de evolución (García, 2006); que se da a través de procesos, que no sólo modifican el sistema gradual y continuamente, sino, inclusive lo desequilibran, correspondiendo en consecuencia, una reorganización del sistema. La finalidad es lograr un relativo equilibrio dinámico con fluctuaciones que aseguren mantener dentro de los límites permisibles la geotecnia Inca; sin embargo, siempre existirá la posibilidad de una nueva

perturbación que exija una nueva reorganización de la geotecnia, quizá sea esta la característica principal de un sistema complejo abierto, en permanente movimiento y retroalimentación.

El nivel de análisis del sistema complejo abierto geotecnia, está dado por procesos que corresponden a diferentes niveles; así, un primer nivel, está integrado por los subsistemas Condiciones Locales de Emplazamiento, Características Físicas de los suelos y Capacidades de Carga; un segundo nivel, está compuesto por todos aquellos cambios introducidos en el sistema como resultado de fenómenos de carácter más general, entre ellos, políticas nacionales, leyes como la 28296, y normas técnicas como la E-050; y, el tercer nivel está referido a los cambios que trastocan los fenómenos generales, siempre circunscritos al ámbito de estudio, por ejemplo, políticas internacionales y las Cartas Internacionales para la conservación del Patrimonio.

Así mismo, como todo sistema complejo abierto, la geotecnia está al alcance de equipos multidisciplinarios, con una metodología de trabajo integrada interdisciplinariamente, con el objetivo de lograr intervenciones de conservación integrales en el patrimonio edificado. En este escenario, nos enfocaremos en los subsistemas Condiciones Locales de Emplazamiento, Características Físicas y Mecánicas de los Suelos y Rocas de fundación y, sus Capacidades de Carga, que determinan el funcionamiento del sistema Suelo-Cimiento-Superestructura Inca; correlacionada a la Norma Técnica Peruana E-050, de Suelos y Cimentaciones y, enmarcada en la Ley 28296, Ley General del Patrimonio Cultural de la Nación y, en las Cartas Internacionales.

Siendo la geotecnia, un sistema complejo abierto, conviene evidenciar una postura personal; pues, hay quienes gustan soñar con soluciones perfectas y materiales ideales, con gran tendencia hacia lo analítico; y, otros, que se interesan mucho más por investigar las incertidumbres y complejidades de los materiales reales, me sumo a este segundo grupo, considerándome apasionada por observar y curiosear personalmente con experimentos directos

las intimidades del subsuelo. Terzaghi (como se citó en Juárez y Rico, 2005) alguna vez, afirmaba que, “quién sólo conoce la teoría de la mecánica de Suelos y carece de experiencia práctica puede ser un peligro público”.

El conocimiento geotécnico Inca

2.2 Marco Conceptual

Para el diseño de las cimentaciones de superestructuras, se requiere el conocimiento de varios factores; entre ellos, la carga que será transmitida por la superestructura a la cimentación, el comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos que soportarán el sistema y, las condiciones geológicas del suelo (Braja, 2006). En consecuencia, el conocimiento geotécnico es un ejercicio de la imaginación y de la inteligencia, de la prudencia y del sentido de observación (Juárez, 1998) que aseguran por ejemplo, una cimentación sólida. A continuación conceptualizamos la terminología utilizada en el desarrollo de la presente investigación, haciendo hincapié en patrimonio, geotecnia, suelos y cimentación.

2.2.1 Patrimonio cultural y, patrimonio material inmueble

El patrimonio arqueológico, materia de la presente investigación, forma parte del Patrimonio Cultural de la Nación; y, de acuerdo a la clasificación definida en el capítulo I, art. 1º de la Ley 28296, integran el denominado *patrimonio material inmueble*, que “Comprende de manera no limitativa, los edificios, obras de infraestructura, ambientes y conjuntos monumentales, (...), y demás construcciones, o evidencias materiales resultantes de la vida y actividad humana (...). La protección (...) comprende el suelo y subsuelo en el que se encuentran (...)” (Marco Legal de Protección del Patrimonio Cultural, 2016, p. 9). En el desarrollo de nuestra investigación las denominamos *Llaqtas Incas* (pueblos de la élite Inca).

2.2.2 Patrimonio arqueológico

“El patrimonio arqueológico representa la parte de nuestro patrimonio material para la cual los métodos de la arqueología nos proporciona la información básica. Engloba todas las huellas de la existencia del hombre (...), a las estructuras y los vestigios abandonados de cualquier índole, tanto en la superficie, como enterrados (...)” (Documentos Fundamentales para el Patrimonio Cultural, 2007, p. 157). En este contexto, la investigación está enfocada en los suelos de fundación que constituyen los vestigios enterrados, el Uku Pacha de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, cuyo manejo geotécnico tiene incidencia directa en el Kay Pacha; es decir, en las superestructuras Incas.

La Carta Internacional para la Gestión del Patrimonio Arqueológico (1990), artículo 5°, admite que las excavaciones deben realizarse preferentemente en sitios y monumentos amenazados o al advertirse deterioro natural; teniéndose como principio, que los *métodos de intervención no destructivos* como *observaciones In Situ, análisis de muestras y sondeos*, debe ser fomentado en cualquier caso, con preferencia a la excavación integral. Tomando en cuenta esta recomendación y, las restricciones que impone la condición patrimonial de las Llaqtas Incas en investigación, se prioriza los sondeos con Penetrómetro Dinámico Ligero y Esclerómetro In Situ, para su contrastación con ensayos normalizados de muestras en Laboratorio.

2.2.3 Recursos culturales no renovables

El Reglamento de Intervenciones Arqueológicas, título preliminar, artículo 1°, establece que los bienes integrantes del Patrimonio Cultural de la Nación, son reconocidos como *recursos culturales no renovables*; motivo superior que justifica su estudio a través de investigaciones multidisciplinarias, para preservarlos y protegerlos; siendo su conservación de interés nacional, y su inclusión en las políticas de desarrollo nacional, regional y local como estratégica. En su artículo 2°, determina que su defensa y máxima protección es atribución de toda persona o

autoridad, y un derecho cultural el conocerlo (El Peruano, 04.10.2014, p. 534122). El conocer la geotecnia Inca, significa actuar para conservar nuestros recursos culturales no renovables.

2.2.4 Zona arqueológica monumental

De acuerdo al numeral 7.2, artículo 7° del Reglamento de Intervenciones Arqueológicas (2014), todos los monumentos arqueológicos de la época prehispánica, están clasificados; en ese sentido, las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, en estudio, se enmarcan en la clasificación denominada *Zona Arqueológica Monumental*, que “Es el conjunto de monumentos arqueológicos, cuya magnitud, complejidad y ordenamiento espacial arquitectónico le da un valor singular y excepcional (...). Contiene edificaciones monumentales, ceremoniales, funerarias (...), cuyo diseño y fisonomía debe conservarse” (El Peruano, 04.10.2014, p. 534123).

2.2.5 Geotecnia, estudio de la Pachamama

La geotecnia, se encarga del estudio de las propiedades mecánicas de los materiales provenientes de la tierra (Juárez y Rico, 2005), de la Pachamama; considerándose que los depósitos de suelo natural sobre los cuales las cimentaciones se construyen, no son homogéneos en la mayoría de los casos (Braja, 2006); por ello, en la presente investigación, estudiamos los *suelos* que se encuentran por debajo de la superficie de cada una de las Llaqtas Incas en estudio, para determinar sus *propiedades físicas y mecánicas* y, su comportamiento esfuerzo – deformación; que posibilitaron cimentar las superestructuras Incas y conferirles seguridad, durabilidad y estabilidad perennes.

Metodológicamente nos apoyamos en los contenidos de un *Estudio de Mecánica de Suelos* (Norma E-0.50, 2006); que abarca el conjunto de *investigaciones de Campo*, como sondeos y verificación de resistencia de suelos; *Ensayos de Laboratorio*, que determinan las características físicas y mecánicas de los suelos obtenidos en campo; y, *análisis en gabinete*, consistente en la determinación de las propiedades geotécnicas del suelo (Braja, 2006); todo

ello, define la naturaleza de la Pachamama, su comportamiento y las respuestas ante sollicitaciones estáticas (cargas del peso propio) y dinámicas (sismo); complementándose con contenidos establecidos en la *mecánica de rocas* (Ramírez y Alejano, 2004).

2.2.6 Macizos rocosos, Q'aaqas.

Considerando que, las superestructuras de las Llaqtas Incas en estudio, están emplazadas en montañas rocosas (Q'aaqas), amerita entender el concepto de *roca*; el cual lo definimos como un agregado de minerales *con cohesión permanente* y que requiere de medios mecánicos de alta intensidad (taladros o voladuras) para su remoción (Ramírez y Alejano, 2004). Las rocas pueden ser *ígneas, sedimentarias o metamórficas*. Las propiedades *físicas o índices* más representativos de las rocas que se abordan en la presente investigación son, el *peso específico* y la *durabilidad*. Respecto a las *propiedades mecánicas*, nos enfocamos en su resistencia, a partir de ensayos de Compresión Simple No Confinada de corazones diamantinos de los macizos rocosos.

Sin embargo, es importante referir algunas características básicas de las rocas como son la densidad, humedad, porosidad y grado de saturación y, permeabilidad (Ramírez y Alejano, 2004); pues, influyen en sus propiedades mecánicas; en este escenario, entenderemos por *densidad* como la relación entre la masa de una muestra de la roca en su estado natural y el volumen que ocupa; cuando la muestra se ha secado previamente en un horno a una temperatura de 110°C, su densidad se denomina seca. Respecto al volumen natural o seco de una muestra de roca, éste es la suma del volumen que ocupan las partículas sólidas más el de los *poros*, que está muy relacionada con su composición mineralógica.

En relación a la *humedad* (C.A., Contenido de Agua o humedad), la entendemos como la relación, expresada en porcentaje, entre la masa de agua contenida en la roca que se evapora a 110° de temperatura y la masa de la muestra seca. La *porosidad* de una roca, la definimos como el volumen de poros expresado en tanto por ciento del volumen total; en algunas rocas como

las areniscas, los poros pueden verse a simple vista, en otros casos sólo son visibles con la ayuda de un microscopio, como es el caso de los granitos, por ejemplo. El *grado de saturación* de una roca es el porcentaje de poros ocupado por el agua; cuando la roca está seca, el grado de saturación es igual a cero; y, cuando la roca está saturada, el valor es igual a 100.

En la Tabla 2.1, mostramos las clases de roca existentes y, la denominación que reciben; siendo las más duras y resistentes, a decir de Ramirez y Alejano (2004): Las ígneas, por su origen volcánico, como: la Granodiorita, la Andesita y el Basalto.

Tabla 2.1.*Clasificación de rocas*

Clase	Tipo	Denominación	
Ígneas	Ácidas	De grano grueso	Granito - Diorita
		De grano fino	Andesita - Riolita
Básicas	Básicas	De grano grueso	Gabro
		De grano fino	Basalto
		No granulares	Pedernal - Obsidiana
		De grano grueso	Conglomerado - Brecha
Sedimentarias	Sedimentarias	Pudinga	
		De grano fino	Arenisca - Ortocuarcita
			Limolita - Arcillita
		No Granulares	Caliza - Dolomita
		Cristalinas	Yeso - Anhidrita
Metamórficas	Metamórficas	De grano grueso	Gneis
		De grano fino	Pizarra - Esquisto
		No Granulares	Cuarcita - Mármol

Nota: Esta clasificación está en base al origen y al mecanismo de formación de las rocas; así, las ígneas de origen volcánico, presentan mayor dureza y resistencia frente a las sedimentarias y metamórficas; sin embargo, las tres presentan alto grado de impermeabilidad. Adaptado de Ramírez y Alejano, 2004.

Las condiciones locales de emplazamiento de las Llaqtas Incas en estudio, evidencian *macizos rocosos*, que no son sino la forma en la que se presentan las rocas en el medio natural, presentando características discontinuas y propiedades heterogéneas y/o anisótropas. Desde el punto de vista genético, puede aseverarse que los suelos son rocas que se han ido erosionando y alterando; y, las rocas son suelos que, sometidos a determinados niveles de presión y temperatura y condiciones químicas, se han ido litificando a lo largo del tiempo mediante diversos tipos de procesos físico-químicos (Ramírez y Alejano. 2004).

La *meteorización de las rocas*, es un factor que no puede dejar de considerarse en la presente investigación; entendiéndose este proceso, como las modificaciones experimentadas en su composición o estructura por la acción de los agentes atmosféricos (Ramírez y Alejano, 2004). La importancia que tiene la meteorización desde el punto de vista de la mecánica de

rocas, se debe a que se produce profundos cambios en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales rocosos; posiblemente, en un estado intemperizado encontraron los Incas las Q'aaqas, antes de emplazarse. Existen dos clases de meteorización: física y química. El hecho de que una u otra predomine depende del clima, ya que ambas se producen simultáneamente.

Respecto a la *meteorización física*, ésta se evidencia a través de las siguientes acciones: arranque directo de partículas por erosión, acción destructora debida a la congelación de agua en grietas y fisuras, modificaciones producidas por los cambios de volumen de la roca debido a variaciones de temperatura, acción de las plantas, especialmente de las raíces de los árboles. La *desintegración, de origen físico, afecta a la parte más superficial de los macizos rocosos y favorece la penetración del agua* que puede dar lugar a la descomposición de los mismos en el interior mediante cambios químicos en las rocas. Si esto es así, es un factor de relevancia a ser considerado en las acciones de conservación del patrimonio arqueológico edificado.

La *meteorización química*, es consecuencia de reacciones de oxidación, hidratación, hidrólisis, carbonatación y disolución, en las cuales los reactivos más importantes son: el agua, el oxígeno, el dióxido de carbono y los ácidos orgánicos. La meteorización física predomina en climas cálidos y secos, o fríos y húmedos, mientras que la meteorización química es propia de climas cálidos o templados pero húmedos; esto significa que, la Llaqta Inca de Machupicchu, cuyo clima es templado y húmedo, está expuesta a la meteorización química; mientras que las Llaqtas Incas de Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, caracterizadas por climas fríos y secos, están expuestas a la intemperización física.

Esto explicaría, el porqué los Incas, presentan profusos sistemas de drenaje y evacuación de aguas pluviales; de seguro, conocían sus efectos devastadores, cuando no está bien manejado; consecuentemente, siendo inevitable convivir con el agua, por ser además un elemento vital, lograron soluciones técnicas muy eficientes que permitieron la conservación de las Llaqtas hasta nuestros días.

En la Tabla 2.2., mostramos la escala de meteorización de rocas, que es un proceso natural al que están expuestos los macizos rocosos, por encontrarse a la intemperie y sus efectos; que, si no se maneja con cautela, podría generar inestabilidades, en caso de constituir material de cimiento de una carga determinada; pues, al llegar al grado de meteorización acentuada, ya sus propiedades geotécnicas se modifican drásticamente, hasta constituirse en suelo, cuyas propiedades son distintas; pudiéndose generar problemas geotécnicos que afectarían a las condiciones de cimentación proyectadas, como son: baja resistencia e inestabilidad puntual, sobre todo en zonas próximas a relieves montañosos de pendiente alta (ver figura 2.1).

Tabla 2.2.

Escala de meteorización de rocas

Grado de Meteorización	Denominación	Criterios de reconocimiento
I	Sana	Roca no meteorizada. Las micas y los feldespatos están lustrosos.
II	Sana con juntas teñidas de óxidos	Las caras de las juntas están manchadas o cubiertas con hematites y limonita, pero el bloque de rocas entre juntas no está meteorizado.
III	Moderadamente meteorizada	Claramente meteorizada a través de la petrofábrica. La alteración se manifiesta por manchas de óxidos de hierro y ligera descomposición de los feldespatos, pero la resistencia es muy similar a la de la roca sana.
IV	Muy meteorizada	Meteorización acusada del conjunto, pero con resistencia tal que piezas aproximadas de 25 cm ² de sección transversal no pueden romperse a mano.
V	Completamente meteorizada	Roca intensamente meteorizada, con aspecto de suelo, que puede romperse y desmenuzarse a mano, pero se puede reconocer todavía la fábrica original de la roca.

Nota: Proceso aplicable a rocas como el granito, basalto, la andesita y la arenisca, cuyas capas más próximas a la superficie presentan aspecto de suelo por el elevado grado de meteorización, frente a las capas profundas poco expuestas a la intemperie que conforman la roca sana. Adaptado de Ramírez y Alejano, 2004.

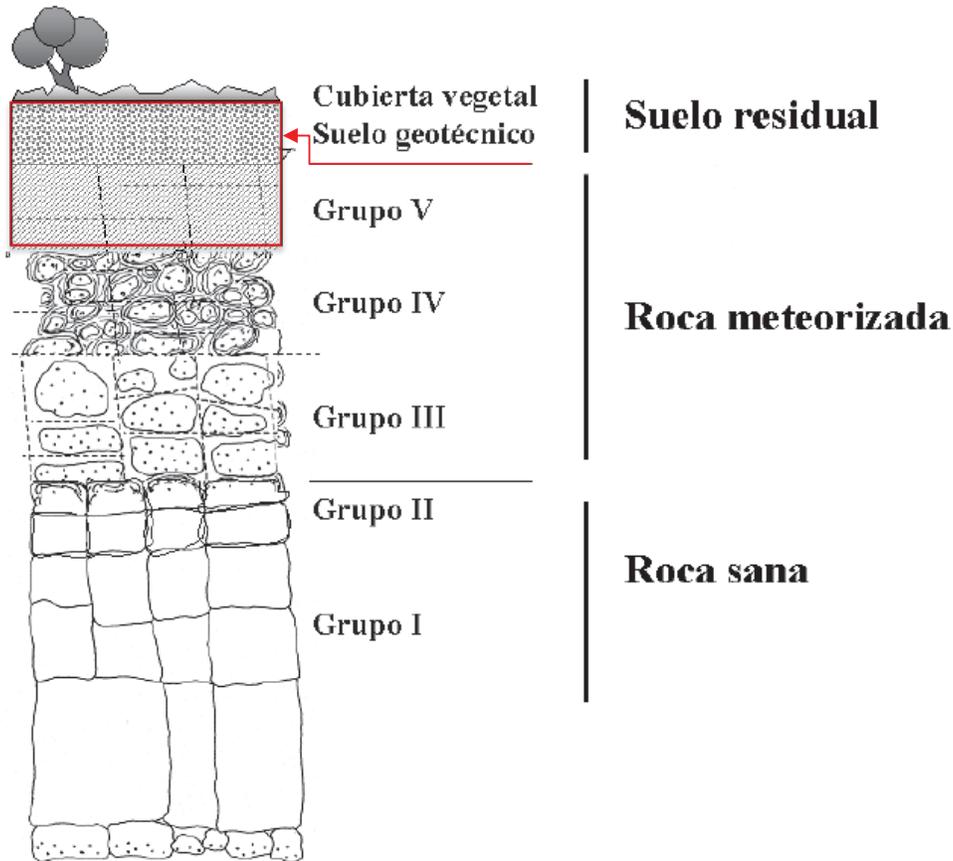


Figura 2.1: Grados de meteorización de las Q'aaqas (rocas); donde los estratos más próximos a la superficie (incluido el estrato clasificado en el grupo V), están conformado por suelo (orgánico o cubierta vegetal, suelo fino o granular), siendo reconocible la matriz de la roca de origen; los estratos inmediatos inferiores (grupos IV y III), presentan a la roca fracturada en bolones de gradiente descendente, hasta alcanzar a la roca sana alejada del proceso de meteorización y sus efectos (grupos II e I). Adaptado de Ramírez y Alejano, 2004.

Es importante referirnos al concepto de *Caos Granítico* (Carlotto, Cárdenas y Fidel, 2009), que consiste en bloques de granitos de dimensiones que varían desde algunos decímetros hasta varios metros de diámetro, formando apilamientos y relieves irregulares; porque, nos permite utilizar el término Caos, para entender los relieves abruptos e irregulares sobre los que se emplazaron las Llaqtas Incas; caos generado desde la formación de los macizos rocosos y sus consecuentes procesos de meteorización; que no sólo se presenta como proceso para el caso del grano diorito de la Llaqta de Machupicchu, sino también para la arenisca de Ollantaytambo, la andesita de Pisaq y Raqchi, el basalto de Tipón y la caliza de Saqsaywaman (ver Figura 2.2).

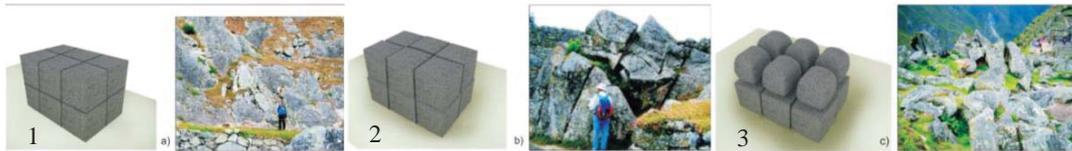


Figura 2.2: Proceso de generación de Caos en macizos rocosos, Q'aaqas. (1) Macizos rocosos fracturados en bloques, (2) tendencia a la separación aprovechando las fracturas en los bloques, y (3) erosión de bloques fracturados que pasan a conformar el Caos. Adaptado de Carlotto, Cárdenas y Fidel, 2009.

De hecho, los relieves con caos superficial, facilitan el movimiento de suelos; pues, las fracturas existentes y, la tendencia de separación, pueden ser aprovechados para remover capas que no favorecen en la construcción de cimientos ú otro tipo de emprendimiento; sí esto es así, podremos comprobar más adelante, cómo manejaron los Incas, este tipo de procesos naturales, cuánto ayudó en el emplazamiento de las Llaqtas, que por la envergadura que presentan, ameritaría grandes e intensos movimientos de suelo; así mismo, los macizos rocosos que presentan caos, no favorecen al desarrollo de los sistemas edáficos, y en consecuencia, la presencia de vegetación arbustiva de raíz profunda es casi inexistente.

Los caos de los macizos rocosos, tienen una antigüedad de millones de años (Carlotto, Cárdenas y Fidel, 2009), desde la formación de los suelos; en consecuencia, no pueden ser considerados como fallas o fracturas de data reciente, que ponen en riesgo una montaña rocosa; por el contrario, con esas formaciones finales, encontraron un equilibrio estático.

Los macizos rocosos se encuentran cortados o afectados por fracturas que pueden ser fallas (ver Figura 2.3), o *diaclasas* (Carlotto, Cárdenas y Fidel, 2009), las mismas que han jugado un papel determinante modelando la morfología y el aspecto que presentaban Machupicchu, Ollantaytambo, Pisaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, cuando los Incas llegaron a éstos lugares. En este contexto, entendemos por *fallas*, a los planos de discontinuidad que se producen cuando el macizo rocoso ha estado sometido a un esfuerzo tectónico que ha sobrepasado su límite de rotura; cuando las dos secciones separadas por la fractura han sufrido desplazamientos relativos por efectos de tensiones cortantes (Ramírez y Alejano, 2004).



Figura 2.3: Sistema de Fallas de formación en la Llaqta Inca de Machupicchu; identificado por Kalafatovich (1963), con dirección NO – SE que cruzan la Llaqta, siendo las representativas: (1) la falla de Waynapicchu, (2) falla de Machupicchu, y (3) falla Foso Seco. Adaptado de Carlotto, Cárdenas y Fidel, 2009.

Respecto a las *Juntas* o *Diaclasas* (ver Figura 2.4), son fracturas sin desplazamiento, originadas por contracciones debidas al enfriamiento del magma, durante su consolidación dentro de la corteza terrestre, hace millones de años (Ramírez y Alejano, 2004).



Figura 2.4: Sistema de Diaclasas de formación en suelos de fundación de Llaqtas Incas. En los recuadros rojos y, resaltados con líneas amarillas se muestran: (1) Q´aqqas con presencia de diaclasas en la Llaqta Inca de Ollantaytambo, y (2) Q´aqqas con presencia de diaclasas en la Llaqta Inca de Pisaq. Nótese que en ambos casos no hay desplazamiento de los macizos rocosos. Fotografías, archivo personal, 2017.

Es importante considerar el término *Afloramiento rocoso* (ver Figura 2.5); pues, normalmente los macizos rocosos están cubiertos por sistemas edáficos que imposibilitan tener contacto directo; más aún, constituyendo macizos muy antiguos, cuya antigüedad puede advertirse en los profundos y cerrados barrancos, labrados por la continua erosión; presentando una morfología de agudas crestas y laderas con pendientes que se aproximan a la verticalidad; por ello, en la presente investigación, se utiliza los afloramientos rocosos en superficie para obtener la máxima información sobre los tipos litológicos y las características estructurales de los macizos rocosos, que son muy útiles para la identificación de los tipos de roca.



Figura 2.5: Macizos y afloramientos rocosos, en Llaqtas Incas. Recuadros rojos muestran: (1) Macizos rocosos de los suelos de fundación, Llaqta Inca de Ollantaytambo; (2) Afloramiento rocoso, Llaqta Inca de Machupicchu. Fotografías, archivo personal, 2017.

Las Llaqtas Incas en estudio están emplazadas -en su mayoría- en taludes, por lo que conocer los factores que desencadenan movimientos imprevistos de éstos se hace necesario; entre los más recurrentes se tiene: el *agua*, que se constituye en el agente natural de mayor incidencia. El agua existente en el interior de la red de fracturación de un macizo rocoso o de forma intersticial en los poros de las rocas, condiciona la estabilidad de los taludes debido a las presiones intersticiales que genera. La influencia del *factor climático* también es determinante, así, las *lluvias* por ejemplo, constituyen un factor desencadenante de inestabilidades, tendiendo a activar o aumentar la acción de otros factores, como los procesos de meteorización.

El agua produce entonces, presiones en el terreno al infiltrarse por discontinuidades y grietas y origina sobrecargas debidas a su propio peso (Ramírez y Alejano, 2004); así mismo, frente a la presencia de suelos finos como arcillas, se da lugar a cambios de volumen (hinchamiento), lo que lleva consigo un incremento de presiones en el macizo rocoso y una disminución de la resistencia. La *sismicidad*, es otro factor que, a partir de un conjunto de vibraciones que se propagan como ondas de diferentes tipos y frecuencias, asociadas a aceleraciones verticales y horizontales, originan fluctuación de las tensiones y deformaciones en el terreno, que afectan al equilibrio de los taludes (Kuroiwa, 2002).

La *actividad humana* está considerada como otro factor importante, que se deriva en específico de las obras civiles; este factor constituye una de las causas con mayor incidencia en los movimientos de los taludes, aunque generalmente tiene consecuencias de menor alcance que las debidas a la naturaleza. Dentro de las actividades humanas se pueden destacar las excavaciones, las voladuras y las sobrecargas (Ramírez y Alejano, 2004).

2.2.7 Suelos, Pachamama

La mayoría de los suelos que cubren la tierra están formados por el intemperismo de varias rocas. Existen dos tipos de intemperismo: (1) *mecánico* y (2) *químico*. El intemperismo mecánico es el proceso por el cual las rocas se fracturan en piezas de menor tamaño bajo la acción de fuerzas físicas, como corrientes de agua, viento, entre otras, además de expansiones y contracciones causadas por ganancia y pérdida de calor; sin embargo, no cambia su composición química. El intemperismo químico implica procesos de descomposición química de la roca original, cambiando sus propiedades a otro completamente diferente (Ramírez y Alejano, 2004).

En este contexto, entendemos el *suelo* como un agregado natural de partículas minerales *sin cohesión permanente y fácilmente removibles* por medios mecánicos de baja intensidad (Ramírez y Alejano, 2004). El suelo producido por el intemperismo de rocas llega a ser

transportado mediante procesos físicos a otros lugares. Esos depósitos se llaman *suelos transportados*. Algunos suelos permanecen donde se forman y cubren la superficie rocosa de la que se originan y se conocen como *suelos residuales*. Cuando las rocas duras como el granito sufren intemperismo, la mayor parte de los materiales tienden a permanecer en el mismo sitio; constituyéndose entonces en suelos residuales.

Estos suelos residuales, forman una capa superior de material arcilloso o de arcilla limosa; debajo de la cual, se encuentran capas de suelo limoso y/o arenoso. Debajo se halla una capa de roca parcialmente intemperizada y luego una de roca sana. La profundidad de la roca sana (ver Figura 2.6), puede variar mucho (Braja, 2001).

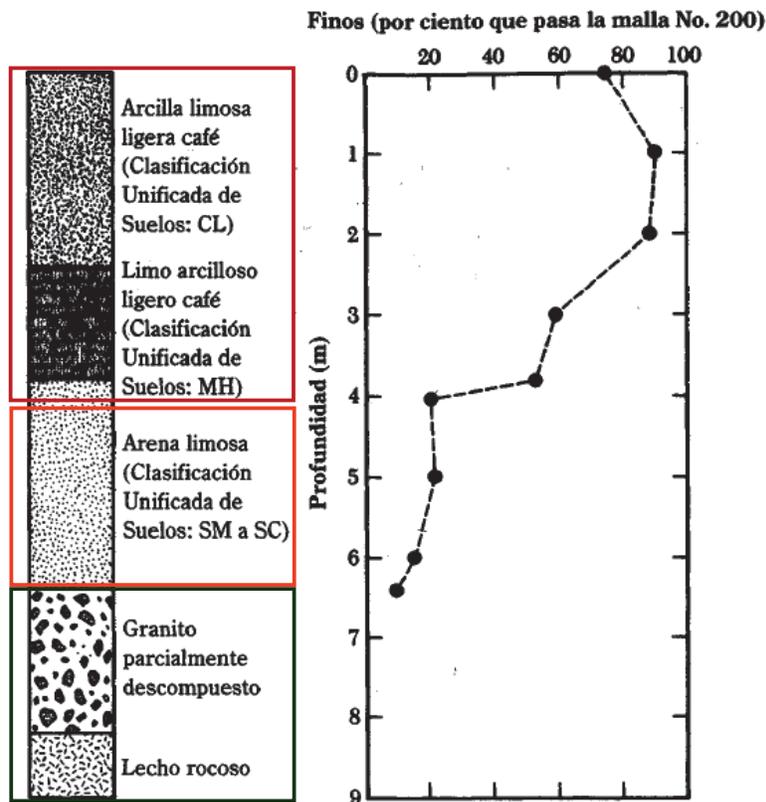


Figura 2.6: Registro de suelo residual derivado de rocas. El estrato próximo a la superficie, resaltado con el recuadro rojo, está conformado por suelos finos y, el subyacente, resaltado con el recuadro naranja, conformado por suelos granulares; hasta alcanzar el lecho rocoso, resaltado con el recuadro verde; sin embargo, la conformación de estos estratos evidencian conformación mixta; cohesión, a partir de las arcillas y, resistencia a partir de las arenas y gravas, otorgándole la naturaleza a los suelos, óptimas características geotécnicas. Adaptado de Braja, 2001.

Por la utilización en los emplazamiento de las Llaqtas Incas en estudio, amerita mencionar el concepto de *suelo orgánico*; el mismo que generalmente se encuentra en regiones de poca altura, donde el nivel freático está cerca o por arriba de la superficie del terreno. La presencia de un alto nivel freático ayuda al crecimiento de plantas acuáticas, que al descomponerse, forman suelo orgánico que se encuentra predominantemente en regiones costeras (Ramírez y Alejano, 2004). Por su alto contenido de agua natural, son altamente compresibles; y, pruebas de laboratorio muestran que, bajo cargas, un gran porcentaje del asentamiento en ellos se deriva de la consolidación secundaria.

Los suelos, a partir de *sistemas de clasificación de suelos*, están divididos según Graja (2001), en “grupos y subgrupos, en base a propiedades índice comunes tales como: la *distribución granulométrica, el límite líquido y el límite plástico*” (p. 17). En la actualidad, dos son los sistemas principales de clasificación de suelos: (1) el sistema *AASHTO (American Association of State High-way and Transportation Officials)* y (2) el *Unified Soil Classification System (ASTM)*. El sistema de clasificación AASHTO se usa principalmente para clasificación de las capas de carreteras, no en la construcción de cimentaciones (Braja, 2001); en la presente investigación, utilizaremos el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

El sistema unificado de clasificación de suelos, SUCS (Braja, 2001), fue originalmente propuesto por A. Casagrande en 1942 y, después revisado y adoptado por Bureau of Reclamation de Estados Unidos y por el Cuerpo de Ingenieros. Este sistema se usa en prácticamente todo trabajo de geotecnia. En el Sistema Unificado, los siguientes símbolos se usan como identificación: *Grava (G), Arena (S), Limo (M), Arcilla (C), Limos orgánico y arcilla (O), Turba y suelos altamente orgánicos (PT), Alta plasticidad (H), Baja Plasticidad (L), Bien graduadas (W) y Mal graduadas (P)*; en consecuencia, serán también los que utilizemos en el desarrollo de la presente investigación.

En la Figura 2.7., mostramos los característicos Suelos granulares, finos y orgánicos.

Divisiones principales		Simbolo del grupo	Nombre clásico	Metodo de identificación en campo excluyendo partículas mayores de 75 mm				
1	2	3	4	5				
Suelos de grano grueso Más de la mitad del material es mayor que el t. n°200 El tamaño del tamiz n°200 es aproximadamente la menor particula visible a simple vista	GRAVAS Más de la mitad de los gruesos es > 50mm Para clasificación visual el tamiz n°4 equivale a 5 mm	Gravas limpias (poco ó ningún fino)	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena, poco ó ningún fino	Amplio margen de variación del grano y cantidades importantes de todos los tamaños intermedios de los granos			
		Gravas limpias (poco ó ningún fino)	GP	Gravas pobremente graduadas, mezclas de grava y arena, poco ó ningún fino	Predomina un tamaño ó una serie de tamaños faltando algunos tamaños intermedios			
		Gravas con finos (apreciable cantidad)	GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo	Finos no plásticos ó con baja plasticidad (para procedimiento de identificación ver grupo ML)			
		Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla	GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla	Finos plásticos (para procedimiento de identificación ver grupo CL)			
	ARENAS Más de la mitad de los gruesos es < 5 mm Para clasificación visual el tamiz n°4 equivale a 5 mm	Arenas limpias (poco ó ningún fino)	SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava, poco ó ningún fino	Amplio margen de variación del grano y cantidades importantes de todos los tamaños intermedios de los granos			
		Arenas limpias (poco ó ningún fino)	SP	Arenas pobremente graduadas, arenas con grava, poco ó ningún fino	Predomina un tamaño ó una serie de tamaños faltando algunos tamaños intermedios			
		Arenas con finos (apreciable cantidad)	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo	Finos no plásticos ó con baja plasticidad (para procedimiento de identificación ver grupo ML)			
		Arenas arcillosas, mezcla de arena y arcilla	SC	Arenas arcillosas, mezcla de arena y arcilla	Finos plásticos (para procedimiento de identificación ver grupo CL)			
Suelos de grano fino Más de la mitad del material es menor que el t. n°200 El tamaño del tamiz n°200 es aproximadamente la menor particula visible a simple vista	Limos y arcillas. Límite líquido menor que 50			Método de identificación en la fracción menor de tamiz n°40 (0.4 mm)				
				Resistencia a la rotura	Dilatancia	Plasticidad		
				ML	Limos inorgánicos de baja compresibilidad	Ninguna a ligera	Rápida a lenta	Ninguna
				CL	Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad arcillas con gravas, arcillas arenosas, arcillas limosas	Media a alta	Ninguna a muy lenta	Media
				OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja compresibilidad	Ligera a media	Lenta	Ligera
				MH	Limos inorgánicos de alta compresibilidad	Ligera a media	Lenta a ninguna	Ligera a media
	Limos y arcillas. Límite líquido mayor que 50	CH	Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad	Alta a muy alta	Ninguna	Alta		
OH		Arcillas y limos orgánicos de media a alta compresibilidad	Media a alta	Ninguna a muy lenta	Ligera a media			
Suelos altamente orgánicos		Pt	Turba y otros suelos altamente orgánicos	Fácilmente identificable por el color, olor, tacto esponjoso y a menudo textura fibrosa				

Figura 2.7: Clasificación de Suelos SUCS. Las gravas bien graduadas (GW) se distinguen de las mal graduadas (GP), en su conformación por diversos tamaños, que posibilitan un mejor acomodo e integración de los elementos, evitando los vacíos. Los suelos granulares y los finos, se distinguen por el grado de permeabilidad y plasticidad, respectivamente. Adaptado de Bowles, 1981.

La propiedad índice de suelos, es cualquier propiedad del suelo utilizada en la clasificación del suelo. Las propiedades índices deben poseer los siguientes atributos: (a) la propiedad debe ser simple de expresarse, preferentemente debe tener valor numérico; (b) debe ser posible de medirse rápidamente; (c) la medición de la propiedad debe ser de bajo costo; (d) la propiedad debe ser significativa; y, (e) la medición debe ser reproducible (Ramírez y Alejano, 2004).

Los suelos se dividen en *suelos granulares* y *suelos finos*. Los Suelos Granulares; son aquellos cuyos granos no están juntos firmemente. De este modo, el suelo se desintegra en

granos individuales al sumergirse en el agua. Las *arenas* y las *gravas* son suelos granulares típicos. Los *limos*, que contienen partículas no menores que 0.002 mm., pueden también ser considerados como granulares en algunos sistemas de clasificación. La *propiedad índice* más representativa de los suelos granulares está relacionada al tamaño de los granos. Para suelos con partículas más gruesas que 0.005 mm., el análisis granulométrico se realiza por tamizado (Braja, 2001). Los suelos de grano grueso como las gravas y arenas, son más permeables y menos compresibles que los suelos de grano fino; en la Figura 2.8 mostramos suelos granulares.



Figura 2.8: Suelos granulares: Gravass, Arenas y Limos. Muestras de gravas bien graduadas, (GW), por la variedad de tamaños que las conforman y que posibilitan un buen acomodo e integración en el momento de su utilización como material de cimiento. Fotografías facilitadas por el Laboratorio de Suelos, Geotest Perú, 2016.

Los suelos de grano grueso *bien graduados* tienden a ser menos permeables, menos compresibles y más resistentes que los suelos *pobrementemente graduados*. La granulometría del suelo por lo tanto tiene cierta significancia. Para tener una idea sobre la distribución de los tamaños de partículas, se define el término de *coeficiente de uniformidad*, C_u ; si el coeficiente de uniformidad es grande, es probable que el suelo sea bien graduado, que significa que el suelo es relativamente incompresible y resistente. En el *Sistema Unificado de Clasificación*, una *arena* debe tener un coeficiente de uniformidad mayor que 6 para ser bien graduada, mientras que para una *grava* el C_u debe ser mayor de 4 (Braja, 2001).

El suelo podría consistir de una mezcla de partículas gruesas y finas con pocas partículas intermedias, es decir podría tener una granulometría con vacíos. Para evitar una granulometría con vacíos se define el *coeficiente de curvatura*, C_c , el mismo que debe estar entre 1 y 3 para

evitar la granulometría con vacíos. Por lo tanto, para que un suelo sea definido como bien graduado debe tener un coeficiente de uniformidad lo suficientemente alto y un coeficiente de curvatura entre 1 y 3. La *densidad relativa* y los parámetros granulométricos son propiedades índice muy útiles para clasificar en el laboratorio las arenas y las gravas (Braja, 2001).

Los *suelos finos* (ver Figura 2.9), están constituidos por partículas que tienden a ser muy finas. Los *suelos cohesivos*, son suelos finos típicos; en los suelos finos se utiliza el *contenido de humedad* en vez de densidad y se establecen límites en el contenido de humedad. Los límites en los contenidos de humedad de suelos cohesivos son los *límites de Atteberg*, que son contenidos de humedad definidos para varias consistencias del suelo. El *límite líquido* es una buena propiedad índice, cuando se usa con el *índice de plasticidad* ($IP=LL-LP$) que es una medida de la arcillosidad del suelo. El parámetro de suelos cohesivos equivalente a la densidad relativa de suelos granulares, es el *índice de liquidez*, IL (Braja, 2001).

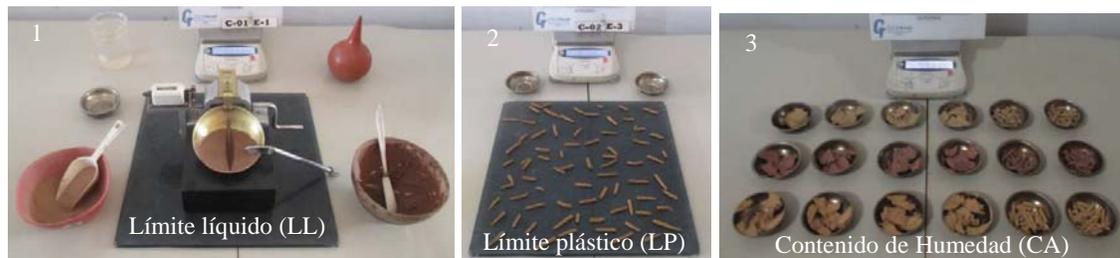


Figura 2.9: Ensayos en Laboratorio de Suelos finos. (1) Ensayos de Límite Líquido, (LL); (2) Ensayos de Límite Plástico (LP); (3) Ensayo de Contenido de Humedad. Los suelos característicos de los finos son las arcillas que presentan diferentes grados de plasticidad y contenido de agua. Fotografías facilitadas por el Laboratorio de Suelos, Geotest Perú, 2016.

Puede ocurrir la presencia de *suelos expansivos*, que son suelos cohesivos (o suelos finos), con bajo grado de saturación que aumentan de volumen al humedecerse o saturarse. Amerita también referirnos sobre *suelos colapsables*, que son suelos que cambian violentamente de volumen por la acción combinada o individual de las siguientes acciones: (a) al ser sometidos a un incremento de carga o (b) al humedecerse o saturarse. Por lo tanto, de acuerdo a la normatividad vigente, no está permitido cimentar directamente sobre suelos colapsables; en

caso extremo, tendría que recurrirse a rellenos artificiales o a la utilización de cimentaciones profundas a partir de pilotes por ejemplo.

La *licuación de suelos*; es un fenómeno que se produce en suelos granulares finos ubicados bajo la napa freática y algunos suelos cohesivos; las solicitaciones sísmicas pueden originar este fenómeno, que consiste en la pérdida momentánea de la resistencia al corte del suelo, como consecuencia de la presión de poros que se genera en el agua contenida en sus vacíos originada por la vibración que produce el sismo; generándose asentamientos en las obras sobreyacentes. Causas: (a) cuando el suelo está constituido por arena fina, arena limosa, arena arcillosa, limo arenoso no plástico o grava empacada en una matriz constituida por alguno de los materiales anteriores. (b) cuando el suelo descrito está sumergido (Kuroiwa, 2002).

La *Erosión superficial*, es otro fenómeno que se produce en los suelos, generado por la escorrentía de las aguas pluviales, en la superficie del suelo y, origina problemas cuando las pendientes son empinadas y no tienen vegetación, ya que erosiona superficialmente el material presente, sea fino o ligeramente grueso, tal como se aprecia en la Figura 2.10. Es una dificultad que se presenta sobre todo en temporada de lluvias y, cuando los suelos no están tratados con materiales impermeables; así, el agua lava principalmente los suelos finos que en su trayecto obstruyen canales, pero sobre todo se empobrece el suelo y da lugar a infiltraciones no controladas que comprometen las estructuras en el sub suelo.

La erosión superficial, podría ser considerada como una de las más peligrosas y silenciosas causas que afectan la conservación de las Llaqtas Incas investigadas; pues, además de degradar irreversiblemente los pisos superficiales originales, a partir de las escorrentías que se producen en época de lluvias, generan la infiltración descontrolada del agua hacia el subsuelo; pues, al ser lavado el material impermeabilizante (arcillas transformadas en limos), el agua pasa con facilidad hacia los cimientos, constituidos en sus primeras capas por suelos finos y compactados, desequilibrando el sistema suelo – cimiento – supertestructura Inca.

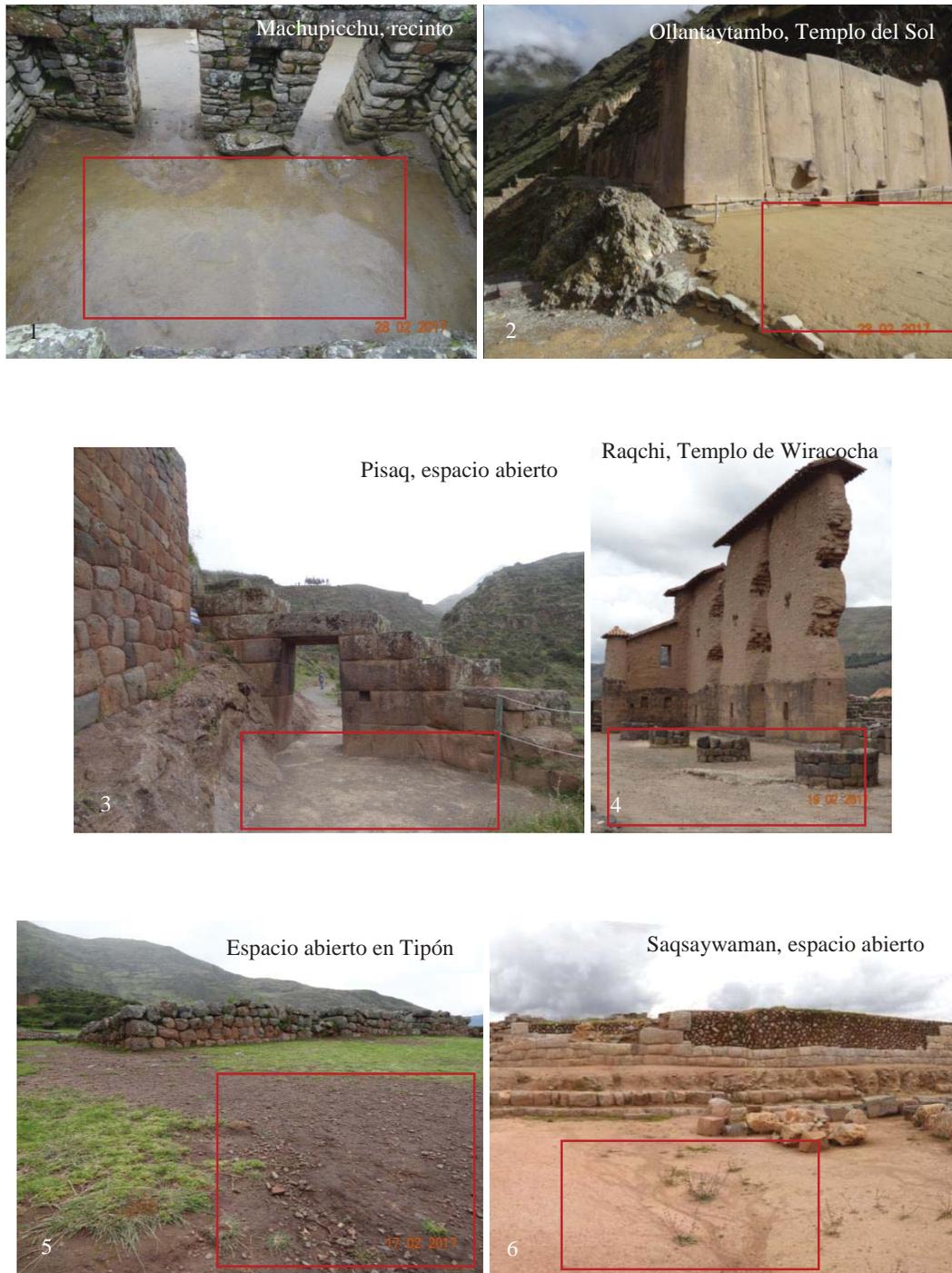


Figura 2.10: Erosión superficial de Suelos en Llaqtas Incas; debido a escorrentías de aguas pluviales. Lo resaltado con el recuadro rojo, evidencia (1) erosión superficial en un recinto de la Llaqta de Machupicchu; (2) erosión superficial en el Templo del Sol de la Llaqta de Ollantaytambo; (3) erosión superficial en la Llaqta de Pisaq, presentado en un espacio abierto del Sector Qantus Raqay; (4) En la Llaqta de Raqchi, los pisos del Templo de Wiracocha, erosionados; (5), erosión superficial en la Llaqta de Tipón, presentado en senderos peatonales, del Sector Sinkuna Kancha, y (6) erosión superficial en la Llaqta de Saqsaywaman, en un espacio abierto del Sector Muyoc Marka. Fotografías, archivo personal, 2017.

Habiendo abordado los aspectos más relevantes de Rocas y Suelos, en la Tabla 2.3., mostramos las principales características que los diferencia.

Tabla 2.3.

Caracterización general de Rocas y Suelos

Parámetro	Roca	Suelo
Definición	Medio discontinuo formado por un número finito de grandes elementos.	Medio continuo formado por multitud de pequeños elementos discontinuos.
Procesos de rotura	Implica mecanismos de fracturación como generación y crecimiento de grietas en un mundo pseudo-continuo.	La rotura no afecta a la integridad mecánica de cada uno de los granos individuales.
Condiciones de operación	Se suelen encontrar sometidos a campos de tensiones muy fuertes.	Se suelen encontrar sometidos a campos de tensiones débiles.
Módulo de Elasticidad	Mayor	Menor
Resistencia	Mayor	Menor
Flujo de agua	Se produce siguiendo fisuras o canales determinados, lo que suele originar niveles bajos de permeabilidad.	El flujo se produce a través de los poros que deja el entramado de partículas sólidas.

Nota: Rocas y suelos presentan características favorables para su empleo en cimentaciones; así, las rocas otorgan resistencia y elevado grado de permeabilidad; y, los suelos, cuya integridad mecánica no es afectada por procesos de rotura, presentan condiciones de operación de relativa facilidad. Adaptado de Ramírez y Alejano, 2004.

2.2.8 Cimentación, conexión del Kay Pacha con el Uku Pacha

Entendemos la *cimentación* como parte de la superestructura cuyas cargas son transmitidas al subsuelo. Existen varios tipos de cimentación, entre ellas las cimentaciones profundas y las cimentaciones superficiales; por el tipo de superestructuras en investigación, nos avocamos a las *cimentaciones superficiales*; según Braja (2001), “Las *zapatas aisladas*, las zapatas para muros, y las cimentaciones a base de *losas corridas*, son todas cimentaciones superficiales. (...) *la profundidad de empotramiento puede ser igual o menor a tres o cuatro veces el ancho de la cimentación*” (p. 2). Los característicos parámetros geotécnicos de los macizos rocosos,

que se traducen en máxima dureza y óptima resistencia, pueden asegurarnos desde ya, la innecesaria utilización de cimientos profundos.

Éstas *se usan* cuando las capas superiores del *subsuelo presentan buena capacidad de apoyo* o carga y no comprometen daño estructural y/o problemas de estabilidad.

2.2.9 Cimentaciones sobre Rellenos

Los rellenos son *depósitos artificiales* que se diferencian por su naturaleza y por las condiciones bajo las que son colocados. Por su naturaleza pueden ser: (a) materiales seleccionados, todo tipo de suelo compactable, con partículas no mayores de 7,5 cm. (3"), con 30% o menos de material retenido en la malla $\frac{3}{4}$ " y sin elementos distintos de los suelos naturales; (b) por las condiciones bajo las que son colocados, pueden ser controlados o no controlados; los *rellenos controlados o de ingeniería*, son aquellos que *se construyen con material seleccionado*, tendrán las mismas condiciones de apoyo que las cimentaciones superficiales (Norma E-0.50, Suelos y Cimentaciones, 2006).

Los métodos empleados en su conformación, compactación y control, dependen principalmente de las propiedades físicas del material. El material seleccionado con el que se debe construir el *relleno controlado* debe ser compactado en función del porcentaje de suelo fino presente, siendo exigible a una densidad mayor o igual del 90% de la máxima densidad seca del método de *ensayo Proctor Modificado*, NTP 339.141, (ASTM D 1557), en todo su espesor. En todos los casos debe realizarse controles de compactación en todas las capas compactadas, a razón necesariamente, de un control por cada 250 m² con un mínimo de tres controles por capa. En cualquier caso, el espesor máximo a controlar será de 0,30 m de espesor.

Cuando se requiera verificar la compactación de un relleno controlado ya construido, este trabajo debe realizarse mediante cualquiera de los siguientes métodos: (a) un ensayo de *Penetración Estándar*, NTP 339.133 (ASTM D 1586) por cada metro de espesor de relleno Controlado. (b) un *ensayo con Cono de Arena*, NTP 339.143, (ASTM D1556) o por medio de

métodos nucleares, NTP 339.144, (ASTM D2922), por cada 0.50 m. de espesor (Norma E-0.50, Suelos y Cimentaciones, 2006).

2.2.10 Capacidad de Carga

“Terzaghi (1943) fue el primero en presentar una teoría completa para evaluar la capacidad de carga última de cimentaciones superficiales” (Braja, 2001, p. 156). Sin embargo, “Las ecuaciones de capacidad de carga de Terzaghi se modificaron para tomar en cuenta los efectos de la forma de la cimentación (...), profundidad de empotramiento (...), e inclinación de la carga” (Braja, 2001, p. 159). De acuerdo a Braja (2001), “A menudo se usa (...) factor de seguridad para la capacidad de carga de cimentaciones superficiales. Se trata del factor de seguridad con respecto a la falla por corte (...) de 1.4 a 1.6 es deseable junto con un factor *mínimo* de seguridad de 3 o 4 por capacidad de carga última neta o bruta” (p. 165).

Las ecuaciones de Terzaghi (1943), no se aplican para cimentaciones rectangulares, tampoco “toman en cuenta la resistencia cortante a lo largo de la superficie de falla en el suelo arriba del fondo de la cimentación...” (Braja, 2001, p. 166); menos aún, cargas que pueden estar inclinadas sobre la cimentación; por todo ello, para efectos de las memorias de cálculo para nuestra investigación, consideramos a Meyerhof, por “tomar en cuenta todos los factores (...) sugirió la (...) forma de ecuación general de capacidad de apoyo” (Braja, 2001, p. 166). Según Braja (2001), “Desde que Meyerhof propuso su correlación original, los investigadores han observado que sus resultados son algo conservadores” (p. 259).

En este contexto, el artículo 15° de la Norma Técnica Peruana E-0.50, define la *Capacidad de Carga*, como “(...) la presión última o de falla por corte del suelo y se determina utilizando las fórmulas aceptadas por la mecánica de suelos” (2006). En *suelos finos* o cohesivos (arcilla, arcilla limosa y limo-arcillosa), se emplea un ángulo de fricción interna (f) igual a cero. En *suelos granulares* o friccionantes (gravas, arenas y gravas-arenosas), se emplea una cohesión (c) igual a cero. La *capacidad admisible de soporte* es sólo una fracción de la *capacidad última*

de soporte, y se calcula aplicando a esta última un factor de seguridad apropiado. Los valores de factor de seguridad característicos se encuentran en el intervalo de 3 a 5.

La *presión admisible*, es la máxima presión que la cimentación puede transmitir al terreno sin que ocurran asentamientos excesivos (mayores que el admisible) ni el factor de seguridad frente a una falla por corte. Los factores que determinan la presión admisible del suelo son: (a) la *profundidad de cimentación*, (b) la *dimensión de los elementos* de la cimentación, (c) las *características físico – mecánicas de los suelos* ubicados dentro de la zona activa de la cimentación, (d) la ubicación del nivel freático, considerando sus variaciones y la probable modificación de las características físico – mecánicas de los suelos, como consecuencia de los cambios en el contenido de humedad y, (e) el *asentamiento* tolerable de la estructura.

2.2.11 Asentamiento de una Cimentación

Los *asentamientos* son desplazamientos verticales del suelo (Braja, 2001). Se originan por la sobrecarga o peso de las superestructuras y los bloques de caos de macizos rocosos, que al saturarse con agua pierden su capacidad de carga, causando movimientos y reajustes de bloques; pues, las aguas pluviales penetran por las fracturas, fisuras o espacios abiertos, o por las raíces de plantas, erosionando internamente o por *sufusión*, parte del suelo de fundación o soporte de superestructuras, que al erosionarse pierden masa y se mueven o se asientan buscando un nuevo equilibrio, y en ese proceso, puede generarse el colapso de casi toda la superestructura.

En la figura 2.11, mostramos un ejemplo de asentamiento diferencial, sucedido en la Llaqta Inca de Machupicchu, probablemente en el momento de su construcción (Carlotto, Cárdenas y Fidel, 2009); pues, por el tipo de suelo de fundación (conformado por fragmentos de granodiorita sobre roca del mismo tipo), se identificaría como inmediato, provocado por la deformación elástica de suelo seco; resultando poco admisible un asentamiento por consolidación, que se presenta en suelos cohesivos saturados, por cambios de volumen.



Figura 2.11: Asentamiento diferencial en la Llaqta Inca de Machupicchu. Los recuadros rojos evidencian (1) asentamiento diferencial en la pared norte del Templo Principal; (2) separación de juntas en las paredes norte y sur debido a asentamientos en el Templo de las Tres Ventanas; que probablemente se produjeron en el momento de su construcción (Carlotto, Cárdenas y Fidel, 2009). Fotografías, archivo personal, 2017.

Existen también, asentamientos por consolidación que, “se da a lo largo del tiempo, y ocurre en suelos arcillosos saturados cuando son sometidos a una carga creciente causada por la construcción de una cimentación” (Braja, 2001, p. 251); sin embargo, es poco probable que este tipo de asentamiento, se presente en cimentaciones cuyo suelo de fundación está constituido por macizos rocosos. Respecto a los asentamientos tolerables, Braja (2001), refiere que “si el asentamiento máximo no es más de 1 pulgada (25.4 mm) para cualquier cimentación, el asentamiento diferencial no será mayor de 0.75 pulgada (19 mm). Éstos son probablemente los límites admisibles para la mayoría de los diseños de cimentaciones para edificios” (p. 261).

Analizar los asentamientos es importante en todo proceso de diseño y construcción de cimentaciones; pues, a decir de Braja (2001), “Grandes asentamientos de varias componentes de una estructura pueden conducir a un daño considerable y/o a interferir con un funcionamiento apropiado de la estructura” (p. 267). Un efecto de asentamiento es la *Sufusión* o erosión interna, que genera hundimiento del suelo por presencia de flujos de agua, que lavan y erosionan el material fino que sirve como matriz entre los bloques de roca, que al perderse

masa generan colapso (Braja, 2001); se presenta en interfaces de: diferente granulometría, material mal gradado, en el contacto entre dos estratos o, entre el suelo y la superestructura.

Por el proceso de sufusión, los bloques se reacomodan y se mueven, afectando a las superestructuras levantadas sobre estos. Este fenómeno se presenta también en plataformas de caminos, en los muros y en la base de las superestructuras; ocasionando a su vez, asentamientos y hundimientos. Un ejemplo de este proceso lo advertimos en la figura 2.12, en los recintos del borde oriental de la Llaqta de Machupicchu, donde varios muros han colapsado por el desarrollo de un proceso de sufusión (Carlotto, Cárdenas y Fidel, 2009).



Figura 2.12: Proceso de Sufusión, en la Llaqta Inca de Machupicchu; Sector oriental. Un conjunto de recintos con mayor problema de conservación, por procesos de sufusión, que antes de colapsar presentaron agrietamientos, rastros de humedad por empozamiento de aguas pluviales, pérdida de inclinación original, crecida de vegetación, entre otros, previos a su colapso. Adaptado de Carlotto, Cárdenas y Fidel, 2009. Fotografías, archivo personal, 2017.

Contextualizando el concepto de sufusión al objeto de la investigación, son causas, la erosión de las cabeceras de los muros por el agua de lluvia, que debilita la argamasa, haciéndolas permeables, por donde filtra el agua hacia el subsuelo; y, por otra parte, la

concentración de aguas pluviales en el suelo (por la inoperatividad de sistemas de drenaje), que originan sufusión con posteriores asentamientos diferenciales y el colapso de las superestructuras. Este proceso, constituye una amenaza en la estabilidad de las superestructuras Incas, y se evidencia, en la separación de juntas de los bloques pétreos que los componen (Carlotto, et. al., 2009), coadyuvado por la presencia de vegetación que se enraiza en ellas.

2.2.12 Exploración del Suelo (Pachamama)

“La exploración del subsuelo comprende varias etapas, entre ellas la recolección de información preliminar, el reconocimiento y la investigación del sitio” (Braja, 2001, p. 90). Respecto a la información preliminar, Braja (2001), refiere que esta etapa “incluye la obtención de información respecto al tipo de estructura (...) y su uso por general (...) deben conocerse las cargas aproximadas (...) una idea general de la topografía y del tipo de suelo (...) cerca y alrededor del sitio” (p. 90).

Respecto al reconocimiento, “debe siempre hacer una inspección visual del sitio para obtener información sobre: 1. La topografía general del sitio (...) 2. Estratificación del suelo en cortes profundos (...) 3. Tipo de vegetación en el sitio, que indique la naturaleza del suelo. 4. Huellas de niveles altos de agua (...) 5. Niveles del agua freática (...) 6. Tipos de construcciones vecinas (...) y existencia de problemas” (Braja, 2001, p. 91).

La investigación del sitio, a decir de Braja (2001) “consiste en la planeación, efectuar sondeos de prueba y recolectar muestras del suelo a los intervalos deseados para subsecuentes observaciones y pruebas de laboratorio” (p. 91). “Dos tipos de muestras se obtienen durante una exploración del subsuelo: *alteradas e inalteradas*. Las muestras alteradas pero representativas son generalmente usadas para los siguientes tipos de pruebas de laboratorio: 1. Análisis granulométrico 2. Determinación de los límites líquido y plástico 3. Peso específico de sólidos del suelo 4. Determinación del contenido orgánico 5. Clasificación del suelo” (Braja, 2001, p. 98). Detallamos en la Tabla 2.4., los ensayos que se realizan In Situ.

Tabla 2.4.

Ensayos de investigación In Situ

Ensayo	Norma Técnica Peruana (NTP)	Finalidad
Clasificación unificada de suelos (SUCS)	339.134	Clasificar los suelos en función a sus características físicas y mecánicas.
Descripción visual de suelos	339.150	Describir características físicas del suelo.
Sondeo con Penetrómetro Dinámico Ligero PDL	339.039	Obtener a través de correlaciones propiedades de resistencia mecánica y propiedades índice del suelo.
Ensayos de carga puntual Esclerómetro	339.181	Determinar la dureza o resistencia a compresión de la superficie de la roca.

Nota: Los sondeos con Penetrómetro Dinámico Ligero (PDL), “Aunque aproximada, con una correcta interpretación (...) proporciona una buena evaluación de las propiedades de los suelos” (Braja, 2001, 105). Los ensayos con Penetrómetro y Esclerómetro, no son invasivos ni destructivos cuyas imágenes se muestran en la Figura 2.13. Adaptado de la Norma E-050 de Suelos y Cimentaciones (2006).



Figura 2.13: Ensayos In Situ, con el equipo Penetrómetro Dinámico Ligero, (PDL). (1) Sin presencia de Nivel Freático; (2) con presencia de Nivel Freático. Fotografías, facilitadas por GEOTEST PERÚ, 2017.

La muestra alterada en bolsa plástica, Mab, está establecida en la Norma Técnica Peruana, NTP, 339.151, referidas a las Prácticas Normalizadas para la Preservación y Transporte de Muestras de Suelos, en función de las exigencias que deberán atenderse en cada caso, respecto

del terreno que representan. Es probable la existencia de estratos típicos, que son suelos con características tales que pueden ser representativos de otros iguales. La verificación de la presencia de *nivel freático* es relevante por la incidencia de éste en la estabilidad de los suelos de fundación y las cimentaciones; pues, la presencia de agua freática cerca de una cimentación afecta considerablemente la *capacidad de carga* y *asentamiento* (Braja, 2001).

El *método de ensayo normalizado para la auscultación con Penetrómetro dinámico ligero de punta cónica, (DPL)*, es un ensayo que requiere investigación adicional de suelos para su interpretación y no sustituyen al Ensayo de Penetración Estándar. No se recomienda ejecutar estos ensayos en el fondo de calicatas, debido a la pérdida de confinamiento (Norma E-0.50, 2006). Para determinar las condiciones de cimentación sobre la base de auscultaciones dinámicas, debe conocerse previamente la estratigrafía del terreno obtenida mediante la ejecución de calicatas, trincheras o perforaciones. Para la presente investigación, se recurre a la información de excavaciones arqueológicas de la Dirección Regional de Cultura Cusco.

Ensayos de carga puntual o esclerométrico (martillo de Schmidt), según la *Norma Técnica Peruana, NTP, 339.181 (ASTM c805)*; consiste en un vástago que lleva conectado un muelle. Se coloca el vástago sobre la roca y se introduce en el martillo empujando este contra la roca, lo que da lugar a que se almacene energía en un muelle que se libera automáticamente cuando esa energía elástica alcanza un cierto nivel y lanza una masa contra el vástago. La altura que alcanza esta marca al rebotar, que se mide en una escala graduada de 0 a 60 es directamente proporcional a la dureza y por tanto a la resistencia a compresión simple de la superficie de roca (Ramírez y Alejano, 2004).

Correlación entre ensayos y propiedades de los suelos; en base a los parámetros obtenidos en los ensayos In Situ y, mediante correlaciones debidamente comprobadas y estandarizadas, se obtienen valores de resistencia al corte, ángulo de fricción interna, relación entre asentamientos y carga, módulo de elasticidad, entre otros (Braja, 2001).

2.2.13 Ensayos de Laboratorio

Se seleccionan muestras típicas para ejecutar con ellas ensayos de Clasificación, de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS; muestras, que son porciones representativas de los suelos de fundación investigados y, que conservan alguna o la totalidad de las propiedades de los macizos rocosos; y, los resultados de esta clasificación se comparan con la descripción visual – manual, obtenida In Situ, a partir del perfil estratigráfico, procediéndose a compatibilizar las diferencias existentes a fin de obtener el perfil estratigráfico definitivo, que se incluye en el estudio; para efectos de la presente investigación, se trabajó con el Laboratorio de Suelos y Concreto GEOTEST PERÚ S.A.C. Veamos la Tabla 2.5.

Tabla 2.5

Ensayos de Laboratorio

Ensayo	Norma Técnica Peruana NTP	Finalidad
Contenido de humedad	339.127	Determinar la variación de la humedad en el suelo de fundación y, para ver si existe nivel freático.
Análisis granulométrico	339.128	Obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra de suelo.
Límite líquido y plástico	339.129	Determinar la consistencia líquida y plástica del suelo.
Clasificación unificada de suelos	339.134	Clasificar los suelos en función a sus características físicas y mecánicas.
Descripción visual de suelos	339.150	Describir características del suelo.
Ensayos de corazones diamantinos	339.039	Determinar la resistencia a compresión de una probeta cilíndrica de roca

Nota: Los Límites Líquido y Plástico, son denominados: Límites de Atteberg (Braja, 2001). Los ensayos referidos, permiten conocer las Características Físicas y Mecánicas de los suelos, permiten determinar si se trata de suelos: finos (Arcillas), granulares (Gravas, Arenas y Limos) o mixtos. En la Figura 2.14, mostramos la preparación de muestras de corazones diamantinos de los macizos rocosos, para los Ensayos de resistencia de: Compresión Simple no Confinada.



Figura 2.14: Ensayos de Compresión Simple no Confinada; (1) Muestras de corazones diamantinos de los macizos rocosos; (2) Ensayo de Compresión Simple No Confinada. “Con las muestras procedentes de la prospección geotécnica se realizan los ensayos de laboratorio... según la finalidad del Estudio, pueden ser de los tipos...: a) Ensayos de Clasificación; b) Ensayos de Resistencia...” (Rodríguez et.al., 1989, p.24). Fotografías, archivo personal, 2017.

2.2.14 Investigación Geotécnica

La investigación, prueba los conocimientos geotécnicos que se manejó en el periodo Inca; implicando ello: (a) La determinación de las características principales de las Condiciones Locales de Emplazamiento, entre ellas las geológicas, climáticas, sísmicas; (b) la determinación de las Características Físicas y Mecánicas de los suelos de fundación, a partir de su clasificación de suelos, SUCS; (c) la determinación de la Capacidad de Carga y Asentamientos; (d) los Rellenos Controlados Inca, cimientos de las superestructuras Incas; y, (e) las conclusiones y recomendaciones, que certifican el cumplimiento de las hipótesis, y, la importancia del conocimiento geotécnico en la conservación de las Llaqtas Incas.

Se investigará, cómo se proyectó la cimentación de las Llaqtas Incas, cómo se consiguió seguridad suficiente y unas deformaciones compatibles con las tolerancias de las estructuras. Lo tendremos que averiguar, “Con base en los ensayos de laboratorio, pruebas In Situ, información bibliográfica y la experiencia en el tema,...los parámetros geotécnicos a utilizar para cada capa del terreno en los cálculos de cimentación...”. Nos centraremos en: “Capacidad portante o calidad como cimiento; problemas de deformabilidad y asiento; condiciones de drenaje y niveles freáticos; morfología y relieve – pendientes; estabilidad de laderas; suelos y rocas aprovechables como materiales” (Rodríguez, et.al., 1989, p. 36).

Verificaremos el cumplimiento de las condiciones exigibles, para un correcto diseño de cimentaciones, que implica: “Transmitir al terreno las cargas del edificio con deformaciones (Asiento) tolerables, garantizando una seguridad suficiente frente a la rotura o hundimiento; poseer suficiente resistencia como elemento estructural; no resultar afectada por la eventual agresividad del terreno; estar suficientemente protegida frente a las modificaciones del entorno (helada, cambios de volumen, variaciones del nivel freático, efectos dinámicos, excavaciones próximas, etc)” (Rodríguez, et.al., 1989, p. 41). Todo esto, una vez conocida la naturaleza y propiedades del suelo de fundación, de modo que se elija la solución de cimentación adecuada.

2.3 Antecedentes empíricos de la investigación (estado del arte)

Estando la investigación centrada en los conocimientos geotécnicos, es decir, las condiciones locales y las características físicas y mecánicas de los suelos de fundación de las Llaqtas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, en el periodo Inca; muy poco indagadas hasta la actualidad, se aborda ordenada y de forma crítica, todas aquellas referencias arqueológicas, históricas y bibliográficas que se encuentran y se refieren a los suelos de fundación de éstas; información que en su momento se contrasta con la investigación In Situ y los resultados de Ensayos en Laboratorio y Gabinete, echando mano a la literatura especializada actual.

Así, en el *Informe Anual de Investigación Arqueológica Ciudad Inca Machupicchu 2000*, se asevera que en el tratamiento de los pisos, se utilizó la misma técnica y el mismo material de la zona (granodiorita); constituido por una capa conformada por arena limosa colocada sobre un relleno de piedras (Solís, 2000); esto evidencia, el manejo de estándares constructivos generalizados y, el conocimiento del comportamiento de materiales en cuanto a resistencia y manejabilidad; pues, el utilizar gravas como base de piso, asegura ausencia de hundimientos por su resistencia y, las arenas y limos, materiales de amplia manejabilidad en labores de compactación.

Se identifica también problemas estructurales en las superestructuras de la Llaqta, causadas por las precipitaciones pluviales, como pandeamientos y desintegración de los núcleos de las estructuras; así mismo, intemperismo y meteorización de los elementos pétreos, ocasionados por fenómenos físico-químicos, que provocan fisuramiento de muros y hundimiento de pisos (Solís, 2000). Entonces desde hace 17 años, se conoce el efecto devastador del agua que en época Inca fue bien gestionado y hoy, pone en riesgo silencioso la Llaqta Inca, quizá debiera investigarse el sistema hidráulico integral que posibilite operativizar los canales de desfogue y evacuación de aguas pluviales.

El año 2003, el *Informe de Investigación Arqueológica Sector I Agrícola, II y V en la Ciudad Inka de Machupicchu*, determina que la ocupación cultural de Machupicchu corresponde a la época Inca, durante su mayor apogeo, encabezado por el Inca Pachacutec; evidenciándose también, el culto al agua, donde el Templo del Cóndor, cumplía función ceremonial (Mormontoy, 2003). Ello confirma que el agua no era un agente de riesgo. Se identifica también la zona de trabajo de cantería, indicándose, estar éste próximo a la cantera de donde se extraían los litos; esto confirma la utilización de material de la misma zona (Solís, 2000) para la construcción de la Llaqta Inca (Granodiorita).

Se señala también, que las plataformas emplazadas en el área urbana de la Llaqta, fueron preparadas para el cultivo de diversos productos y que presentaban como capa superficial un estrato conformado por tierra humosa en un espesor promedio entre 0.35 m. a 0.50 m.; esa misma configuración presentan los andenes del sector I Agrícola (Mormontoy, 2003). Esto implicaría, el manejo de un mismo patrón en la conformación de plataformas agrícolas, conformadas por estratos, estando constituido el primero por suelo orgánico, seguido de arcilla limo arenosa, que precedería a las capas de gravas bien graduadas de tamaño pequeño, mediano hasta bolones de gran tamaño que se asientan sobre los lechos rocosos .

El año 2009, se emite el *Informe Anual del Proyecto de Investigación Arqueológica Ciudad Inka de Machupicchu: Sectores II, V, Sector Waynapicchu y Andenes Orientales Grupos 04 y 05*; en él se determina, que la estructura semicircular denominada “Torreón” y “Templo del Sol” están asentados sobre un afloramiento rocoso; y, en ambos casos, se acondicionó la roca natural con rellenos de piedra para asentar las estructuras. Así mismo, se identificó altos grados de compactación, sellado de pisos, composición de estratos constitutivos de base de pisos, entre ellos, suelo limonitizado, cuarzo, ceniza mezclada con carbón, entre otros (Chambi, 2009); demostrándose la importancia del tratamiento de pisos, para evitar filtración de aguas.

Las conclusiones del Informe, describen objetivamente características de los cimientos Inca.

Advertimos entonces, que el nivel de piso terminado sobre todo en recintos ceremoniales o de importancia, recibió un tratamiento especial, consistente en la quema o cocción, con la finalidad de lograr máxima impermeabilización y evitar filtración de aguas pluviales. Se hallan muros transversales que cumplieron función de refuerzo estructural para los cimientos, que en varios sectores fueron acoplados directamente a la roca natural, ello para evitar posteriores problemas estructurales (Chambi, 2009). El estado de conservación de los cimientos en los sectores investigados, mostraron desplazamientos de algunos elementos líticos causados por factores de meteorización y fisuración (Cano, del Carpio y Astete, 2009).

La investigación desarrollada por Chambi (2009) en los andenes orientales de la Llaqta Inca de Machupicchu, evidencia que las piezas líticas para los cimientos se trabajaron In Situ y de abajo hacia arriba, tallándolas de acuerdo a la función que cumplirían en cuanto a tamaño y forma para constituir la estructura muraria o el transmuro; y, los restos de la talla restante, era utilizada como material de relleno también para asentar los cimientos, del andén inferior. La configuración de tratamiento de plataformas era la misma, con similar composición de estratos desde el cimiento, diferenciándose sólo en el espesor de cada estrato; cumpliendo éstas tanto función agrícola como estructural (Chambi, 2009).

Se verifica que estas andenerías en un 70% presentan problemas de estabilidad como desplazamientos, pandeos, colapsos y soterradas muchas de ellas por material coluvial y rocas de gran tamaño desprendidas de la parte superior; advirtiéndose la alarmante presencia de humedad, que no sólo facilita la propagación de especies vegetales en los paramentos y núcleos de los andenes, sino convierten los morteros en material degradado (Chambi, 2009). Estas anomalías no sólo afectan las superestructuras de la Llaqta Inca, sino sobre todo los cimientos que los sustentan desde el subsuelo, donde el agua y la humedad podrían desestabilizarlos y generar su colapso.

Los Incas, superaron estos efectos, con un prolijo sistema de drenaje y evacuación de aguas.

El *Proyecto Cápac*, emprendido por el Instituto Nacional de Cultura a partir del año 2000, aporta información relevante para el caso de la Llaqta Inca de Ollantaytambo; así, el *Informe de Excavación Arqueológica, Sector: Pirámide de Ollantaytambo*, asevera que en las plataformas agrícolas se empleó una tecnología hidráulica avanzada, con altos conocimientos en el manejo de riego que puede demostrarse en los canales bien concebidos y planificados; manejo de pendientes y transporte del líquido desde los puntos de captación hasta los sectores requeridos (Sullivan y Valencia, 2000). Puede considerarse el conocimiento hidráulico Inca como factor fundamental en la conservación de la Llaqta.

Sullivan y Valencia (2000) distinguen la conformación y dimensiones de los muros de cimentación de las plataformas agrícolas entre el periodo Pre Inca, Killke y el Inca; anotando que el ancho de los muros de cimentación era 1.00 m. y, 0.80 m. respectivamente; así mismo, los rellenos sobre el suelo de fundación para la cimentación, en el caso Inca estaba conformado por estratos de gravas, arenas, limos, arcillas de gradiente descendente desde la base hasta la superficie, mientras que en el periodo anterior, la conformación era al revés, cumpliendo en ambos casos la función de soporte de cargas. Esto demuestra la transformación de técnicas ancestrales pre Incas, durante el periodo Inca, buscando mejores resultados.

Otro *Informe de Excavación Arqueológica en Ollantaytambo – Proyecto Cápac*, preparado para el Instituto Nacional de Cultura Cusco; investigó el sub suelo de plataformas agrícolas conformantes de la Pirámide de Ollantaytambo, en una extensión aproximada de 100 hectáreas; utilizando tecnologías como el Radar de Penetración Subterránea (GPR) y los exámenes de Resistividad Eléctrica (ERT); al realizar los ensayos y pruebas programadas In Situ, los resultados fueron decepcionantes y conducentes a la pérdida de confianza en estos equipos, por los reportes inexactos; determinándose volver a las excavaciones tradicionales y, a la experiencia del arqueólogo responsable (Valencia, 2001).

La elección de ensayos no invasivos pero de lectura acertada son preferibles en estos casos.

El motivo de los hierros, a decir de los especialistas en estos sistemas, era que las probabilidades de obtener resultados útiles mediante la técnica del GPR son bajas cuando se está buscando estructuras de arcilla, piedra o madera sepultados por material rocoso, porque la roca causa muchas reflexiones de la onda de radar, lo cual hace que la señal recibida presente mucho ruido; y, cuando están sepultados bajo arcilla húmeda, su alta conductividad eléctrica atenúa significativamente la energía de la onda de radar (Valencia, 2001). Considerando que las Llaqtas Incas y sus vestigios se desarrollan en macizos rocosos y suelos finos como arcillas, tanto el GPR y ERT, tendrían dificultad en estos medios.

La Llaqta Inca de **Pisac**, fue investigada por el Instituto Nacional de Cultura Cusco, realizándose el año 1998 excavaciones en el Sector Andenes Qosqa; con el objetivo de determinar el suelo de fundación de los muros de los andenes; concluyéndose que todos los muros estaban asentados en suelos de fundación muy compactos, identificándose uno de nueve en roca madre; se determina también, que estos muros tenían una inclinación promedio entre 5 y 9 grados, que contaban todos con un transmuro, constituido por piedras de mediano tamaño aglutinadas con mortero de arcilla, sobre una capa de grava de distinto tamaño (Rosa, 1998). Aquí se evidencia suelo granular como base de cimiento de muros.

El año 2010, el Instituto Nacional de Cultura Cusco investiga el Sector Ajchapata de la Llaqta de **Pisac**; identificándose las causas que generan el colapsamiento de las estructuras murarias de los andenes; entre ellas anotan, el abandono de acciones de mantenimiento de los canales de evacuación de aguas pluviales que permite el libre discurrir de éstas afectando las estructuras; factores medio ambientales que generan intemperismo, enraizamiento de especies vegetales en las estructuras murarias y, en las cabeceras de muro (Álvarez, 2010). Este reporte técnico, evidencia el peligroso y silencioso deterioro de estas superestructuras provocados por la inoperatividad de los sistemas de evacuación Inca.

Investigaciones sobre los sistemas de drenaje Inca, resultan urgentes frente a este escenario.

Las excavaciones realizadas evidencian también una distinción entre andenes para el uso agrícola y andenes de estabilización de taludes o soporte, diferenciándose ambos en su extensión, pues el primero tiene un ancho de hasta cinco metros y el segundo, es mucho más angosto; además, muestran la existencia de acueductos subterráneos y canales abiertos de riego, contruidos con líticos tallados en forma vertical y zarunas de conexión entre plataformas. El tratamiento de las plataformas desde el suelo de fundación es muy ordenada, constante y repetitiva, presentan una estructura trabajada que garantizaba su funcionalidad para el uso agrícola y su estabilidad (Álvarez, 2010).

Reporta también, que el primer estrato de las plataformas agrícolas de Ajchapata está conformado por tierra humosa, el segundo estrato constituida por tierra fina y granulada con cascajo de uso agrícola, el tercer estrato por cascajo arenoso, que cumplía la función de capa filtrante de las aguas pluviales intensas; y, el cuarto estrato conformado por grava producto de los desechos de talla, que también servía de apoyo de filtración al tercer estrato hacia el sub suelo. Los muros presentan una ligera inclinación hacia el talud natural, transmuros conformados por piedras de diferente tamaño unidas con mortero de barro, asociados al relleno de grava, cuyo ancho tenía 0.45 m., y la andesita como material.

El Instituto Nacional de Cultura Cusco, el año 2008, emite el Informe Parque Arqueológico Nacional de **Pisac** – Sector Qhosqa, de la Llaqta de Pisac; en él, se asevera la existencia de distintos grados de conocimiento en la técnica de construcción de andenes, basándose en deficiencias halladas en su construcción, como la omisión de trabas entre piezas líticas y la composición de morteros y el volumen de aplicación en los núcleos de los muros (Estrada, 2008). Esta afirmación es rebatible, pues no hay duda en la existencia más bien de especialistas con sello propio, lo que no podría haber sucedido es el empleo de técnicas de construcción personales.

Un sello característico en la obra Inca, es la estandarización de procesos constructivos.

En los 15 muros de andén investigados, las dimensiones son casi estandarizadas: altura promedio entre 1.50 m. y 3.10 m.; ancho basal, de 1.30 m. y coronan con un ancho de 0.55 m.; la inclinación de los muros varía desde 7% hasta 22%. Respecto a la construcción de cimentaciones, se establece que algunas fueron trabajadas a nivel superficial y otras a una profundidad de 0.70 m.; así mismo, se refiere que el suelo de fundación de las cimentaciones es variado por sectores; en algunos, se encuentra directamente sobre el suelo muy compacto o roca madre, en otros, apoyados en rellenos ligeramente sueltos; todos presentan transmuro asociado al relleno de filtración (Estrada, 2008).

La Llaqta Inca de **Raqchi**, es otro de los monumentos de nuestra investigación; por esta razón, recurrimos a los contenidos del Informe de Investigación Arqueológica 2007, de la Dirección Regional de Cultura Cusco, titulado Parque Arqueológico de Raqchi San Pedro Sector Urapampa Sub Sector Urinsaya, en él se determina que el material empleado en la construcción de este complejo es la toba volcánica y el basalto, cuya cantera rocosa se ubica en la misma zona de emplazamiento de todo el monumento, entre ellos, los andenes; éstos, presentan, muros de contención, que están apoyados sobre la roca madre a través del cimientado constituido por grava de diferente tamaño (Laurel, 2007).

Las terrazas están conformadas por tierra de cultivo, asentadas sobre gravas que cumplen función de drenaje; respecto al suelo de fundación, menciona que se emplazan sobre material madre o roca. La vegetación arbustiva del entorno inmediato a las terrazas, tienen el objetivo de mejorar el microclima del lugar, además el sistema de andenes actúa como cortina de viento para evitar la erosión eólica. Presentan tras muros unidos al muro exterior por un núcleo compuesto de rocas medianas y pequeñas con mortero de arcilla lechada; el ancho de la base de los muros es 1.20 m., 1.00 en el medio y coronan con 0.50 m., drenes internos para la evacuación de aguas (Laurel. 2007).

Es recurrente en las Llaqtas Incas, este sistema constructivo con ligeras particularidades.

Tipón, es investigado y reportado en el *Informe Anual Proyecto de Investigación Arqueológica P.A. Tipón*, emitido el año 2006, donde se señala que, por las evidencias culturales halladas en las excavaciones, es de ocupación Inca; así mismo, las plataformas agrícolas estaban delimitadas por muros pétreos que en algunos sectores cumplían función estructural a manera de muros de contención; en las plataformas agrícolas se evidenció la existencia de un sistema hidráulico soterrado (Castillo, 2006). Esta información recurrente en todos los monumentos arqueológicos en estudio, sustentan la praxis de patrones constructivos estándar Incas.

Se evidencia también que, el colapso de algunas estructuras murarias no se debe a problemas en la cimentación respecto a su escasa profundidad, sino al intemperismo, a la filtración e infiltración de aguas pluviales que entre otros favorecen la presencia de vegetación que degrada los morteros que sellan sobre todo las cabeceras de muros; así mismo, refieren que los cimientos se encuentran en regular estado de conservación, y están conformados por grava de diferente tamaño precedidos por una capa de arcilla con presencia de cascajo bien compactado, en la mayoría de los casos se encuentran muy disturbados por las diferentes intervenciones y los huaqueos sufridos (Castillo, 2006).

La Llaqta Inca de **Saqsaywaman**, es otro monumento en investigación, por ello, recurrimos a los contenidos del *Informe Final Proyecto de Investigación Arqueológica Sector Baluartes – Saqsaywaman 2010*, emprendido por la Dirección Regional de Cultura Cusco; donde se determina que Saqsaywaman – Baluartes, corresponde a la fase cronológica del periodo Inca Expansivo o Imperial, bajo el gobierno del Inca Pachacutec; así mismo, refiere que los Killke serían los antecesores de la ocupación Inca, por la evidencia de cerámica encontrada (Zegarra, 2010). Esto evidencia con recurrencia a los Killke como los antecesores más cercanos a la ocupación Inca.

Es innegable el importante aporte de las culturas predecesoras antiguas, en la obra Inca.

Se establece una estrecha relación de los baluartes con el sector de Muyuqmarka, ubicado en la parte superior, espacio considerado como sacro por las evidencias de cerámica y arquitectura ceremonial, destinado al culto de la deidad suprema andina; consecuentemente, los baluartes cumplían una función administrativa y de control restringido a un área sagrada; además, constituían el soporte estructural para la estabilización de la parte superior, que genera empujes naturales y compresión. Toda esta estructura está asentada sobre roca calcárea, a un nivel profundo, seguido por un relleno de material diverso (Zegarra, 2010).

Reporta además, dos efectos relevantes causados por la infiltración de aguas pluviales, composición de cimientos, sistema hidráulico inoperativo y, la impermeabilización de áreas con intervención restaurativa sin considerar un plan de manejo de aguas pluviales; estas son: La apertura de juntas y el pandeo de sus paramentos; sin embargo, consideraría que la causa más relevante es la presencia descontrolada del agua, recordemos que en varios informes se evidenció que el sistema hidráulico Inca era infalible.

Respecto al suelo de fundación que soporta las estructuras pétreas, Zegarra (2010) afirma que está a diferentes profundidades; sin embargo, se tiene un promedio de 0.45 m. por debajo de un relleno conformado por grava y arcilla compactada, estrato que está afectado por la infiltración de aguas pluviales y escorrentías y, una humedad excesiva constante que degrada las bases de los cimientos. Recurrentemente se evidencia, el descontrolado discurrir de las aguas pluviales como la causa del deterioro irreversible y peligroso de las estructuras Incas en el subsuelo; pues, si fallan los cimientos, falla toda la estructura; por ello, se hace indispensable investigar sobre la geotecnia Inca.

El año 2009, el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Sector Energía y Minas y, la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, emitieron el *Informe Estudio Geológico y Geodinámico de los Baluartes en el Sitio de Saqsaywaman – Cusco*; identificándose tres fenómenos geodinámicos: Erosión superficial, empuje lateral por saturación de aguas y,

asentamientos producidos por la libre circulación de aguas pluviales (Cárdenas, Carlotto, Cano, Flores y Oviedo, 2009). Se indica que a partir de la erosión superficial es que se conducen las aguas pluviales o de escorrentía y se infiltran en el suelo, saturándolo y provocando la inestabilidad de las piezas líticas.

Pues, al entrar en contacto con los muros provocan expansión lateral de suelos y asentamientos que inestabilizan y destruyen los muros Incas de los baluartes, sobre todo en los muros del tercer nivel de baluartes y en menor proporción en los del segundo y primer nivel; quizá, en consideración a que éstos últimos tienen mayor volumen. Frente a esta situación, recomiendan como urgente la construcción de una canaleta o dren impermeable sobre la plataforma de acceso que se encuentra por encima del tercer nivel de los baluartes, que captaría las aguas que bajan desde las plataformas superiores (Cárdenas et al.). Si no se operativizan estas recomendaciones, los baluartes estarían expuestos a su colapso.

Según Protzen (2005), los Incas tenían como regla general *erigir sus edificios sobre cimientos sólidos*; esto es, *en terrenos con lechos rocosos*, donde se tallaba una base horizontal en la piedra para proveer de un adecuado asiento para la hilada de base del muro. Estas sólidas prácticas de construcción requirieron –a decir de Protzen (2005)-, que el terreno cercano a los cimientos se encontrase apropiadamente drenado. El drenaje limitaba la expansión y contracción del terreno bajo los cimientos debido a los cambios estacionales de lluvia y temperatura. Los Incas conocían que los cimientos no sólo transmitían el peso de la estructura al suelo, sino distribuían dicho peso incluso más allá de sus límites.

José A. Beltrán Caballero (2013), en su Tesis doctoral titulada *Agua y forma urbana en la América precolombina: el caso del Cusco como centro del poder Inca*, afirma que en el periodo Inca *habría sido necesario transformar la morfología de la roca con un aporte masivo de tierras antes de asentar los cimientos de los edificios*; esto con la finalidad de acumular tierra en el fondo de las grietas y en la formación de los suelos que recubrieron las partes menos

inclinadas de la roca; transformando así la topografía con la construcción de terrazas y muros destinados a estabilizar las pendientes de los cerros y regularizando las superficies horizontales de sus cumbres.

Carrillo (2008), en su investigación titulada Geotecnia Histórica: Estudios de Cimentación en Muros Pre – Hispánicos, refiere que los Incas fueron creando con el tiempo muros, viviendas y centros religiosos, perfectamente adecuados al clima y modo de vida de los pueblos que los construyeron en las cumbres andinas. *Las cimentaciones estaban constituidas por zanjas que contenían tierra compactada con piedras de regular tamaño.* El ancho y profundidad de las zanjas no es más grande que el espesor del muro en su parte baja *por hallarse cimentadas bajo afloramientos rocosos.* Esta referencia evidencia tres características concurrentes respecto a los cimientos Incas: Suelos resistentes, cimentaciones superficiales y, compactación de suelos.

Para Carrillo (1988), puede verificarse en las construcciones Incas *muros con una clara función estructural*, los mismos que estarían contruidos sobre potentes cimentaciones y servirían para dibujar las líneas principales de los distintos cuerpos de edificación que formaban el edificio; así mismo, la mayor parte de las cimentaciones superficiales siguen las sinuosidades del terreno. Las partes inferiores de los muros fueron contruidos con un ancho mayor que el siguiente nivel en forma trapezoidal, de este modo se transmitía menores esfuerzos al suelo de apoyo. A decir de Kenneth Wright (2001), los Incas planearon sus ciudades cuidadosamente y aprendieron por experiencia cómo contruir las para que perduren en el tiempo.

Wright (2001), afirma que en Machupicchu, está la certeza que *los Incas contruyeron sus terrazas con un sistema de drenaje en mente*; la evidencia de esta aseveración, lo constituye el material de relleno de las terrazas: Una capa de piedras al fondo, seguida de arena gruesa, material arenoso y mantillo. Así mismo, en las excavaciones de su investigación, advirtió que las plazas fueron contruidas con el mismo sistema de sus terrazas, con un profundo subsistema de rocas fracturadas; evidenciándose el conocimiento tecnológico Inca para estabilizar

pendientes además de planificar una compleja estructura de drenajes; en suma, planificaron con cuidado las edificaciones principalmente las cimentaciones.

Las Excavaciones de Wright (2001) en Machupicchu, descubrieron que era típico de los Incas en la construcción de los muros, *preparar el terreno con pequeñas rocas y encima colocaban rocas cada vez más grandes como cimentación y sobre esta base los muros*; así mismo –refiere-, refiere que los ingenieros Incas dedicaron el 50% o quizá hasta el 60% de todo su mayor esfuerzo en el subsuelo –haciendo los cimientos y preparando el sitio- para asegurarse que Machupicchu por ejemplo, dure para siempre. Kenneth Wright logró excavar en la Plaza principal de Machupicchu, llegando hasta una profundidad de investigación aproximada de 2.70 metros; ello, para conocer sobre qué tipo de suelo se habrían cimentado las estructuras Incas.

Kenneth Wright (2001), Pudo comprobar In Situ y de primera mano, que la estratigrafía del suelo de fundación “trabajado” estaba conformada en un primer estrato por rica tierra vegetal, hasta una profundidad aproximada de 0.90 m., un segundo estrato conformado por arena en una profundidad similar y, el estrato último estaba conformado por grava. Por debajo de toda esta estructura de suelo, pudo verificar la existencia de un sistema de drenaje subterráneo, conformado por grava (roca fracturada de diferente tamaño), que sería material residual de todas las rocas trabajadas para las diferentes estructuras durante largos años de construcción que habrían durado éstas.

Estas evidencias halladas en las numerosas investigaciones arqueológicas desarrolladas, aseveran que los seis monumentos arqueológicos pre hispánicos en estudio, corresponden al periodo Inca y, que fueron las residencias temporales o vacacionales de la elite Inca; sin embargo, a decir de Makowski (2016) “las casas del inca no se diferenciaban en forma, pero sí en dimensiones y acabado, de construcciones en las que se manifestaba el poder de otros señores del imperio” (p. 106). “Su complejidad y la calidad de la mampostería guardaba

relación directa con la importancia del edificio que soportaba...El diseño de la traza urbana era condicionado por el resultado de estas obras de ingeniería” (Makowski, 2016, p. 113).

A decir de Hyslop (2016), “Durante el reinado de Pachakuti y los primeros años de la influencia de Thupa Yupanki..., existe una considerable estandarización en la forma y características secundarias de edificios importantes... Hay una simplicidad en los edificios y patios, y los edificios están contruidos con un solo tipo de mampostería” (p.65). “Aunque todavía no está bien demostrada, la ‘geografía sagrada’, (...) la presencia de afloramientos rocosos, agua, así como picos y pasos de montañas cercanas pudieron haber jugado un papel en la selección de la ubicación de algunos asentamientos” (Hyslop, 2016, p. 345). Podría entenderse esto como la relevancia de las condiciones locales previo a la construcción.

“Una vez seleccionada la ubicación de un asentamiento importante, la remodelación del paisaje...fue necesaria (...) cuando el terreno era irregular, como en muchos sitios en la zona del Cusco... La ingeniería del paisaje implicó la construcción de terrazas para crear la superficie sobre la que se construyeron edificios, plazas, y desarrollaron las actividades agrícolas” (Hyslop, 2016, p. 346). Los ingenieros Incas nivelaban previamente el terreno con tierra o rellenos, sosteniéndolos con muros de contención que estabilizaban las superficies planas logradas; invirtiendo para ello mucha energía; esta afición de remodelación del paisaje, superó a civilizaciones predecesoras andinas (Hyslop, 2016).

Los monumentos arqueológicos en estudio, forman parte de las llamadas fincas reales, “En general, las fincas reales se caracterizan por diseños con finas y amplias terrazas agrícolas, obras hidráulicas, importantes afloramientos rocosos tallados y sin tallar, así como numerosos edificios contruidos con diversos tipos de fina mampostería” (Hyslop, 2016, p. 358). Ningún otro asentamiento Inka presenta mayor inversión de tiempo en su construcción y la ingeniería del paisaje, marcándose así la diferencia con otros asentamientos estatales; así mismo, fue

importante para el imperio Inca asociar estas propiedades con lo sagrado y paisajístico, lo que implicó amalgamar la arquitectura del asentamiento y el medio ambiente (Hyslop, 2016).

Wright y Valencia (2006) afirman que:

La técnica incaica para la construcción de cimientos para los muros comenzó con la colocación cuidadosa de pequeñas rocas en la zanja para crear un lecho estable. Las rocas aumentaban de tamaño a medida que el cimiento iba alcanzando el nivel del terreno (p. 59).

En algunos casos... eligieron una roca 'viva' de granito o grandes rocas in situ, a las cuales les daban una forma apropiada para que sirvan de plataforma de cimentación (p. 60). El 60% de labor desarrollada por los Incas en la construcción de Machupicchu se encuentra en la preparación del terreno, el drenaje y las cimentaciones (Wright y Valencia, 2006).

“Los incas aprendieron lo relativo a infraestructura y construcción de larga duración de sus predecesores de Pikillaqta y Choquepukio, (...). Sobre tecnología de construcción, aprendieron mucho del Imperio de Tiawanaku (...); y también que no se debía construir en las planicies húmedas tomando, (...), en cuenta las experiencias del Reino de Moche (...). De todos estos antecesores, los incas aprendieron la necesidad de los cimientos sólidos, buen drenaje, buen suelo agrícola y confiable abastecimiento de agua. Como resultado de ello, sus construcciones resistieron los estragos que producen el tiempo, la lluvia y las raíces de los árboles del bosque tropical” (Wright y Valencia, 2006, p. 68).

En efecto, sería iluso concebir que los Incas lograron técnicas constructivas extraordinarias sin referente alguno; por el contrario, el conocimiento y la práctica que lograron, tuvo que ser producto de cientos y hasta miles de años de experiencias vividas, no sólo por sus antecesores, sino también, de experiencias propias; lo que sí es mérito indiscutible de los Incas, es la sistematización y optimización de todo el conocimiento previo, hasta el logro de la calidad total; calidad que se puede comprobar en cada una de las Llaqtas Incas, emplazadas en montañas rocosas de gran competencia geotécnica y mimetizadas al paisaje natural.



Figura 2.15: Monumento Arqueológico Pre Inka Choquepukio - Lucre (900-1300 DC); (1) Emplazamiento de los Choquepukio, constructores predecesores de los Ingenieros Incas, emplazados en el encuentro dos ríos: Huatanay y Vilcanota del Valle del Cusco; (2) conformación y confinamiento de cimientos; (3) Muestras de Arcilla (CL) y Grava arcillosa (GC), material fino combinado con el suelo granular por su condición ligante. Fotografías adaptadas de GEOTEST PERÚ SAC, 2014.

Según Guzmán (2013), la cultura Pre hispánica, consideraba su entorno natural como sagrado y medio protector; ello explicaría el emplazamiento de las Llaqtas Incas próximas a sus Apus Tutelares; así, en el caso de Machupicchu, toda su arquitectura está orientada al Apu Uña Huayna Picchu; Písac, cercana a su Apu Intihuatana; Tipón adyacente al Apu Cruzmoco; Raqchi en las faldas del volcán Kinsachata; y, Saqsaywaman en el seno mismo del Apu del mismo nombre. Entonces, podría afirmarse que los Incas al buscar ex profeso estar cerca de su deidad o en su seno, no sólo aseguraban el mejor de los emplazamientos, sino sobre todo buscaban perennizarse en el lugar, junto a su Pachamama, máxima protectora.

El quehacer Inca, estuvo impregnado de mucho simbolismo, como estrategia de éxito.

A decir de Gavazzi (2010), “Palacios campestres del Inca deificado que parecen ciudades o templos, construidos a manera de nido de cóndores en la cima de imponentes cerros, como Machupicchu” (p.15), vendría a constituir un ejemplo del aprovechamiento de las condiciones locales de un determinado lugar para el emplazamiento de las Llaqtas Incas; práctica seguramente, operada en extenso; pues, “Templos y zonas ceremoniales poderosamente fortificadas en la cima de los cerros de difícil acceso y en cierta distancia del área cultivable y fuentes de agua potable” se presentan recurrentemente cubriendo todo el territorio del departamento de Cusco.

De acuerdo a lo publicado en el *Boletín del Instituto Francés de Estudios Andinos (2006)*, tanto los Incas como sus predecesoras, conocieron la naturaleza altamente dinámica de los Andes; para reducir sus efectos, entre sus estrategias consideraron *evitar emplazarse en lugares peligrosos*; y, *desarrollar prácticas geotécnicas y constructivas de gran eficacia*, como: La sustitución de materiales, rellenos selectos, drenajes complejos y adaptación de taludes. La pulcra concepción de sus cimentaciones reducía la posibilidad de asentamientos diferenciales o las deformaciones laterales por efecto de compactación, disolución Kárstica y sofusión. Los suelos finos y presencia de agua en determinadas circunstancias constituyen suelos peligrosos.

Todas las investigaciones referidas, no hacen sino exhibir los conocimientos, prácticas y técnicas Inca, muy avanzadas para su época y, de plena vigencia para el Siglo XXI; prácticas constructivas, que tienen como mayor mérito, la conservación y protección de las Llaqtas Incas; habiéndonos dejado lecciones que, lamentablemente por no investigarlas a profundidad, no las ponemos en práctica, y en consecuencia, hemos roto el equilibrio que tanto costó lograr a los Incas con el medio ambiente. Esta investigación tiene el objetivo de probar cualitativa y cuantitativamente, los conocimientos geotécnicos que se manejaron en el Periodo Inca, conocimientos que son la partida de nacimiento de todo emprendimiento constructivo.

Sólo el conocimiento y manejo geotécnico, pudo garantizar la conservación de las Llaqtas.

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

a. Hipótesis general

La geotecnia, era conocida y manejada en el periodo Inca; a partir de los factores, Condiciones Locales de Emplazamiento; Características Físicas y Mecánicas; Capacidades de Carga de los Suelos y Rocas de fundación, de las superestructuras de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, del departamento de Cusco.

b. Hipótesis específicas

1. Los Incas conocían las Condiciones Locales de Emplazamiento de los Suelos y Rocas de fundación de las superestructuras de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman.
2. Los Incas conocían y manejaban las Características Físicas y Mecánicas de los suelos y rocas de fundación de las superestructuras de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman.
3. Los Incas conocían la Capacidad de Carga de los suelos de fundación de las superestructuras de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman.

3.2 Identificación de variables e indicadores

a. Variables independientes

Las variables independientes están constituidas por las condiciones locales de emplazamiento; características físicas y mecánicas y, la capacidad de carga de los suelos de fundación de las superestructuras de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman del departamento de Cusco. De las condiciones de estas variables dependerá el tipo de cimentación Inca.

b. Variables dependientes

La variable dependiente está constituida por el tipo de cimentación Inca, empleado en las superestructuras de: Muros de contención, Plataformas agrícolas, Recintos, Plazas y, Patios de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, del departamento de Cusco.

3.3 Operacionalización de variables

Tabla 3.1

Operacionalización de Variables Independientes

Variable	Dimensión	Indicador	Ítem	Posibilidad	Instrumento	Índice
Características Físicas (C.F.)	Rocas	Dureza	Presentarán óptimas características físicas y mecánicas los suelos elegidos?	Ígnea, Sedimentaria y Metamórfica	Observación In Situ, Ensayos de Compresión Simple No Confinada, Ensayos con Esclerómetro, Ensayos en Laboratorio	Peso unitario (Kg./cm ³), Densidad (Tn/m ³), ángulo de fricción (ϕ), resistencia (Kg./cm ²)
	Granulares	Fricción		Gravas, arenas y limos	Observación In Situ, Ensayos con Penetrómetro Dinámico Ligero, Ensayos en Laboratorio	Densidad (Tn/m ³), ángulo de fricción (ϕ)
	Finos	Cohesión		Arcillas	Observación In Situ, Ensayos en Laboratorio de Límite	Cohesión (c)

					Líquido (LL), Límite Plástico (LP), Contenido de Humedad (CA).	
Capacidad de Carga	Suelo clasificado (SUCS)	Parámetro geotécnico	Tendrán los suelos resistencia competente?	Alta Medio Bajo	Software: Dinamic, Load; Esclerómetro, Compresión Simple No Confinada, Laboratorio	Profundidad de cimentación, Q admisible (Kg./cm2), Asentamiento (cm.)
Condición local de ubicación	Riesgo sísmico, Nivel freático, cobertura vegetal, estabilidad de taludes	Estabilidad estructural	Qué condiciones de ubicación?	Estabilidad, inestabilidad	Observación In Situ, registro de antecedentes de ocurrencia de eventos específicos	Deslizamiento, derrumbe, avalancha, escorrentía, deformación, asientos diferenciales, socavamiento

Nota: C.F. = Características Físicas. Elaboración propia, 2017.

Tabla 3.2

Operacionalización de Variable Dependiente

Variable	Dimensión	Indicador	Ítem	Posibilidad	Instrumento	Índice
Cimiento	Superficial, profundo	Profundidad	Es óptima la profundidad de cimentación?	Muros, muros de contención, Plataformas agrícolas, Recintos Plazas y Pacios	Observación, Ensayos con Penetrómetro dinámico ligero extensible	Estabilidad

Nota: De las Condiciones Locales de Emplazamiento, las Características Físicas y Mecánicas del suelo y, la Capacidad de Carga, dependerá el Tipo de Cimiento Inca; el cual puede ser superficial o profundo. Elaboración propia, 2017.

IV. METODOLOGÍA

4.1 **Ámbito de estudio: Localización Política y Geográfica**

Las seis Llaqtas investigadas se encuentran localizadas en Perú, en el departamento de Cusco y, en las provincias de Urubamba en el caso de Machupicchu y Ollantaytambo; en la provincia de Calca, en el caso de Pisaq; en la provincia de Quispicanchis, en el caso de Tipón, en la provincia de Canchis, en el caso de Raqchi; y, en la provincia de Cusco, en el caso de Saqsaywaman, tal como se muestra en la figura 4.1.



Figura 4.1: Ubicación geográfica del ámbito de investigación.

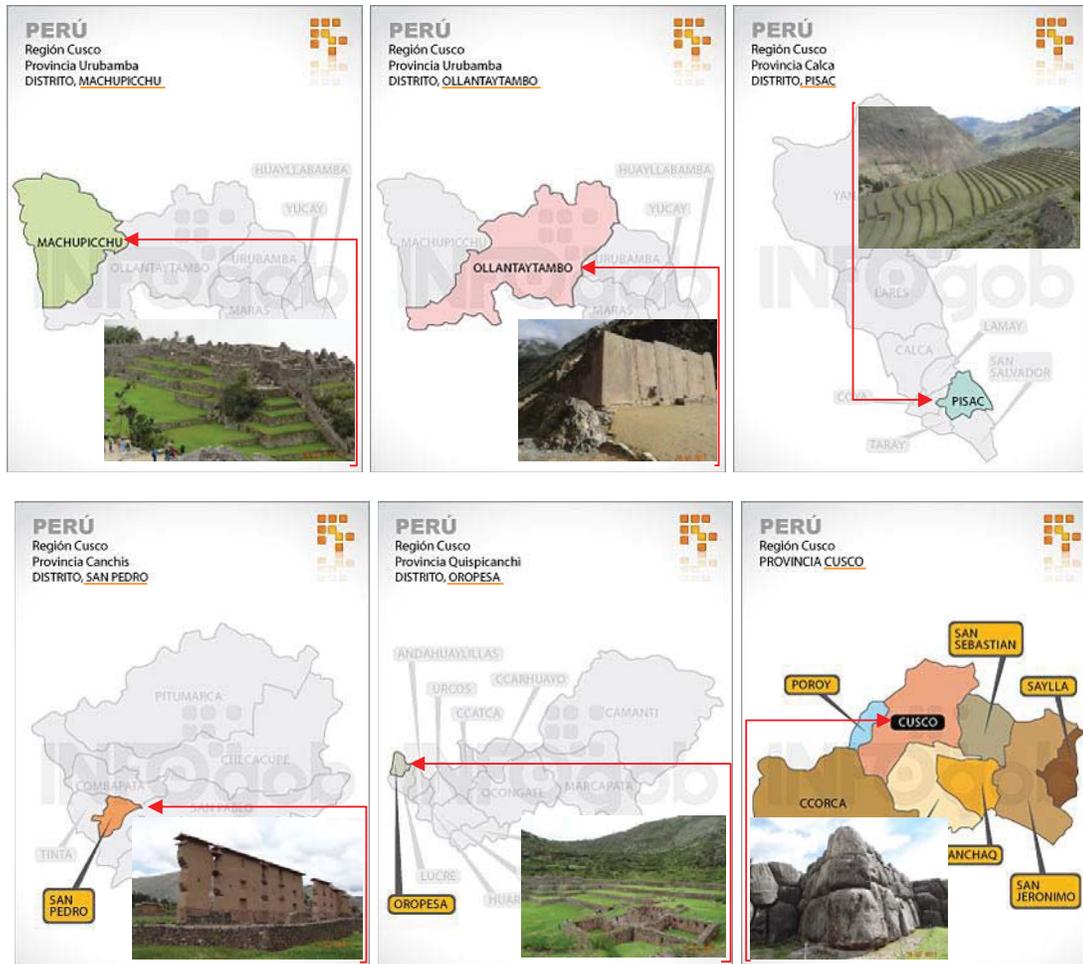


Figura 4.2: Localización geográfica de Llaqtas Incas investigadas. No puede ser coincidencia, que seis de las más emblemáticas Llaqtas Incas, como son Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, eligieran emplazarse en el departamento de Cusco; pudieron hacerlo en Arequipa, o en el norte, próximos al mar; sin embargo, decidieron localizarse en Cusco. Las razones las estudiaremos en el desarrollo de la presente investigación; pero, desde ya, podemos mencionar tres factores de relevancia: a) Las Condiciones Locales de Emplazamiento; que se refieren, a las características que el entorno del proyecto presentan como: Sismicidad, Clima, Geología, Nivel freático, entre otros, que determinan la factibilidad del emplazamiento de una Llaqta.

b) Las Características Físicas y Mecánicas del Suelo; es decir, qué competencias geotécnicas presentan los suelos de fundación, si son aptas o no para sustentar superestructuras; y, c) La Capacidad de Carga de los Suelos y los Asentamientos; esto está referido a la resistencia o no del suelo frente a las cargas verticales que se le impondrán, como el peso propio de superestructuras; acaso serán capaces de equilibrarse ó son susceptibles a Asentamientos, producto de desequilibrios entre la resistencia del suelo y la carga aplicada. Son estos factores que los Incas debieron analizar previamente, antes de emplazar las Llaqtas, y de hecho lo hicieron bien, las evidencias lo demuestran. Esto es conocimiento geotécnico, que define la localización de una Llaqta Inca.

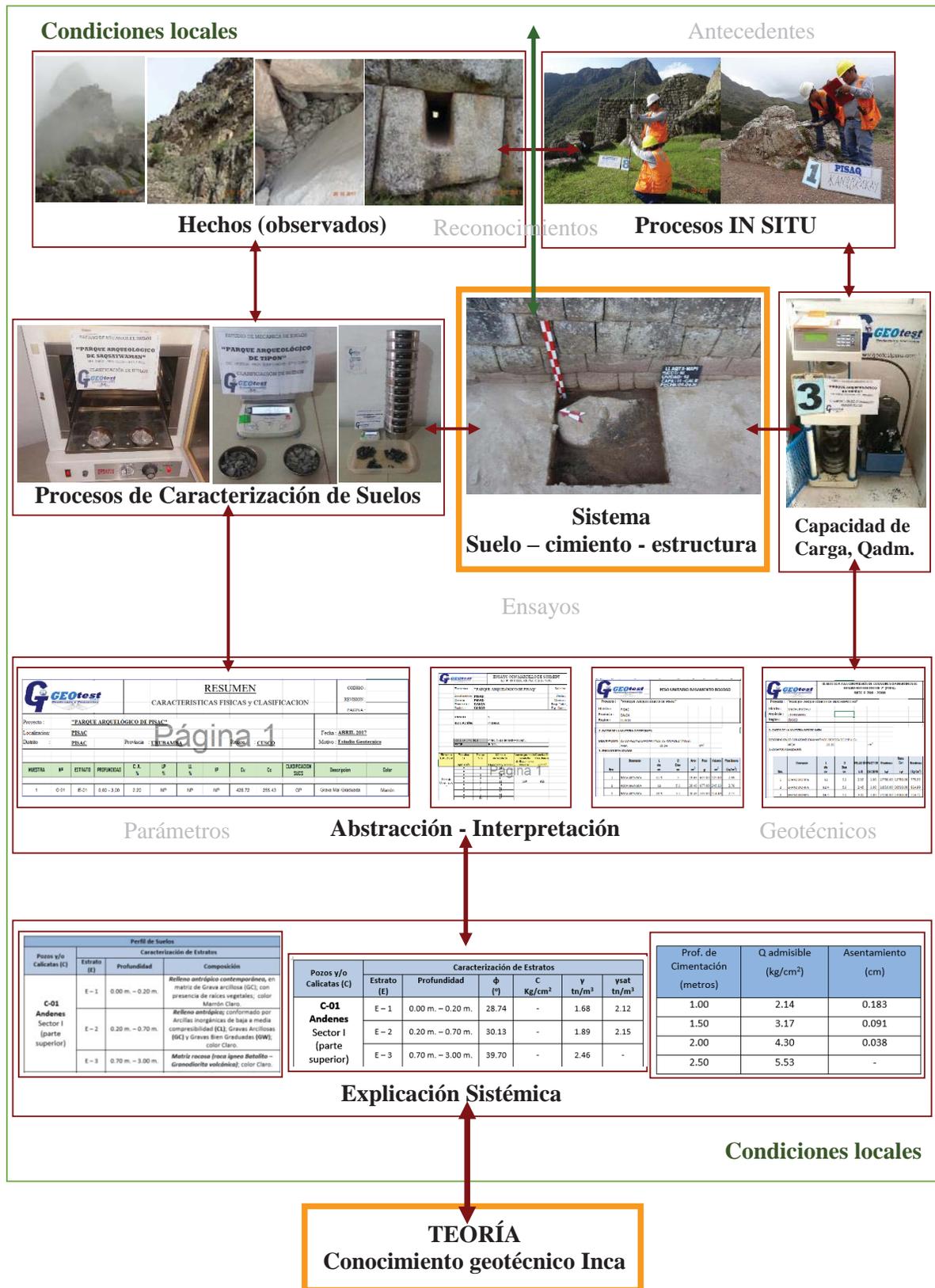
4.2 Tipo y nivel de investigación

El tipo de la investigación desarrollada es Experimental, pues se ensayaron In Situ y en Laboratorio los suelos de fundación; Evaluativa, porque se verifica la interrelación de las variables en estudio, es decir, cómo las características físicas y mecánicas de los suelos influyen en la capacidad portante y, a su vez, estas dos variables determinan el diseño de los cimientos.

Es también Comparativa; pues, se investiga seis casos distintos, cuyas particularidades se contrastan e interpretan para obtener parámetros estándar. Por otro lado, la investigación, se hace Cualitativa (inductiva), ya que recurrimos a la observación directa de los hechos y emitimos una apreciación personal, que es respaldada por literatura especializada; así mismo, califica como una investigación Cuantitativa (deductiva), porque se demuestra a través de parámetros geotécnicos estándar los resultados que posibilitan emitir una Teoría.

Respecto al diseño de la investigación, concebimos el conocimiento geotécnico Inca, como un sistema complejo abierto, por su estrecha relación con su entorno, con el cual interactúa; al igual que con los sub sistemas que lo componen, como son, las condiciones locales de emplazamiento, las características físicas y mecánicas y las capacidades de carga; sistema que se logra abstraerlo e interpretarlo a partir de hechos y procesos que posibilitaron una explicación sistémica y llegar a una teoría.

Para llegar a plantear una teoría, respecto a los conocimientos geotécnicos en el Periodo Inca, se desarrolla con profusión cada uno de los factores, identificados como trascendentes en geotecnia; factores que fundamentalmente se verifican In Situ, a partir de hechos tangibles, que pueden ser certificados en Laboratorio, a partir de Ensayos normalizados que presentan parámetros geotécnicos que, al ser analizados y contrastados, determinan la autenticidad de los factores investigados; en este caso: Las Condiciones Locales de Emplazamiento de las Llaqtas, las Características Físicas y Mecánicas de los suelos y rocas de fundación; y, las Capacidades de Carga y Asentamiento. En la Figura 4.3, mostramos lo referido.



RESUMEN
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y CLASIFICACION

Proyecto: "PARQUE ARQUEOLÓGICO DE PISAQ" / "PARQUE ARQUEOLÓGICO DE TIPÓN"

Localización: PISAQ / PIRAMIDA / TEBRAMAN / Cusco / Cusco

Fecha: ABRIL 2017 / No. de: Etiqueta Emisora

MUESTRA	SP	ESTRATO	PROFUNDIDAD	C.A. %	IP %	IS %	IP	IS	CLASIFICACION	Descripción	Color	
1	0-01	E-1	0.00 - 0.20	2.22	10 ⁰	10 ⁰	10 ⁰	428.72	255.43	CP	Grava No Graduada	Marrón

RESUMEN
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y CLASIFICACION

Proyecto: "PARQUE ARQUEOLÓGICO DE PISAQ" / "PARQUE ARQUEOLÓGICO DE TIPÓN"

Localización: PISAQ / PIRAMIDA / TEBRAMAN / Cusco / Cusco

Fecha: ABRIL 2017 / No. de: Etiqueta Emisora

MUESTRA	SP	ESTRATO	PROFUNDIDAD	C.A. %	IP %	IS %	IP	IS	CLASIFICACION	Descripción	Color	
1	0-01	E-1	0.00 - 0.20	2.22	10 ⁰	10 ⁰	10 ⁰	428.72	255.43	CP	Grava No Graduada	Marrón

RESUMEN
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y CLASIFICACION

Proyecto: "PARQUE ARQUEOLÓGICO DE PISAQ" / "PARQUE ARQUEOLÓGICO DE TIPÓN"

Localización: PISAQ / PIRAMIDA / TEBRAMAN / Cusco / Cusco

Fecha: ABRIL 2017 / No. de: Etiqueta Emisora

MUESTRA	SP	ESTRATO	PROFUNDIDAD	C.A. %	IP %	IS %	IP	IS	CLASIFICACION	Descripción	Color	
1	0-01	E-1	0.00 - 0.20	2.22	10 ⁰	10 ⁰	10 ⁰	428.72	255.43	CP	Grava No Graduada	Marrón

RESUMEN
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y CLASIFICACION

Proyecto: "PARQUE ARQUEOLÓGICO DE PISAQ" / "PARQUE ARQUEOLÓGICO DE TIPÓN"

Localización: PISAQ / PIRAMIDA / TEBRAMAN / Cusco / Cusco

Fecha: ABRIL 2017 / No. de: Etiqueta Emisora

MUESTRA	SP	ESTRATO	PROFUNDIDAD	C.A. %	IP %	IS %	IP	IS	CLASIFICACION	Descripción	Color	
1	0-01	E-1	0.00 - 0.20	2.22	10 ⁰	10 ⁰	10 ⁰	428.72	255.43	CP	Grava No Graduada	Marrón

Perfil de Suelos

Pozos y/o Calicatas (C)	Estrato (E)	Profundidad	Composición
C-01 Andenes Sector I (parte superior)	E-1	0.00 m. - 0.20 m.	Relleno antrópico contemporáneo, en matriz de Grava arcillosa (GC), con presencia de raíces vegetales, color Marrón Claro.
	E-2	0.20 m. - 0.70 m.	Relleno antrópico; conformado por arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CI), Gravas Arcillosas (GC) y Gravas Bien Graduadas (GW); color Claro.
	E-3	0.70 m. - 3.00 m.	Matriz rocosa (roca ignea Batolito - Granodiorita volcánica); color Claro.

Caracterización de Estratos

Pozos y/o Calicatas (C)	Estrato (E)	Profundidad	ϕ (°)	C Kg/cm ²	γ tn/m ³	γ_{sat} tn/m ³
C-01 Andenes Sector I (parte superior)	E-1	0.00 m. - 0.20 m.	28.74	-	1.68	2.12
	E-2	0.20 m. - 0.70 m.	30.13	-	1.89	2.15
	E-3	0.70 m. - 3.00 m.	39.70	-	2.46	-

Prof. de Cimentación (metros)	Q admisible (kg/cm ²)	Asentamiento (cm)
1.00	2.14	0.183
1.50	3.17	0.091
2.00	4.30	0.038
2.50	5.53	-

Figura 4.3: Diseño metodológico de la investigación. Elaboración propia, 2017.

4.3 Unidad de Análisis

La unidad de análisis está constituida por el suelo de fundación de seis Llaqtas Incas en el departamento de Cusco; y, las unidades de observación son las condiciones locales de emplazamiento, las características físicas y mecánicas, y las capacidades de carga.

4.4 Universo de Estudio

El universo de estudio está conformada por seis Llaqtas Incas en el departamento de Cusco: Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman.

4.5 Tamaño de Muestra

Se investiga un mínimo de diez puntos en cada una de las Llaqtas Incas, con el equipo denominado Penetrómetro Dinámico Ligero (PDL); haciendo un total de sesenta puntos, cubriendo así todo el área de investigación; así mismo, se verifica in situ en cada una de las Llaqtas, la resistencia de seis macizos rocosos como mínimo, con el equipo Esclerómetro o Martillo de Schmidt, haciendo un total mínimo de treinta y seis ensayos. Se extraen también de cada una de las seis Llaqtas Incas muestras de Suelo alterado para los ensayos de Caracterización de Suelos y, Compresión Simple no confinada en Laboratorio; limitándonos a ello por las restricciones existentes por la condición patrimonial de las Llaqtas Incas.

4.6 Técnicas de selección de Muestra

Se identifica In Situ el tipo de los macizos rocosos predominantes que conforman los suelos de fundación de cada una de las Llaqtas Incas en investigación; esta información, se contrasta con lo reportado en las diferentes investigaciones arqueológicas desarrolladas por la entidad tutelar; comprobado el tipo de macizo rocoso, se procede a la selección In Situ de los sectores representativos para la investigación como son los suelos de fundación de muros de contención, plataformas agrícolas, recintos, plazas y patios, donde se desarrollan los ensayos de campo con el Penetrómetro dinámico ligero (PDL) y el martillo de Schmidt y, la obtención de la muestra representativa.

4.7 Técnicas de recolección de información

Las restricciones que imponen la condición patrimonial de las Llaqtas Incas, imposibilita la apertura de Calicatas a cielo abierto; inconveniente que es superado con información de fuente secundaria; recurriéndose a los contenidos de informes de investigaciones arqueológicas desarrolladas por la entidad tutelar en Cusco. Respecto a las condiciones locales de los suelos de fundación, se procede a la observación directa de los hechos In Situ, registrándose fotográfica y documentalmente cada detalle, complementándose con información secundaria.

Para conocer las características físicas y mecánicas de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas, se realizan Ensayos In Situ, con el equipo Penetrómetro Dinámico Ligero y, Esclerómetro; este último, para contrastar y verificar la resistencia que presentan los macizos rocosos de fundación. En ambos casos, se registra la información en cuadernos de campo previamente estructurados, complementados con registros fotográficos. Finalmente, se extraen muestras representativas de los suelos de fundación para su análisis en laboratorio, recurriéndose para ello, a GEOTEST PERÚ S.A.C., Laboratorio de Suelos y Concreto en Cusco.

4.8 Técnicas de Análisis e interpretación de la información

In Situ, se describe visualmente los suelos de fundación, de acuerdo a la Norma Técnica Peruana (NTP) 339.150; así mismo, se desarrollan sondeos en los suelos de fundación con el equipo Penetrómetro Dinámico Ligero (PDL), de acuerdo a la Norma Técnica Peruana (NTP) 339.039, que a través de correlaciones posibilitan obtener propiedades de resistencia mecánica y propiedades Índice; propiedades que a su vez, son verificados a partir de Ensayos de Carga Puntual, con el equipo Esclerómetro (NTP 339.181), para obtener información respecto a la dureza o resistencia a compresión de la superficie de los macizos rocosos investigados.

En los Laboratorios de GEOTEST PERÚ S.A.C., se realizan los Ensayos de Clasificación de Suelos, a partir del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), de acuerdo a la

Norma Técnica Peruana (NTP) 339.134; implicando ello, el desarrollo de ensayos de Contenido de Humedad, para verificar la variación de humedad en los suelos de fundación, sujetos a la Norma Técnica Peruana (NTP) 339.127; Análisis Granulométrico, que permite obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra de suelo, de acuerdo a la Norma Técnica Peruana (NTP) 339.128; Límite Líquido y Plástico, para determinar la consistencia líquida y plástica, según Norma Técnica Peruana (NTP) 339.129.

Para determinar la dureza y/o resistencia de los macizos rocosos de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas, se realizan ensayos de Compresión Simple no Confinada de corazones diamantinos, de acuerdo a la Norma Técnica Peruana (NTP) 339.039. Los resultados de Campo y Laboratorio, son procesados utilizando Software como el Geostru Dynamic Probing, que correlacionan los ensayos de penetración dinámica continua y posibilitan graficar la estratigrafía del suelo de fundación; también el Load Cap, para el cálculo de la Capacidad de Carga y Asientos de cimentaciones superficiales. Toda la data es interpretada y explicada sistémicamente para obtener la Teoría final.

4.9 Técnicas para demostrar la verdad o falsedad de las hipótesis planteadas

El conocimiento geotécnico en el periodo Inca, se demuestra a partir de la medición y comparación de los resultados, en cada caso de: las Condiciones Locales de los Emplazamientos de las Llaqtas; las Características Físicas y Mecánicas de los suelos de fundación; y, las Capacidades de Carga y Asentamientos, que presentan; comprobados con la observación de los hechos y sondeos In Situ; certificados con Ensayos normalizados en Laboratorio, que determinan parámetros geotécnicos como: ángulos de fricción, densidades, pesos unitarios, resistencias a compresión, entre otros; que definen la competencia geotécnica o no de los suelos de fundación Inca.

Respecto a las Condiciones Locales de Emplazamiento, éstas se verifican In Situ y, con literatura especializada, respecto a sismos, clima, nivel freático, geología, entre otros.

V. CASOS DE ESTUDIO

5.1 De las Condiciones Locales de Emplazamiento de las Llaqtas Incas

5.1.1 Geología

La geología de las Llaqtas Incas en estudio, evidencia que éstas se emplazan predominantemente sobre conjuntos de *rocas volcánicas ígneas*, como es el caso de **Machupicchu**, formado principalmente por granodiorita; **Pisaq**, compuesta mayoritariamente por andesita; **Tipón**, conformada por andesita y basalto; y, **Raqchi**, formada por andesita; advirtiéndose también en estos emplazamientos, afloramientos rocosos de formación sedimentaria y metamórfica. En el caso de **Ollantaytambo** sobre rocas de formación metamórfica, predominando la arenisca – cuarcítica; y, **Saqsaywaman**, está asentada sobre rocas de formación sedimentaria como las Calizas principalmente (ver Tabla 5.1).

Tabla 5.1

Características geológicas de las Llaqtas Incas

Llaqtas Incas	Geología	Peligro geológico
Machupicchu	Zona compuesta por <i>rocas ígneas intrusivas</i> del batolito de Machupicchu; <i>macizo rocoso granítico</i> .	Los granitos de Machupicchu están fuertemente fracturados por sistemas de diaclasas y fallas, que favorecen la desintegración de los bloques graníticos coadyuvado por el agua y la gravedad (Carlotto, Cárdenas y Fidel, 2009).
Ollantaytambo	Zona compuesta por <i>afloramientos rocosos</i> de la Formación Ollantaytambo; constituida por brechas y conglomerados, <i>areniscas cuarcíticas</i> , ignimbritas, de composición andesítica.	Predominan las rocas volcánicas fuertemente fracturadas (Boletín 35, del Instituto Francés de Estudios Andinos, 2016).
Pisaq	Zona compuesta por <i>rocas sedimentarias</i> del Grupo Mitu, predominando la <i>andesita</i> .	Muy baja susceptibilidad a deslizamientos; el fenómeno más importante es el deslizamiento de K´allaqhasa, que involucra una napa de rocas metamórficas de la formación Paucartambo, aflorantes en esa zona por efecto de un

		sobrecabalgamiento (Boletín del Instituto Francés de Estudios Andinos, 2016).
Raqchi	Zona compuesta por una <i>colada andesítica</i> , resultado de la erupción del <i>volcán Quinsachata</i> .	Volcán Quinsachata considerado como activo, de <i>riesgo volcánico relativo (RVR)</i> , moderado (Macedo, et. al., 2016).
Tipón	Zona compuesta por afloramiento de roca volcánica, <i>andesita y basalto</i> ; forma parte de la cadena del Pachatusan.	Infiltración de aguas pluviales por fallas y diaclasas en el macizo rocoso (Castillo, 2006).
Saqsaywaman	Zona compuesta por <i>rocas sedimentarias calizas</i> de la formación Yuncaypata.	Intemperismo y erosión que desgastan las superficies expuestas de las masas de calizas; escorrentías de lluvia se infiltran en el subsuelo (Bueno, 2007).

Nota: Las fallas referidas son de formación de hace millones de años y están inactivas. Adaptado de Carlotto, Cárdenas y Fidel, 2009.

Los macizos rocosos referidos líneas arriba, presentan cortes caracterizados como diaclasas y fallas, las que determinaron su morfología y relieve particular, con apilamientos de bloques de rocas, por el efecto de meteorización e intemperismo; aspecto que presentaban estas zonas, a la llegada de los Incas. Cabe destacar, que estas formaciones son de data de millones de años; sólo como ejemplo, “el batolito de Machupicchu se levantó muy rápidamente como un gran y solo bloque hace aproximadamente 2 millones de años” (Carlotto et.al., 2009, p.734). Precisamente, sobre esos diferentes tipos de suelos y, sobre los mismos afloramientos de los macizos rocosos (cantera In Situ), se han construido las Llaqtas Incas.

Las fallas y diaclasas existentes, son desde la formación de estos macizos rocosos, los mismos que se generaron en un proceso natural de acomodo y consolidación; y, de acuerdo a Carlotto et.al (2009), éstas a la fecha son inactivas, siendo la mayor evidencia, la no ocurrencia de sismos en los emplazamientos de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman; consecuentemente, puede afirmarse que la geología local como tal, coadyuva en la conservación y protección de estos monumentos arqueológicos.



Figura 5.1: Geología de la Llaqta Inca de **Machupicchu**. (1) Plano Geológico y Fallas, adaptado de Carlotto, Cárdenas y Fidel, 2009; (2) macizo rocoso – batolito de Machupicchu, (3) Falla foso, (4) afloramientos rocosos de granodiorita. Las Fallas son de formación de hace millones de años y, están inactivas. Fotografías, archivo personal, 2017.

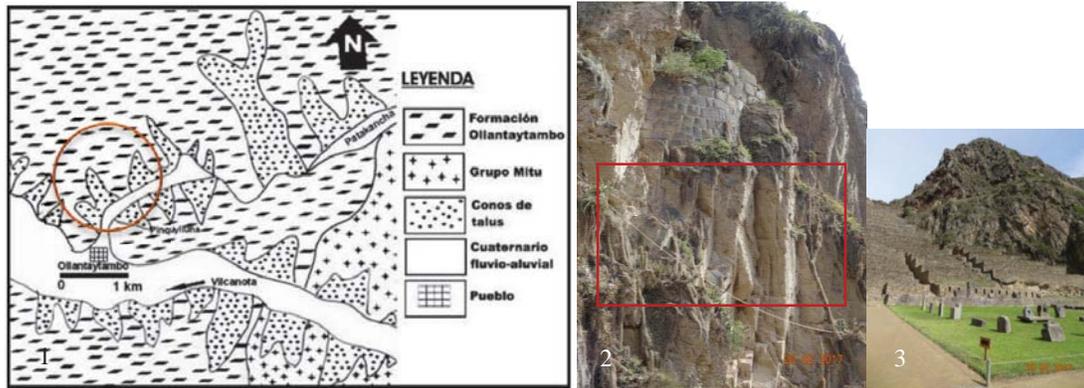


Figura 5.2: Geología de la Llaqta Inca de **Ollantaytambo**. (1) Plano Geológico, adaptado de Carreño, 2006; (2) estructura de los macizos rocosos; (3) emplazamiento de la Llaqta, sobre rocas metamórficas Arenisca-Cuarcítica consolidadas. Fotografías, archivo personal, 2017.

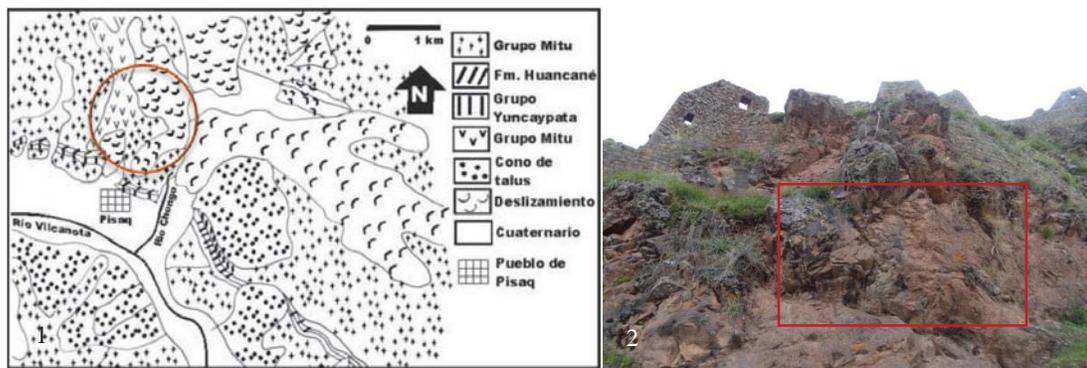


Figura 5.3: Geología de la Llaqta Inca de **Pisaq**. (1) Plano Geológico, adaptado de (Carreño, 2006; (2) estructura de los macizos rocosos de base. Macizos rocosos con antecedentes de deslizamientos en el sector de K'allaqhasa. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.4: Geología de la Llaqta Inca de **Tipón**. (1) Plano Geológico, adaptado de Wright, 2001; (2) estructura de los macizos rocosos de base. Emplazada en el foso de la explosión volcánica sucedida hace millones de años. Fotografías, archivo personal, 2017.

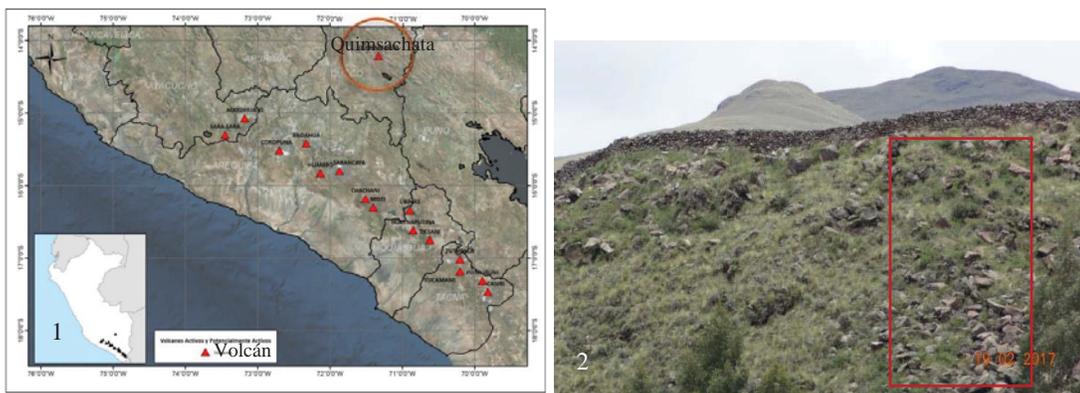


Figura 5.5: Geología de la Llaqta Inca de **Raqchi**. (1) Plano ubicación Volcán Quimsachata, adaptado de Macedo, et.al., 2016; (2) estructura de los macizos rocosos de base. Emplazada sobre roca volcánica Andesita. Fotografías, archivo personal, 2017.

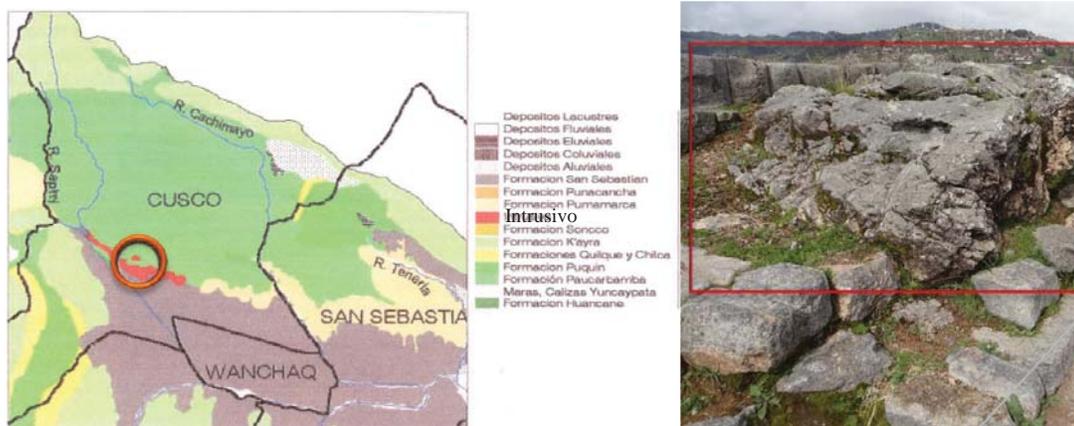


Figura 5.6: Geología de la Llaqta Inca de **Saqsaywaman**. (1) Plano Geológico, adaptado de Cárdenas, et.al., 2009; (2) estructura de los macizos rocosos. Emplazada sobre rocas sedimentarias Areniscas-Cuarcíticas, competente dureza. Fotografías, archivo personal, 2017.

5.1.2 Características Climatológicas

El clima en los emplazamientos de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman; en general, está caracterizado por la presencia de varias zonas climatológicas, relacionadas con los cambios altitudinales y la variada configuración morfológica de los relieves; así mismo, se alternan tres estaciones climatológicas representativas: una de estiaje durante los meses de abril hasta agosto, otra de precipitaciones pluviales de inicio desde septiembre a diciembre; y, finalmente, de enero a marzo lluvias intensas. En las zonas de **Machupicchu, Ollantaytambo y Písaq**, *la precipitación es abundante* y, en **Tipón, Raqchi y Saqsaywaman**, *la precipitación es mediana*.

Respecto a *la temperatura* media anual, *Machupicchu, presenta el clima más cálido y húmedo* (90-60%), seguido por Ollantaytambo; 16.5 °C y 13 °C respectivamente. *Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman presentan una temperatura promedio de 12°C*; respecto a *la precipitación* total anual, en Machupicchu es de 2000 mm., frente a 750 mm. promedio en las Llaqtas restantes. *La vegetación* natural comprende especies arbóreas y arbustivas en el caso de Machupicchu, además de helechos arbóreos, orquídeas, bromeliáceas y musgos; que la diferencian del resto de Llaqtas, donde la vegetación corresponde a climas de puna. Están rodeadas por laderas con pendientes muy empinadas a excepción de Raqchi (ver Tabla 5.2).

Tabla 5.2

Características climatológicas de las Llaqtas Incas

Llaqtas Incas	Altitud (m.s.n.m.)	Temperatura (°C. máx.- mín.)	Precipitación (mm.)	Humedad (%)	Nubosidad
Machupicchu	2200 - 2500	16.5 – 14.5	2000	90	Alta
Ollantaytambo	2700 – 3700	24 – 16	800	65	Baja
Písaq	2900 – 3800	24 – 3.7	790	60	Baja
Raqchi	3500	12 – 8	665.14	58	Baja
Tipón	3400	25 – 6	810	64	Baja
Saqsaywaman	3200 - 4200	12 – 6	734.80	64.27	Baja

Nota: Adaptado de Planes Maestros vigentes de Parques Arqueológicos. Climas característicos de zonas altoandinas, con temperaturas bajas y precipitaciones medianas.

5.1.3 Nivel Freático

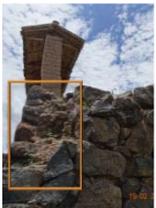
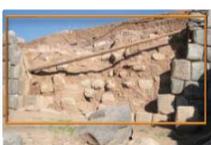
Considerando que las Llaqtas Incas investigadas están emplazadas en macizos rocosos, no se registra presencia de nivel freático, como tal; sin embargo, lo que se advierte hoy, es la peligrosa infiltración de aguas pluviales, fundamentalmente hacia los cimientos en el sub suelo y, a través de los muros en la superficie; ello, en estrecha relación con la intensidad de precipitación de cada zona; constituyéndose en un grave problema por resolverse; dificultad que durante la ocupación Inca fue solucionada; pues, las plataformas agrícolas por ejemplo, fueron implementadas con sistemas de drenajes superficial y subterráneo; y, las edificaciones con techos de paja, que permitían una evacuación eficaz de las aguas de lluvias.

Lamentablemente, hoy las construcciones Incas ya no cuentan con sus techos y, gran parte del sistema de drenajes están inoperativos; generando ello, efectos nocivos a la estabilidad de las edificaciones Incas, como asentamientos, erosión superficial, sufusión, derrumbes, caída de rocas y deslizamientos superficiales. En este escenario, puede inferirse, que el agua y la gravedad se constituyen *hoy* en los fenómenos más atentatorios de las edificaciones de las Llaqtas Incas; por un lado, a nivel del macizo rocoso y sus afloramientos, es posible que el agua de lluvia se esté infiltrando siguiendo las fracturas (fallas y diaclasas), cuyas superficies además pueden estar alteradas con presencia de arcillas; y, a nivel de cimientos.

Es preciso referir, que en el periodo Inca, probablemente el drenaje haya constituido un problema complejo; esto, considerando que las Llaqtas Incas, a excepción de Raqchi, se encontraban prácticamente emplazadas en los riscos de las montañas, con una inclinación en algunos casos de hasta 50% y, las intensas y medianas precipitaciones pluviales; en ese contexto, Ellos, encontraron la solución: Sistemas eficaces de drenaje. Cómo? “Ellos taparon cada terraza para un eficiente drenaje, con una capa de piedras al fondo, seguido de arena gruesa, material arenoso, y mantillo o suelo superior” (Wright, 2006). Las evidencias de todo su sistema las encontramos a cada paso al recorrer cada una de las Llaqtas Incas (Tabla 5.3).

Tabla 5.3

Efecto nocivo del agua en las Llaqtas Incas

Llaqtas Incas	Asentamientos	Erosión	Derrumbes	Sufusión
Machupicchu				
Ollantaytambo				
Pisac				
Raqchi				
Tipón				
Saqsaywaman				

Nota: El registro fotográfico, resaltado con el recuadro naranja evidencia, la inoperatividad del sistema de drenaje Inca, probablemente por la carencia de investigaciones especializadas y, limitadas labores de mantenimiento; generando el agua efectos nocivos, que exponen la estabilidad de las Llaqtas Incas desde los cimientos en el subsuelo y, la erosión en la superficie.

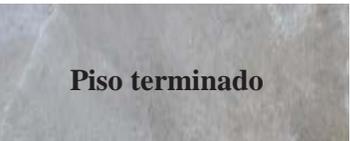
La estabilidad de estas superestructuras por más de 500 años, es el resultado de un *eficiente y eficaz sistema de drenaje Inca*; sistema con el cual resolvieron la inevitable presencia del agua; a nuestro entender, ésta fue una de las estrategias más importantes operativizadas para lograr la longevidad de las Llaqtas Incas; pues, al parecer, planificaron las Llaqtas desde el Uku Pacha (sub suelo), con drenajes subterráneos, verificados en las investigaciones arqueológicas; en el Kay Pacha (superficie), con drenajes superficiales como canales; y, atendieron la Para (lluvia) del Hanan Pacha (cielo), con materiales impermeables como el ichu (paja) en los techos y, el tratamiento de las plataformas agrícolas (ver Figura 5.7).



Figura 5.7: Sistemas de drenaje Inca en el Kay Pacha (superficie). (1) Sistema escalinatas – drenaje lateral, Machupicchu; (2) sistema canal receptor de escorrentías, Ollantaytambo; (3) sistema plataforma agrícola – drenaje – escalinatas, Pisaq; (4) sistema de drenaje superficial, Raqchi; (5) sistema de drenaje vertical Tipón; (6) sistema de drenaje de escurrimiento a través de Perkas (paredes), Saqsaywaman. Todos estos sistemas estaban dirigidos a un dren principal, alejado de las Llaqtas y sus cimientos; hoy, lamentablemente se encuentran inoperativos, carentes de investigación, exponiendo peligrosa e irreversiblemente los cimientos de las superestructuras Incas. Fotografías, archivo personal, 2017.

Tabla 5.4

Recreación del Perfil estratigráfico y tratamiento del drenaje Inca en el Uku Pacha

Plataformas Agrícolas	Espacios abiertos	Recintos
N.P.T. + - 0.00		
		
		
		
		
		
-X metros	1er. Estrato (E-1)	
		
-Y metros	2do. Estrato (E-2)	

Nota: El Uku Pacha o subsuelo de fundación de las superestructuras Incas, fue modelado para garantizar estabilidad y, a su vez, como un sistema de drenaje subterráneo, que aleje el agua de las cimentaciones; en ese contexto, los perfiles estratigráficos comparten patrones de conformación bastante similares, distinguiéndose principalmente en la función que cumplirían; como: Muros de contención, Plataformas agrícolas, Plazas, Patios y Recintos; y, en la profundidad o potencia de las *capas* conformantes; alternándose el uso de suelos finos como las arcillas en su condición de material ligante y próximos a la superficie y, los suelos granulares como las arenas y gravas de distinto tamaño hasta bolones, que otorgan resistencia y permeabilidad e imposibilidad de modificar sus propiedades en presencia del agua; constituyendo éstos un primer *estrato* (E-1), que en conjunto constituyen los *Rellenos Controlados Inca*, hasta alcanzar el macizo rocoso que constituye el segundo *estrato* (E-2).

5.1.4 Efecto del Sismo

Investigaciones desarrolladas en las diferentes Llaqtas Incas, no reportan fallas que presenten movimientos recientes; lo que significa, que las fallas existentes desde su formación, no están activas; ya que, normalmente, las fallas activas producen sismos. Sin embargo, el departamento de Cusco presenta antecedentes sísmicos, tanto históricos como instrumentales, siendo los más representativos los ocurridos en 1950 y 1986, relacionados con el sistema de fallas activas que se alinean entre Cusco y Abancay; no hay información de daños por dichos eventos en las Llaqtas Incas, lo que confirma, que posiblemente la naturaleza de los macizos rocosos atenuaron las ondas sísmicas y evitaron que las superestructuras Incas se dañen.

Por otro lado, no olvidemos que el Perú, es un país expuesto a terremotos y, Cusco no se exime de ello; consecuentemente, conocer las características sísmicas que podrían afectar a las estructuras patrimoniales en estudio, es fundamental; lo que dependerá, de nuestra historia sísmica, estrechamente relacionada al parámetro de intensidad sísmica, que nos permite conocer el riesgo sísmico al cual estamos expuestos. El año 2016, un grupo de investigadores del Instituto Geofísico del Perú, liderados por el Ing. Hernando Tavera, publicó el *Catálogo General de Isosistas para Sismos Peruanos*, información que evidencia la severidad del sacudimiento del suelo en el lugar afectado por el sismo, a nivel nacional.

Para el caso de las Llaqtas Incas, hemos seleccionado del *Catálogo*, 18 mapas de isosistas o mapas de valores similares de intensidad unidos con líneas, donde los valores mayores permiten definir la ubicación del llamado *epicentro macrosísmico* del evento, medido en la escala de *Mercalli Modificada, MM*; así, los valores de intensidad entre II y V se refieren al efecto sobre las personas y vibración de objetos, incluyendo a las edificaciones. Las intensidades intermedias entre VI y VIII, son consideradas por todas las escalas, como los efectos sobre las construcciones y, los valores mayores describirían los efectos sobre la naturaleza; las figuras 3.8 y 3.9, muestran los sismos sucedidos próximos a las Llaqtas Incas.

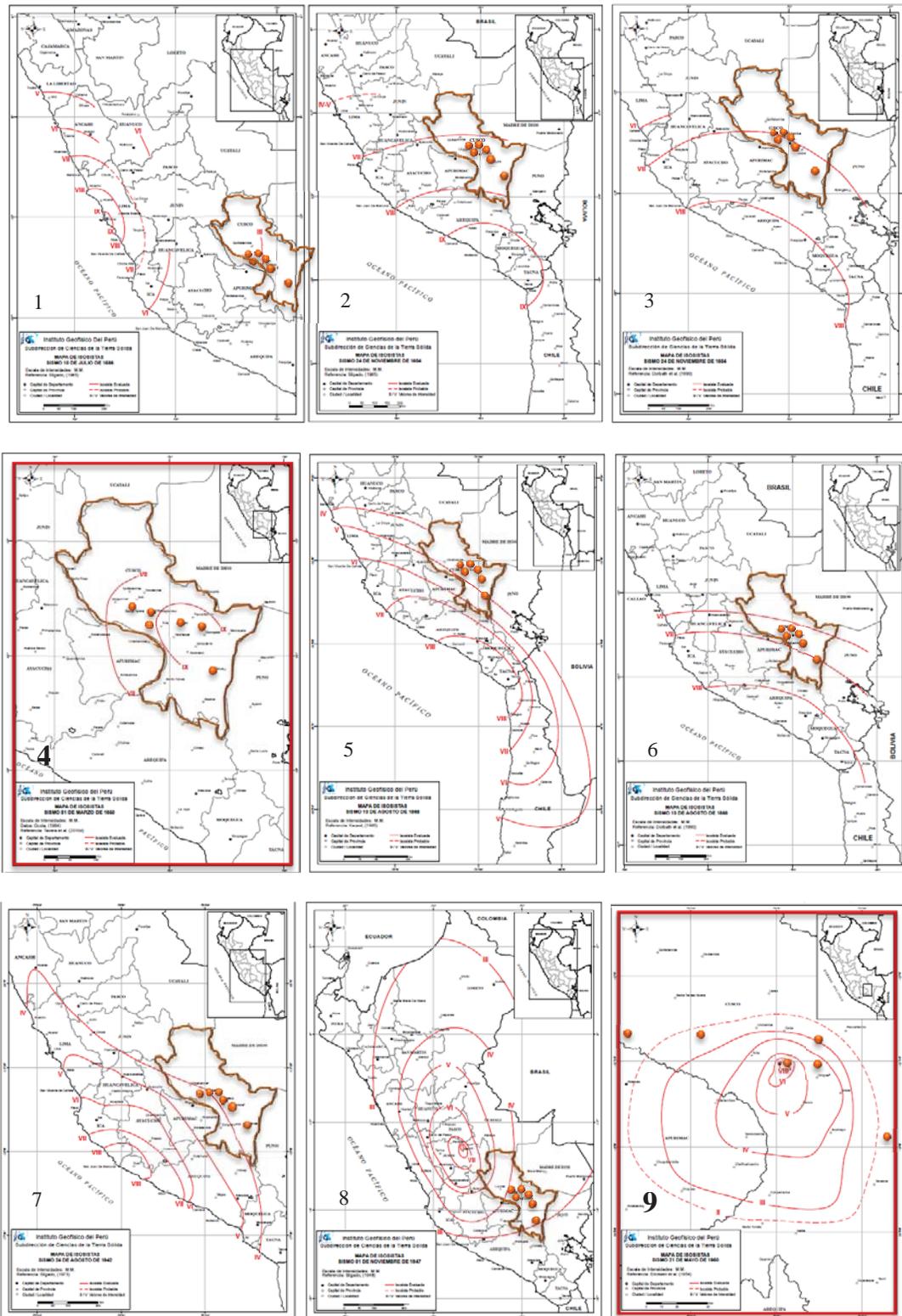


Figura 5.8: Historial sísmico del ámbito de emplazamiento de las Llaqtas Incas, 1688-1860; Machupicchu, Ollantaytambo, Písac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman; los eventos más destructores, se registran: (4) año 1650, intensidad VII-IX, **devastador**; (9) año 1950 intensidad II-VIII, **severo**; ninguno afectó las Llaqtas Inca. Adaptado de Tavera, et.al., 2016.

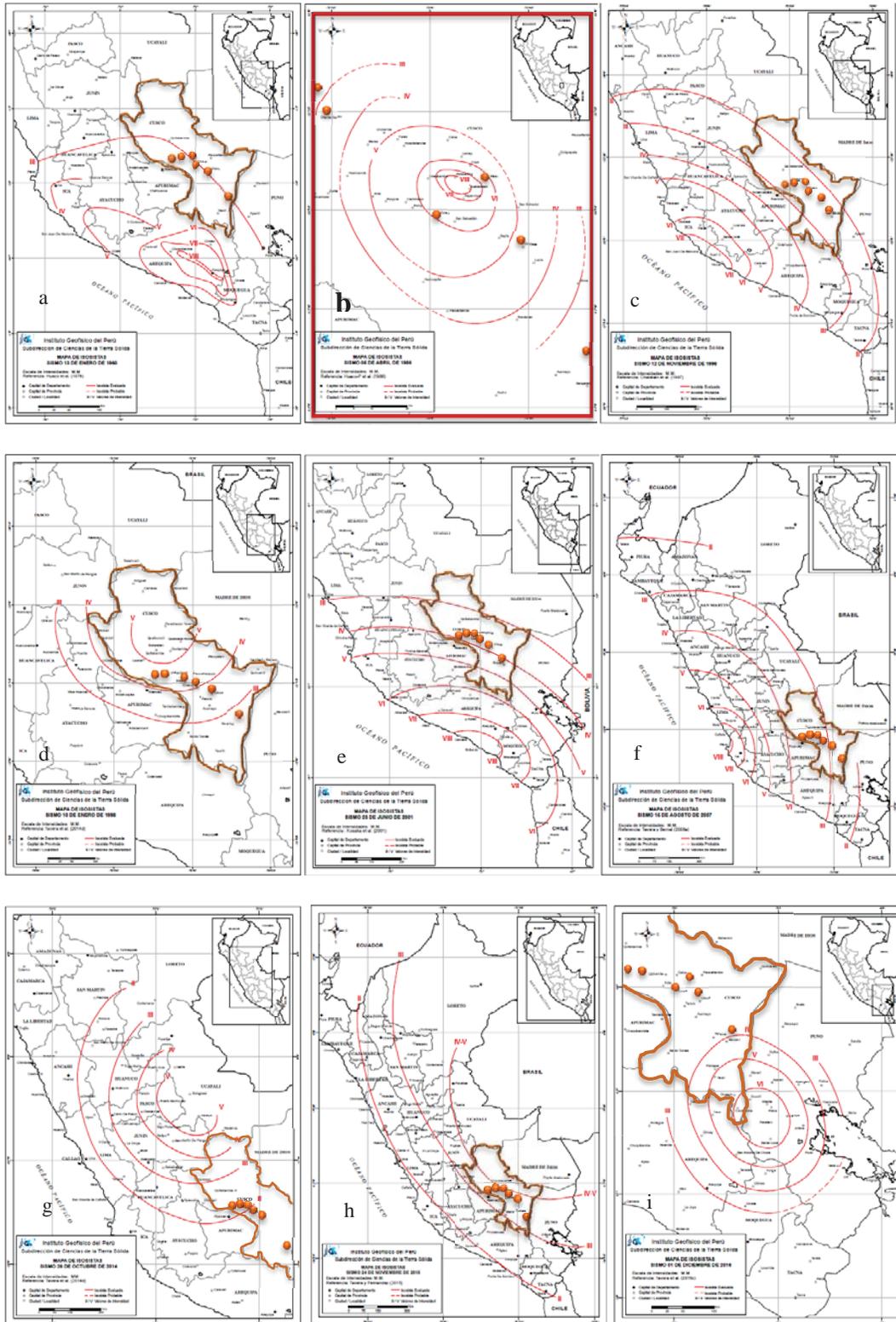


Figura 5.9: Historial sísmico del ámbito de emplazamiento de Llaqtas Incas, 1880-2016, Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman; eventos más destructores se registran (b) año **1986**, intensidad III-VIII, **severo**; la intensidad de sismos varían de II a V, **bajo**. Los sismos sucedidos no afectaron a las Llaqtas Inca. Adaptado de Tavera, et.al., 2016.

De las figuras 5.8 y 5.9, puede inferirse que en el periodo Inca, la elección de las condiciones locales de emplazamiento de las Llaqtas, fue uno de los principales factores que evitó daños en las superestructuras durante la ocurrencia de sismos, incluso severos posteriores, como los acaecidos el 31 de mayo de 1650 y el del 21 de mayo de 1950; pues, la amplificación sísmica es un efecto de las condiciones locales de emplazamiento y es fuertemente dependiente de las condiciones sísmicas, geológicas, geomorfológicas y geotécnicas; en consecuencia, *no se ubicaron en zonas de alto riesgo sísmico*, por las intensidades sísmicas que presentan predominantemente II a V; ubicándose en suelos de alta competencia geotécnica, rocas ígneas.

Un caso que evidencia aún más la importancia de las condiciones locales de emplazamiento frente al efecto sismo, es el de México, que en 1985 sufrió un terremoto devastador de 8.1 de intensidad; sus suelos de fundación están constituidos por *arcillas expansivas* y, las características del movimiento sísmico se resumieron en : *gran amplificación* a periodos largos, *larga duración* y *periodos* predominantes claramente *definidos*; esto significa que, la cantidad de daño producido por un terremoto depende del *carácter geológico* del suelo principalmente y, que cuando la sacudida se produce en la roca sólida produce daños pequeños y en cambio los daños son mayores sobre suelos blandos o finos; tal como lo mostramos en la figura 3.10.

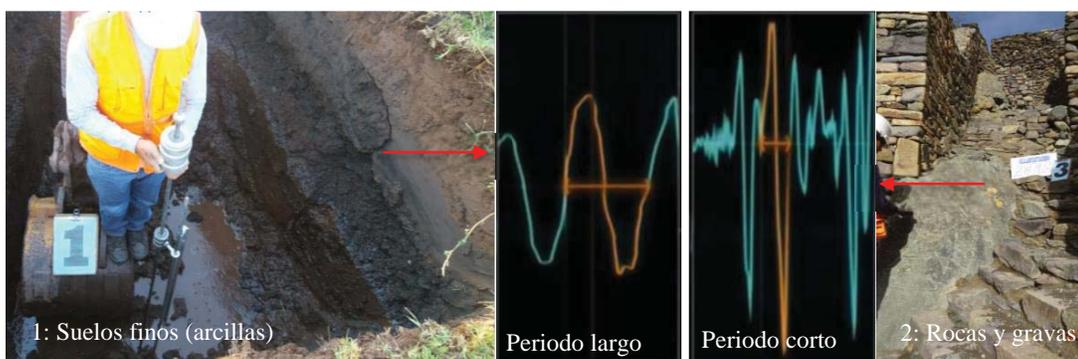


Figura 5.10: Movimiento de terreno de periodo largo y periodo corto. (1) Suelos blandos o finos como arcillas, vibran con ondas sísmicas largas, generan más daño en las construcciones; (2) macizos rocosos o granulares, minimizan la oscilación de las ondas sísmicas y vibran con ondas cortas y generan menos daños; probablemente, los Incas conocían el comportamiento de los suelos, frente a sismos, ya sea por experiencia propia o referencias heredadas de sus antepasados, buscando emplazarse en zonas constituidas por montañas rocosas, resistentes y en consecuencia, seguras. Fotografías, archivo personal, 2017.

Tabla 5.5*Factores de Zona, “Z” de Llaqtas Incas*

Llaqtas Inca	Zona	Z
	4	0.45
	3	0.35
Machupicchu Ollantaytambo Pisaq Raqchi Tipón Saqsaywaman	2	0.25
	1	0.10

Nota: “Z” = Factor de aceleración máxima horizontal en suelo rígido. Las Llaqtas Incas, asentadas en macizos rocosos (Tabla 5.6), difícilmente son afectadas por un sismo en forma devastadora, debido al bajo factor de aceleración horizontal que poseen (resaltado con el recuadro rojo), por estar emplazados en el departamento de Cusco, de categoría sísmica 2. Adaptado de la Norma Técnica E.030, de Diseño sismo resistente 2014.

Tabla 5.6*Condiciones Geotécnicas de las Llaqtas Incas*

Llaqtas Inca	Perfiles Tipo de Suelo	Descripción
Machupicchu Ollantaytambo	S°: Roca dura	Rocas sanas con velocidad de propagación de ondas de corte mayor que 1500 m/s.
Pisaq Raqchi Tipón Saqsaywaman	S1: Roca o suelos muy rígidos	Rocas con diferentes grados de fracturación, de macizos homogéneos y suelos muy rígidos con velocidades de propagación de ondas de corte entre 500 y 1500 m/s.
	S2: Suelos intermedios	Suelos medianamente rígidos con velocidades de propagación de ondas de corte entre 180 y 500 m/s (arenas y gravas densas; arcillas compactas).
	S3: Suelos blandos	Suelos flexibles con velocidades de propagación de ondas de corte menor o igual a 180 m/s (arenas y gravas medianas a finas, arcillas blandas).
	S4: Condiciones excepcionales	Suelos excepcionalmente flexibles y los sitios donde las condiciones geológicas y/o topográficas son particularmente desfavorables, en los cuales se requiere efectuar un estudio específico para el sitio. Sólo será necesario considerar un perfil tipo S4 cuando el Estudio de Mecánica de suelos (EMS) así lo determine.

Nota: El perfil del tipo de suelo que conforman las Llaqtas Inca en estudio, corresponde predominantemente a Roca dura (S°) y Suelos muy rígidos, tal como se evidencia en el recuadro rojo; pues, están asentadas en su mayoría en rocas ígneas de origen volcánico, como es el caso del **granodiorito** de **Machupicchu**; la **arenisca cuarcítica**, en el caso de **Ollantaytambo**; la **andesita**, en los casos de **Pisaq** y **Raqchi**; el **basalto**, en el caso de **Tipón**; y, la **caliza** en el caso de **Saqsaywaman**.

Respecto a los *Parámetros de Sitio* para el caso del departamento de Cusco y la Zona 2, corresponde un *factor de amplificación del suelo, (S)*, de 0.80; un valor de 0.3 para el *Periodo, Tp, (s)* y, 3.0 para el *Periodo, Tl, (s)*; tal como está establecido en las Tablas N° 3 y 4 de la Norma Técnica E-030, 2014, del Reglamento Nacional de Edificaciones.

Tabla 5.7

Categoría de Edificaciones y Factor de Uso de Llaqtas Incas

Llaqtas Inca	Categoría	Descripción	Factor de Uso (U)
	Edificaciones esenciales	Establecimientos de Salud, Puertos, Aeropuertos, locales municipales, Centrales de Comunicaciones, Estaciones de Bomberos, Cuarteles de las Fuerzas Armadas y Policía, Instalaciones de Generación Eléctrica, Reservorio y Plantas de Tratamiento de Agua	1.5
Machupicchu Ollantaytambo Pisaq Raqchi Tipón Saqsaywaman	Edificaciones Importantes	Edificaciones donde se reúnen gran cantidad de personas... o que guardan patrimonios valiosos	1.3
	Edificaciones Comunes	Viviendas, hoteles,...	1
	Edificaciones Temporales	Construcciones provisionales	

Nota: Las Llaqtas Incas en estudio están clasificadas en la categoría de edificaciones importantes (resaltado con el recuadro rojo), con un factor de importancia de 1.3; implicando ello, el requerimiento de prever acciones de evacuación masiva, frente a la ocurrencia de sismo u otro evento que amenace la integridad de las personas. Adaptado de la Norma Técnica E 0.30, 2014.

En las superestructuras de las Llaqtas Incas de **Machupicchu, Ollantaytambo, Pisaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman**, *la unidad de arquitectura fundamental es la estructura rectangular*, generalmente sin subdivisiones internas y, de una sola habitación, de diferentes tamaños; normalmente pequeños para ser cubiertos con rollizos de madera. Las Perk'as

(paredes) de Rumi (piedra) tienen altura uniforme, techadas por una cubierta a dos y cuatro aguas, compuesta de rollizos de madera cubiertos con ichu (paja). Existieron diversas variaciones de esta unidad básica; observándose también, paramentos curvos, aunque ocasionalmente (ver figura 5.12), formando muros de contención u otros.



Figura 5.12: Características morfológicas de Llaqtas Incas; (1) Planta característica Inca (recinto en Tipón); (2) techo con Ichu (Machupicchu); (3) estructura de techos con rollizos de madera (Machupicchu); (4) paramentos curvos (Raqchi). La regularidad de las formas y la utilización de materiales ligeros como el ichu (paja) en las cubiertas, son características constructivas recurrentes en el periodo Inca, que no se condicen con características sismo resistentes. Fotografías, archivo personal, 2017.

Construyeron generalmente edificaciones de un solo nivel; sin embargo, se advierte la presencia de edificaciones de dos niveles, que se sustentan en rollizos de madera, apoyadas en los muros y nichos; el acceso normalmente se da desde el exterior, aprovechando y/o salvando los desniveles del emplazamiento. Las Perk'as (paredes) de las construcciones están ligeramente inclinadas hacia el interior, en ningún caso más de 15° (Kendall, 1976); el ancho oscila entre 0.65 m y 1 m. de espesor. Predominan los llenos sobre los vacíos, siendo trapezoidales las formas de las aberturas más utilizadas; las puertas están colocadas de forma simétrica en el lado largo de la unidad rectangular; el ancho no supera los 1.65 m.

Ventanas y nichos están ubicados a 1.25 m. sobre el nivel del piso terminado y, tienen un ancho máximo de 0.60 m.; los dinteles son de piedra predominantemente y, en madera en otros casos, sujetadas por ichu (paja) trenzado. El material de construcción común es la piedra labrada dispuesta sobre mortero, existiendo también muros con piedra semicanteadas con relleno en el núcleo. El aparejo empleado predominante es el de sogas y tizón. Se advierte

también construcciones en adobe (caso Raqchi), colocados sobre cimientos de piedra de más de 1 m. de altura, con la finalidad de proteger los muros de la lluvia (ver figura 5.13). Se evidencia recubrimientos con arcilla en muros (caso Ollantaytambo).



Figura 5.13: Características constructivas de Llaqtas Incas; (1) Dintel de madera (Machupicchu); (2) Perla de adobe, sobre cimiento de piedra (Raqchi); (3) núcleo de muro (Saqsaywaman); (4) enlucido de muros con barro (Ollantaytambo). Aligerar el peso propio de las superestructuras Incas con la utilización de madera y, el relleno de los muros pétreos con unidades más pequeñas, son algunas de las estrategias utilizadas. Fotos, archivo personal, 2017.

De lo descrito, puede afirmarse que las edificaciones Incas, predominantemente estandarizadas, presentan coherencia formal y técnica, que responden desde su diseño formal, a lo denominado como *edificaciones sismo resistente*. Pues, presentan formas cuadradas y rectangulares bien proporcionadas, que se constituyen en estructuras unidas; las aberturas, que tienen una incidencia fundamental en la disminución del riesgo en una edificación, tienen el mismo tamaño y están dispuestas a plomo (no superan el 40 % de la superficie de muro y evitan el colapso); no presentan muros en bandera que se expongan a las ondas sísmicas sin una resistencia opuesta, tampoco se advierte volados sin apoyo.

En síntesis, las edificaciones Incas presentan simetría formal; buen arriostre entre sí; solidez estructural; continuidad de formas; rigidez (a mayor rigidez, menor riesgo); y, continuidad de materiales, con la utilización masiva de sólo piedra; además, cubiertas ligeras constituidas por el ichu (paja) y la madera. Otro factor trascendental, es la elección de suelos de fundación muy duros; pues, los suelos blandos o finos transmiten las ondas sísmicas con mayor facilidad que suelos duros o granulares; esto explica el porqué los Incas, eligieron macizos rocosos.

Tabla 5.8

Regularidad estructural en las Llaqtas Incas

Llaqtas Inca	Categoría y Restricción	Morfología en Planta y Elevación	
Machupicchu			
Ollantaytambo			
Pisaq	Categoría: A Estructuras Especiales		
Raqchi	Zona sísmica: 2 Restricción: No se permiten irregularidades		
Tipón			
Saqsaywaman			

Nota: Las Llaqtas Incas, clasificadas como *regulares*, enfrentan mejor cargas laterales (sismo); no presentan en *elevación* irregularidad de masa y peso, ni irregularidad geométrica; tampoco en *planta* presentan esquinas entrantes y sus sistemas son paralelos; siendo el *Factor de Irregularidad en altura y planta 1.0*. Estas características de diseño, las definen como superestructuras antisísmicas. Adaptado de Norma Técnica E-0.30, 2014.

5.1.5 Relieve

El relieve, lo entendemos como formaciones montañosas, llanuras y depresiones; y, su morfología, está estrechamente ligada a la acción del clima, a procesos internos de la Tierra, como el movimiento de placas tectónicas; así como a procesos de modificación ejecutados por el hombre para la erigir sus asentamientos. En la concepción ideológica y simbólica de los Incas, el relieve es la imagen misma de la *Pachamama* (madre tierra); y, al saberse sus hijos, se introducen en ella, en el seno materno, lugar inmejorable a nivel de seguridad y protección; y, al intentar mimetizarse con ella, advierten que está mal herida, que el tiempo y sus efectos la erosionaron e intemperizaron gravemente, tal como mostramos en la Figura 5.14.

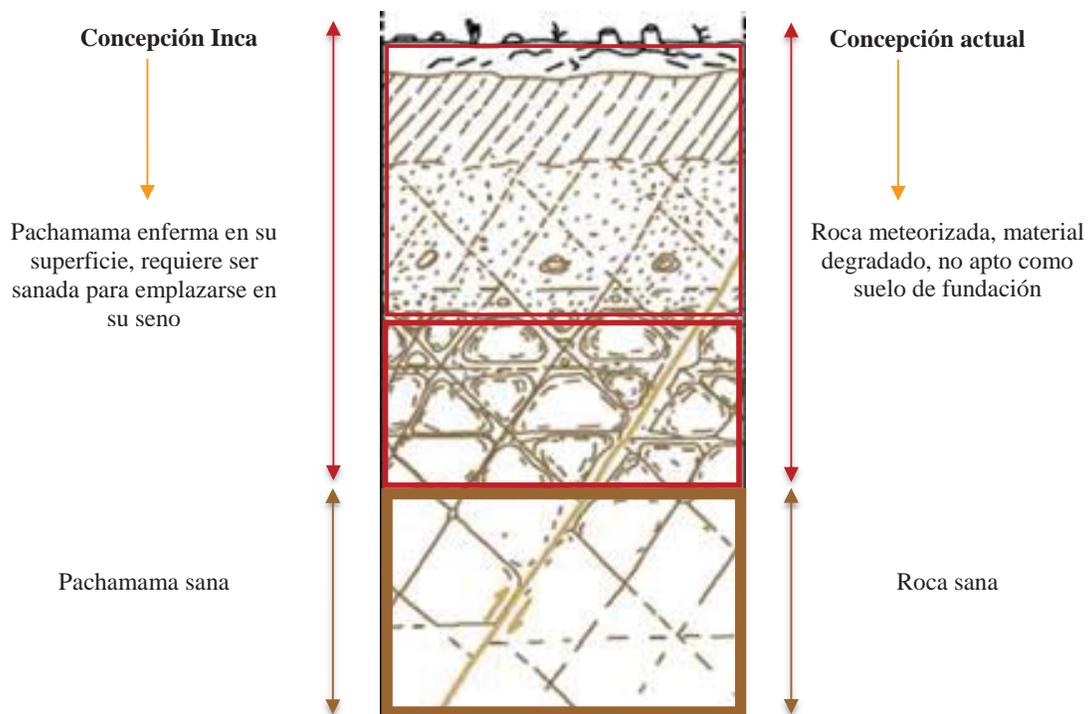


Figura 5.14: Meteorización de macizos rocosos – Pachamama enferma. Luego de millones de años de haberse acomodado y consolidado los macizos rocosos en la superficie, y, estar expuestos a las inclemencias climáticas, era previsible que, a la llegada de los Incas, éstos presenten meteorización e intemperismo; constituyendo superficialmente, rocas degradadas no aptas como suelo de fundación; y, en consecuencia, para emplazarse en ella, había que liberar las capas degradadas hasta encontrar roca sana. Esto explica el movimiento de suelo superficial que hicieron los Incas, conservando la morfología primigenia o relieve de la Pachamama, que se traduce en la armónica integración con el paisaje natural, a partir de un prolijo sistema de andenerías y artificiales plataformas agrícolas. Gráfico adaptado de Deer y Patton, 1971.

Técnicamente, esto lo entendemos como meteorización, intemperismo, erosión, diaclasas y hasta fallas, que se habían originado en estratos superficiales del macizo rocoso, de espesor considerable; pero para los Incas, significaban heridas de gravedad, que requerían ser aliviadas para que su Pachamama vuelva a su esplendor natural; ellos, no podían asentarse en esas condiciones, sería impropio. Ello explica, toda la transformación desarrollada en su Pachamama, había que liberarla de toda la insania hasta recobrar la piel sana; esto significó, movimiento de grandes masas de suelo superficial, hasta hallar roca sana, macizo rocoso competente; para luego realizar acciones de protección para su conservación permanente.

Se trataba entonces de implementar capas protectoras que alejen a la Pachamama de las inclemencias climáticas adversas; por ello, los Incas ejecutaron desde la base hasta la cima de la montaña, superficies de andenerías, que además de prodigar estabilidad a su Pachamama, posibilitaba refrescarla y respirar, a través de las extensas plataformas agrícolas, que cual gigantes represas, permitirían el lento paso del agua hacia el sub suelo. Esta operación, de ninguna manera podría alterar la fisonomía primigenia de su Pachamama; de ahí la explicación de tan armoniosa integración de la obra Inca con su entorno natural, pues se trataba de la Madre Tierra, la Pachamama, a quién se le debía máximo respeto y consideración.

Habiendo logrado liberar la Pachamama del suelo superficial degradado y, luego de protegerla entre otros, con el prolijo sistema de andenerías, estaban en condiciones de emplazarse en su seno, en el Kay Pacha (superficie), constituido por roca dura, fuerte, resistente, único material capaz enfrentar exitosamente los embates climáticos y eventos naturales, que tanta devastación habían generado a sus antepasados en otros sectores de los Andes. Además de ello, buscaron mantenerse lo más próximos posible al Inti Tayta (Pachacamaq, Padre Hacedor del mundo) que se encontraba en el Hanan Pacha (cielo); por ello, eligieron erigir las superestructuras en las cumbres de las montañas rocosas.

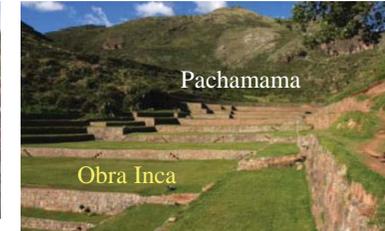
En la figura 5.15 mostramos cómo los Incas, revistieron a la Pachamama para protegerla.



Figura 5.15: Acciones de protección Inca de la Pachamama. En las áreas resaltadas por el recuadro naranja, se muestra: (1) Revestimiento de protección del macizo rocoso, y a la vez, aprovechando la estructura muraria, para posibilitar circulación horizontal, **Machupicchu**; (2) estabilización del talud con placas pétreas y venas de dilatación, que aseguran y protegen al macizo rocoso, **Ollantaytambo**; (3) recubrimiento de afloramientos rocosos, evitando intemperización y degradación, **Pisac**; (4) áreas de colección de aguas pluviales con tratamiento de drenaje subterráneo para evacuarlas fuera de la Llaqta, a la vez áreas de Juñunacuy (encuentro) **Raqchi**; (5) consolidación de la Pachamama con el sistema de terrazas, a la vez muros de contención que la soportaban de abajo hacia arriba, **Tipón**; (6) conductos de desagüe que facilitaban evacuar rápidamente las aguas de lluvia, evitando su infiltración en los cimientos de las edificaciones Incas, **Saqsaywaman**. Fotografías, archivo personal, 2017.

Tabla 5.9

Emplazamiento de Llaqtas Incas en el seno de la Pachamama (Madre Tierra)

Llaqta Inca	Emplazamiento	
Machupicchu		
Ollantaytambo		
Pisac		
Raqchi		
Tipón		
Saqsaywaman		

Nota: Paisaje natural y artificial integrados, logrado por los Incas como muestra de respeto y consideración máxima a la Pachamama que los cobija. Fotografías, archivo personal, 2017.

Tabla 5.10

La Pachamama labrada y resaltada en el Kay Pacha (superficie)

Llaqta Inca	Rocas labradas y Huacas		
Machupicchu			
Ollantaytambo			
Pisac			
Raqchi			
Tipón			
Saqsaywaman			

Nota: En las seis Llaqtas Incas investigadas, se advierte la presencia de afloramientos rocosos, que pareciera fueron expuestos en el Kay Pacha (superficie) ex profesamente por los Incas, como una forma de recordarse permanentemente, que estaban emplazados en el seno mismo de la Pachamama y que además, debía estar presente a los ojos del Inti Tayta (Pachacamac) desde el Hanan Pacha (cielo); por ello, muchos de estos afloramientos rocosos no sólo fueron labrados, sino también simulaban la forma misma de la Pachamama que los cobijaba. Es quizá, ese simbolismo, que tanto manejaron los Incas para evitar dañar el medio ambiente, sacralizarlo al extremo, de modo que no exista posibilidad de agredirlo, para garantizar su conservación, y ser los directos beneficiarios. Fotografías, archivo personal, 2017.

5.1.6 Conclusiones

✓ De las condiciones Geológicas

Las condiciones geológicas del emplazamiento de las Llaqtas Incas de **Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman**, están caracterizadas por conformar predominantemente *macizos rocosos* de origen *volcánico - ígneo* como: *granodioritas, andesitas y basalto*; así mismo, por afloramientos rocosos de origen *sedimentario* como las *calizas*; y, *metamórficas* como la *arenisca cuarcítica*; todas ellas de comprobada competencia geotécnica.

Presentan *morfología compleja y horizontes edáficos* poco desarrollados, esto por la delgada capa de suelo y los abruptos relieves; que facilitó las labores de emplazamiento de las Llaqtas Incas y, evitó grandes movimientos de suelo.

Los macizos rocosos y sus afloramientos *presentan diaclasas y fallas de formación*, éstas últimas *inactivas* por la no ocurrencia de sismos a partir de ellas; en consecuencia, las Llaqtas Incas no son afectadas por estas fallas; sin embargo, se advierte en esta geología, erosión hídrica, que amerita ser investigada por especialistas, para evitar cualquier efecto negativo que ponga en riesgo la conservación de las Llaqtas Incas.

Por las evidencias físicas, puede afirmarse, que los Incas tenían *gran dominio de criterios geológicos*, como factor esencial para la elección de los emplazamientos, el diseño, y la construcción de las superestructuras de las Llaqtas; pues, aquellas irregularidades geológicas fueron acondicionadas mediante andenerías multipropósito (agricultura, estabilización de taludes y, defensa); mientras tanto, los riscos y crestas rocosas fueron destinados para el emplazamiento de las Llaqtas, manteniéndolas muy próximas al Inti Tayta.

El *sistema de abastecimiento de agua* fue emplazado *por sectores que no presentaban riesgo de inestabilidad y erosión*, garantizándose así una subsistencia segura; pero sobre todo, sin poner en riesgo la cimentación de las Llaqtas Incas.

✓ **De las condiciones Climáticas**

Las condiciones climáticas, de las Llaqtas Incas de **Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman** están caracterizadas por *intensas y medianas precipitaciones pluviales*; que en su momento, fueron enfrentadas acertadamente por los Incas, a partir de los sistemas de drenaje y evacuación, que hoy están inoperativos, coadyuvado por la ausencia de cubiertas de los recintos; que generan la silenciosa e irreversible degradación superficial de materiales y, el colapso previsible de las estructuras de cimiento; advirtiéndose este efecto con *mayor incidencia en Machupicchu*, contribuida por la elevada humedad que ésta presenta.

No existe presencia de *nivel freático*, en las Llaqtas Incas; sin embargo, la manifestación prolongada de las *lluvias* en los meses de diciembre a marzo, viene generando erosión hídrica a nivel superficial y, con ella, todos los efectos nocivos en el material pétreo; así mismo, por gravedad, *el agua se va infiltrando en el subsuelo*, poniendo en riesgo los cimientos de las superestructuras, que tanto esfuerzo demandó a los Ingenieros Incas en alejarlos del agua; pues, era la garantía de su conservación y supervivencia.

✓ **De los efectos Sísmicos**

Para no exponerse al efecto sismo, los Incas eligieron *óptimas condiciones locales* para el emplazamiento de las Llaqtas de **Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman**; localizándose en el departamento de Cusco, calificada como *Zona sísmica 2*, donde las intensidades oscilan entre II a V en la escala de Mercalli; y no generan efectos devastadores como en las Zonas sísmicas III, IV y V.

Eligieron *zonas conformadas por rocas duras*, donde la amplificación de *ondas sísmicas es corta y rápida*; y, en consecuencia, de efectos poco dañinos; esto explica, que los cuatro sismos más devastadores de la historia cusqueña, no hayan afectado la integridad de las Llaqtas Incas.

De acuerdo a la Norma Técnica E.030, de Diseño Sismo resistente, del Reglamento Nacional de Edificaciones, 2006, las superestructuras Incas, están calificadas como

edificaciones de importancia, con un factor de uso de 1.3., que implica prever sistemas de evacuación masiva y, a tiempo, por la importante concentración de personas que en ellas se genera; además, considerando la condición patrimonial que presentan y, la necesidad de conservarlas para las generaciones futuras.

Por su estructura morfológica, las Llaqtas Incas están calificadas como *edificaciones regulares con diseño antisísmico*; que contribuyó a su conservación; lo que demuestra, que los Incas, no dejaron ningún eslabón suelto, como para exponer las Llaqtas al mínimo peligro; hecho que los califica con un genio ingenieril y arquitectónico muy elevado, cuyo propósito primordial era la conservación de la Pachamama; por que, si ella estaba bien, entonces se garantizaba la integridad de las Llaqtas.

✓ **De las condiciones del Relieve**

El relieve de los emplazamientos de las Llaqtas Incas de **Machupicchu, Ollantaytambo, Pisaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman**, fue transformado en la concepción ideológica de proteger a la Pachamama; liberándola superficialmente del material degradado por meteorización, intemperismo y erosión, para luego estabilizarla desde las bases de la montaña hasta la cima; cubriéndola con andenerías de contención, que no solo posibilitaban la conformación de amplias y artificiales plataformas agrícolas, sino sobre todo, la colección de aguas pluviales que eran direccionadas al sub suelo a través de sofisticados sistemas de drenaje subterráneo, con la finalidad de alejar el agua de los cimientos de las superestructuras.

Eligieron erigir las superestructuras de las Llaqtas Incas, en las crestas y riscos más elevados de la montaña rocosa, que presenta mayor estabilidad y seguridad; siguiendo una larga práctica ancestral de sus antecesores Lucre y Killke, en la concepción ideológica de mantenerse próximos al Inti Tayta (Pachacamac), en el Hanan Pacha. En el Kay Pacha (superficie), emplazando superestructuras que no aplasten a la Pachamama, gestionado desde el Ukupacha (sub suelo), a partir de los Rellenos Controlados Inca, que constituyen la continuidad de la roca.

5.2 Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman

5.2.1 Descripción.

Tabla 5.11

Descripción de las Llaqtas Incas

Llaqta Inca	Descripción
Machupicchu Ollantaytambo Písaq Raqchi Tipón Saqsaywaman	<p>Llaqtas del noveno Inca Cusi Yupanki, que toma el nombre de Pachacutec, Intic churin (transformador del mundo, hijo del sol), al asumir el mando del Cusco (S. XV); donde junto a su Panaka (familia), los Huillcahumas (sacerdotes) y algunos Ccapac (ricos e ilustres) invitados, pasaba temporadas de huch'uy samainy (descansos cortos), atendidos por los Yanaconas (criados), bajo la supervisión del Pachacc (mayordomo del Inca en la Llaqta); contaban con toda la infraestructura y equipamiento necesarios para una óptima estancia.</p> <p>Las Llaqtas estaban constituidas por el Sapa Incaq Wasin (casa del Inca Supremo), los Q'apana (Templos o adoratorios) al Inti Tayta (padre sol), por quién celebraban fastuosas ceremonias rituales de veneración, así como a otras deidades, como el Unu (agua), la Quilla (luna) y, también a su Pachamama (madre tierra), a la cual la personificaban en rocas labradas y, emulaban tener In Situ a todas las Pachamamas del entorno a través de las Waqas (rocas sagradas), atendiendo así al Hanan Pacha (cielo), Kay Pacha (superficie) y el Uku Pacha (sub suelo).</p> <p>Complementariamente, contaban con Qolqas (almacenes), con Kallanqas (ambientes de reunión masiva), con Llankaq Wasi (talleres), Wayranas (talleres artesanales) y con Yanaconas wasin (vivienda de los sirvientes o criados). Respecto a la infraestructura de abastecimiento, contaban Chaqras (plataformas agrícolas) y Uno Puquios (canales de suministro de agua). Presentan una ubicación estratégica, para el dominio visual de todo el entorno y estrategia de defensa, contándose con las Pukaras (torres de vigilancia); todo articulado por el Qapaq Ñan (camino real).</p> <p>Las Llaqtas Incas son similares a nivel funcional y formal; sin embargo, cada una de ellas, tiene logros propios; así, Machupicchu dominó la estabilización de taludes en pendientes casi verticales; Ollantaytambo manejó los deslizamientos a través de sus andenerías sólidas; Písaq, transformó el agreste relieve a través de finas andenerías; Raqchi, manejó un microclima óptimo en condiciones adversas (puna); Tipón, logró el dominio agrícola y acuífera; y, Saqsaywaman creó su propia Pachamama con los descomunales bloques pétreos.</p>

Nota: Adaptado de Rostworowski, 2015.

5.2.2 Ubicación y Accesos

Las Llaqtas Incas de **Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman**, están ubicadas en ámbitos dominados por la Cordillera de los Andes Peruanos, que en su momento fue azotado por los terremotos y devastado por los volcanes; para los Incas, vivir en las cumbres y cimas de los andes fue uno de los retos geológicos exitosamente logrados; además de conseguir microclimas a través de la utilización de terrazas de cultivo, que no sólo les permitió incrementar área agrícola, sino también estabilizar los taludes y transportar el agua de las montañas. Los Incas pensaban en vertical, por ello, manejaron y trabajaron su agricultura en diferentes alturas, si una fallaba, contaban con las otras restantes.

En este contexto, las características geográficas de los emplazamientos marca diferencias sustanciales en cuanto al tipo de superestructuras erigidas; así, la Llaqta de Machupicchu, ubicada en una zona intermedia entre el dominio andino y el amazónico, donde los relieves son abruptos y las laderas escarpadas, con clima de lluvias intensas, que la hacen propensa a deslizamientos, coadyuvado por la elevada humedad, hizo que los Incas concentraran su labor constructiva en la estabilización de la montaña con un profuso sistema de contención, que paralelamente ampliaba en los sectores adecuados la superficie agrícola; así mismo, estas características adversas, condicionaron la ubicación de la zona urbana en la cima de la montaña.

Por otro lado, en el caso de las Llaqtas de Ollantaytambo y Písaq, emplazadas en ámbitos geográficos similares, caracterizado por constituir un Valle Interandino, con relieves empinados, presencia de lluvias de mediana intensidad, y clima templado a frío, con antecedentes de fallas geológicas milenarias, condicionó priorizar a los Incas trabajos de estabilización de Suelos, con la operación de espectaculares obras de andenería Inca, destinando las crestas empinadas para asentar las edificaciones. Las Llaqtas de Raqchi y Tipón, comparten la particularidad de emplazarse en concavidades producto de la erupción volcánica, con climas secos y fríos, presipitaciones pluviales de mediana intensidad.

Para maximizar la extensión superficial aprovechable tanto en Raqchi como en Tipón, los Incas desarrollaron rellenos masivos para uniformizar la superficie; así, en el caso Raqchi, nivelaron toda la superficie hasta lograr una extensa planicie para asentar la Llaqta y, en el caso Tipón, por el relieve empinado implementaron sistemas de contención que permitió contar con amplias plataformas agrícolas; privilegiando el emplazamiento de la Llaqta en las zonas más elevadas, alejadas del riesgo de deslizamiento. El caso de la Llaqta de Saqsaywaman es particular, pues además de estar en una zona de clima seco y frío, con precipitaciones pluviales de mediana intensidad, los Incas necesitaban contar con una montaña artificial.

Para tal efecto, se realizaron rellenos masivos y por niveles, empleándose bloques megalíticos como contención de los rellenos; consecuentemente, el emplazamiento de las Llaqtas se dio en función a sus particularidades locales; pero comparten también similitudes en su configuración constructiva, así, las zonas urbanas fueron ubicadas en los sectores más elevados, de relativa mayor estabilidad; se separó espacialmente la zona urbana de la agrícola; y, a decir de Canziani (2009), "... los andenes... evidencian que su construcción trascendió los aspectos... productivos o funcionales, primando los criterios estéticos, que llevaron a modelar el paisaje... integrando en él los asentamientos y la volumetría de sus edificaciones".

Cabe precisar, que los Incas con sensatez, prudencia y buen juicio, evitaron sobrecargar los suelos de fundación, sobre todo en aquellos emplazamientos donde realizaron rellenos masivos; así, en el caso de Raqchi, disminuyeron los esfuerzos actuantes de las superestructuras operando en las bases o fustes, a manera de sobrecimientos, muros pétreos complementados con muros de adobe de sección diferenciada en su base y coronación; así mismo, implementaron construcciones circulares (sector Qolqas), para atenuar los efectos de las fuertes corrientes de aire que se suscitan en esta altoplanicie, implementándose además arboledas para mejorar las condiciones climáticas y generar un microclima confortable.

En cada uno de estos emplazamientos, los Incas han procurado una particular integración paisajística, cuidando detalles en zonas específicas; donde las áreas urbanas están caracterizadas por presentar densos conjuntos de superestructuras con hastiales organizadas alrededor de patios, con angostos corredores y miradores con privilegiadas visuales del entorno, donde los accesos son difíciles y limitados. La mampostería de las Llaqtas es elaborada con diferente tipo de tratamiento de las piezas líticas exprofesamente para atenuar los efectos de sismos, además de soterrar las primeras hiladas de base de los muros y compactarlos para lograr mayor estabilidad de las superestructuras Incas.



Figura 5.16: Emplazamiento Inca en el seno de la Pachamama (montaña, madre tierra), exprofeso difícil acceso como estrategia de defensa y protección; máximo dominio visual del entorno; y, manejo de distintos pisos altitudinales; constituyen entre otras, las estrategias de ubicación de las Llaqtas Incas de: (1) Machupicchu; (2) Ollantaytambo; (3) Pisaq; (4) Raqchi; (5) Tipón; (6) Saqsaywaman. Fotografías, archivo personal, 2017.

Tabla 5.12*Ubicación geográfica y accesos*

Llaqta Inca	Ubicación	Accesos
Machupicchu	<i>Dist.: Machupicchu</i> <i>Prov.: Urubamba</i> Lat. sur: 13°10'19" y 13°14'00" Long. oeste: 72°30'5" y 72°36'33"	A 112.5 Km. por línea férrea Cusco – Machupicchu; y, a 8.5 Km. del Pueblo de Aguas Calientes vía carretera afirmada.
Ollantaytambo	<i>Dist.: Ollantaytambo</i> <i>Prov.: Urubamba</i> Lat. sur: 13°15'15" Long. oeste: 72°10'20"	A 68 Km. por vía férrea y a 81 Km. por carretera asfaltada (Cusco-Chincho-Urubamba-Ollantaytambo).
Pisac	<i>Dist.: Pisac</i> <i>Prov.: Calca</i> Lat. sur: 13°22'40" Long. oeste: 71°49'03"	A 33 km. por vía asfaltada Cusco-Calca; por camino peatonal la distancia es de 30 km., hasta el Intihuatana.
Raqchi	<i>Dist.: San Pedro</i> <i>Prov.: Canchis</i> Lat. sur: 4°10'488" Long. oeste: 71°24'198"	A 121 Km. por vía asfaltada Cusco-desvío Raqchi; y, a 600 m. del desvío Raqchi al Templo de Wiracocha.
Tipón	<i>Dist.: Oropesa, CC. Choquepata</i> <i>Prov.: Quispicanchis</i> Lat. sur: 13°34' Long. oeste: 71°47'	A 4 Km. del Km. 19.5 de la carretera Panamericana Sur; pasando por el Poblado de Tipón.
Saqsaywaman	<i>Dist.: Cusco</i> <i>Prov.: Cusco</i> Lat. sur: 13°30'06" Long. oeste: 71°59'06"	A 2 Km. de la ciudad de Cusco, por vía asfaltada Cusco – Valle Sagrado.

Nota: Se ubican en el departamento de Cusco, no por mera coincidencia; sino, como resultado del análisis previo, que los Ingenieros Incas hicieron respecto a las Condiciones Locales de Emplazamiento para las Llaqtas; conociendo y, habiendo experimentado efectos devastadores tanto climáticos como sísmicos; pues la idea era perennizarse en el tiempo, y ello dependía mucho del tipo de suelo de fundación y las condiciones del entorno; esta determinación fue acertada, ya que en pleno Siglo XXI contamos con Llaqtas Incas del Siglo XV. A todas las Llaqtas se llega por vía terrestre, a través de vías asfaltadas, utilizando transporte público y privado; a excepción de Machupicchu, al cual se llega, por vía férrea; además, todas son accesibles por rutas peatonales, conocidas como Caminos Inca, que forman parte del sistema del Qapaq Ñan (camino real). Adaptado de los Planes Maestros vigentes de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman.

5.2.3 Topografía

Los Arquitectos e Ingenieros Incas, no dejaron memorias descriptivas, especificaciones técnicas, ni planos de las superestructuras emprendidas en cada una de sus Llaqtas; lo que nos legaron, es mucho más que todo eso; Ellos, prefirieron cedernos su obra misma, la evidencia In Situ y, en 3D; la cual, no necesita interpretar ni filosofar, sólo precisa una aguda observación para leer y reconocer la técnica empleada. En este contexto, si la topografía queremos conocer, los planos topográficos están expuestos In Situ, cada una de las curvas de nivel están dibujadas y representadas en el terreno mismo, sólo basta apreciar las siluetas de las andenerías desde la distancia que se quiera, o ubicarnos en una de ellas para saber a qué altura estamos.

Los Incas sabían que la pendiente topográfica y la altura de las laderas son factores que condicionan el desarrollo de procesos de deslizamiento, porque contribuyen a la inestabilidad de los suelos de fundación; pues, éstos tienen una altura crítica y un ángulo máximo; entonces, razonablemente evitaron alterar esos parámetros de límite, y más bien, se acomodaron a los ángulos de reposo constante de las pendientes topográficas, impidiendo desequilibrios gravitacionales; hecho que ampliamente puede comprobarse In Situ, por la subsistencia de más de cinco siglos de sus superestructuras; que, además, se mimetizan e integran armoniosamente a la topografía natural de sus emplazamientos, en el seno de su Pachamama (madre tierra).



Figura 5.17: Integración paisajística de la obra Inca; armonía con la topografía natural del emplazamiento de las Llaqtas (Písaq). Fotografías, archivo personal, 2017.

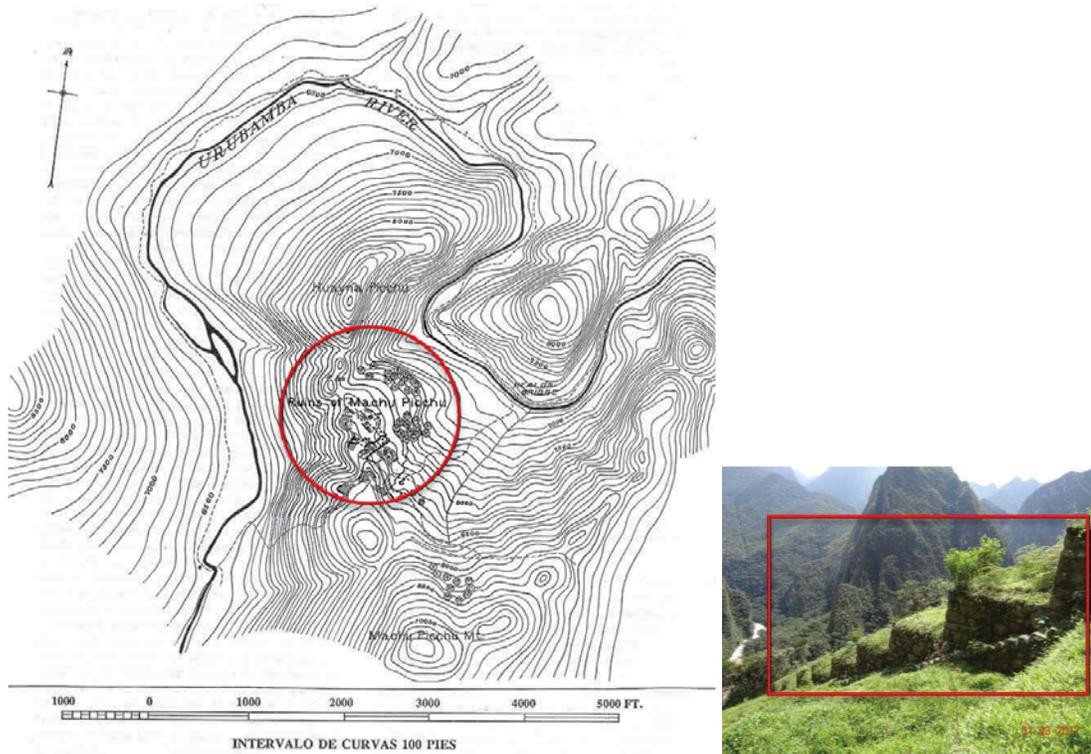


Figura 5.18: Características topográficas de la Llaqta Inca de **Machupicchu**. La obra Inca se adecua a la pendiente natural del emplazamiento, lográndose integración a la topografía y paisaje natural. Adaptado de documento Expedición Yale, 1911. Fotografía, archivo personal, 2017.



Figura 5.19: Características topográficas de la Llaqta Inca de **Ollantaytambo**. Los elementos topográficos artificiales utilizado por los Incas como: muros de contención, andenes, plataformas artificiales, se incorporan condicionados al paisaje natural, conservando, resaltando y favoreciendo la formación de un paisaje de calidad. Adaptado de Plan Maestro del Parque Arqueológico de Ollantaytambo, 2005. Fotografía, archivo personal, 2017.

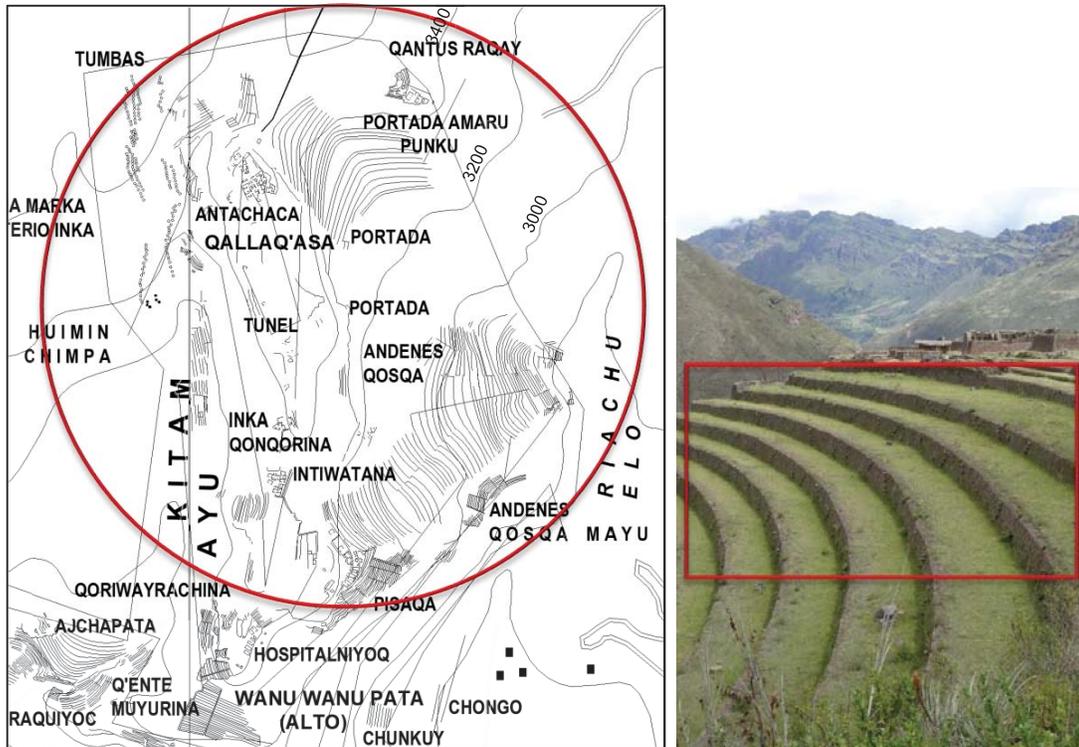


Figura 5.20: Características topográficas de la Llaqta Inca de **Pisac**. Los Incas con su obra, logran integrarse al paisaje natural en el que se insertan, evitando impactar lo menos posible la topografía primigenia, mimetizándose con la Pachamama que los cobija. Adaptado del Plan Maestro del Parque Arqueológico de Pisac, 2005. Fotografía, archivo personal, 2017.

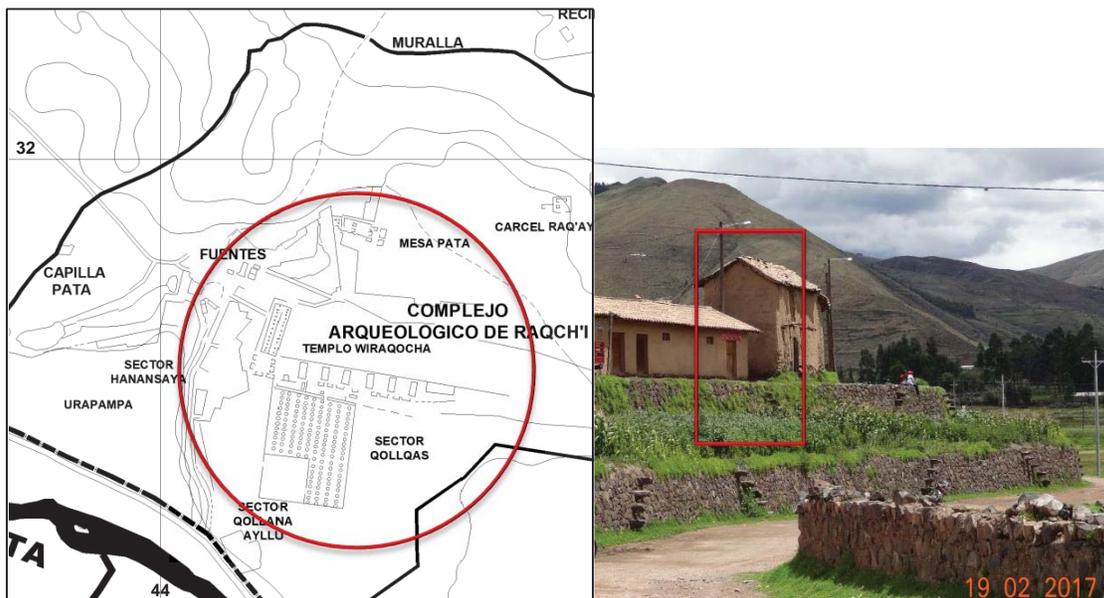


Figura 5.21: Características topográficas de la Llaqta Inca de **Raqchi**. La integración topográfica en este caso, va acompañada de la integración de la vegetación preexistente, por el emplazamiento de la Llaqta en un altiplano; conservando la textura y la cantidad de masa forestal, que actúa como cortina frente a los vientos intensos que se producen en la zona. Adaptado de la Oficina de Catastro, DRCC, 2017. Fotografía, archivo personal, 2017.



Figura 5.22: Características topográficas de la Llaqta Inca de **Tipón**. Los Incas, se enfocaron en conservar el paisaje primigenio de la Pachamama, no sólo a partir de la adecuación topográfica, sino también, manteniendo el paisaje de flora y cubierta vegetal. En el caso Tipón, aprovecharon el foso generado por una explosión volcánica, que propició un microclima óptimo para la máxima experimentación de producción agrícola. Adaptado de Castillo, 2009. Fotografía, archivo personal, 2017.

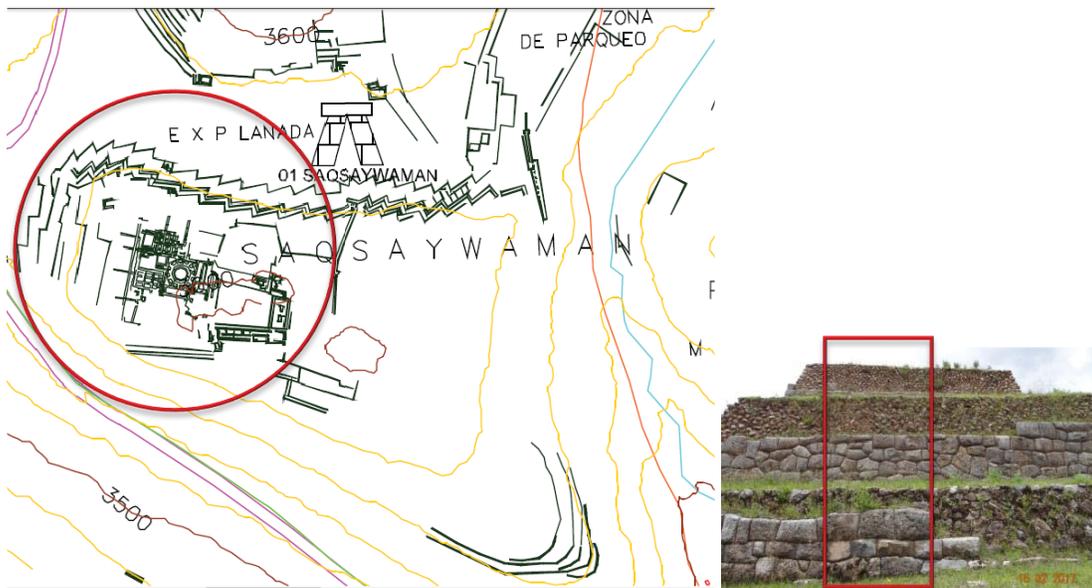


Figura 5.23: Características topográficas de la Llaqta Inca de **Saqsaywaman**. No impactar la topografía natural y, preservar hitos y elevaciones topográficas naturales, salvaguardando su visibilidad y, reforzando su presencia como referencia visual del emplazamiento y su función como espacio de disfrute escenográfico, son características de la obra Inca. Saqsaywaman, está emplazado en la capital del imperio, su majestuosidad había que fabricarla con mayor profusión, en un entorno no muy elevado como en el resto de Llaqtas. Adaptado del Plan Maestro del Parque Arqueológico de Saqsaywaman, 2004. Fotografía, archivo personal, 2017.

5.2.4 Situación Legal

De acuerdo al Inventario y Delimitación de Parques Arqueológicos del departamento de Cusco, las Llaqtas Incas de **Machupicchu**, **Ollantaytambo**, **Pisac**, **Raqchi**, **Tipón** y **Saqsaywaman**, forman parte de los Parques Arqueológicos del mismo nombre, declarados como *Integrantes del Patrimonio Cultural de la Nación*; que, de acuerdo a la *Ley General del Patrimonio Cultural de la Nación*, Ley 28296, en sus numerales II y III, del Título Preliminar, son declarados como tales por su importancia, valor y significado paleontológico, arqueológico, arquitectónico, histórico, artístico, militar, social, antropológico, religioso, tradicional, etnológico, científico y tecnológico.

El artículo 6° de la Ley 28296 (Ley General del Patrimonio Cultural de la Nación), señala: “Todo bien inmueble integrante del Patrimonio Cultural de la Nación de carácter prehispánico es de propiedad del Estado, así como sus partes integrantes y/o accesorias y sus componentes descubiertos o por descubrir, independientemente de que se encuentre ubicado en predio de propiedad pública o privada. Dicho bien inmueble integrante del Patrimonio Cultural de la Nación tiene la condición de intangible, inalienable e imprescriptible, siendo administrado únicamente por el Estado”. En la Tabla 5.13, mostramos la situación físico legal de las Llaqtas.

Tabla 5.13

Saneamiento Físico Legal de Llaqtas Incas

Llaqta Inca	Época	Área (m ²)	Perímetro (ml)	Norma Legal (Resolución Directoral Nacional)	Fecha	N° Pág. El Peruano
Machupicchu	Inca	32 592	90 400	D.S. N° 001-AA-81	08/01/81	-
Ollantaytambo	Inca	34 800	156 350	R.D.N. N° 395-2002	13/05/02	223748
Pisac	Inca	9 063	43 340	R.D.N. N° 429-2002	17/05/02	223750
Raqchi	Inca	1097	12 312	R.D.N. N° 392-2002	13/05/02	223747
Tipón	Inca	239	6 445	R.D.N. N° 393-2002	13/05/02	223746
Saqsaywaman	Inca	3 093	26 550	R.M. N° 517-2002	13/05/02	223746

Nota: D.S. = Decreto Supremo; R.D.N. = Resolución Directoral Nacional; R.M. = Resolución Ministerial. Las seis Llaqtas Incas investigadas forman parte de extensos Parques Arqueológicos; el estudio se realiza exclusivamente en la Llaqta representativa de los Parques. Adaptado de la Dirección de Catastro de la Dirección Regional de Cultura Cusco, 2010.

5.2.5 Tipo de Edificación

Las edificaciones conformantes de las Llaqtas Incas de **Machupicchu**, **Ollantaytambo**, **Pisac**, **Raqchi**, **Tipón** y **Saqsaywaman**, encajan en la clasificación de *Estructuras Especiales*, *tipo A*, de acuerdo a la Tabla N° 1, de la Norma Técnica Peruana E-050, de Suelos y Cimentaciones; esto, *en función a la transmisión de cargas concentradas importantes al suelo de fundación*; sin embargo, la clasificación que le correspondería tendría que estar referida exclusivamente a su *factura Inca* y el singular sistema constructivo en piedra; pues, se trata de Wasis (edificaciones), cimentadas en macizos rocosos (Q'aaqas), construidas enteramente en Rumi (piedra), con el sistema de Pirqa (apilado).

Están *caracterizadas por integrarse a las diferentes pendientes topográficas*, donde los planos están articulados por centenares de Zarunas (escalinatas); estabilizadas por Perk'as (muros) de contención o *andenes*, que ex profesamente *rompen continuidad y paralelismo longitudinal para disipar las cargas verticales*; y, dibujan el perfil del relieve con formas rectilíneas y semicirculares desde las bases hasta la cima de la Pachamama (macizo rocoso). Ningún espacio disponible es desperdiciado por la arquitectura Inca, se aprovechan las concavidades y convexidades del emplazamiento, se libran los desniveles con edificaciones de uno y dos niveles, lográndose máxima fusión entre la Pachamama y la obra Inca (Figura 5.24).



Figura 5.24: Edificación Inca Tipo. (1) Machupicchu; (2) Ollantaytambo; (3) Pisac; (4) Raqchi; (5) Tipón; (6) Saqsaywaman. Fotografías, archivo personal, 2017.

5.2.6 Movimiento de Suelo

Los emplazamientos elegidos para la construcción de las Llaqtas Incas de **Machupicchu**, **Ollantaytambo**, **Pisac**, **Raqchi**, **Tipón** y **Saqsaywaman**, al estar caracterizados por constituir macizos rocosos, presentaban a la llegada de los Incas (ver Figura 5.25), estratos o capas meteorizadas, intemperizadas y erosionadas a diferentes escalas; lo que obligó a removerlas superficialmente hasta lograr un suelo de fundación competente, roca sana; sin embargo, ello no implicaba una remoción intensiva de suelos, por la naturaleza misma de la roca y sus condiciones edáficas; además, simbólicamente para los Incas, había que trastocar lo menos posible a la Pachamama enferma y respetar al máximo su relieve morfológico primigenio.

En este contexto, puede afirmarse que el movimiento de suelos para la construcción de los cimientos de las edificaciones Incas, se realizó fundamentalmente para estabilizar los taludes naturales, a través de sistemas de andenerías que hacían las veces de muros de contención que soportaban las plataformas agrícolas; rellenar las concavidades profundas, optimizando el uso como espacios abiertos de uso colectivo y, a la vez grandes colectores en el sub suelo que alejaban el agua hacia drenes fuera de los cimientos de las superestructuras; revestir las convexidades expuestas y convertirlas en adoratorios que se aproximaban por la altitud hacia el Hanan Pacha (cielo); y, habilitar los riscos en plataformas para la ubicación de sus Llaqtas.



Figura 5.25: Contexto natural de las Llaqtas Incas; (1) Machupicchu; (2) Ollantaytambo; (3) Pisac; (4) Raqchi; (5) Tipón; (6) Saqsaywaman. Fotografías, archivo personal, 2017.

5.2.7 De la Cimentación

Los referentes más próximos que los Incas tenían en cuanto a planificación de Llaqtas, eran los Wari, representados en Cusco por los Pikillaqta, emplazada en el distrito de Lucre, de la provincia de Quispicanchis; y, respecto, al manejo de la piedra como material de construcción, lo rescatan del altiplano Qolla, de los Tiawanaku. No se registra otros referentes que puedan haber influido en la *calificada técnica constructiva Inca*, lo que sugiere que se trata de un conocimiento propio, basado en la experiencia, la observación, el ensayo, el error hasta lograr la eficiencia y eficacia constructiva; en este contexto, registramos dos tipologías del sistema suelo-cimiento-estructura que se operativizan en las Llaqtas Incas; la primera, la mostramos en la Figura 3.26, donde las superestructuras se apoyan directamente en el macizo rocoso.



Figura 5.26: Sistema: Superestructura - macizo rocoso; donde el muro Inca hace las veces de cimiento en su base de contacto directo con el macizo rocoso. (1) Machupicchu, (2) Ollantaytambo, (3) Pisaq, (4) Raqchi, (5) Tipón, (6) Saqsaywaman. Pachamama con mínimo impacto, es una estrategia Inca para la supervivencia de las Llaqtas; por ello, sí se podía cimentar directamente en el macizo rocoso, así lo hacían. Fotografías, archivo personal, 2017.

En efecto, en la Figura 5.26, se evidencia la primera tipología del sistema suelo –cimiento – superestructura identificada; donde, el muro Inca es apoyado directamente sobre el macizo rocoso; es decir, los muros que constituyen el cerramiento de las edificaciones, cumplen a la vez funciones resistentes y se erigen directamente a partir del nivel original del macizo rocoso o Pachamama, sin ninguna clase de cimentación más que el anclaje preparado directo; pues, los arranques de los muros dibujan con precisión las irregularidades del macizo; de hecho, las cargas que estos muros transmiten al macizo rocoso son considerables, lo que evidencia, desde el punto de vista geotécnico, la comprobación de la conveniencia del apoyo sobre roca dura.

Puede identificarse entonces, una *primera regla general Inca*: toda edificación debía erigirse sobre bases sólidas, constituidos por macizos rocosos, en la Pachamama; y, si para ello, se precisaba adentrarse en la piel misma, para proveer de un adecuado asiento y evitar deslizamiento de la hilada de base del muro, había que hacerlo; y, si el muro era de piedra labrada, el macizo rocoso de base debía parcialmente tallarse también, para producir un mejor empotramiento; tallándose además, juntas de asentamiento en la superficie del macizo rocoso para recibir la hilada de base del muro. Simbólicamente, esto significaba para los Incas, morar en el seno mismo de la Pachamama, empotrada a ella, integrada a ella para la eternidad.

Sin duda, la resistencia de los macizos rocosos como soporte directo de las superestructuras Incas, era óptima; sin embargo, debe quedar claro, que esta práctica estaba limitada generalmente a riscos cuyos relieves eran muy abruptos, pero que sin embargo, no podían ser desaprovechados, tampoco desatendidos; recordemos que, la obra Inca era un homenaje a la Pachamama (madre tierra), y en consecuencia, había que tratarla y embellecerla en todos sus extremos. Pues bien, advertimos una *segunda regla general Inca*, crear un elemento que los ligue con toda garantía a su Pachamama; un elemento que evidencie quién es la Pachamama y quién se adhiere a ella; ese elemento ligante, lo llamaron *cimiento*.

El cimiento tenía que garantizar óptima ligazón entre el suelo y las superestructuras Incas.

Los Incas empezaron a construir cimientos con pleno conocimiento geotécnico, sabiendo que éstos funcionarían en primer término, como elemento que los ligaba textualmente a la Pachamama; pero además, constituían elementos que repartían y transmitían equilibradamente las cargas producidas por sus superestructuras hacia la Pachamama o suelo de fundación; a quién no se podía sobrecargarla directamente y, en un solo punto. Por otro lado, los Incas, sabían que estaban construyendo en zonas elevadas, sobre la Pachamama (macizo rocoso) confiable, donde desde el punto de vista mecánico, no se necesitaban cimientos profundos, sino sólo superficiales; que les posibilite arranques de muro en posición y, a nivel.

Consecuentemente, el insertarse en la Pachamama (excavación de zanjas), hasta alcanzar el Uku Pacha (sub suelo), para la conformación de cimientos corridos (nexo ligante) y, apoyar con mayor seguridad sus superestructuras (necesidad geotécnica), les facilitaba operaciones de replanteo y nivelación, así como, oportunidades compositivas y constructivas. Por ello, los cimientos, debían estar diseñados y conformados eficazmente, *tercera regla general Inca*, para transmitir competentemente las cargas verticales (peso propio y, cargas vivas) hacia el Uku Pacha; además, debía coadyuvar a soportar las cargas horizontales, que podrían generarse en el Kay Pacha (superficie), como consecuencia del efecto sismo.

En este contexto, los cimientos Incas no fueron simples vertidos directos de los remanentes de los movimientos de suelo; por el contrario, constituyeron quizá el elemento más elaborado y que mayor tiempo les exigió; aproximadamente el 60 % de tiempo de construcción, los Incas lo dedicaron a las cimentaciones (Wright, 2006); pues, había que garantizar la perennidad de sus obras en el seno de su Pachamama, sin ningún tipo de falla. Además, la constitución de los cimientos tendría que aproximarse al máximo a las características mecánicas de la Pachamama (macizos rocosos) que los sustentaba, lo que implicaba, trabajar In Situ y con el material de la zona, ello garantizaría evitar probables deformaciones y asentamientos.

Para evitar asentamientos, tendría que implementarse estrategias técnicas óptimas.

Fue fundamental entonces, la aplicación de dos métodos constructivos; el primero, la compactación de los cimientos y, el segundo, el confinamiento de los mismos, que les servían de contención; pero además, garantizaba responder eficientemente a cargas axiales, resistir mejor las fuerzas cortantes y prevenir pandeos. Estos conocimientos, seguramente no con esa terminología, pero sí de amplio entendimiento y manejo de las características físicas y mecánicas de los macizos rocosos, hicieron que los Incas llegaran a soluciones constructivas extraordinariamente adelantadas para su tiempo, y la mayor evidencia, es contar con sus construcciones en pie habiendo pasado más de cinco siglos.

Existe una variedad de solicitudes de cimentación en las Llaqtas Incas; sin embargo, para efectos del presente estudio, nos concentramos en las de las edificaciones de uno y dos niveles; muros de contención, plataformas agrícolas y espacios abiertos de uso colectivo; cada uno de ellos, está caracterizado por un tratamiento específico, en función al uso y la envergadura estructural que representa; pero siguiendo siempre estándares constructivos preestablecidos; así, podemos afirmar, que los Incas, emplearon como cimentación lo que pasamos a denominar a partir de esta investigación, como *Rellenos Controlados Incas*, contruidos con material seleccionado In situ, del mismo substrato del macizo rocoso.

Los *Rellenos Controlados Incas*, al ser conformados por el mismo material del substrato rocoso del suelo de fundación (características físicas y mecánicas), tendrían que presentar las mismas condiciones de apoyo, de ahí la importancia de su compactación y confinamiento en todo su espesor; así mismo, la conformación de estos *Rellenos Controlados Incas*, tendrían que hacerse por capas y de espesores manejables, para facilitar la compactación y garantizar su eficacia. Una característica relevante en estos *Rellenos Controlados Incas*, es la gradación ascendente de las gravas, pero además, en este trayecto, las Gravas son bien graduadas, lo que posibilita un encaje óptimo de las piezas líticas, y en consecuencia, solidez.

Los Rellenos Controlados Inca constituyen el mayor aporte técnico para cimentaciones.

Lo extraordinario de los Incas, que pocos advierten, es la gran capacidad de comunicación, a través de un lenguaje formal, impreso en sus obras; si bien es cierto, no dejaron nada escrito, Ellos quizá consideraron más trascendente y perenne, dejar la evidencia misma In Situ; sabían que la condición humana era fugaz y, no podían perecer con ellos sus conocimientos; dejándolos como un libro abierto a los ojos y observación de quién quisiera conocer su obra; en efecto, en el caso del detalle de sus cimientos y sus *Rellenos Controlados Incas*, éstos no solo permanecen en el Uku Pacha, sino también, están expuestos en el Kay Pacha, como una extensión hacia el Hanan Pacha; pasando a recrear dicho *concepto*, en las imágenes siguientes.



Figura 5.27: Conformación de Cimientos Inca - Machupicchu; a partir de *Rellenos Controlados Inca*; notamos en las imágenes, la extensión de la composición de los cimientos en el Kay Pacha (superficie); resaltando en la base piezas de gran tamaño, que gradualmente van disminuyendo, conforme alcanzan la coronación del muro; pero, siempre alternadas con piezas menores para asegurar óptima compacidad, sin vacíos, garantizándose la solidez y estabilidad necesarias. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.28: Conformación de Cimientos Inca - Ollantaytambo; a partir de *Rellenos Controlados Inca*; en el caso de la Llaqta Inca de **Ollantaytambo**, advertimos en el Kay Pacha (superficie), a lo largo de toda la Llaqta, la extensión de la composición formal de los cimientos Incas desde el Uku Pacha (sub suelo), constituidos en la base (- X metros) por el macizo rocoso, representado por piezas de gran tamaño, seguido de bolones de gradiente descendente, que incluyen piezas pequeñas que llenan los vacíos, hasta alcanzar la coronación del muro. Técnica operada por los Incas, en el Uku Pacha y Kay Pacha. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.29: Conformación de Cimientos Inca - Písaq, a partir de *Rellenos Controlados Inca*, los mismos que desde el Uku Pacha (sub suelo), se extienden hasta el Kay Pacha (superficie), mostrándonos, cómo se conforman y el nivel de compactación que presentan, utilizándose para ello, gravas de gradación variada. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.30: Conformación de Cimientos Inca - Raqchi, a partir de *Rellenos Controlados Inca*; cuya composición no necesita una nivelación lineal, por el contrario, buscan que las gravas de variada gradación se acomoden libremente, de modo que cubran todos los espacios vacíos, asegurando máxima compactación y solidez; y esto lo advertimos en la superficie, en cada uno de los muros de la Llaqta. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.31: Conformación de Cimientos Inca - Tipón, a partir de *Rellenos Controlados Inca*; nótese en las imágenes, el detalle de la mampostería de los muros, que son la reproducción de la conformación de los cimientos, caracterizados por utilizar en la base fragmentos de roca grande, seguida de tamaños de gradación descendente, pero alternada con tamaños pequeños que ayudan a compactar bien la estructura. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.32: Conformación de Cimientos Inca - Saqsaywaman, a partir de *Rellenos Controlados Inca*; cuya composición está estandarizada, a partir del uso de gravas del substrato rocoso, gravas bien graduadas (de distinto tamaño), que permite un acomodo perfecto de las piezas líticas, que aseguran su compacidad; quizá, tratando de imitar expresamente la compacidad de los macizos rocosos; y, como advertimos en las fotografías, se maneja en el Kay Pacha (superficie), el mismo concepto utilizado en los cimientos en el Uku Pacha (sub suelo). Fotografías, archivo personal, 2017.

5.2.8 Conclusiones

✓ De las Llaqtas Incas

Las *Llaqtas Incas* de **Machupicchu**, **Ollantaytambo**, **Pisac**, **Raqchi**, **Tipón** y **Saqsaywaman**, pertenecieron al Sapan Inca, Pachacutec, Intiq Churin; constituían estancias temporales del soberano, que junto a su Panaka, e invitados de la élite Inca, disfrutaba de días de descanso, sin dejar de lado las ceremonias rituales de agradecimiento y veneración al Inti Tayta (Pachacamac, hacedor del mundo), en el Hanan Pacha.

La infraestructura, equipamiento y logística, con que contaban las Llaqtas Incas, las hacían autosuficientes; teniendo a los Yanaconas, como personal de servicio.

El Incaq Wasin, los templos, los espacios abiertos de uso colectivo, estaban complementados por los Talleres, las Kallankas y las viviendas de los Yanaconas, en cada una de las Llaqtas Incas.

Las plataformas agrícolas, sustentadas por andenerías de contención, y el drenaje, garantizaban en conjunto, la estabilidad de las Llaqtas; cumpliendo multipósitos: área

agrícola, colectores de aguas pluviales, muros de contención y, como elementos que resaltan la belleza paisajística.

✓ **De la Ubicación y acceso de las Llaqtas Incas**

Las Llaqtas Incas de **Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman**, se caracterizan por estar ubicadas en elevadas montañas rocosas, de difícil acceso, por estrategia de protección y defensa; para dominar visualmente todo el territorio del entorno y aprovechar los diferentes pisos altitudinales; pero sobre todo, por las óptimas condiciones geotécnicas de los macizos rocosos.

El acceso a las Llaqtas Incas, a excepción de Machupicchu que es por vía férrea, se da por vía terrestre, a través de vías asfaltadas; existiendo también la posibilidad de accederlas por caminos peatonales (Caminos Inca), que forman parte del sistema del Qapaq Ñan (camino real).

El tratamiento de los Suelos y Rocas de Fundación difiere en las Llaqtas por las condiciones de ubicación de los emplazamientos, como relieves abruptos, crestas empinadas, concavidades producto de erupción volcánica y necesidad de consolidar montañas artificialmente.

✓ **De la Topografía de las Llaqtas Incas**

Las superestructuras que conforman las Llaqtas Incas de **Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman**, lograron ser integradas extraordinariamente a la topografía natural de cada uno de los emplazamientos; a partir de la utilización de sistemas de andenerías o contención, que casi textualmente grafican la topografía natural; mimetizándose así, el paisaje artificial y natural; pero sobre todo, con la finalidad de no romper equilibrios naturales de los suelos de fundación.

✓ **Del saneamiento Físico Legal de las Llaqtas Incas**

Las Llaqtas Incas de **Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman**, hoy forman parte de Parques Arqueológicos, declarados como Integrantes del Patrimonio Cultural de la Nación, de acuerdo a Decretos Supremos, Resoluciones Directorales

Nacionales y Resoluciones Ministeriales del Ministerio de Cultura; y, se encuentran protegidas bajo los contenidos de la Ley 28296, Ley General del Patrimonio Cultural de la Nación. La tutela y administración, están a cargo del Ministerio de Cultura de Perú.

✓ **Del Tipo de edificación de las Llaqtas Incas**

Según la Norma Técnica E.050, de Suelos y Cimentaciones, del Reglamento Nacional de Edificaciones de Perú, las Llaqtas Incas de **Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman**, estarían clasificadas como *Edificaciones Especiales, Tipo A*, por las superestructuras, que las componen y las cargas que actúan en los suelos de fundación. Por la estandarización formal y técnica que presentan, son superestructuras sismo - resistentes.

Las Llaqtas Incas como tales, no se encuentran tipificadas específicamente en ninguna de las Normas Técnicas Peruanas, las mismas que por su trascendencia patrimonial, tendrían que estar consideradas como *Estructuras de construcción Inca*, caracterizadas por estar *construidas en piedra en su totalidad*, emplazadas en *macizos rocosos*, con cimientos constituidos por *Rellenos Controlados Inca*, e integrados a la topografía del territorio.

✓ **Del movimiento de Suelos en las Llaqtas Incas**

El movimiento de suelos en las Llaqtas Incas de **Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman**, estuvo orientada a la liberación superficial de suelo degradado, como consecuencia de la meteorización, intemperismo y erosión de los macizos rocosos; encontrada la roca sana, se procedió a la estabilización de taludes, manteniendo los equilibrios naturales del suelo, a través de sistemas de andenerías que no sólo cumplían función de contención, sino también, ampliaban el área agrícola, a partir de las plataformas agrícolas.

✓ **De las cimentación de las Llaqtas Incas**

Por las características físicas y mecánicas de los macizos rocosos de los suelos de fundación, de las Llaqtas Incas de **Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y**

Saqsaywaman, sólo se precisó de *cimientos superficiales*, operativizados a través de *Rellenos Controlados Inca*, del mismo substrato rocoso del emplazamiento.

Se identificaron dos tipos del sistema Suelo – cimiento – superestructura: el primero, constituido por *muros Incas asentados directamente sobre el macizo rocoso*; sin ningún tipo de ligante, excepto la cala de empotramiento tanto del macizo rocoso como de las piezas líticas de la base de muro. El segundo tipo, constituido por el *macizo rocoso como suelo de fundación, el cimiento, cuya función fue la distribución equilibrada de las cargas, operativizado por los Rellenos Controlados Inca*, y la superestructura; evidenciándose *altos niveles de compactación y confinamiento de cimientos*.

Los Incas no legaron por escrito sus calificadas técnicas constructivas; lo que hicieron fue imprimir físicamente y en 3D en el Kay Pacha (superficie), cada una de sus técnicas; así, en el caso de los cimientos, la conformación está expuesta en cada uno de los muros pétreos de las Llaqtaa; donde se observa el concepto que utilizan para asentarlas sobre los macizos rocosos: fragmentos de roca trabajada que constituyen los *Rellenos Controlados Inca*, constituidos por *bolones de gradiente descendente (grande, mediano y pequeño) hasta alcanzar la superficie*.

5.3 De la Investigación de Campo

El procedimiento regular para conocer las características físicas y mecánicas de los suelos de fundación; y, en consecuencia, definir el tipo y condiciones de cimentación que sustenten una edificación proyectada, se inicia con la investigación In Situ del terreno baldío; sin embargo, en nuestro caso, y, tratándose de edificaciones patrimoniales, con más de cinco siglos de existencia, ese procedimiento lo desarrollamos con las superestructuras presentes, adecuándonos a los protocolos establecidos en la Norma Técnica Peruana, E.050, de Suelos y Cimentaciones, con la única limitación de no contar con calicatas a cielo abierto, que es superada con información existente en los informes de investigaciones arqueológicas.

5.3.1 Condiciones de frontera

De acuerdo al artículo 3°, de la Norma E.050, *es obligatorio realizar Estudios de Mecánica de Suelos, en edificaciones que alojen gran cantidad de personas; así mismo, en aquellas que tengan de uno a tres pisos, con un área en planta de 500 m²*; si esto es así, las Llaqtas Incas investigadas, estarían inmersas en esta exigencia; pues, se necesita conocer las características físicas y mecánicas de los suelos de fundación que sustentan las superestructuras. Consecuentemente, primero comprobamos las características del suelo, supuestamente iguales a las de los terrenos colindantes ya edificados; sí simultáneamente, se cumplen las condiciones, es buen referente para realizar el *EMS* y la consecuente construcción, veamos:

1) Existen en los terrenos colindantes grandes irregularidades como afloramientos rocosos, fallas, *vestigios arqueológicos*, rellenos o cavidades. **SI**.

2) Existen superestructuras situadas a menos de 100 metros del terreno edificado que presenten anomalías como grietas o desplomes originados por el terreno de cimentación. **NO**.

3) El tipo de superestructuras cimentadas es de la misma o de menor exigencia que las superestructuras situadas a menos de 100 metros. **SI**.

4) El número de plantas de las superestructuras cimentadas, la modulación media entre apoyos y las cargas en éstos son iguales o inferiores que las correspondientes a las superestructuras situadas a menos de 100 metros. **SI**.

5) Las cimentaciones de las superestructuras situadas a menos de 100 metros y las cimentadas en el emplazamiento de las Llaqtas Incas en estudio, son de tipo superficial. **SI**.

6) La cimentación de las superestructuras arqueológicas en estudio no profundiza respecto de las contiguas más de 1.5 metros. **SI**.

Las condiciones de frontera o entorno inmediato enunciadas y, adecuadas a las características patrimoniales de las Llaqtas Incas en estudio, *se cumplen*; por lo tanto, la posibilidad de construir en estos emplazamientos, era y es, factible. Sin embargo, para

proyectos edificatorios en la actualidad, si la condición de frontera del numeral 1) se cumple, en relación a la existencia de vestigios arqueológicos, se tendría que gestionar ante las entidades tutelares, el deslinde de compromiso patrimonial del proyecto; pues, de acuerdo a la normativa en estas áreas patrimoniales, no se admiten construcciones nuevas, salvo excepciones autorizadas; ello, sustentado por la Ley General del Patrimonio Cultural de la Nación; consecuentemente, las restricciones actuales, coadyuvan a la conservación de las Llaqtas.

5.3.2 Número de puntos de investigación

La Norma Técnica Peruana de Suelos y Cimentaciones, Norma E.050, en el literal b), del artículo 11°, establece para *habilitaciones urbanas*, que sería *lo más próximo a una Llaqta Inca, 3 puntos de investigación por Hectárea*; consecuentemente, para efectos de la investigación, en las Llaqtas Incas de **Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman**, se ha superado ampliamente esa exigencia, realizándose ensayos en promedio, en más de once puntos de investigación, tanto con el equipo Penetrómetro Dinámico Ligeró (PDL), como con el Esclerómetro o Martillo de Schmith; detallándose el número exacto de Ensayos en cada Llaqta, en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14

Ensayos realizados In Situ en las Llaqtas Incas

Llaqta Inca	N° de Ensayos con Penetrómetro Dinámico Ligeró (PDL), Norma Técnica Peruana 339.039	N° de Ensayos Esclerométricos Norma Técnica Peruana 339.181
Machupicchu	15	03
Ollantaytambo	13	10
Písaq	10	05
Raqchi	12	03
Tipón	10	22
Saqsaywaman	11	24

Nota: El número de ensayos está referido al número de sondeos realizados In Situ, distribuidos equidistantemente, tratando de cubrir toda la Llaqta investigada; sondeos realizados tanto a nivel de cimentación con el Penetrómetro Dinámico Ligeró, como a los macizos rocosos aflorantes con el Esclerómetro. Elaboración propia, 2017.

5.3.3 Profundidad de investigación en las Llaqtas Incas

Para cimentaciones superficiales, la Norma Técnica Peruana E.050, en el literal c), del artículo 11°, establece como *profundidad mínima de investigación, 3 metros; **excepto**, si se encontrase roca antes de alcanzar dicha profundidad*; si ese fuere el caso, se podrá verificar la calidad utilizando otros métodos adecuados. Considerando que los emplazamientos de las Llaqtas Incas en estudio, tienen como suelos de fundación macizos rocosos, en varios puntos de investigación, al estar desarrollándose los Ensayos con el equipo Penetrómetro Dinámico Ligero, se encontró el macizo rocoso, antes de alcanzar los 3 m. de profundidad; y, en otros casos, éste se encontró a 5 m. de profundidad.

En las Tablas 5.15 a 5. 20, mostramos la profundidad del macizo rocoso.

Tabla 5.15

*Profundidad de investigación alcanzada con Penetrómetro Dinámico Ligero (PDL); Llaqta Inca de **Machupicchu***

N° de punto de Investigación	Ubicación del punto de investigación en la Llaqta	Estructura donde se desarrolló el ensayo con PDL	Profundidad (m.) a la que se encontró el macizo rocoso
1	Sector I	Muro de contención	0.70
2	Sector I-c	Plataforma agrícola	1.90
3	Sector II-a	Muro contención	0.80
4	Sector II-a	Recinto	1.30
5	Sector III-c	Espacio abierto – Plaza	1.20
6	Sector VI-c	Espacio abierto - Patio	0.50
7	Sector V-c	Muro de contención	0.80
8	Sector VI-d	Espacio abierto - Patio	0.60
9	Sector VI-e	Muro de contención	0.90
10	Sector Andenes oriental 1	Plataforma agrícola	1.10
11	Sector Andenes oriental 2	Plataforma agrícola	1.30
12	Sector Andenes oriental 3	Muro de contención	0.90
13	Sector Andenes oriental 4	Muro de contención	0.80
14	Sector Andenes oriental 5	Plataforma agrícola	1.30
15	Sector Andenes Oriental 6	Muro de contención	0.50

Nota: La diferencia de profundidades (resaltado con el recuadro rojo), a la que se encontró el macizo rocoso en la **Llaqta Inca de Machupicchu**, evidencia la utilización de *Rellenos Controlados Inca (RCI)*, con espesores o potencias específicos para cada tipo de superestructuras; así, en el caso de muros de contención, el espesor del RCI promedio es de 0.80 metros, profundidad a la que se halla el macizo rocoso; en el caso de plataformas agrícolas, el espesor o potencia del RCI promedio es de 1.20 metros. Elaboración propia, 2017.

Tabla 5.16

Profundidad de investigación alcanzada con Penetrómetro Dinámico Ligero (PDL); Llaqta Inca de Ollantaytambo

N° de punto de Investigación	Ubicación del punto de investigación en la Llaqta	Estructura donde se desarrolló el ensayo con PDL	Profundidad (m.) a la que se encontró el macizo rocoso
1	Sector Medio	Recinto cuadrangular 1	0.70
2	Sector Medio	Recinto cuadrangular 2	0.30
3	Sector Medio	Recinto rectangular	1.20
4	Sector Medio	Espacio abierto - Plaza	0.50
5	Sector Templo del Sol	Espacio abierto – Patio	0.30
6	Sector Templo del Sol	Espacio abierto – Plaza	0.50
7	Sector Templo del Sol	Espacio abierto – Patio	0.20
8	Sector Andenes Pumatallis	Muro de contención	0.60
9	Sector Andenes Pumatallis	Muro de contención	0.70
10	Sector Andenes Pumatallis	Plataforma agrícola	1.10
11	Sector Andenes Pumatallis	Espacio abierto - Plaza	0.30
12	Sector Andenes Pumatallis	Espacio abierto - Plaza	0.40
13	Sector Andenes Pumatallis	Espacio abierto - Plaza	0.20

Nota: La diferencia de profundidades (resaltado con el recuadro rojo), a la que se encontró el macizo rocoso en la Llaqta Inca de **Ollantaytambo**, evidencia la utilización de Rellenos Controlados Inca (RCI), con espesores o potencias específicos para cada tipo de superestructuras; así, en el caso de recintos, el espesor del RCI promedio es de 1.20 metros, profundidad a la que se halla el macizo rocoso; en el caso de plazas, el espesor o potencia del RCI promedio es de 0.40 metros. Elaboración propia, 2017.

Tabla 5.17

Profundidad de investigación alcanzada con Penetrómetro Dinámico Ligero (PDL); Llaqta Inca de Písaq

N° de punto de Investigación	Ubicación del punto de investigación en la Llaqta	Estructura donde se desarrolló el ensayo con PDL	Profundidad (m.) a la que se encontró el macizo rocoso
1	Sector Qantus Raqay	Espacio abierto – Patio	0.30
2	Sector Qantus Raqay	Recinto mediano	0.80
3	Sector Qantus Raqay	Recinto grande	0.50
4	Sector Qantus Raqay	Recinto pequeño	0.40
5	Sector Qantus Raqay	Muro de contención	2.70
6	Sector Kalla Qasa	Recinto	0.60
7	Sector Písaq	Espacio abierto - Plaza	0.40
8	Sector Písaq	Recinto cuadrangular	0.20
9	Sector Písaq	Recinto rectangular	0.20
10	Sector Andenes Qosqa	Plataforma agrícola	2.70

Nota: La diferencia de profundidades (resaltado con el recuadro rojo), a la que se encontró el macizo rocoso en la Llaqta Inca de **Písaq**, evidencia la utilización de Rellenos Controlados Inca (RCI), con espesores o potencias específicos para cada tipo de superestructuras; así, en el caso de Patios, el espesor del RCI promedio es de 0.30 metros, profundidad a la que se halla el macizo rocoso; en el caso de recintos, el espesor o potencia del RCI promedio es de 0.45 metros. Elaboración propia, 2017.

Tabla 5.18

*Profundidad de investigación alcanzada con Penetrómetro Dinámico Ligero (PDL); Llaqta Inca de **Raqchi***

N° de punto de Investigación	Ubicación del punto de investigación en la Llaqta	Estructura donde se desarrolló el ensayo con PDL	Profundidad (m.) a la que se encontró el macizo rocoso
1	Sector C, Qolqas	Espacio abierto – Patio	0.50
2	Sector C, Qolqas	Espacio abierto – Patio	0.90
3	Sector C, Qolqas	Recinto	1.60
4	Sector B, Aposentos	Espacio abierto - Patio	0.80
5	Sector B, Aposentos	Espacio abierto – Plaza	2.90
6	Sector B, Aposentos	Espacio abierto - Patio	1.00
7	Sector D, Fuentes menores	Espacio abierto – Patio	0.20
8	Sector D, Ushno Mesapata	Espacio abierto – Patio	1.00
9	Sector D, Fuentes reales	Espacio abierto – Plaza	1.50
10	Sector A, Templo	Recinto	0.80
11	Sector A, Templo	Recinto	2.30
12	Sector A, Templo	Recinto	0.50

Nota: La diferencia de profundidades (resaltado con el recuadro rojo), a la que se encontró el macizo rocoso en la Llaqta Inca de **Raqchi**, evidencia la utilización de Rellenos Controlados Inca (RCI), con espesores o potencias específicos para cada tipo de superestructuras; así, en el caso de Plazas, el espesor del RCI promedio es de 2.20 metros, profundidad a la que se halla el macizo rocoso; en el caso de recintos, el espesor o potencia del RCI promedio es de 1.30 metros. Elaboración propia, 2017.

Tabla 5.19

*Profundidad de investigación alcanzada con Penetrómetro Dinámico Ligero (PDL); Llaqta Inca de **Tipón***

N° de punto de Investigación	Ubicación del punto de investigación en la Llaqta	Estructura donde se desarrolló el ensayo con PDL	Profundidad (m.) a la que se encontró el macizo rocoso
1	Base Andén XII	Espacio abierto – Patio	0.30
2	Base Andén XII	Espacio abierto – Patio	0.10
3	Sector Iglesia Raki	Recinto	0.50
4	Sector Cancha Inca	Recinto	0.40
5	Sector Cancha Inca	Espacio abierto – Patio	0.40
6	Sector Andén IV	Plataforma agrícola	1.10
7	Sector Andén I	Plataforma agrícola	1.00
8	Sector Sinkuna Cancha	Espacio abierto – Plaza	1.40
9	Sector Sinkuna Cancha	Espacio abierto – Plaza	1.50
10	Sector Andén IX	Plataforma agrícola	0.60

Nota: La diferencia de profundidades (resaltado con el recuadro rojo), a la que se encontró el macizo rocoso en la Llaqta Inca de **Tipón**, evidencia la utilización de Rellenos Controlados Inca (RCI), con espesores o potencias específicos para cada tipo de superestructuras; así, en el caso de Plataformas agrícolas, el espesor del RCI promedio es de 0.90 metros, profundidad a la que se halla el macizo rocoso; en el caso de recintos, el espesor o potencia del RCI promedio es de 0.45 metros. Elaboración propia, 2017.

Tabla 5.20

Profundidad de investigación alcanzada con Penetrómetro Dinámico Ligero (PDL); Llaqta Inca de Saqsaywaman

Nº de punto de Investigación	Ubicación del punto de investigación en la Llaqta	Estructura donde se desarrolló el ensayo con PDL	Profundidad (m.) a la que se encontró el macizo rocoso
1	Baluarto I-2	Espacio abierto – Plaza	2.20
2	Baluarto I-15	Espacio abierto – Plaza	0.50
3	Baluarto I-11	Espacio abierto – Plaza	0.90
4	Baluarto I-7	Espacio abierto – Plaza	1.60
5	Baluarto II-18	Espacio abierto – Patio	2.90
6	Baluarto II-11	Espacio abierto – Patio	5.20
7	Baluarto II-7	Espacio abierto – Patio	0.90
8	Baluarto III-6	Espacio abierto – Patio	2.00
9	Sector Muyoq Marka	Espacio abierto – Patio	2.00
10	Sector Sayaqmarka	Espacio abierto – Plaza	0.30
11	Sector Sayaqmarka sur	Recinto	0.70

Nota: La diferencia de profundidades (resaltado con el recuadro rojo), a la que se encontró el macizo rocoso en la Llaqta Inca de **Saqsaywaman**, evidencia la utilización de Rellenos Controlados Inca (RCI), con espesores o potencias específicos para cada tipo de superestructuras; así, en el caso de espacios abiertos Plaza, el espesor del RCI promedio es de 1.10 metros, profundidad a la que se halla el macizo rocoso; en el caso de patios, el espesor o potencia del RCI promedio es de 2.60 metros. Elaboración propia, 2017.

De las tablas precitadas, puede verificarse que los relieves de los emplazamientos de las Llaqtas Incas de **Machupicchu, Ollantaytambo, Písac, Raqchi, Tipón** y **Saqsaywaman**, son muy irregulares; pues, así lo revelan la variedad de espesores o potencias de los *Rellenos Controlados Inca (RCI)* encontrados In Situ; los cuales, además de constituir el nexo estructural entre las diferentes superestructuras Incas y los macizos rocosos de fundación, cumplían también la función de nivelación de las superficies. Sin embargo, lo que sí está estandarizado en las Llaqtas Incas, es la utilización de los Rellenos Controlados Inca, como sistema que permitió el emplazamiento de las Llaqtas Incas en tan escarpados relieves.

Por otro lado, se registra que el sistema edáfico de los emplazamientos de las Llaqtas Incas, es superficial o poco desarrollado; por ello, en el caso de Ollantaytambo y Písac, que serían los más representativos, los macizos rocosos afloran con mayor profusión hacia la superficie (0.40

a 0.80 metros de profundidad), seguidos de Tipón y Machupicchu, que se encuentran en un nivel intermedio, respecto a Raqchi y Saqsaywaman, donde se evidencia Rellenos Controlados Inca con espesores o potencias que superan los 2 metros; lo que implica también, que en estos dos últimos, se realizó mayor movimiento volumétrico de suelo para cimentar las superestructuras conformantes de las Llaqtas Incas (ver Figura 5.21).



Figura 5.21: Profundidad de Investigación en las Llaqtas Incas; (1) y (2) Ollantaytambo y Pisac; (3) y (4) Machupicchu y Tipón; (5) y (6) Raqchi y Saqsaywaman; donde el sistema edáfico es pobre, los macizos rocosos afloran y los Rellenos Controlados Inca presentan espesores en función a la profundidad de los macizos. Fotografías, archivo personal, 2017.

Puede comprobarse también, que la profundidad de los *Rellenos Controlados Inca, RCI*, fueron trabajados en función al tipo de superestructura a cimentar en cada una de las Llaqtas Incas; así, en el caso de Recintos, por ejemplo, los Rellenos Controlados Inca, tienen un espesor promedio que varía en las Llaqtas de 0.40 a 0.80 metros, muy distinto al de las plataformas agrícolas, Plazas y Patios, cuyos espesores presentan promedios que varían de 1.20 a 2.70 metros; igualmente, en los muros de contención, los Rellenos Controlados Inca, varían su espesor en promedio de 0.80 a 1.50 metros. De hecho, influye en la potencia de los Rellenos Controlados Inca, la morfología del relieve de cada una de las Llaqtas Incas.

5.3.4 Distribución de los puntos de investigación en las Llaqtas Incas

Cabe precisar, que las Llaqtas Incas en estudio, forman parte de extensos Parques Arqueológicos delimitados; sin embargo, para efectos del presente estudio, sólo consideramos el monumento más representativo de cada Parque, al cual la llamamos Llaqta Inca; en este contexto, se ha distribuido el número de puntos de investigación, primero cubriendo todos los sectores de la Llaqta, y, en segundo término, abordando las cinco tipologías elegidas para investigación: Muros de contención, Plataformas agrícolas, Recintos, espacios abiertos Plazas y Patios. Esta distribución, a su vez, estuvo sujeta a las restricciones decretadas por cada Responsable de los Parques Arqueológicos, por la condición patrimonial que las protege.

Debo manifestar que, a pesar de haber logrado la autorización de investigación en las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, emitida por la autoridad competente; las restricciones en la facilitación de la documentación cartográfica, documental y fotográfica oficial fue prácticamente denegada; aduciéndose por parte de los Responsables de los Parques Arqueológicos respectivos, que no contaban con tal información; en consecuencia, toda la información consignada fue gestionada por la Suscrita por otros medios; por ello, la baja calidad de la cartografía que se presenta, pero que sin embargo no afecta porque no es materia de investigación, sino la geotecnia Inca; ver Figuras 5.33 a 5.38.

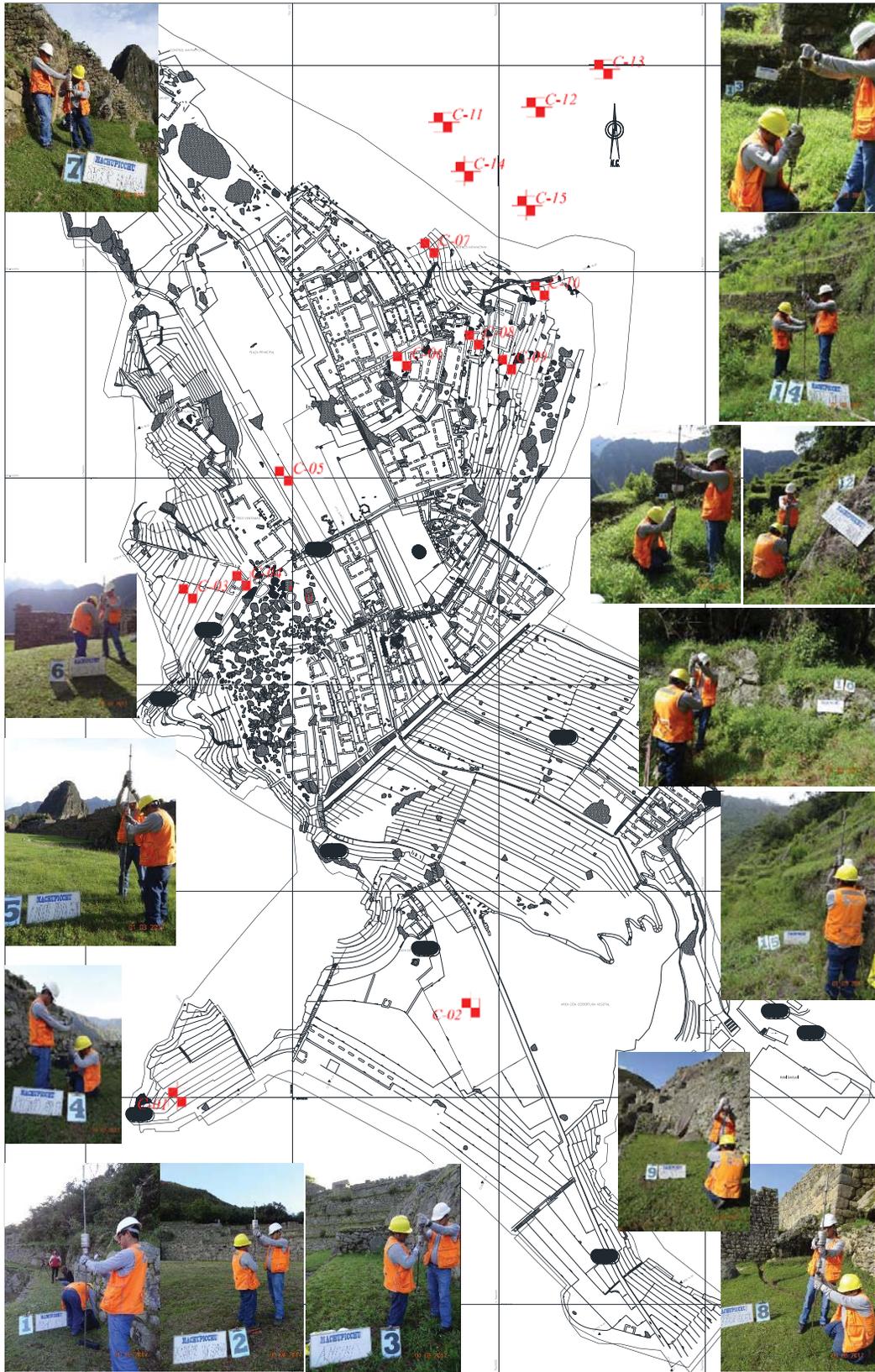


Figura 5.33: $C-01$ Distribución de Puntos de Investigación con Penetrómetro Dinámico Liger, en la Llaqta Inca de Machupicchu. Fotografías, archivo personal, 2017.

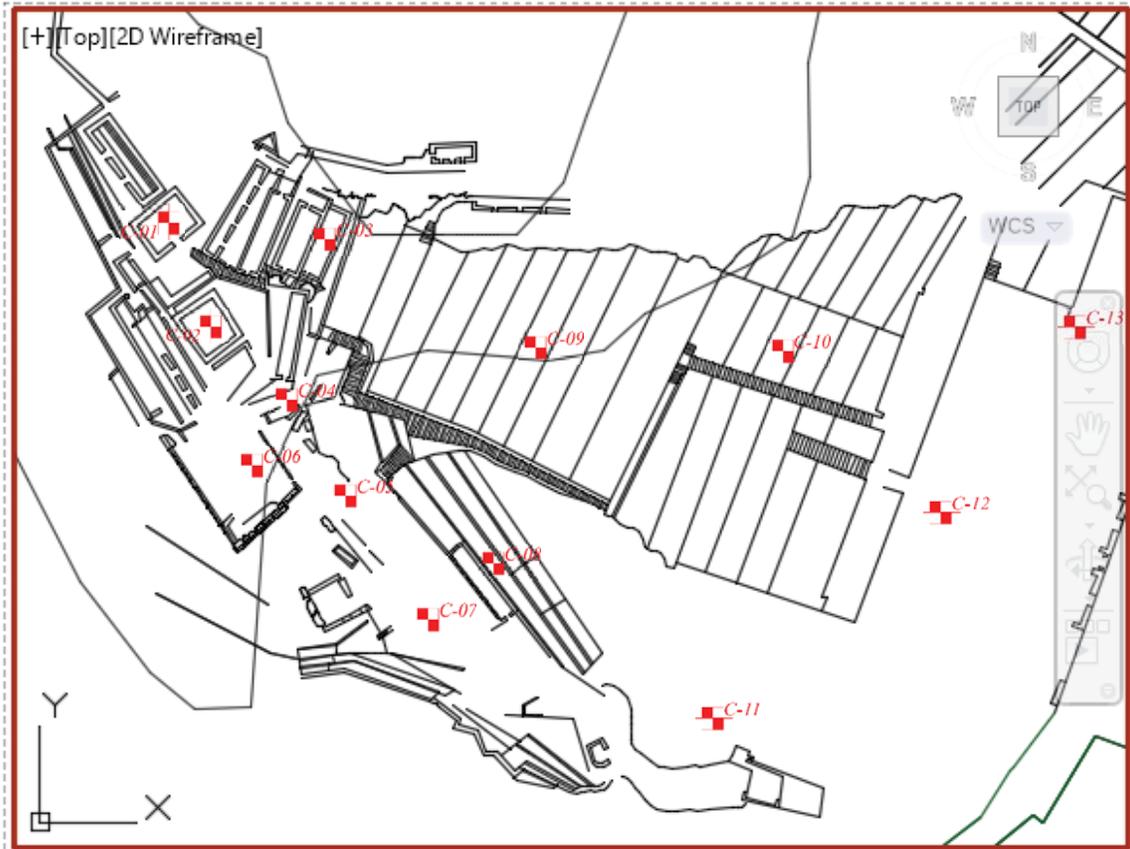


Figura 5.34: ■ Distribución de Puntos de Investigación con Penetrómetro Dinámico Ligerero, en la Llaqta Inca de **Ollantaytambo**. Si bien, el suelo de fundación está constituido por roca del tipo arenisca - cuarcítica, cuyas características son las mismas en todo el emplazamiento de la Llaqta; el objeto de distribuir el mayor número posible de puntos de investigación en la Llaqta, se debe a conocer los espesores o potencias de los Rellenos Controlados Incas, para cada tipo de superestructura Inca; que a su vez, nos indica a qué profundidad se encuentra el macizo rocoso de fundación, verificándose, que se maneja espesores específicos para cada tipo, como se demostrará en las siguientes páginas. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.35: *c-01* Distribución de Puntos de Investigación en la Llaqta Inca de **Pisag**, con Penetrómetro Dinámico Ligero. Se investigó en tres de los sectores más representativos de la Llaqta de Pisag: Qantu Rakay, Kallakasa y Pisaga, cubriéndose el área con el mayor número posible de puntos de investigación. Fotografías, archivo personal, 2017.

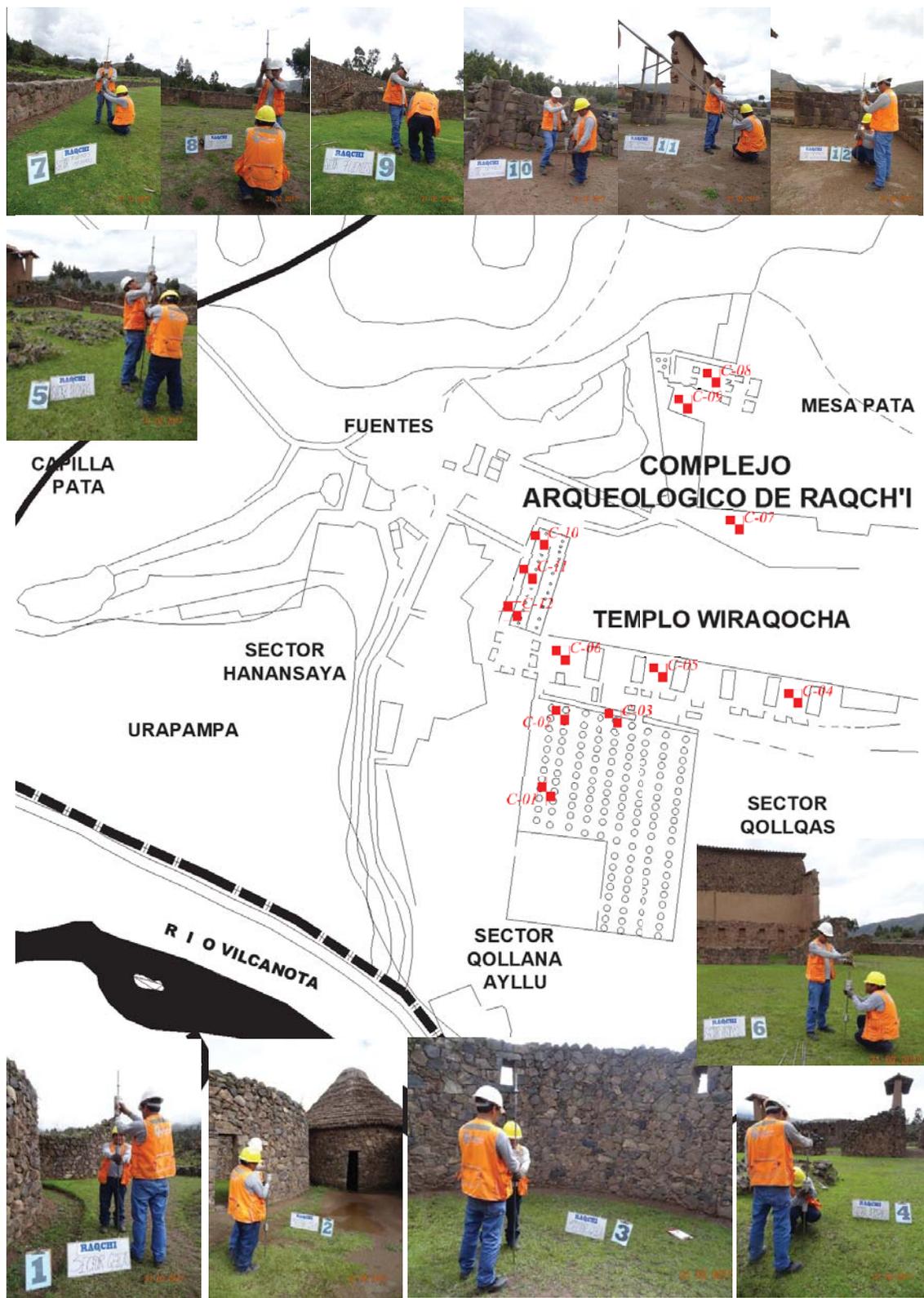


Figura 5.36: *c-01* Distribución de Puntos de Investigación, en la Llaqta Inca de **Raqchi**, con Penetrómetro Dinámico Ligero. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.37: $c-01$ Distribución de Puntos de Investigación en la Llaqta Inca de **Tipón**, con Penetrómetro Dinámico Ligero. Se investigó en las Plataformas agrícolas, Iglesia Raqui, Cancha Inca y Sinkuna Cancha. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.38: **C-01** Distribución de Puntos de Investigación en la Llaqta Inca de **Saqsaywaman**. Investigamos el Sector denominado Baluartes; donde se ha distribuido 11 puntos de investigación, cubriendo todo el área del Sector y, conseguir la mayor cantidad de lecturas, a partir de los Ensayos Penetrométricos; en, Recintos, Plazas y Patios; no teniendo acceso a Plataformas agrícolas ni muros de contención. Fotografías, archivo personal, 2017.

5.3.5 Ensayos In Situ

La Norma Técnica Peruana E.050 de Suelos y Cimentaciones, establece en su artículo 3°, la obligatoriedad de realizar Estudios de Mecánica de Suelos o geotécnicos en edificaciones que alojen gran cantidad de personas; y, las Llaqtas Incas de **Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman**, no se sustraen de esta obligatoriedad; así mismo, en su artículo 10°, numeral 10.1, establece las técnicas de investigación de campo aplicables en estudios geotécnicos, entre ellos, el *Método de ensayo normalizado para la auscultación con Penetrómetro dinámico ligero de punta cónica*, DPL, o PDL; en este contexto, a continuación detallamos las características de este ensayo realizado In Situ en cada una de las Llaqtas Incas.

Ensayos con *Penetrómetro Dinámico Ligero, PDL*, Norma NTP 339.159

Método de ensayo normalizado para la auscultación con Penetrómetro Dinámico Ligero de punta cónica, y a diferentes profundidades, para *caracterizar el suelo de fundación y obtener propiedades de resistencia mecánica y propiedades índice, a través de correlaciones*; en efecto, cuando un suelo de fundación manifiesta esfuerzos resistentes o portantes por debajo de 1 Kg./cm², representa un suelo con un número de golpes muy bajo, en contraposición a ello, *sí el número de golpes es alto, será evidencia de un suelo competente y de buena resistencia*. Consecuentemente, el método de investigación utilizado posibilita obtener información consistente y de forma inmediata.

En ese contexto, en las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, se ha realizado un total de setenta puntos de investigación con el equipo Penetrómetro dinámico ligero, en los cinco tipos de superestructuras seleccionadas: muros de contención, plataformas agrícolas, recintos, plazas y patios; exceptuándose, aquellas superestructuras localizadas fuera del área de autorización; así, en Raqchi muros de contención y plataformas agrícolas; en Tipón, muros de contención por encontrarse estos soterrados en el área autorizada; y, en Saqsaywaman, plataformas agrícolas y muros de contención.

Tabla 5.21

Número de Ensayos realizados con Penetrómetro dinámico ligero en las Llaqtas Incas

Llaqtas Incas	Muros de contención	Plataformas agrícolas	Recintos	Plazas	Patios	Total
Machupicchu	7	4	1	1	2	15
Ollantaytambo	2	1	3	5	2	13
Pisac	1	1	6	1	1	10
Raqchi	-	-	4	2	6	12
Tipón	-	3	2	2	3	10
Saqsaywaman	-	-	1	5	4	10

Nota: Se detalla en la tabla, el número de puntos de investigación realizados In Situ en cada una de las Llaqtas Incas y, el tipo de superestructura donde se desarrolló el ensayo; excepto en Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, donde no se investigó sobre muros de contención; ni, 3plataformas agrícolas en Raqchi y Saqsaywaman, por no hallarse estas superestructuras dentro del área autorizada de investigación.

En los Ensayos con el *Penetrómetro Dinámico Ligero, PDL*, se ha evidenciado en las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, *lecturas características de macizos rocosos, gravas bien graduadas, gravas arcillosas y arcillas limosas compactas*; estos tres últimos, conformantes de lo que denominamos en esta investigación como *Rellenos Controlados Inca*; donde el número de golpes con la masa del Penetrómetro, además de indicar las características mecánicas del suelo, evidencia también la profundidad del estrato por capas, el cual varía de acuerdo a la función del sistema suelo - cimiento – superestructura, hasta alcanzar al macizo rocoso de fundación.



Figura 5.39: Equipo Penetrómetro Dinámico Ligero. Fotografía GEOTEST PERÚ, 2017.

En la imagen 5.40, se muestra los ensayos realizados con el equipo Penetrómetro dinámico ligero, en las Llaqtas de Ollantaytambo y Raqchi (de izquierda a derecha, respectivamente), en el primer caso, se advierte el esfuerzo resistente del suelo al Penetrómetro de punta cónica, pues el macizo rocoso precedido por gravas está próximo a la superficie, y en consecuencia, el número de golpes con la pesa es alto a muy alto, valores característicos de gravas y rocas que al ser alcanzado por el Penetrómetro, éste rebota. En el caso de Raqchi, el macizo rocoso se encuentra a mayor profundidad, precedido por capas de gravas, arenas, gravas arcillosas y limos arcillosos, lo que hace que el número de golpes sea bajo, hasta alcanzar al macizo rocoso.



Figura 5.40: Ensayos In Situ, con el Equipo Penetrómetro Dinámico Ligero. El objetivo es obtener propiedades de resistencia mecánica y propiedades índices en los emplazamientos de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman. (1) **Ollantaytambo**, donde los macizos rocosos se encuentran cerca de la superficie y, el número de golpes del Penetrómetro es elevado para la penetración, por la resistencia de la roca; (2) **Raqchi**, donde el macizo rocoso se encuentra a mayor profundidad, precedido por suelos finos (como las arcillas) y granulares (Gravas), por lo que el número de golpes es bajo y el Penetrómetro se hunde con mayor facilidad, hasta alcanzar la profundidad del macizo rocoso. Fotografías, archivo personal, 2017.

Las Figuras 5.41 a 5.46, muestran los Ensayos con Penetrómetro en las Llaqtas Incas.



Figura 5.41: Ensayos In Situ con Penetrómetro Dinámico Ligero, en la Llaqta Inca de **Machupicchu**; realizados en muros de contención, plataformas agrícolas, recintos, plazas y patios; los sondeos, prueban el manejo de Rellenos Controlados Inca poco profundos y, la cercana presencia de los macizos rocosos de fundación, debido al poco desarrollo del sistema edáfico; ello, a excepción de las plataformas agrícolas, conformadas por más capas de suelos finos y orgánico, en la estratigrafía. Se distingue el tratamiento de Rellenos Controlados Inca para cada tipo de superestructura que conforman la Llaqta. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.42: Ensayos In Situ con Penetrómetro Dinámico Ligero, en la Llaqta Inca de **Ollantaytambo**; realizados en muros de contención, plataformas agrícolas, recintos, plazas y patios; los sondeos realizados en esta Llaqta, evidencian el manejo de Rellenos Controlados Inca casi superficiales, por la cercana presencia de los macizos rocosos de fundación; esto tiene que ver, con el limitado desarrollo del sistema edáfico en la zona. Las plataformas agrícolas, por su función, presentan mayor número de capas de suelos finos, granulares y orgánico en la estratigrafía; y en consecuencia, mayor profundidad. Es clara la distinción en el tratamiento de Rellenos Controlados Inca respecto a cada una de las superestructuras conformantes de la Llaqta. Fotografías, archivo personal, 2017.

Los sondeos en la Llaqta de Ollantaytambo, reportan golpes que oscilan predominantemente entre 9, 15, 24 y el rebote al llegar al macizo rocoso; con Rellenos Controlados Inca, concisos.



Figura 5.43: Ensayos In Situ con Penetrómetro Dinámico Ligero, en la Llaqta Inca de **Písaq**, realizados en muros de contención, plataformas agrícolas, recintos, plazas y patios; los sondeos realizados en esta Llaqta, evidencian el manejo de Rellenos Controlados Inca casi superficiales por la cercana presencia de los macizos rocosos de fundación; ello debido al poco desarrollado sistema edáfico del lugar. Aquí, las plataformas agrícolas por su función, presentan mayor número de capas de suelos finos, granulares y orgánico en la estratigrafía. Se distingue bastante bien el tratamiento de Rellenos Controlados Inca para cada tipo de superestructuras conformantes de la Llaqta. Fotografías, archivo personal, 2017.

En la Llaqta Inca de Písaq, se registran golpes de valores altos a muy altos; ello, debido a la escasa presencia de suelos finos y, la predominancia de suelos granulares, cuya matriz está constituida por los macizos rocosos; así, las capas de los Rellenos Controlados Inca, están próximas a la superficie, conformadas por suelos mixtos (arcillas y gravas), presentando espesores reducidos (0.10 a 0.30 metros); pues, los macizos rocosos por poco afloran.



Figura 5.44: Ensayos In Situ con Penetrómetro Dinámico Ligero, en la Llaqta Inca de **Raqchi**, realizados en recintos, plazas y patios; los sondeos realizados en esta Llaqta, evidencian el manejo de Rellenos Controlados Inca profundos por la lejanía de los macizos rocosos de fundación; ello debido a masivos rellenos desarrollados para lograr una superficie uniforme. Se distinguen claramente el tratamiento de Rellenos Controlados Inca para cada tipo de superestructuras conformantes de la Llaqta. Fotografías, archivo personal, 2017.

Raqchi, presenta una estratigrafía particular, respecto a las demás Llaqtas Incas; en efecto, los macizos rocosos se encuentran a una profundidad considerable, hecho que se demuestra con el reporte del número de golpes, que oscilan, en las primeras capas, entre 4, 7, 11, 14; que constituyen parte del primer estrato, con espesores que superan en algunos casos los 2.50 metros, hasta alcanzar capas más compactas, conformadas por gravas, que componen los Rellenos Controlados Inca, con golpes más profusos que oscilan entre 21, 24, y 26, hasta alcanzar el rebote del penetrómetro, que revela la presencia de roca. Los Rellenos Controlados Inca, de gran extensión, probablemente se realizaron para lograr óptimo emplazamiento.

Los Rellenos Controlados Inca, en el caso de Tipón, presentan espesores más reducidos (0.40 a 0.80 m.), a excepción de las plataformas agrícolas; con cercana presencia de la roca.



Figura 5.45: Ensayos In Situ con Penetrómetro Dinámico Ligero, en la Llaqta Inca de **Tipón**, realizados en plataformas agrícolas, recintos, plazas y patios; los sondeos realizados en esta Llaqta, evidencian el manejo de Rellenos Controlados Inca poco profundos por la cercana presencia de los macizos rocosos de fundación; esto debido entre otros, al limitado sistema edáfico del lugar. Se distingue bien el tratamiento de Rellenos Controlados Inca para cada tipo de superestructuras conformantes de la Llaqta. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.46: Ensayos In Situ con Penetrómetro Dinámico Ligero, en la Llaqta Inca de **Saqsaywaman**, realizados en recintos, plazas y patios; los sondeos realizados en esta Llaqta, evidencian el manejo de Rellenos Controlados Inca profundos por la alejada presencia de los macizos rocosos de fundación; esto debido a masivos rellenos desarrollados con la finalidad de lograr una superficie homogénea. Se distingue bien el tratamiento de Rellenos Controlados Inca para cada tipo de superestructuras conformantes de la Llaqta. Fotografías, archivo personal, 2017.

En suma, los reportes de los Ensayos realizados en plataformas agrícolas, muros de contención, recintos, espacios abiertos plazas y patios (Figuras 5.41 a 5.46); evidencian lecturas de 6 a 9 golpes para Arcillas limosas (CL) compactas; para Gravas arcillosas (GC), de 9 a 15 golpes; para gravas bien graduadas (GW), de 16 a 24 golpes; y, para macizos rocosos el Penetrómetro y su punta cónica “rebota”. Así mismo, en el caso de Plataformas agrícolas, el suelo orgánico presenta de 3 a 5 golpes; en todos los casos, la lectura del número de golpes se

considera cada 0.10 metros de penetración mediante la auscultación con el *Penetrómetro Dinámico Ligero, PDL*.

Ensayos *Esclerométricos*, Norma NTP 339.181

Método mecánico, llamado también Martillo de Schmidt (SHT: Schmidt Hammer Test); es un método de pruebas indirectas y no destructivas, donde la lectura que se obtiene se denomina valor de rebote, que representa una medida de elasticidad a la colisión entre dos cuerpos; en efecto, los ensayos de impacto, miden la respuesta que ofrece la superficie del macizo rocoso a la acción del impacto de una masa metálica. En la literatura científica, este ensayo es el que tiene mayor respaldo; por esta razón, en la presente investigación, se emplea este instrumento, para conocer la resistencia mecánica In Situ, de cada uno de los macizos rocosos que conforman los suelos de fundación de las Llaqtas Incas.

Para la presente investigación, se utiliza el equipo del Laboratorio de Suelos y Concretos, Geotest Perú; los ensayos se realizan en concordancia a lo establecido en la normatividad peruana (NTP 339.181) y, la ASTM D 5873-05 (Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method), registrándose los valores de rebote en 10 lugares representativos del macizo rocoso seleccionado, descartando las lecturas que difieren en 7 unidades del promedio de las 10 lecturas realizadas. Los resultados obtenidos, son correlacionados en Gabinete, los mismos que, “dan valores esperados con un 95% de probabilidad” (cing. cienc., vol. 10, no. 19, pp. 221–246, enero-junio. 2014).

En consecuencia, este método no destructivo rápido, eficiente y económico, nos ayuda a conocer la calidad mecánica de los macizos rocosos, con aceptable certeza; por lo que, los resultados pueden adoptarse como un primer paso, para definir el uso que se le quiera dar a una cantera de rocas similares, a las aquí expuestas: si estas serían destinadas para soportar cargas estructurales, o si podrían emplearse solo con fines ornamentales. En las Figuras 5.47 a 5.52, mostramos los Ensayos realizados con el Esclerómetro en las Llaqtas Incas.



Figura 5.47: Ensayos Esclerométricos, en la Llaqta Inca de **Machupicchu**; realizados en macizos rocosos aflorantes, que constituyen los suelos de fundación de las superestructuras de la Llaqta. Se toman, al menos 10 lecturas con el fin de disponer de una estimación fiable del índice de rebote de la zona de ensayo. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.48: Ensayos Esclerométricos, en la Llaqta Inca de **Ollantaytambo**; realizados en macizos rocosos aflorantes, que constituyen los suelos de fundación de las superestructuras de la Llaqta. Es importante anotar la posición y orientación del esclerómetro para cada conjunto de lecturas, pudiendo ser éstas vertical u horizontal. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.49: Ensayos Esclerométricos, en la Llaqta Inca de **Písac**, realizados en macizos rocosos aflorantes, que constituyen los suelos de fundación de las superestructuras de la Llaqta. El esclerómetro se sujeta firmemente en una posición que permita transmitir mediante el vástago un impacto perpendicular a la superficie de ensayo; después del impacto, se anota el valor del índice de rebote. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.50: Ensayos Esclerométricos, en la Llaqta Inca de **Raqchi**, realizados en macizos rocosos aflorantes, que constituyen los suelos de fundación de las superestructuras de la Llaqta. Las características de la toma de valores de los índices de rebote, son: el número de impactos, la forma (horizontal o vertical), una superficie lisa y, seca. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.51: Ensayos Esclerométricos, en la Llaqta Inca de **Tipón**, realizados en macizos rocosos aflorantes, que constituyen los suelos de fundación de las superestructuras de la Llaqta. Los valores de rebote, permiten medir la dureza que presentan In Situ los macizos rocosos; constituyéndose este método, en el procedimiento más usado a nivel mundial. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.52: Ensayos Esclerométricos, en la Llaqta Inca de **Saqsaywaman**, realizados en macizos rocosos aflorantes, que constituyen los suelos de fundación de las superestructuras de la Llaqta. Es recomendable, contrastar estos resultados, con ensayos de Compresión Simple no Confinada en Laboratorio, de los macizos rocosos. Fotografías, archivo personal, 2017).

5.3.6 Extracción de Muestras representativas

En sujeción a lo establecido en la Norma Técnica Peruana 339.159, se procedió In Situ a la extracción de las muestras representativas de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas de **Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman**; en condición de *Muestra Alterada en Bolsa, MAB*, constituido por bloques de los macizos rocosos aflorantes; de los cuales, en el Laboratorio de Suelos de GEOTEST PERÚ SAC, se extraen corazones diamantinos para la caracterización física y mecánica. Para el caso de Ensayos de Compresión Simple No confinada se requieren por muestra tres unidades y, para el caso de los Límites de Atteberg, son necesarias dos unidades de la misma muestra; ver figura 5.53.



Figura 5.53: Muestras de Suelo para Laboratorio. (1) Raqchi, Tres unidades de una misma muestra de suelo, para los ensayos de Compresión Simple No Confinada; (2) Machupicchu, dos unidades para ensayos de Caracterización de suelos. Fotografías, archivo personal, 2017.

Tabla 5.22

Muestras de Suelos de Llaqtas Incas para la Caracterización física y mecánica

Llaqtas Incas	Muestras para Ensayos de Resistencia	Muestras para caracterización de Suelos
Machupicchu		
Ollantaytambo		
Pisac		
Raqchi		
Tipón		
Saqsaywaman		

Nota: Las muestras obtenidas In Situ, "...son porciones representativas de los suelos de fundación, que conservan alguna o la totalidad de las propiedades del mismo para su clasificación y la realización de Ensayos diversos" (Rodríguez, et.al., 1989). Se verifica la resistencia de los macizos rocosos a partir de Ensayos de Compresión Simple no confinada de corazones diamantinos, extraídos de los macizos rocosos; para tal efecto, se requiere contar como mínimo con tres unidades de una misma muestra de suelo, tal como se muestra en las fotografías. En el caso de Clasificación y Caracterización de Suelos, es necesario considerar más de 0.50 Kg. como mínimo para los Ensayos de Granulometría; y, dos unidades de una misma muestra para los Ensayos de Contenido de Humedad, Límite Líquido y Límite Plástico; los dos últimos, conocidos como los Límites de Atterberg. Fotografías, archivo personal, 2017.

5.3.7 Conclusiones

La investigación de Campo o, investigación In Situ, en las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, se adecua a los protocolos establecidos en la Norma Técnica Peruana E.050 de Suelos y Cimentaciones; y, a las restricciones que imponen la condición patrimonial de las Llaqtas, como es la imposibilidad de excavar calicatas a cielo abierto; dificultad que se supera con información contenida en los Informes de Investigación Arqueológica, emprendidos por la entidad tutelar en cada una de estas Llaqtas y, literatura especializada.

✓ **De las condiciones de frontera de las Llaqtas Incas**

Las características del suelo de las Llaqtas Incas de **Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman**; *son iguales a los de los terrenos colindantes inmediatos*, en relación a la existencia de afloramientos rocosos, fallas de formación, vestigios arqueológicos, rellenos y cavidades; a la inexistencia de anomalías como grietas y desplomes originados por los suelos de fundación y cimentación; a la similitud del tipo de superestructuras existentes en el entorno; a la similitud en cuanto al número de plantas, la modulación media entre apoyos y las cargas de las superestructuras existentes del entorno; a la igualdad del tipo de cimentación superficial de las superestructuras existentes del entorno.

Así mismo, a al cumplimiento de no superar en más de 1.50 metros de profundidad a las cimentaciones de las superestructuras existentes del entorno. En consecuencia, las condiciones de frontera se cumplen simultáneamente en cada uno de los emplazamientos de las Llaqtas Incas; condición que autoriza el desarrollo del estudio geotécnico y, la consecuente construcción segura de superestructuras; sin embargo, en la actualidad por la condición patrimonial que presentan, se encuentran bajo las restricciones impuestas por la Ley General del Patrimonio Cultural de la Nación, Ley 28296, que imposibilita la construcción de edificaciones nuevas, salvo excepciones autorizadas por la entidad tutelar.

✓ **Del número de Puntos de Investigación realizados en las Llaqtas Incas**

Se ha superado el número de puntos de investigación mínimos, exigidos por la Norma Técnica Peruana E.050 vigente; así, el número de puntos investigados con Penetrómetro son 15 y, 3 con Esclerómetro, en **Machupicchu**; en **Ollantaytambo**, 13 puntos investigados con Penetrómetro y, 3 con Esclerómetro; 10 con Penetrómetro y, 5 con Esclerómetro en **Pisac**; 12 puntos investigados con Penetrómetro y, 3 con Esclerómetro, en **Raqchi**; en **Tipón**, 10 puntos investigados con Penetrómetro y 22 con Esclerómetro; y, 11 puntos investigados con Penetrómetro y, 24 con Esclerómetro, en **Saqsaywaman**; el número de puntos de investigación, estuvo condicionado a las restricciones manejadas en cada Parque Arqueológico.

✓ **De la profundidad de la investigación en las Llaqtas Incas**

La abrupta morfología de los relieves de las Llaqtas Incas de **Machupicchu**, **Ollantaytambo**, **Pisac**, **Raqchi**, **Tipón** y **Saqsaywaman**, ha sido transformada por los Incas, a partir de la utilización de los *Rellenos Controlados Inca*, cuya función es amalgamar las superestructuras y el macizo rocoso de fundación, para la distribución equitativa de las cargas; en este contexto, en los casos de **Ollantaytambo** y **Pisac**, caracterizados por el pobre desarrollo del sistema edáfico, el espesor de los Rellenos controlados Inca *es poco profundo*, encontrándose los macizos rocosos, próximos a la superficie; con una profundidad promedio que varía entre **0.30 a 0.60 metros**.

En **Machupicchu** y **Tipón**, los macizos rocosos de fundación se encuentran *a mayor profundidad*; donde los *Rellenos Controlados Inca* presentan mayor espesor o potencia, oscilando la profundidad promedio entre **0.50 a 1.20 metros**, hasta alcanzar al macizo rocoso. En las Llaqtas Incas de **Raqchi** y **Saqsaywaman**, se comprobó grandes volúmenes de *Rellenos Controlados Inca*; que alcanzan espesores promedio, que varían de **0.90 a 2.50 metros**; profundidad a la que se encuentra el macizo rocoso de fundación. Los *Rellenos Controlados*

Inca, están conformados por capas de suelos finos y, predominantemente granulares, que se distinguen por el número de golpes del Penetrómetro y, su revote al alcanzar el macizo rocoso.

✓ **De la distribución de los Puntos de investigación en las Llaqtas Incas**

Se ha realizado una distribución equidistante de los puntos de investigación en las Llaqtas Incas de **Machupicchu, Ollantaytambo, Pisaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman**; con la finalidad de cubrir todo el área de investigación y, obtener el mayor número de lecturas posible, para comprobar el manejo de los suelos de fundación, que realizaron los Incas, como parte del conocimiento geotécnico que poseían.

✓ **De los Ensayos In Situ en las Llaqtas Incas**

Para el desarrollo de los Ensayos In Situ, en las Llaqtas Incas de **Machupicchu, Ollantaytambo, Pisaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman**, *se utilizaron métodos mecánicos, no invasivos y, normalizados*, como son: el Penetrómetro Dinámico Ligero de punta cónica y, el Esclerómetro o Martillo de Shmith; para conocer las Características Físicas y Mecánicas de los suelos de fundación. El número de golpes con el Penetrómetro para alcanzar una profundidad de 0.10 metros, determina el tipo de suelo; así, en el caso de suelos finos (arcillas y limos), se cuenta con promedios de 6 a 9 golpes; suelos granulares (arenas y gravas), de 10 a 15 golpes; bolones de roca, entre 16 a 24 golpes; y, al alcanzar el macizo rocoso, el Penetrómetro revota.

Los ensayos In Situ con Esclerómetro, se realizan en los afloramientos de los macizos rocosos existentes, en cada una de las Llaqtas; cuyas lecturas (10 por cada punto de investigación), son correlacionadas en gabinete, para obtener los valores de resistencia.

✓ **De la extracción de Muestras representativas de las Llaqtas Incas**

Por las restricciones inherentes a la condición patrimonial de las Llaqtas Incas de **Machupicchu, Ollantaytambo, Pisaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman**, se obtiene Muestras Alteradas en Bolsa (MAB), aceptadas para su análisis, por la Norma Técnica Peruana E.050, de Suelos y Cimentaciones; contándose con bolones de tamaño grande de los macizos rocosos,

para extraer en laboratorio, corazones diamantinos o probetas para los Ensayos de Resistencia y Caracterización Física y Mecánica de Suelos.

5.4 De los Análisis en Laboratorio

Es indiscutible la importancia de un estudio geotécnico previa a la construcción, sobre todo por seguridad estructural y sobrecostos futuros; sin embargo, los insumos para su desarrollo y conclusiones, sólo son factibles a partir de *Análisis en Laboratorio*; siendo fundamental contar con un Laboratorio Geotécnico garantizado -sobre todo hoy, donde afloran laboratorios low cost de dudosa compatibilidad y calidad, posibilitado por la ausencia de mecanismos de control realmente garantes del cumplimiento de la normatividad-; ya que la geotecnia, entraña una enorme complejidad, en una vasta diversidad de emplazamientos y, sus posibles condiciones de estado, para modelizar adecuadamente su comportamiento bajo distintas sollicitaciones.

En este contexto, los análisis de Laboratorio desarrollados, están orientados en primer término, a *identificar el Tipo de Suelo* de los emplazamientos de las Llaqtas Incas; es decir, a discernir si se trata de suelos granulares o finos, a través de análisis granulométricos y Límites de Atteberg; para descartar o prevenir deformaciones diferidas en el tiempo, posibles problemas de expansividad o inestabilidad, así como para adoptar unas u otras metodologías de análisis de la capacidad portante y deformaciones del terreno. En segundo lugar, *Ensayos de Estado*, como Contenido de humedad (C.A.) y, Densidad (γ); parámetros para cálculo y dimensionamiento de las estructuras de cimiento; y tercero, *Ensayos de Resistencia*.

5.4.1 Características Físicas y Mecánicas

Para la caracterización de Suelos, existen, a decir de Bowles (1978), varios métodos; entre ellos, el de la Asociación Americana de Agencias Oficiales de Carreteras y Transportes (AASHTO), el Sistema de la ASTM, el Sistema de la Agencia Federal de Aviación (FAA), por nombrar sólo algunos; para la presente investigación, utilizamos el Sistema Unificado de

Clasificación de Suelos (SUCS), considerando los límites de Atterberg (límites líquido y plástico) y, el análisis granulométrico; tal como lo mostramos en las Figuras 5.54 y 5.55, que corresponden a las muestras de Suelo de los Rellenos Controlados Inca, RCI, que constituyen el primer Estrato (E1), en la estratigrafía investigada.

Cabe aclararse que, los suelos de fundación investigados están constituidos por macizos rocosos y sus fragmentos; suelos que no presentan límites líquidos ni plásticos.



Figura 5.54: Ensayos de **Contenido de Humedad**. Se realizan a los suelos conformantes de los *Rellenos Controlados Inca, RCI*, de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.55: Ensayos de **Análisis Granulométrico**. Realizados a los suelos conformantes de los *Rellenos Controlados Inca, RCI*, de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman. Fotografías, archivo personal, 2017.

Los resultados obtenidos de las Características Físicas de los suelos conformantes de los *Rellenos Controlados Inca, RCI*, se adjunta In extenso en Anexos, presentándose en la Tabla 5.23 el Resumen de las seis Llaqtas Incas investigadas, constituidos por suelos granulares predominantemente; pues, de acuerdo a los Límites de Atteberg, no presentan Límite Líquido, Plástico, tampoco Índice de Plasticidad; evidenciándose suelos de consistencia dura o sólida; así mismo, el Coeficiente de Uniformidad (Cu), cuyos valores son grandes, demuestra que se trata de suelos bien graduados, caracterizados por su incompresibilidad, resistencia, y compacidad; con partículas sólidas que tienen un alto grado de acomodo.

Respecto al Coeficiente de Curvatura (Cc), los valores superan los mínimos (1 y 3), lo que demuestra una granulometría sin vacíos; es decir, un suelo compacto, característica de los suelos granulares como las Gravas. No se ensayó con las Arcillas limosas, que forman parte de las primeras Capas de los *Rellenos Controlados Inca*, por no ser representativas como apoyo.

Tabla 5.23

Resumen de las Características Físicas de Rellenos Controlados Inca, RCI

Llaqta Inca	Est.	Prof. m.	C.A. %	LP %	LL %	IP %	Cu	Cc	Clasificación SUCS	Descripción
Machupicchu	E-1	0-1.00	2.47	NP	NP	NP	340.20	144.06	GP	Grava mal graduada
Ollantaytambo	E-1	0-0.70	1.94	NP	NP	NP	498.14	212.55	GP	Grava mal graduada
Pisac	E-1	0-0.90	2.20	NP	NP	NP	428.72	255.43	GP	Grava mal graduada
Raqchi	E-1	0-1.10	2.64	NP	NP	NP	2.24	1.07	GP	Grava mal graduada
Tipón	E-1	0-0.70	2.42	NP	NP	NP	2.06	0.98	GP	Grava mal graduada
Saqsaywaman	E-1	0-1.6	1.98	NP	NP	NP	380.73	148.55	GP	Grava mal graduada

Nota: C.A. = Contenido de Humedad o Agua; NP = No Presenta; LP = Límite Plástico; LL = Límite Líquido; IP = Índice de Plasticidad; Cu = Coeficiente de Uniformidad; Cc = Coeficiente de Curvatura; GP = Grava mal graduada. Las características físicas definen el tipo de Suelo, a partir del LL, LP e IP; y, los coeficientes de uniformidad y curvatura; evidenciándose que están conformados por suelos granulares, especificados como Gravas mal graduadas, donde más de la mitad del material queda retenido en el tamiz N° 200; y, es pobremente graduada, porque predomina un tamaño o una serie de tamaños, faltando algunos tamaños intermedios (Braja, 2006). Elaboración propia – GEOTEST PERU, 2017.



Figura 5.56: Serie de Tamices estándar para el análisis granulométrico. Cuando el material granular queda retenido proporcionalmente en cada uno de los tamices, empezando en el primer tamiz del lado izquierdo (Tamiz N° 2'', tamaño de malla de 50 milímetros) y, quedando retenido más del 50% en el tamiz N° 200 (tamaño de malla 75 micrómetros), último tamiz del lado derecho; se trata de Grava Bien Graduada (GW); pues, existen un amplio margen de variación del grano y cantidades importantes de todos los tamaños intermedios de los granos; situación óptima para la conformación de cimientos, porque permite que el material se acomode y quede bien compactado para otorgar resistencia, característica que los Incas lograron a través de sus Rellenos Controlados. Por otro lado, cuando más de la mitad del material pasa por el tamiz N° 200, se trata de Suelo fino como las arcillas (Braja, 2006). Fotografías, GEOTEST PERU, 2017.

En la Tabla 5.24 se muestra la valoración del suelo granular Grava mal graduada, definida así, a partir de las Características Físicas y Mecánicas ensayadas In Situ y Laboratorio, junto a los demás tipos de Suelo que complementan los *Rellenos Controlados Inca, RCI*; comprobándose el elevado conocimiento geotécnico de los Incas; quines diferenciaban cada tipo de suelo, de acuerdo a sus características y, la aptitud para usos específicos; así, conocían que una grava (rumi, parte de la Q'aqqa) era dura, resistente y óptima para un apoyo competente; sabían que no se comprimía ni expandía frente a cambios de humedad y temperatura; teniendo como mayor prueba, los sólidos macizos rocosos.

Los suelos finos como las arcillas o Llinqq'is, se empleaban potenciando su capacidad ligante e impermeabilizante; así, los núcleos de las Perqqas (muros) que construyeron en las Llaqtas, presentan estabilidad por estar constituidas por arcillas y gravas, que otorgan cohesión y resistencia, respectivamente (Braja, 2006); así mismo, la utilizaban como material aislante en las capas próximas a la superficie de los cimientos, para evitar la filtración de las aguas pluviales hacia el subsuelo; esto comprueba, que los Incas, no sólo conocían de geotecnia, sino sobre todo, la manejaban de acuerdo a requerimientos específicos, así: Q'aqgas y Rumis, sí resistencia buscaban; y, Llinqq'is, sí de cohesión y sellante precisaban. Ver Tabla 5.24.

Tabla 5.24

Valoración del suelo Grava Mal Graduada, de los Rellenos Controlados Inca

Tipo de Suelo	Símbolo	Valor como suelo de apoyo	Compresibilidad y expansión	Características de drenaje	Peso unitario en seco Tn/m ³	Ángulo de fricción interna
Granular	GW	Excelente	Casi ninguna	Excelente	2 -2.24	32
	GP	Bueno a excelente	Casi ninguna	Excelente	1.76–2.24	32
	GC	Bueno	Ligera	Pobre a prácticamente impermeable	2.08-2.32	-
	SW	Bueno	Casi ninguna	Excelente	1.76-2.08	30
Fino	ML	Pobre a mediano	Ligera a media	Pobre a mediano	1.44-2.08	27
	CL	Pobre a mediano	Ligera	Prácticamente impermeable	1.44-2.08	25

Nota: Tipos de Suelo conformantes de los Rellenos Controlados Inca; GW = Grava bien graduada; GP = Grava mal graduada; GC = Grava arcillosa; SW = Arena bien graduada; ML = Limo; CL = Arcilla. El tipo de suelo conformante de los *Rellenos Controlados Inca*, está identificado como *Grava mal graduada*, cuya valoración resaltada con el recuadro rojo, prueba que constituyen buenos suelos de apoyo, por la nula compresibilidad y expansividad y, las óptimas condiciones de drenaje; con ángulos de fricción interna y pesos unitarios o densidad, elevados, que directamente inciden en una competente Capacidad de Carga. Respecto a las Arcillas (suelo fino), se reconoce su propiedad impermeable y cohesiva. Las propiedades opuestas de suelos finos y granulares, fueron aprovechados óptimamente por los Incas, incluso combinándolos y alternándolos, logrando suelos mixtos. Adaptado de Ramírez y Alejano, 2004.

Los *Rellenos Controlados Inca, RCI*, constituyen para los Incas, una extensión trabajada de la Pachamama (Q'aqqa, macizo rocoso); una extensión que además de posibilitarles nivelación de superficies para un mejor apoyo de las superestructuras, también favorecía eficientemente el discurrir controlado de las aguas que se infiltraban desde la superficie; pues, como ya se vio en la Tabla 3.24, las gravas tienen excelente capacidad de drenaje. Por otro lado, se requería también sellar superficies como las de los recintos, para ello, conocían que las arcillas (Llinqq'is) tenían propiedades cohesivas, combinadas con limos y arenas, serían el perfecto trío para tal efecto. En la Tabla 5.25, mostramos la aptitud de los suelos granulares y finos.

Tabla 5.25

Aptitud de suelos granulares y finos para Rellenos Controlados Inca

Suelo	Valor como cimiento	Valor como terraplén	Capacidad de Carga	Riesgo de Asientos	Modificación de Resistencia por cambio de humedad	Riesgo de deslizamiento de taludes
GW	Buen apoyo	Muy estable	Muy alta	Bajísimo	Muy baja	Muy bajo
GP	Buen apoyo	Razonablemente estable	Alta	Muy bajo	Muy baja	Bajo
GC	Buen apoyo	Medianamente estable	Alta	Bajo	Baja a media	Muy bajo
SW	Buen apoyo	Muy estable	Muy alta	Bajísimo	Muy baja	Muy bajo
ML	Muy pobre, susceptible de sifonamiento	Escasa estabilidad	Media a baja	Medio	Media a alta	Medio
CL	De bueno a pobre	Estable en núcleos impermeables y capas aislantes	Baja	Medio	Media a alta	Medio a alto

Nota: GW = Grava bien graduada; GP = Grava mal graduada; GC = Grava arcillosa; SW = Arena bien graduada; ML = Limo; CL = Arcilla. *Los Rellenos Controlados Inca* están constituidos predominantemente por suelos granulares como las **Gravas** (GW-GP), cuya competencia geotécnica es óptima, por presentar altas Capacidades de Carga, bajísimo riesgo de Asentamientos e, imposibilidad de modificar sus propiedades físicas y mecánicas frente a la presencia de humedad; Así mismo, estaban complementadas con suelos finos como las **Arcillas** (CL), empleadas por sus propiedades impermeables y aislantes. Adaptado de Ramírez y Alejano, 2004.

En la Tabla 5.25, se demuestra porqué los Incas eligieron Suelos Granulares para conformar los *Rellenos Controlados Inca, RCI*, complementados con Suelos finos, cuyas propiedades son opuestas a las gravas, en términos físicos y mecánicos; pues, las Arcillas presentan Capacidades de Carga bajas a muy bajas; susceptibles a modificar sus propiedades frente a cambios de temperatura y humedad y, con alto riesgo de Asentamiento; sin embargo, tienen óptimas condiciones de impermeabilización y aislamiento. Los Incas, manejaron ambos tipos de suelo.

5.4.2 Perfil Estratigráfico

Con la finalidad de determinar las características geotécnicas de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas; se ha utilizado, el equipo Penetrómetro Dinámico Ligerero, PDL; método no destructivo, capaz de medir la capacidad estructural In Situ, además de evidenciar estratos homogéneos que conforman el Perfil Estratigráfico; en este entender, se ha comprobado que los suelos de fundación que soportan las superestructuras Incas, presentan un mismo patrón de conformación; en efecto, un estrato de base, constituido por macizos rocosos y, uno segundo, constituido por lo que denominamos como *Rellenos Controlados Inca*; éstos últimos, se distinguen, de acuerdo al uso y función del tipo de superestructura que soportan.

Los Rellenos Controlados Inca, RCI, en **primer** término, están conformados por fragmentos de los macizos rocosos de los suelos de fundación de cada Llaqta Inca, ello para garantizar sus propiedades físicas y mecánicas; **segundo**, el tamaño de los bolones así como las gravas, está en sujeción a la carga que soporta y a la función que desempeña la superestructura; **tercero**, el espesor o potencia de los estratos está de acuerdo a la profundidad a la que se encuentra el macizo rocoso; **cuarto**, cada capa del segundo estrato presenta un alto nivel de compactación; **quinto**, el estrato próximo a la superficie, está conformado por grava arcillo - limosa, para otorgarle cohesión y resistencia; y, **sexto**, el nivel de confinamiento es elevado.

Los perfiles estratigráficos identificados en las Llaqtas Incas, evidencian que el relieve de sus emplazamientos es bastante irregular; lo que motivó el manejo de diferentes espesores o potencias de los *Rellenos Controlados Inca, RCI*, en las diferentes superestructuras; así mismo, en los emplazamientos donde el sistema edáfico es poco desarrollado como es el caso de las Llaqtas de Ollantaytambo y Písaq, en varios sectores el macizo rocoso se encuentra aflorando; por ello, las capas de los perfiles estratigráficos presentan espesores mínimos de 0.20 y 0.30 m.; en la Figura 5.57, se muestra la estratigrafía característica de los Rellenos Controlados Inca, operados en plataformas agrícolas; y, en la Tabla 5.26 las potencias o espesores manejados.

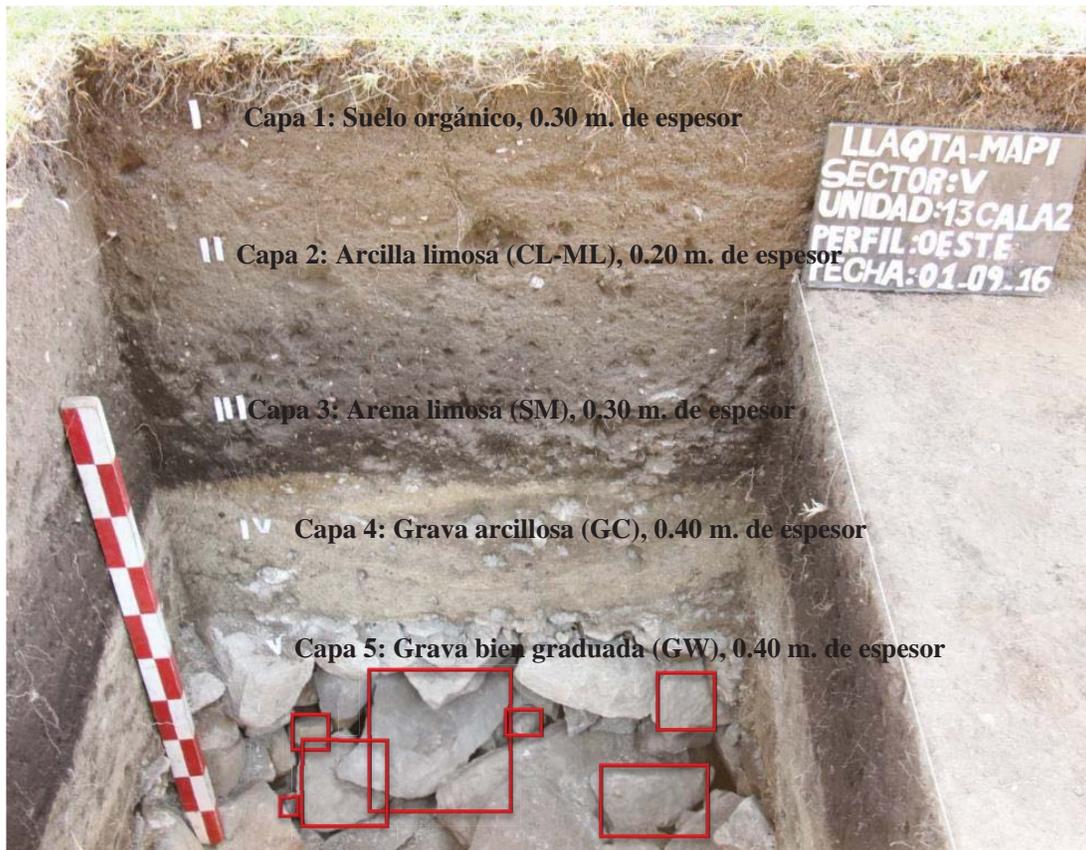


Figura 5.57: Estratigrafía característica de *Rellenos Controlados Inca* en Plataformas Agrícolas - Machupicchu. Nótese el manejo Inca de los suelos tanto finos como granulares para la conformación de los Rellenos Controlados Inca, identificados como el primer estrato (E1), donde cada una de las capas están prolijamente trabajadas y compactadas, asegurando funcionalidad, estabilidad y resistencia, estrato que se apoya directamente en el macizo rocoso que conforma el segundo estrato (E2). La capa 5 del primer estrato, evidencia el suelo granular *Grava bien graduada (GW)*, distinguiéndose con los recuadros rojos, una conformación de fragmentos de roca muy variada en tamaño, lo que posibilita óptimo acomodo y ausencia de vacíos. Esta conformación, diferenciada sobre todo en el espesor o potencia de las capas, es manejada como un patrón geotécnico en el cimiento de las superestructuras de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman. Fotografías, archivo de la Jefatura del Santuario Histórico de Machupicchu, 2016.

En la Norma Técnica E.050 de Suelos y Cimentaciones, artículo 11°, literal c), la profundidad mínima a alcanzar en la investigación geotécnica es de 3 metros; excepto, **sí se encontrare roca**, cuyas características físicas y mecánicas son óptimas como apoyo de cimentaciones; en este contexto, el objetivo en todo estudio geotécnico, es encontrar un suelo competente, que pueda responder con la misma o mayor resistencia al peso que se le aplica; en nuestro caso, esa condición se cumple; pues, los macizos rocosos presentan muy buena

resistencia, debiendo los Incas, concentrar sus esfuerzos, en garantizar una favorable profundidad de encaje, la misma que dependía de la morfología del relieve, ver Tabla 5.26.

Tabla 5.26

Espesor o potencia de los Rellenos Controlados Inca, RCI

Llaqta Inca	Espesor (metros) Muro de contención	Espesor (metros) Plataforma agrícola	Espesor (metros) Recintos	Espesor (metros) Plazas	Espesor (metros) Patios
Machupicchu	0.50; 0.70; 0.80; 0.90	1.10; 1.30; 1.90	1.30	1.20	0.50; 0.60
Ollantaytambo	0.60; 0.70	1.10; 2.70	0.30; 0.70; 1.20	0.20; 0.30; 0.40; 0.50	0.20; 0.30
Pisac	2.70	2.70	0.20; 0.40; 0.50; 0.60; 0.80	0.40	0.30
Raqchi	-	-	0.50; 0.80; 1.60	2.30; 2.90	0.20; 0.80; 0.90; 1.00; 1.50
Tipón	-	0.60; 1.00; 1.10	0.4; 0.50	1.40; 1.50	0.10; 0.30; 0.40;
Saqsaywaman	-	-	0.70	0.30; 0.90; 1.60; 2.00; 2.20; 5.20	0.90; 2.00; 2.90

*Nota: Los Rellenos Controlados Inca, RCI, operados en las diferentes Llaqtas, presentan una variedad de espesores o potencias, respondiendo entre otros, a la abrupta morfología del relieve de sus emplazamientos, al desarrollo del sistema edáfico, y, al tipo de superestructura que soportan; éste último, define el parámetro promedio en el espesor de los Rellenos Controlados Inca; así, por ejemplo en el caso de Muros de Contención, resaltado con color marrón, el espesor promedio encontrado es de **0.70 metros**; en el caso de Plataformas Agrícolas, resaltado con color verde, el espesor promedio llega a **1.10 metros**; en el caso de los Recintos, resaltado con color rojo, tiene un espesor promedio de **0.40 metros**; en el caso de Plazas, resaltado con color guinda, tienen un espesor promedio de **0.50 metros**; en el caso de Patios, resaltado con color azul, el espesor promedio es de **0.40 metros**; en todos los tipos de superestructuras, hay casos contados y excepcionales, que supera incluso ampliamente estos promedios. Así mismo, en los casos de Raqchi y Saqsaywaman, resaltados con color lila, se ha evidenciado espesores de gran dimensión, esto puede explicarse por el masivo movimiento de suelos que se emprendió en estas Llaqtas, en el primer caso, para lograr una superficie nivelada y óptima para el emplazamiento de sus superestructuras; y, en el caso de Saqsaywaman (sector Baluartes, zona estudiada) para elevar artificialmente aún más a su Pachamama.*

En las figuras 5.58 a 5.67, mostramos la estratigrafía operada por los Incas para cimentar las superestructuras de las Llaqtas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman; los sondeos con el Penetrómetro dinámico ligero, permitieron identificar la conformación artificial y estándar, de un primer Estrato, el cual está constituido por varias capas; entre ellas, una primera y próxima a la superficie de contacto con la superestructura, compuesta por arcillas limosas, cuyos golpes de penetración oscilan entre 4 a 6; una segunda capa, reporta golpes que varían desde 8 hasta 13, que corresponden a gravas arcillosas; una tercera capa, evidencia presencia de grava, con golpes que oscilan entre 14 y 30.

Identificado el primer Estrato y, las capas que lo componen, se llega al segundo Estrato, constituido por los macizos rocosos, reconocible por el rebote del Penetrómetro al alcanzarlo.

Caso Muros de Contención:

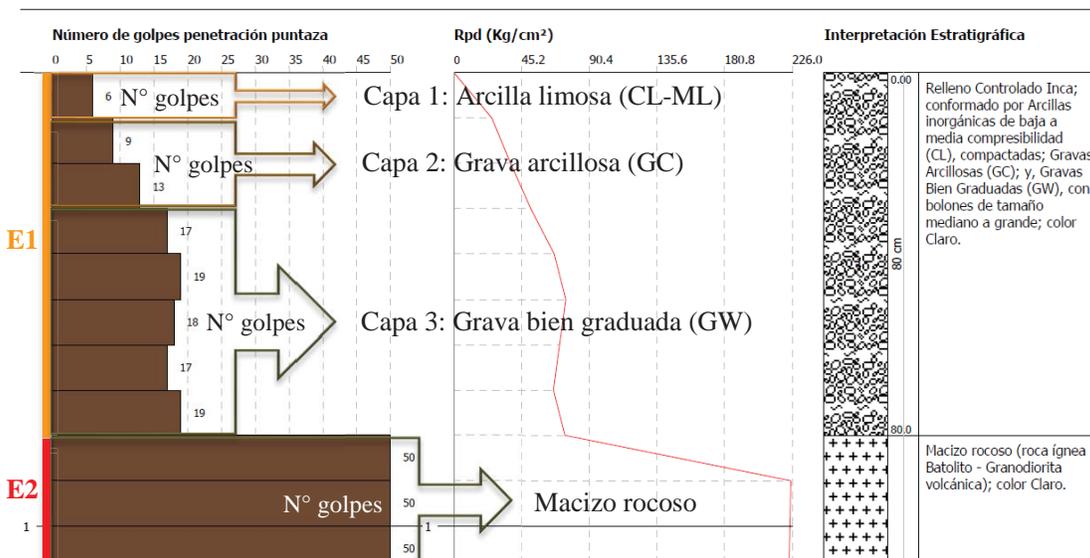


Figura 5.58: Gráfico del Perfil Estratigráfico típico en **Muros de Contención** de las Llaqtas Incas - Machupicchu. La conformación del **Relleno Controlado Inca, RCI**, que constituye el primer Estrato (E1), presenta varias capas, una primera capa de 0.10 m. en promedio, está constituida por Arcilla Limosa (CL-ML) compactada; una segunda Capa, constituida por Grava arcillosa (GC), en un espesor promedio de 0.20 m.; una tercera capa, de Grava Bien Graduada (GW), de gradación descendente desde tamaños pequeños, medianos hasta bolones grandes, en una potencia promedio de 0.50 m. hasta el contacto con el segundo Estrato (E2), constituido por el Macizo Rocosos, suelo de fundación de las superestructuras Incas. Elaboración propia, 2017.

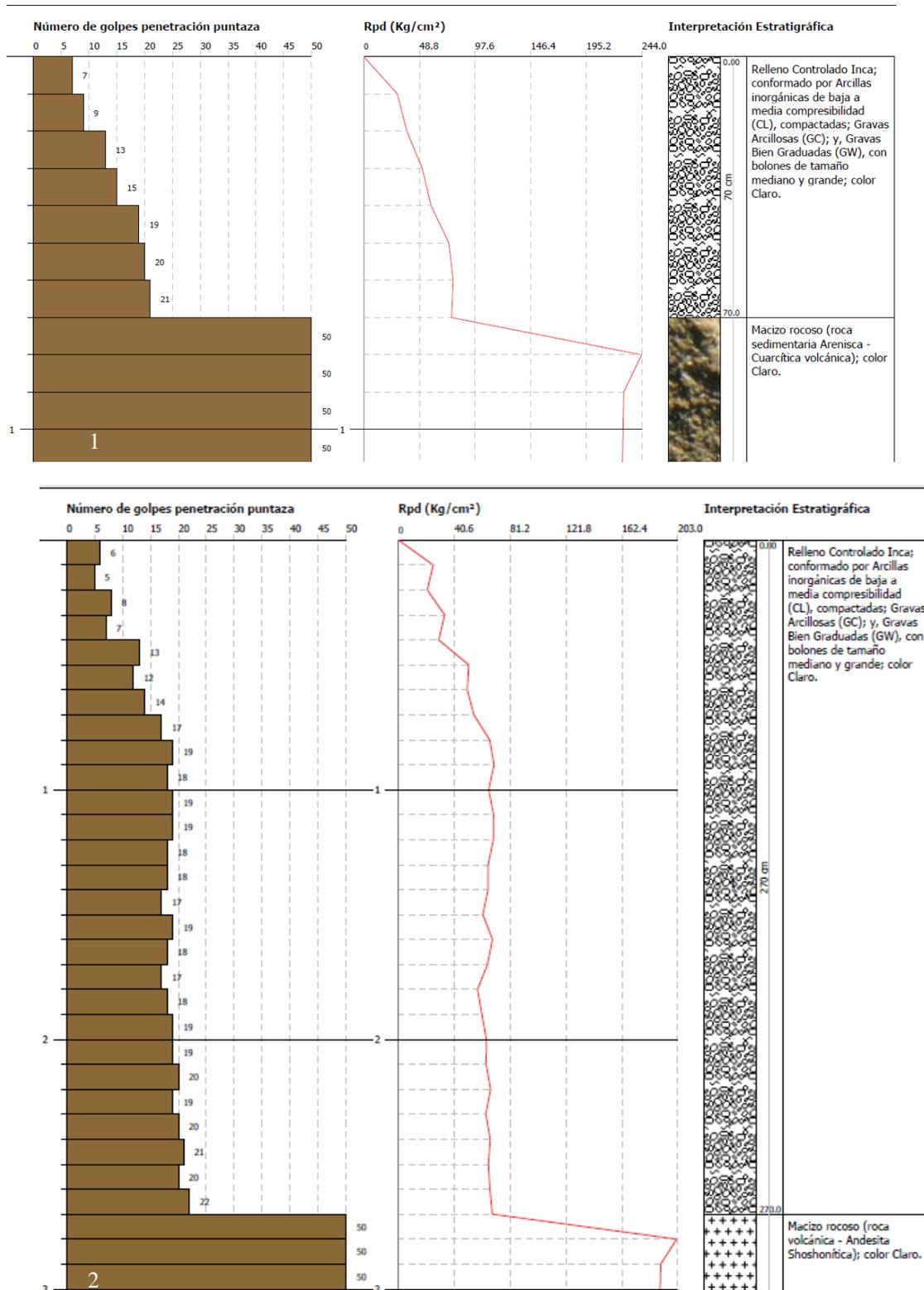


Figura 5.59: Gráficos del Perfil Estratigráfico típico en Muros de Contención de las Llaqtas Incas. (1) Ollantaytambo; (2) Pisaq, caso atípico, el primer Estrato, conformado por el Relleno Controlado Inca, RCI, presenta una potencia de 2.70 m., frente a 0.80 hasta 1.0 m. de promedio; la explicación, es la morfología del relieve. Elaboración propia, 2017.

Caso Plataformas Agrícolas:

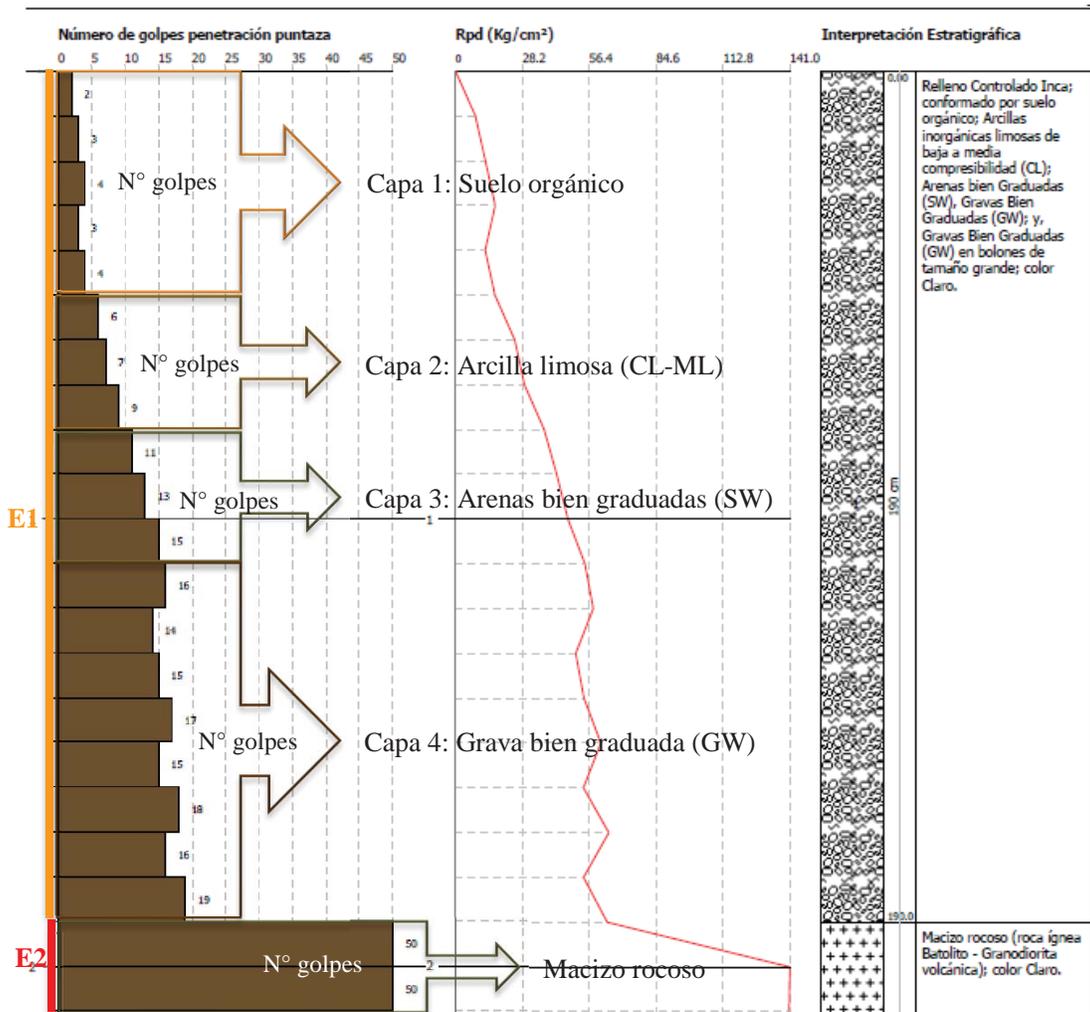


Figura 5.60: Gráfico del Perfil Estratigráfico típico en *Plataformas agrícolas* de las Llaqtas Incas - Machupicchu. La conformación del *Relleno Controlado Inca*, RCI, que constituye el primer Estrato (E1), presenta varias capas, una primera capa de 0.50 m. de espesor en promedio, constituida por Suelo orgánico; una segunda Capa, conformada por Arcilla Limosa (CL), con un espesor promedio de 0.30 m.; una tercera Capa, constituida por Arenas Bien Graduadas (SW), en un espesor promedio de 0.30 m.; una cuarta Capa, conformada por Grava Bien Graduada (GW), de gradación descendente desde tamaños pequeños, medianos hasta bolones grandes, en una potencia promedio de 0.80 m. hasta el contacto con el segundo Estrato (E2), constituido por el Macizo Rocosó, suelo de fundación de las superestructuras Incas. Amerita resaltar, en esta tipología estratigráfica, el doble propósito de los *Rellenos Controlados Inca*; pues, además de transmitir las acciones del suelo al suelo de fundación, también hace las veces de dren, ya que al estar conformadas las Capas 3 y 4 por arenas y gravas, materiales que no tienen adherencia entre sus partículas y son permeables al agua, posibilitan acertadamente la infiltración de las aguas pluviales, que son direccionadas por canales subterráneos a un dren general fuera de los cimientos de las Llaqtas Incas. Elaboración propia, 2017.

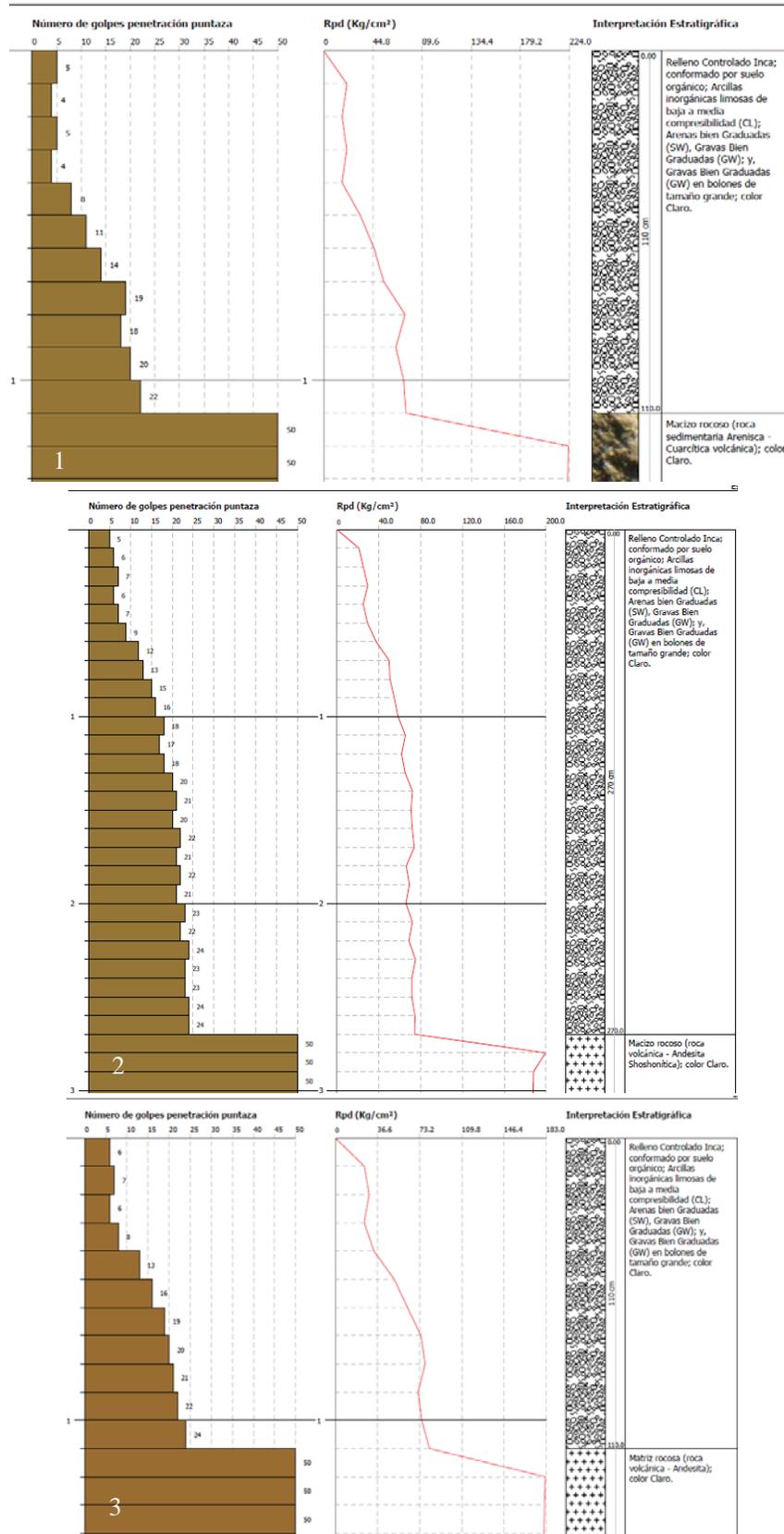


Figura 5.61: Gráficos del Perfil Estratigráfico típico en Plataformas agrícolas de las Llaqtas Incas; (1) Ollantaytambo; (2) Písaq y (3) Tipón; manejo estándar. Elaboración propia, 2017.

Caso Recintos:

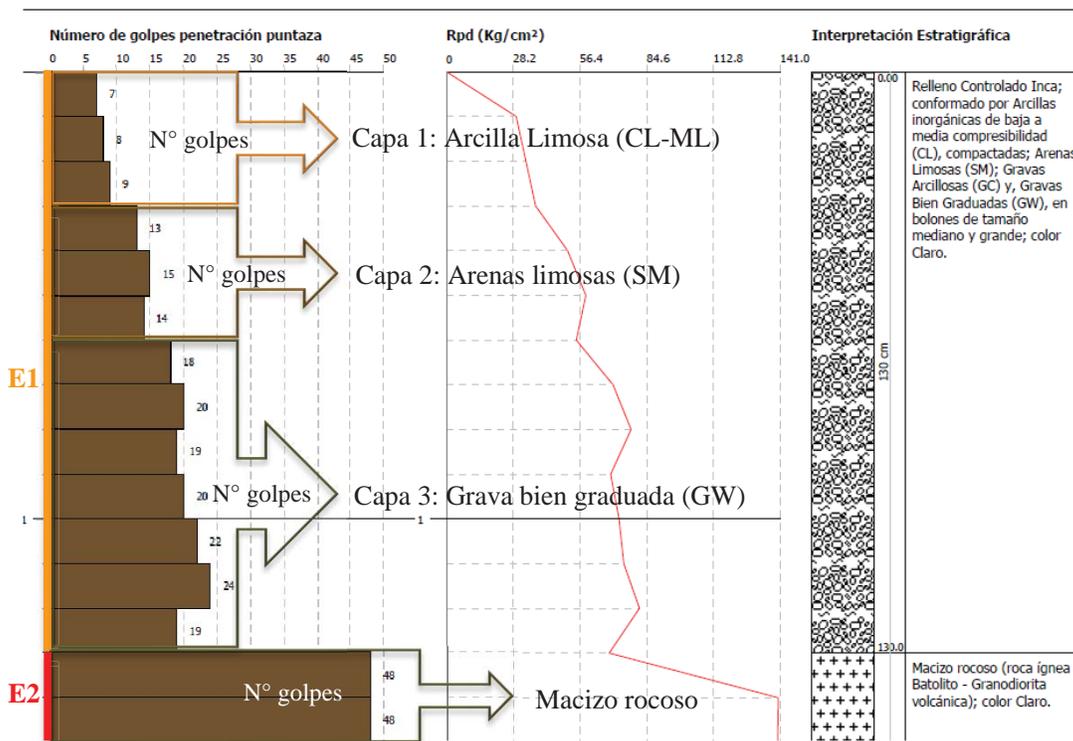


Figura 5.62: Gráfico del Perfil Estratigráfico típico en **Recintos** de las Llaqtas Incas - Machupicchu; donde se comprueba la conformación del *Relleno Controlado Inca*, RCI, que constituye el primer Estrato (E1); el cual, presenta una primera Capa de 0.30 m. de espesor en promedio, constituida por Arcilla Limosa (CL), con alto nivel de compactación; una segunda Capa, constituida por Arenas limosas (SM), en un espesor promedio de 0.30 m.; una tercera Capa, conformada por Grava Bien Graduada (GW), de gradación descendente desde tamaños pequeños, medianos hasta bolones grandes, en una potencia promedio de 0.70 m. hasta el contacto con el segundo Estrato (E2), constituido por el Macizo Rocos, suelo de fundación de las superestructuras Incas. Amerita resaltar, en esta tipología estratigráfica, el tratamiento del nivel de piso terminado de los *Rellenos Controlados Inca*; ya que, recibían acabado diferenciado entre un recinto común (vivienda) y uno ceremonial (templo), éste último, presentaba la Capa de contacto con la superficie: coccionada (Solís, 2000), con la finalidad de lograr máxima impermeabilización; ello, a pesar de estar los recintos techados. Elaboración propia, 2017.

Los Incas emplazaron los recintos, en los sectores más empinados de las montañas rocosas, con la intención de estar próximos al Inti Tayta; zonas de escaso desarrollo edáfico y, en consecuencia, con macizos rocosos muy próximos a la superficie. Por esta razón, los perfiles estratigráficos, presentan el primer estrato (E1) con espesores que oscilan entre 0.20 a 0.50 m.; siendo el objetivo, garantizar un óptimo anclaje entre la superestructura y el suelo, a partir de los Rellenos Controlados Inca, que además de nivelar la superficie, distribuía las Cargas.

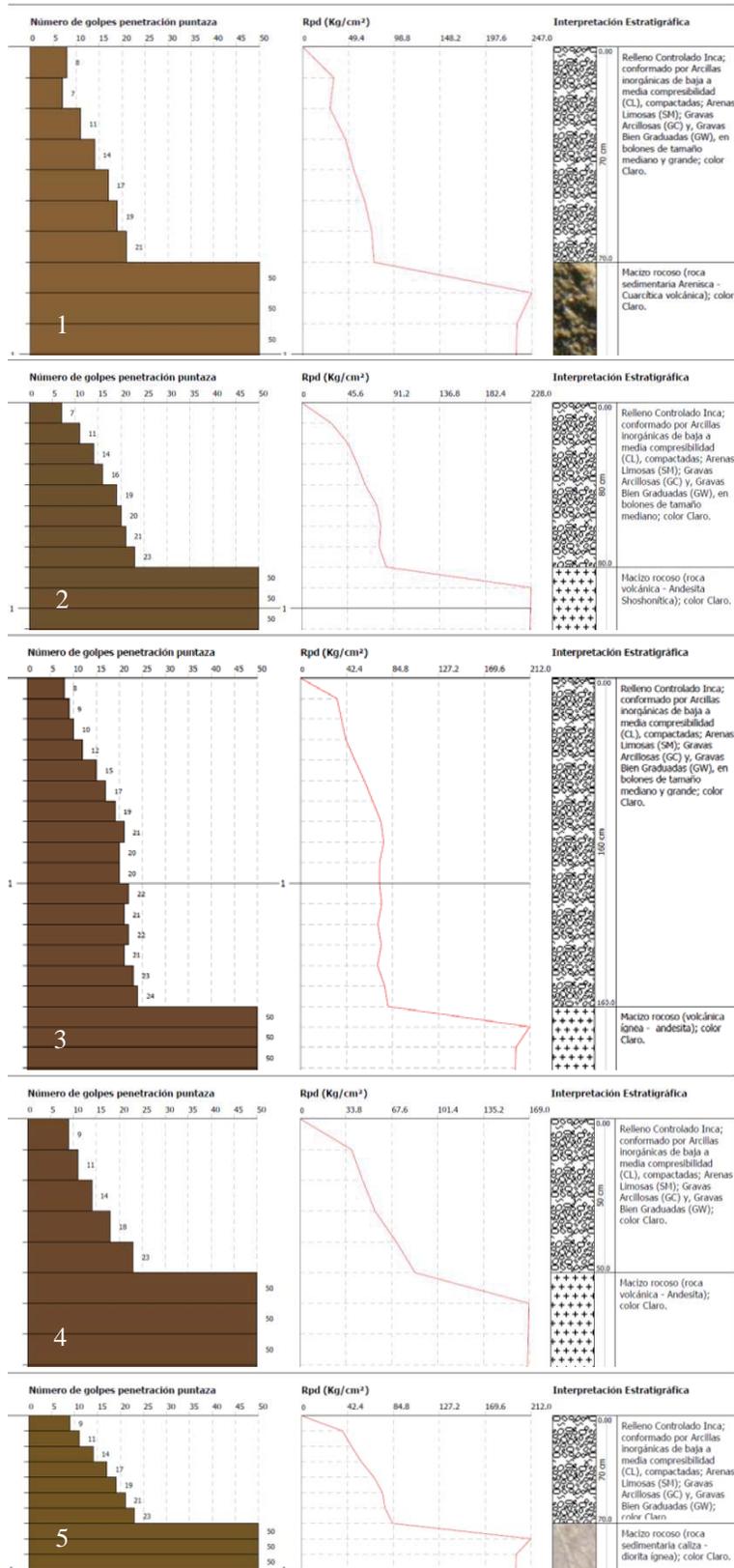


Figura 5.63: Perfil Estratigráfico de Recintos de las Llaqtas Incas; (1) Ollantaytambo; (2) Pisac; (3) Raqchi; (4) Tipón; (5) Saqsaywaman. Elaboración propia, 2017.

Caso espacios abiertos Plaza:

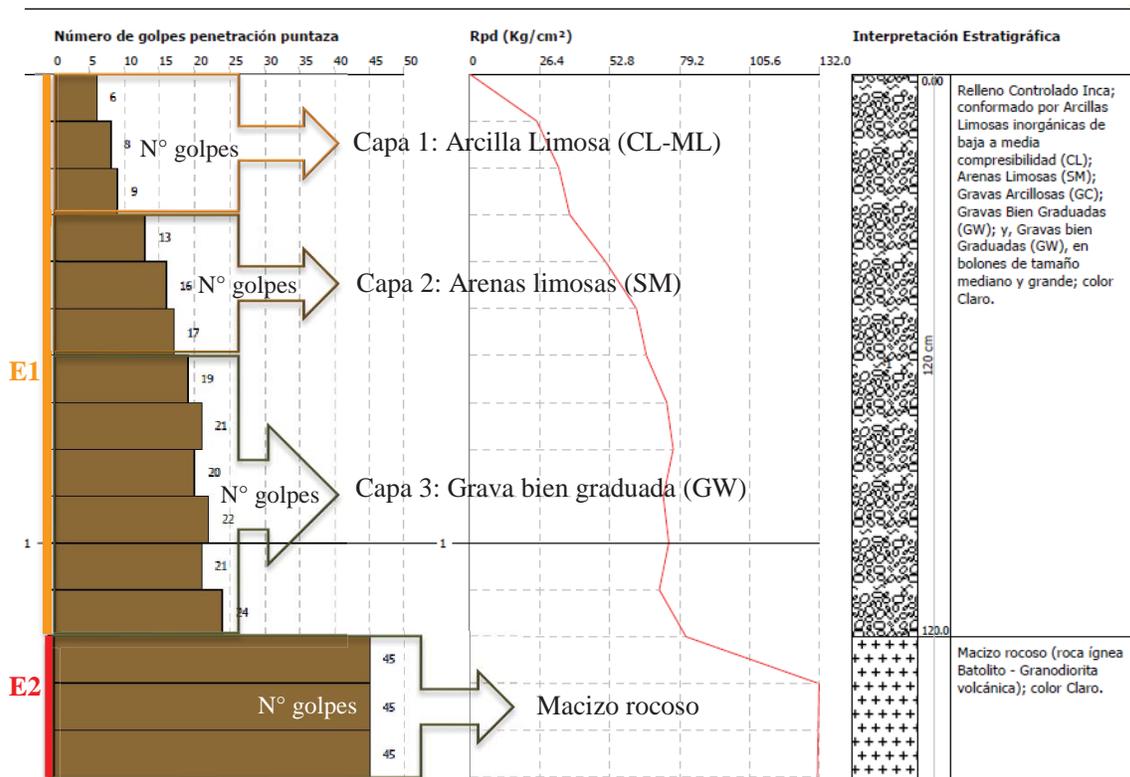


Figura 5.64: Gráfico del Perfil Estratigráfico típico en *Espacios abiertos Plaza* de las Llaqtas Incas - Machupicchu. La conformación del *Relleno Controlado Inca*, RCI, que constituye el primer Estrato (E1); está compuesta por una primera Capa de 0.30 m. de espesor en promedio, constituida por Arcilla Limosa (CL); una segunda Capa, constituida por Arenas limosas (SM), en un espesor promedio de 0.30 m.; una tercera Capa, conformada por Grava Bien Graduada (GW), de gradación descendente desde tamaños pequeños, medianos hasta bolones grandes, en una potencia promedio de 0.60 m. hasta el contacto con el segundo Estrato (E2), constituido por el Macizo Rocos, suelo de fundación de las superestructuras Incas. Amerita resaltar, en esta tipología estratigráfica, que el tratamiento de los *Rellenos Controlados Inca*, es similar a las de las Plataformas agrícolas, diferenciándose en el espesor total del primer estrato, ya que en este caso no presentan capas de suelo orgánico; así mismo, los Incas eligieron áreas que presentaban cierta concavidad para la ubicación de estos espacios abiertos plaza, con la finalidad de emplearlos también como grandes colectores de las aguas pluviales (Wright, 2006), pues los suelos granulares que las conforman (arenas, gravas y bolones de fragmentos de roca) se prestan para tal efecto, por las características impermeabilizantes; y, en el subsuelo, se consideró sistemas de drenaje subterráneo que posibilitaban la evacuación de las aguas hacia drenes que alejaban el agua de los cimientos de las Llaqtas. Elaboración propia, 2017.

El perfil estratigráfico de las Plazas, comprueba la doble función que se les otorgó; pues en el Kay Pacha eran áreas de encuentro y circulación y, en el Uku Pacha colectores de las aguas pluviales; por ello, los Rellenos Controlados Inca, están conformados por suelos granulares.

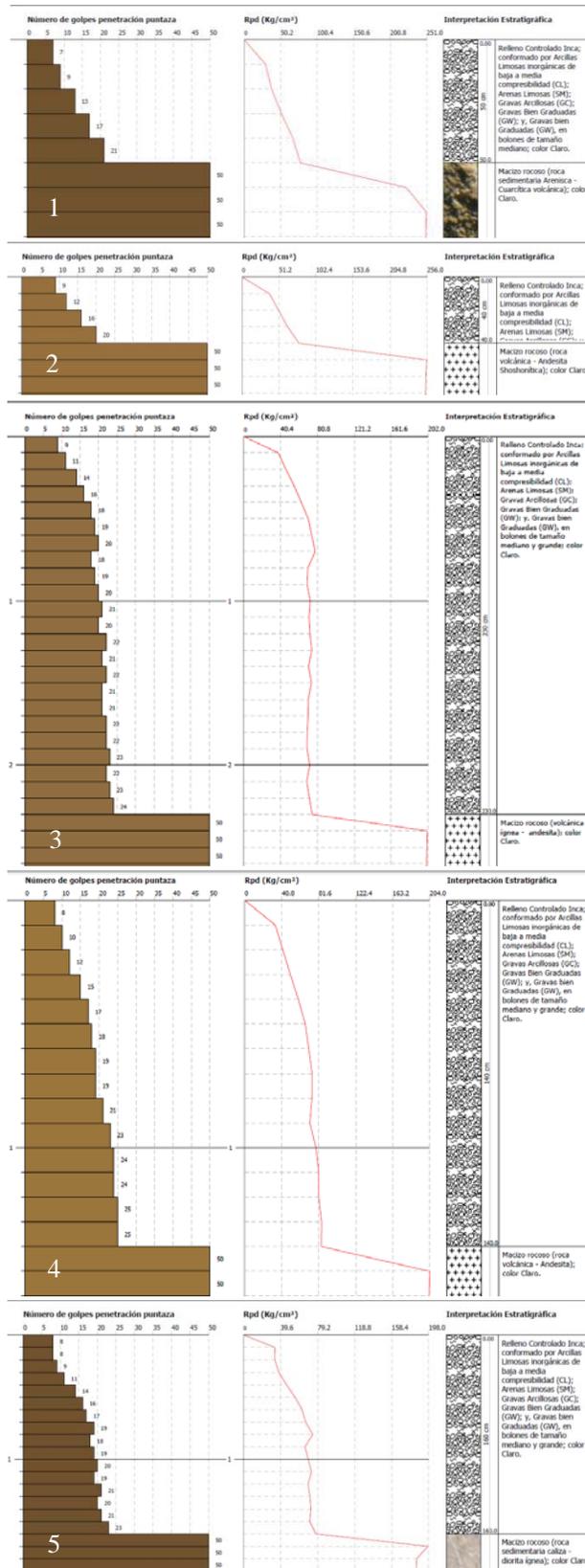


Figura 5.65: Perfil Estratigráfico de Plazas de las Llaqtas Inca; (1) Ollantaytambo; (2) Pisac; (3) Raqchi; (4) Tipón; (5) Saqsaywaman. Elaboración propia, 2017.

Caso espacios abiertos Patio:

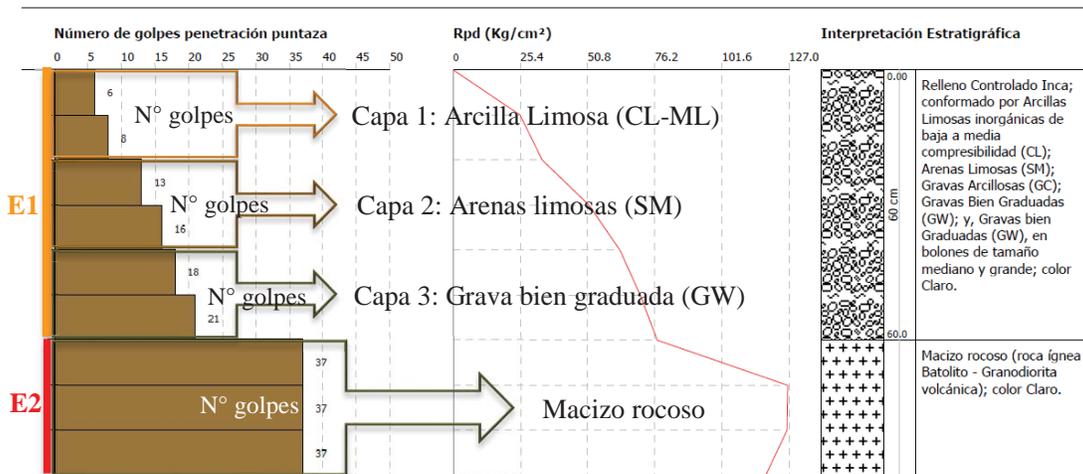


Figura 5.66: Gráfico del Perfil Estratigráfico típico en *Espacios abiertos Patio* de las Llaqtas Incas - Patio. La conformación del *Relleno Controlado Inca*, RCI, que constituye el primer Estrato (E1), presenta una primera Capa de 0.20 m. de espesor en promedio, constituida por Arcilla Limosa (CL); una segunda Capa, constituida por Arenas limosas (SM), en un espesor promedio de 0.20 m.; una tercera Capa, conformada por Grava Bien Graduada (GW), de gradación descendente desde tamaños pequeños, medianos hasta bolones grandes, en una potencia promedio de 0.30 m. hasta el contacto con el segundo Estrato (E2), constituido por el Macizo Rocosos, suelo de fundación de las superestructuras Incas. Esta tipología estratigráfica, se asemeja a los *Rellenos Controlados Inca* de las Plazas; la diferencia reside en la potencia del Estrato total; sin embargo, por su conformación de arenas, gravas y bolones de fragmentos de rocas, materiales impermeabilizantes, posibilitan la infiltración de aguas pluviales al subsuelo, acondicionado con sistemas de drenaje subterráneo, evitando así, el empozamiento y la escorrentía superficial; y, con ello, alejar las aguas pluviales de las cimentaciones de las Llaqtas Incas. Elaboración propia, 2017.

Los Patios, presentan perfiles estratigráficos similares a los Recintos, por constituir las áreas comunes entre éstos; distinguiéndose en el espesor de las Capas de los Rellenos Controlados Inca (E1), manteniendo la misma técnica de conformación, constituida predominantemente por suelos granulares de gradiente descendente. Sin embargo, cumplen dos funciones distintas: En el Kay Pacha, superficie de circulación y, en el Uku Pacha colector de las aguas pluviales que las discriminan hacia drenes alejados de los cimientos; ello explica, el mayor espesor de las Capas constituidas por arenas y gravas, que por sus propiedades permeables e imposibilidad de compresibilidad y expansión, fueron destinados acertadamente, a este uso por los Incas; demostrándonos así, el manejo de las características físicas y mecánicas del suelo de fundación.

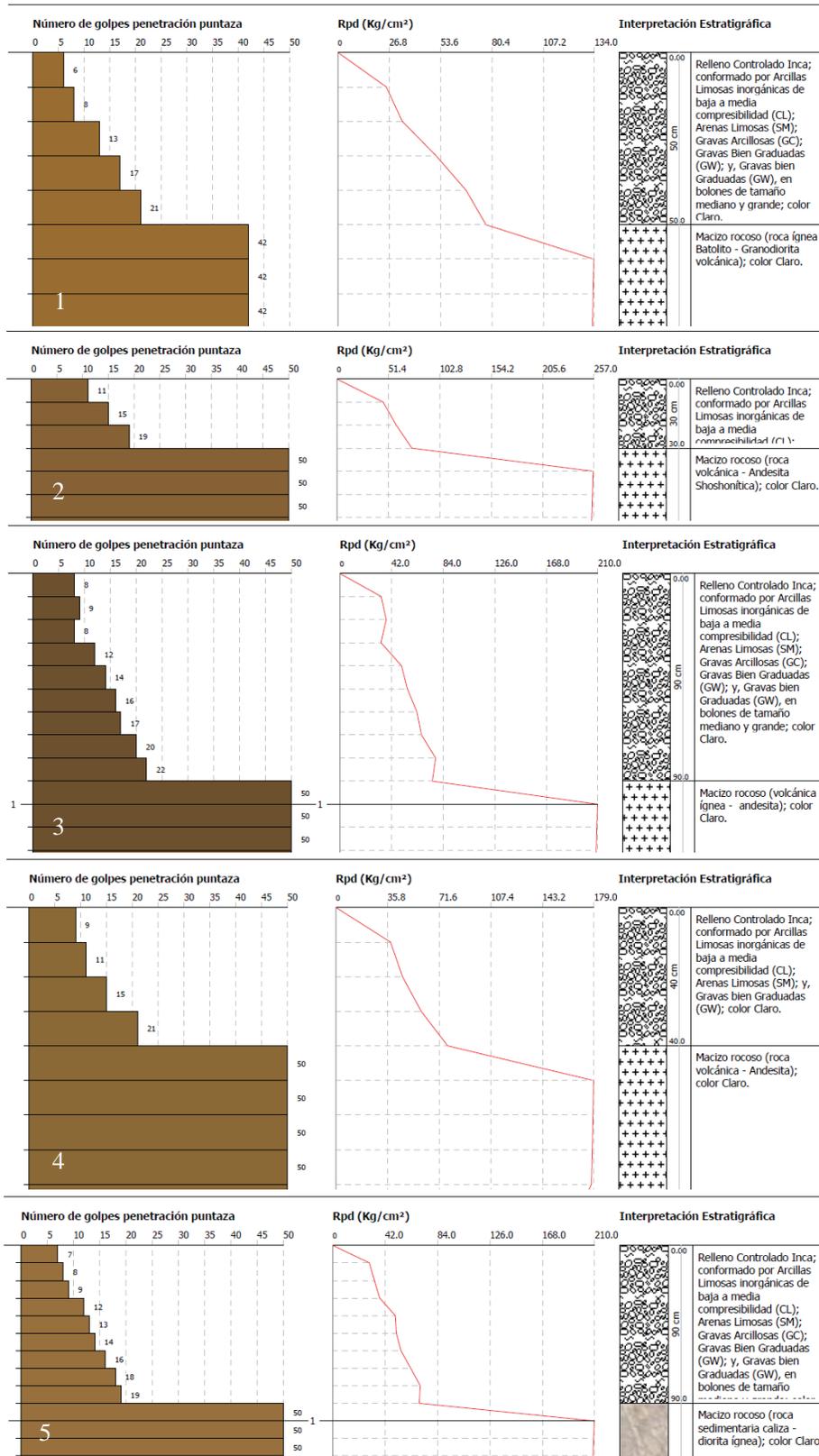


Figura 5.67: Perfil Estratigráfico de Patios de las Llaqtas Inca. (1) Ollantaytambo; (2) Pisac; (3) Raqchi; (4) Tipón; (5) Saqsaywaman. Elaboración propia, 2017.

5.4.3 Correlaciones Penetrométricas

La utilización de correlaciones entre parámetros geotécnicos es una práctica habitual que resulta válida si se trata de fórmulas suficientemente contrastadas y, la correspondencia se establece entre terrenos comparables (Rodríguez, Serra y Oteo, 1989); en este contexto, las correlaciones geotécnicas establecidas a partir del ensayo con el Penetrómetro dinámico ligero, guarda las mejores concordancias con las propiedades reales del suelo de fundación; así, las principales correlaciones que ligan el golpeo penetrométrico y las características del suelo de fundación de las Llaqtas Incas, son los parámetros ángulo de rozamiento interno (Φ) y densidad relativa (γ), que se detalla en Anexos; presentándose en la Tabla 5.27 los valores promedio.

Tabla 5.27

Ángulos de Fricción y Densidades promedio de los Suelos de fundación de las Llaqtas Incas

Llaqta Inca	Φ (°)	γ tn/m ³	γ_{sat} tn/m ³
Machupicchu			
E1: Gravas	30	1.90	2.15
E2: Granodiorita	38	2.34	-
Ollantaytambo			
E1: Gravas	30.63	1.94	2.17
E2: Arenisca	44.30	2.53	-
Pisac			
E1: Gravas	31.20	2.02	2.18
E2: Andesita	44.72	2.60	
Raqchi			
E1: Gravas	30.60	1.95	2.16
E2: Andesita	43.53	2.51	
Tipón			
E1: Gravas	31.12	2.02	2.18
E2: Basalto	41.10	2.48	
Saqsaywaman			
E1: Gravas	30.43	1.94	
E2: Caliza	41.60	2.45	2.16

Nota: E1 y E2=Estrato 1 y 2; Φ =Ángulo de fricción; γ =Densidad; γ_{sat} = Densidad saturada. Se presentan los ángulos de fricción y densidades tanto del material conformante de los Rellenos Controlados Inca, que constituyen el primer Estrato (E1), como de los macizos rocosos, que se identifican como el segundo Estrato (E2); advirtiéndose valores elevados, respecto a los estándares representativos de suelos muy competentes. Elaboración propia, 2017.

Comparando los resultados obtenidos de densidades (γ) de los diferentes tipos de macizos rocosos, correspondientes a las Llaqtas Incas investigadas, con valores obtenidos del mismo tipo de rocas, pero de características geotécnicas muy competentes, por diversos investigadores como: Bieniawski (1974) y Brown (1980); Hoek y Bray (1981) y, Brady y Brown (1985); encontramos, similitud e incluso valores más elevados; lo que demuestra, que los suelos de fundación elegidos por los Incas, presentan densidades que igualan y hasta superan a las densidades estándar, consideradas como óptimas, tal como lo evidenciamos en la Tabla 5.28; significando ello, macizos rocosos de excelente competencia geotécnica.

Tabla 5.28

Comparación de densidades entre Rocas sanas y Macizos rocosos de las Llaqtas Incas

Rocas	Densidad (Tn/m ³), Bieniawski, et.al.	Densidad (Tn/m ³), Llaqtas Incas, elaboración propia, 2017
Granodiorita	2.5 – 2.75	2.13 - 2.52
Andesita	2.3 – 2.75	2.52 - 3.04
Basalto	2.75 - 3	2.46 - 2.51
Arenisca	2.10 - 2.5	2.51 - 2.54
Caliza	2.6 - 2.85	2.24 - 2.51

Nota: El parámetro geotécnico *densidad* es relevante en el cálculo de la Capacidad de Carga de suelos; pues, a mayor densidad mayor resistencia de los suelos (Braja, 2006), de ahí su importancia; y, los valores tanto mínimos y máximos en promedio, obtenidos en la presente investigación de las densidades de los macizos rocosos (resaltados en el recuadro rojo), de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, de cuyos afloramientos -en su mayoría intemperizados-, se extrajeron las muestras para los ensayos de laboratorio, están muy próximos a los valores del mismo tipo de roca pero sana. Adaptado de Ramírez y Alejano, 2004. De hecho, hay diferencia en los valores de densidades entre las Llaqtas Incas, obteniendo el valor más alto la andesita de Pisaq y Raqchi; seguida de la arenisca de Ollantaytambo, en tercer lugar está la granodiorita de Machupicchu; en cuarta posición el basalto de Tipón y con la densidad más baja, la caliza de Saqsaywaman; aún así, valores óptimos, en relación a los estándar aceptables de substratos rocosos, que en promedio es 2.3 Tn/m³ (Rodríguez, et.al., 1989).

5.4.4 Peso Unitario

Es otro parámetro geotécnico, referido al peso de las muestras de los macizos rocosos en estudio, sobre sus volúmenes; que, también se consideran como la densidad de los macizos; cuyos resultados promedio, expuestos en la Tabla 5.29, confirman que se trata de macizos

rocosos de alta resistencia, por los elevados valores que presentan, respecto incluso a los Pesos Unitarios característicos de Gravas bien gradudas, que oscilan entre 2 a 2.24 Kg./cm³ (Rodriguez y Alejano, 2004).

Tabla 5.29

Pesos Unitarios o Densidad de Macizos Rocosos de las Llaqtas Incas

Llaqta Inca	Peso Unitario (Kg./cm ³)			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
Machupicchu Granodiorita	1.80	1.81	1.98	1.86
Ollantaytambo Arenisca cuarcítica	2.79	2.64	2.72	2.72
Pisaq Andesita	2.69	2.76	2.77	2.72
Raqchi Andesita	2.51	2.50	2.52	2.51
Tipón Basalto	2.36	2.23	2.17	2.25
Saqsaywaman Caliza	2.49	2.36	2.55	2.47

Nota: El parámetro geotécnico *peso unitario* es relevante en el cálculo de la Capacidad de Carga de suelos; pues, a mayor peso unitario mayor resistencia de los suelos (Braja, 2006); y, los valores promedio obtenidos en la presente investigación de los pesos unitarios de los macizos rocosos, presentan valores elevados; distinguiéndose la arenisca cuarcítica y la andesita de Ollantaytambo y Pisaq respectivamente, con los valores más altos; seguidas de la andesita de Raqchi; en tercera posición la caliza de Saqsaywaman; en cuarta posición el basalto de Tipón y con el peso unitario más bajo la granodiorita de Machupicchu. Elaboración propia, 2017.

5.4.5 Resistencia a la Compresión No Confinada de Corazones Diamantinos de Macizos Rocosos de las Llaqtas Incas

Deducir propiedades mecánicas de macizos rocosos a partir de las características de los materiales que los componen y de las microfisuras y otras discontinuidades existentes en ellos,

es prácticamente imposible. Por ello, se tiene que recurrir a los ensayos de Laboratorio, para determinar dichas propiedades. En este contexto, a partir del *Ensayo de Compresión Simple*, determinamos la resistencia a compresión uniaxial de un corazón diamantino cilíndrico del macizo rocoso; de altura entre el doble y el triple del diámetro; así mismo, clasificamos los macizos rocosos según su resistencia. Aparentemente, constituye un ensayo sencillo; pero, la realización e interpretación de resultados, requiere bastante cuidado.

Cabe precisar que, debido a la heterogeneidad de los corazones diamantinos cilíndricos de un mismo macizo rocoso, la resistencia a compresión simple, puede variar ampliamente. Los factores determinantes, en la resistencia a la compresión simple son: Tamaño de grano; porosidad; meteorización; grado de microfisuración; naturaleza y resistencia del ligante que une los granos; y, densidad, presión y temperatura a la que ha estado sometida durante su formación (Ramírez y Alejano, 2004); siendo el grado de meteorización, el que consideramos el de mayor influencia en las resistencias obtenidas de los macizos rocosos que conforman los suelos de fundación de las Llaqtas Incas en estudio, que se muestran en la Tabla 5.30.

Tabla 5.30

Resistencia a Compresión de Macizos Rocosos de las Llaqtas Incas

Llaqta Inca	Resistencia (Kg./cm ²)			Promedio
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	
Machupicchu Granodiorita	778.95	814.99	719.71	771
Ollantaytambo Arenisca cuarcítica	498.07	522.76	475.86	499
Pisac Andesita	670.85	745.38	651.59	689
Raqchi Andesita	651.10	639.25	653.07	648
Tipón Basalto	292.72	336.16	272.98	315
Saqsaywaman Caliza	315.92	286.36	243.36	282

Nota: Los valores promedio de la Resistencia a la Compresión de los macizos rocosos de las Llaqtas investigadas, presentan valores óptimos, respecto a lo normado como competente en *Concreto Armado*, cuya resistencia es: $f'c = 210 \text{ Kg./cm}^2$. Elaboración propia, 2017.

En las figuras 5.68 a 5.73, se presenta los ensayos de Compresión Simple No Confinada; resultando las muestras ensayadas casi íntegras, por la dureza que éstas presentan.



Figura 5.68: Ensayos de Compresión Simple No Confinada, de suelos de fundación de la Llaqta Inca de **Machupicchu**. (1) Corazones diamantinos de macizo rocoso de Granodiorita; (2) Ensayo de Compresión de la Muestra; (3) Muestra ensayada, casi íntegra, presentan en promedio 771 Kg. /Cm2 de resistencia a la compresión. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.69: Ensayos de Compresión Simple No Confinada, de suelos de fundación de la Llaqta Inca de **Ollantaytambo**. (1) Corazones diamantinos de macizo rocoso de Arenisca cuarcita; (2) Ensayo de compresión de la Muestra; (3) Muestra ensayada, nótese fragmentación en dos partes, con un promedio de $f'_c = 499$ Kg. /Cm2. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.70: Ensayos de Compresión Simple No Confinada, de suelos de fundación de la Llaqta Inca de **Písaq**. (1) Corazones diamantinos de macizo rocoso Andesita; (2) Ensayo de Compresión; (3) Muestra promedio de $f'_c = 689$ Kg./Cm2. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.71: Ensayos de Compresión Simple No Confinada, de suelos de fundación de la Llaqta Inca de **Raqchi**. (1) Corazones diamantinos de macizo rocoso de Andesita; (2) Ensayo de Compresión no confinada de la Muestra; (3) Muestra ensayada, nótese la integridad del espécimen después del ensayo, con un promedio de $f'c = 648 \text{ Kg. / Cm}^2$, lo que certifica la dureza y resistencia de la roca. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.72: Ensayos de Compresión Simple No Confinada, de suelos de fundación de la Llaqta Inca de **Tipón**. (1) Corazones diamantinos de macizo rocoso de Andesita basalto; (2) Ensayo de Compresión de la Muestra; (3) Muestra ensayada, el espécimen resultante casi intacto, con un promedio de $f'c = 315 \text{ Kg. / Cm}^2$, demostrándose la dureza del macizo rocoso. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.73: Ensayos de Compresión Simple No Confinada, de suelos de fundación de la Llaqta Inca de **Saqsaywaman**. (1) Corazones diamantinos de macizo rocoso de Caliza; (2) Ensayo de la Muestra; (3) Muestra resultante intacta, con un $f'c = 282 \text{ Kg. / Cm}^2$; que supera al óptimo normado en Concreto armado de 210 Kg. / Cm^2 . Fotografías, archivo personal, 2017.

Las características mecánicas investigadas de los diferentes tipos de los macizos rocosos en estudio, expresadas en valores promedio de Resistencia (Kg. /cm²), las categorizan como *rocas moderadamente duras a duras*, de acuerdo a la clasificación detallada en la Tabla 5.31; sin embargo, por el extraordinario comportamiento mecánico de los macizos rocosos por más de cinco siglos, soportando las superestructuras Incas, podríamos afirmar que éstos bien pueden ser clasificados como *rocas muy duras*; más aún, tratándose de *rocas volcánicas ígneas* en su mayoría como son los casos de Machupicchu (volcánica ígnea granodiorita), Písaq (volcánica ígnea andesita), Raqchi (volcánica ígnea andesita) y Tipón (volcánica ígnea andesita y basalto).

Tabla 5.31

Clasificación de Rocas de las Llaqtas Incas, a partir de su Resistencia a Compresión

Resistencia a la Compresión Simple Kg./cm ²	ISRM 1981	Geological Society of London 1970	Bieniawski 1973	Llaqta Inca, f'c en Kg./cm ² , 2017, elaboración propia
254.9 – 509.9	Moderadamente dura	Moderadamente dura	Baja	Saqsaywaman 282 (roca sedimentaria caliza), Tipón 315 (roca ígnea andesita – basalto) y Ollantaytambo 499 (roca metamórfica arenisca cuarcítica)
509.9 – 1020	Dura	Dura	Media	Machupicchu 771 (roca ígnea granodiorita), Písaq 689 (roca ígnea andesita) y Raqchi 648 (roca ígnea andesita)
1020 – 2039	Muy dura	Muy dura	Alta	Rocas ígneas y metamórficas

Nota: ISRM = International Society for Rock Mechanics. Las resistencias a compresión de los macizos rocosos de las Llaqtas Incas investigadas, resaltados en color rojo, presentan valores bastante próximos a las de las rocas sanas investigadas por el ISRM, 1981; La Geological Society of London, 1970; y, Bieniawski, 1973; confirmándose que se trata de suelos competentes, de óptimas características geotécnicas. Adaptado de Ramírez y Alejano, 2004.

A su vez, la clasificación de los macizos rocosos en estudio como moderadamente duros a duros (aunque, bien pueden ser calificados como muy duros), les confiere aptitudes óptimas como material de cimiento, tal como se muestra en la Tabla 5.32.

Tabla 5.32

Aptitud de macizos rocosos de las Llaqtas Incas para cimientos

Llaqta Inca y tipo de macizo rocoso	Capacidad de Carga	Modificación de resistencia en presencia de agua	Compactabilidad	Alterabilidad potencial	Observaciones
Machupicchu, <i>ígneas:</i> Granodiorita	Muy alta	Nula	Difícil	Muy baja	Debe eliminarse zonas meteorizadas
Ollantaytambo, <i>metamórfica:</i> Arenisca cuarcítica	Alta	Nula	Difícil	Muy baja	Debe eliminarse zonas meteorizadas
Pisac, <i>ígneas:</i> Andesita	Muy alta	Nula	Difícil	Muy baja	Debe eliminarse zonas meteorizadas
Raqchi, <i>ígneas:</i> Andesita	Muy alta	Nula	Difícil	Muy baja	Debe eliminarse zonas meteorizadas
Tipón, <i>ígneas:</i> Andesita Basalto	Muy alta	Nula	Difícil	Muy baja	Debe eliminarse zonas meteorizadas
Saqsaywaman, <i>sedimentaria:</i> Caliza	Alta	Muy baja	Media	Baja	Debe eliminarse zonas meteorizadas

Nota: La clasificación de los macizos rocosos y su correspondencia con su capacidad de carga, se hace evidente en la Tabla; pues, las ígneas volcánicas como las granodioritas (Machupicchu), andesitas (Pisac y Raqchi) y basaltos (Tipón), constituyen rocas con muy alta capacidad de carga; mientras que las metamórficas como las areniscas (Ollantaytambo) y sedimentarias como las calizas (Saqsaywaman), capacidad de carga alta; presentando además todas ellas, imposibilidad de modificación frente a la presencia de agua e inalterabilidad de sus características físicas y mecánicas. Adaptado de (Braja, 2006).

5.4.6 Correlaciones Esclerométricas

En base a los ensayos esclerométricos realizados In Situ, en los diferentes afloramientos de los macizos rocosos de las Llaqtas Incas investigadas; en gabinete, a través de correlaciones normalizadas, se obtienen valores de resistencia de los macizos rocosos, que se muestran en la Tabla 5.33.

Tabla 5.33

Resistencia de macizos rocosos de las Llaqtas Incas, a partir de Ensayos Esclerométricos

Llaqtas Incas	Resistencia en Kg./Cm ²									Promedio
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	
Machupicchu Granodiorita	294	346	-	-	-	-	-	-	-	320
Ollantaytambo Arenisca	306	284	468	458	529	244	366	589	714	440
Pisac Andesita	714	652	-	-	-	-	-	-	-	683
Raqchi Andesita	622	274	326	-	-	-	-	-	-	407
Tipón Basalto	589	579	438	714	549	612	509	468	622	564
Saqsaywaman Caliza	490	478	534	622	549	589	488	396	529	519

Nota: P=Prueba. Los valores de resistencia obtenidos a partir de ensayos con Penetrómetro Dinámico Ligero y sus correlaciones de los macizos rocosos de las Llaqtas Incas, son confirmados también, por los valores promedio que se obtienen a partir de Ensayos Esclerométricos In Situ y, sus respectivas correlaciones normalizadas; así, el valor más alto lo obtiene por este método, la andesita de Pisac, seguida del basalto de Tipón; en tercera posición la caliza de Saqsaywaman; en cuarta ubicación la arenisca de Ollantaytambo; en quinta posición la andesita de Raqchi; y, con la resistencia más baja, la granodiorita de Machupicchu; sin embargo, todas superan al óptimo estándar normalizado en Concreto Armado, que exige un $f'c = 210 \text{ Kg./Cm}^2$; consecuentemente, están bien catalogadas como rocas muy duras y duras. Por otro lado, la diferencia de resultados entre métodos (PDL y Esclerómetro), no hacen sino evidenciar la heterogeneidad de posibilidades de dureza de un mismo macizo rocoso (Ramírez y Alejano, 2004); pero, con condiciones geotécnicas muy favorables. Elaboración propia, 2017.

5.4.7 Conclusiones de los análisis en Laboratorio

✓ **De las Características Físicas**

Los ensayos de Clasificación, a partir de los análisis granulométricos y, Límites de Atteberg (Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad) realizados en Laboratorio, al material conformante de los *Rellenos Controlados Inca*, evidencian que se trata de *suelos granulares*, constituidos por *Gravas*, cuyos Coeficientes de Uniformidad y Curvatura, son altos; y, en consecuencia, *bien graduados* (alto grado de acomodo), *compactos*, *incompresibles* y *resistentes*. No se realizaron ensayos con los suelos finos como las arcillas, por estar éstos In Situ muy disturbados; y, no constituir el suelo de apoyo, sólo complementar por sus propiedades cohesivas, a la compactación y confinamiento de los *Rellenos Controlados Incas*.

Las Características Físicas y Mecánicas determinadas, hacen que las gravas estén *valoradas como Suelos con alta Capacidad de Carga; sin riesgo de generar asentamientos*, por la *baja posibilidad de modificar sus propiedades frente a cambios de temperatura y humedad; y, excelentes a buenos, como suelos de fundación* o apoyo; coadyuvado por su *propiedad impermeabilizante*, que les posibilita colectar y drenar las aguas pluviales de la superficie hacia el subsuelo. Propiedades que confirma que los Incas, conocieron y aprovecharon eficientemente las propiedades geotécnicas de las Q'aaqas (macizos rocosos) y los Llinqq'is (arcillas) para lograr cohesión y resistencia en sus *Rellenos Controlados Inca, RCI*.

✓ **De los Perfiles Estratigráficos**

Se comprueba un patrón de conformación de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas, a partir de la estratigrafía y naturaleza de los suelos de fundación, constituido por dos Estratos, que se originan a partir del mismo macizo rocoso y sus fragmentos: El primero, *Estrato 1 (E1)*, que determinamos denominarlo en la presente investigación, como *Relleno Controlado Inca, RCI*; y, el segundo Estrato, *Estrato 2 (E2)*, constituido por el *Macizo Rocosos*. El E1, a su vez, está constituido por varias capas, cuyos espesores o potencias, dependen entre otros: de la

morfología del relieve, del nivel del sistema edáfico y de la superestructura a soportar; estando caracterizado este Estrato, por su alto nivel de compactación y confinamiento.

Las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, presentan particularidades propias, de acuerdo a sus emplazamientos; sin embargo, comparten patrones formales y funcionales en la conformación y manejo de sus suelos de fundación; hecho que permite obtener configuraciones promedio para cada tipo de superestructura investigada; así, en el caso de *Muros de contención*, el espesor promedio de los *Rellenos Controlados Inca*, hasta alcanzar al macizo rocoso, es de 0.70 metros; en las *Plataformas agrícolas*, alcanzan 1.10 metros de profundidad; en *Recintos*, 0.40 metros de espesor; en *Plazas* 0.50 metros y, en *Patios*, 0.40 metros.

Las capas características que conforman el Estrato 1 (E1), que constituyen los *Rellenos Controlados Inca*, RCI, están compuestas por Arcillas limosas, (CL-ML); Gravas arcillosas, (GC); Gravas bien graduadas, (GW); y, Gravas con bolones de variado tamaño, en graduación descendente, desde pequeños, medianos hasta fragmentos de roca grandes; sólo en el caso de Plataformas agrícolas, la primera capa está conformada por suelo orgánico. Los *Rellenos Controlados Inca*, están conformados por gravas del mismo macizo rocoso, lo que asegura mantener las mismas características físicas y mecánicas competentes; y, en consecuencia, afrontar sin dificultad las cargas axiales y fuerzas cortantes, a las cuales están sometidas.

✓ De las Correlaciones Penetrométricas

Se comprueba valores acertados, comparándolos con parámetros característicos certificados por investigaciones; siendo los parámetros más representativos para el cálculo de las Capacidades de Carga: los ángulos de fricción(Φ , °) y, las densidades (γ , tn/m³); así, la andesita de **Písaq**, presenta los valores más elevados, 44.72° y **2.6**, respectivamente; seguida por la arenisca cuarcítica de **Ollantaytambo** con 44.30° y **2.53**; en tercera posición, la andesita de **Raqchi**, con 43.53° y **2.51**; cuarto, la caliza de **Saqsaywaman** con 41.60° y **2.45**; quinto, el

basalto de **Tipón** con 41.10 y **2.45**; y, en sexta posición, la granodiorita de **Machupicchu**, con 38.6° de ángulo de fricción y **2.34** de densidad. En todos los casos valores muy competentes.

✓ **De los Pesos Unitarios**

Los pesos unitarios (Kg. /cm²) de las muestras de los macizos rocosos de las Llaqtas Incas, son parámetros geotécnicos similares a las densidades; y se realizaron con la finalidad de comprobar los valores de las densidades halladas; así, el peso unitario con el valor más elevado lo presentan paralelamente la arenisca cuarcítica de **Ollantaytambo** y la andesita de **Pisaq** con **2.72** Kg./cm³; las sigue la andesita de **Raqchi**, con **2.51**; en tercera posición la caliza de **Saqsaywaman** con **2.47**; en cuarta ubicación el basalto de **Tipón**, con **2.25**; y, con el peso unitario más bajo, la granodiorita de **Machupicchu**, con **1.86** Kg. / cm³. Puede advertirse las mismas posiciones con ligeras variantes en los valores; certificándose así, su coherencia.

✓ **De la Resistencia a la Compresión No Confinada de los corazones diamantinos**

La resistencia a la compresión, es uno de los parámetros geotécnicos más representativos que demuestran la competencia o no de los suelos; en este entender, los resultados obtenidos indican con la resistencia más elevada a la granodiorita de **Machupicchu**, con **771** Kg./cm²; seguida por la andesita de **Pisaq**, con **689** Kg./cm²; en tercera posición la andesita de **Raqchi**, con **648** Kg. /Cm²; en cuarta posición, la arenisca cuarcítica de **Ollantaytambo**, con **499** Kg./cm²; en quinta ubicación, el basalto de **Tipón**, con **315** Kg./cm²; y, con la resistencia más baja, la caliza de **Saqsaywaman**, con **282** Kg./cm². La diferencia entre las Llaqtas, es pequeña; manteniendo una diferencia considerable con el $f'c = 210$ Kg. /cm² del concreto.

✓ **De las Correlaciones Esclerométricas**

Parámetro geotécnico que posibilita conocer la resistencia de los macizos rocosos de las Llaqtas Incas In Situ, que permite ratificar o invalidar los valores de las resistencias calculadas a partir de Ensayos de Compresión no confinada; así, la andesita de **Pisaq**, presenta la resistencia más elevada, con **683** Kg./cm²; seguida por el basalto de **Tipón**, con **564** Kg./cm²;

en tercera ubicación, la caliza de **Saqsaywaman**, con **519 Kg./cm²**; en cuarta posición, la arenisca cuarcítica de **Ollantaytambo**, con **440 Kg./cm²**; en quinta ubicación, la andesita de **Raqchi**, con **407 Kg./cm²**; y, con la resistencia más baja, la granodiorita de **Machupicchu**, con **320 Kg./cm²**. Tanto los valores de compresión simple como los esclerométricos son muy similares.

En la Tabla 5.34, sintetizamos los parámetros geotécnicos determinados en Laboratorio.

Tabla 5.34

Síntesis de Parámetros geotécnicos promedio de las Llaqtas Incas

Llaqtas Incas	Peso Unitario (Kg./cm ³)	Densidad, (Tn/m ³)	Angulo de fricción, Φ (°)	Compresión Simple Resistencia (Kg./cm ²)	Correlación Esclerométrica Resistencia (Kg./cm ²)
Machupicchu					
E1: Gravas		1.90	30		
E2: Granodiorita	1.86	2.34	38	771	320
Ollantaytambo					
E1: Gravas		1.94	30.63		
E2: Arenisca	2.72	2.53	44.30	499	440
Pisaq					
E1: Gravas		2.02	31.20		
E2: Andesita	2.72	2.60	44.72	689	683
Raqchi					
E1: Gravas		1.95	30.60		
E2: Andesita	2.51	2.51	43.53	648	407
Tipón					
E1: Gravas		2.02	31.12		
E2: Basalto	2.25	2.48	41.10	315	564
Saqsaywaman					
E1: Gravas		1.94	30.43		
E2: Caliza	2.47	2.45	41.60	282	519

Nota: De acuerdo a los Parámetros Característicos del Suelo (Rodríguez, et. al., 1989), el Peso Específico de Gravas es de 1.90 t/m³; y, los valores hallados en las Llaqtas Incas, son superiores a éste; así mismo, la Resistencia a Compresión óptima normalizada del Concreto Armado es de $f'c = 210$ Kg. /cm².; sin embargo, las resistencias a compresión resultantes de los macizos rocosos investigados, a partir de Ensayos de Compresión Simple y correlaciones esclerométricas, distan ampliamente (resaltado, recuadro naranja). Elaboración propia, 2017.

5.5 De las Condiciones de Cimentación

5.5.1 Tipo de cimentación de las Llaqtas Incas

Considerando que los suelos de fundación de los emplazamientos de las Llaqtas Incas, están constituidas por Macizos rocosos *ígneos*, en los casos de Machupicchu, Písaq, Raqchi y Tipón; *metamórficos*, en el caso de Ollantaytambo; y, *sedimentarios* en el caso de Saqsaywaman; con relieves morfológicos abruptos; los Incas, con la finalidad de homogeneizar las superficies de fundación o apoyo para cimentar sus superestructuras, crearon -lo que denominamos en esta investigación- como: los *Rellenos Controlados Inca, RCI*; los mismos, que están constituidos por el mismo material del macizo rocoso de emplazamiento, en forma de fragmentos de tamaños grande, regular y pequeño o gravas, complementadas con arenas, limos y arcillas.

Los *Rellenos Controlados Inca, RCI*, en primer término, hacen las veces de suelos de fundación, que ayudan a los macizos rocosos a presentar una superficie nivelada para los cimientos; pero a su vez, constituyen también, los cimientos de las superestructuras Incas, pues éstas se apoyan en ellos; además, las superestructuras, con excepción de aquellas que están directamente apoyadas sobre los macizos rocosos en la superficie, presentan un importante nivel de soterramiento, que junto a los *Rellenos Controlados Inca, RCI*, además, cuentan con confinamientos vastos, para dar cara a las cargas verticales y horizontales; éstas últimas, generadas por los sismos.

En este contexto, de acuerdo a los perfiles estratigráficos registrados y, a la profundidad a la que se encuentran los *Rellenos Controlados Inca* y los macizos rocosos, se comprueba que el Tipo de cimentación de las superestructuras de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, son los *Cimientos Corridos Superficiales*. Éstos varían en espesor, de acuerdo a la morfología del relieve particular de los emplazamientos y, del tipo de superestructura que soportan; así mismo, la conformación de las Capas de los *Rellenos Controlados Incas*, que vienen a ser los cimientos, también difieren; en

efecto, las Plataformas agrícolas son distintas en espesor que los Recintos, y éstos difieren en potencia a los Muros de Contención. Mostramos lo descrito en las Figuras 5.74 a 5.79.

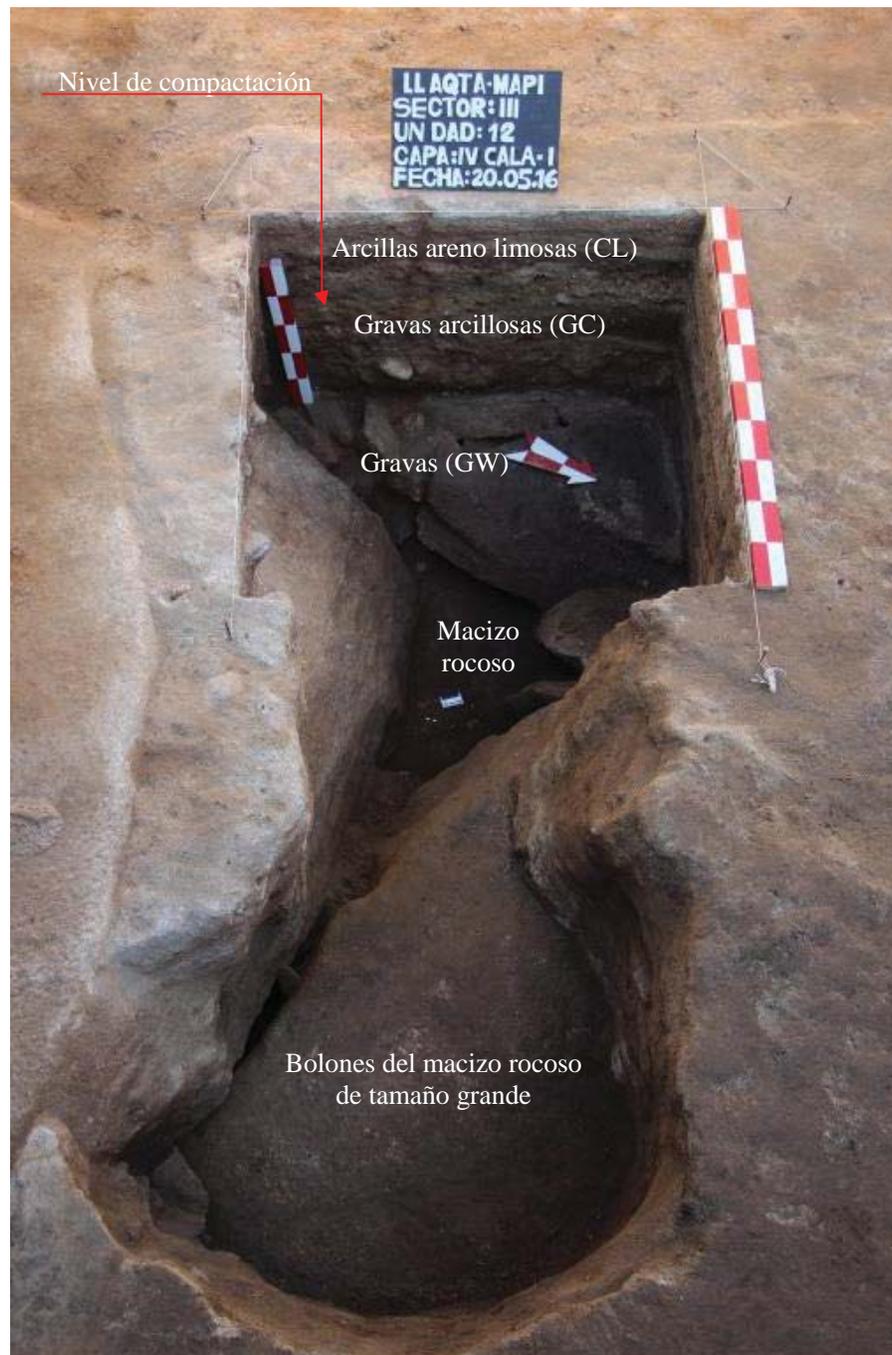


Figura 5.74: Patrón de Relleno Controlado Inca, RCI. Conformado por bolones del mismo material del macizo rocoso en la base; seguido de Capas de Gravas bien graduadas (GW); Gravas arcillosas (GC) y Arcillas areno limosas (CL-SM); los espesores de las capas están en función al relieve de los emplazamientos de las Llaqtas, el sistema edáfico y la función de la superestructura Inca; con óptimos niveles de compactación y confinamiento muy bien soterrado. Fotografías, archivo Jefatura Santuario Histórico de Machupicchu, 2016.

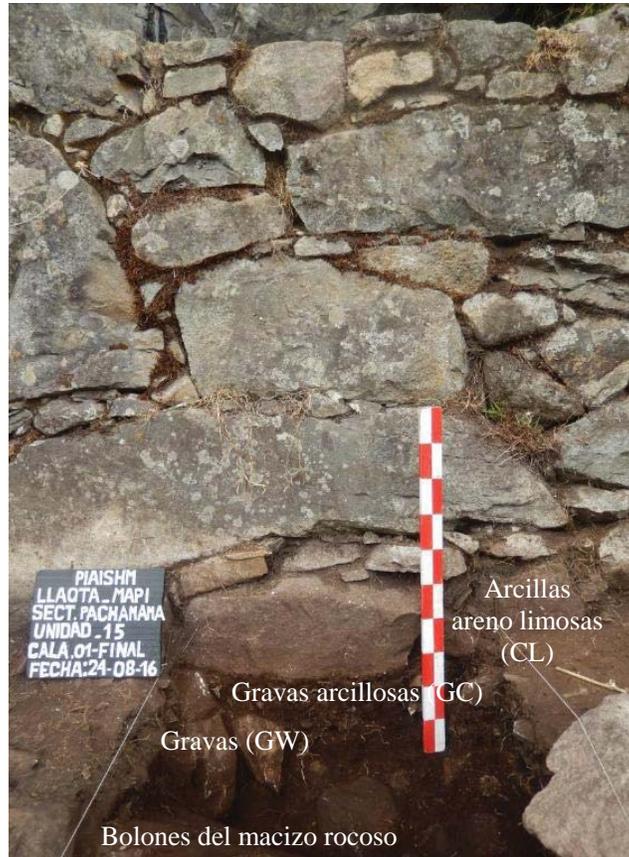


Figura 5.75: Relleno Controlado Inca, RCI – Muros de contención - Machupicchu. Conformado por Capas de Bolones del macizo rocoso; Gravadas bien graduadas; Gravadas arcillosas (GC) y Arcillas areno limosas (CL), que sellan y compactan las capas, cuyo espesor promedio es 0.70 m. Fotografías, archivo Jefatura Santuario Histórico de Machupicchu, 2016.



Figura 5.76: Rellenos Controlados Inca, RCI - Plataformas Agrícolas. Conformado por Capas de Gravas bien graduadas; Gravas arcillosas (GC); Arenas bien graduadas (SW), Limos (ML) y, Suelo orgánico; a su vez, este tipo de conformación estratigráfica cumple funciones de drenaje, que posibilita la infiltración de aguas pluviales hacia el sub suelo, evitando escorrentías y empozamiento en la superficie; nótese los niveles de compactación de las Capas estratigráficas, que tienen un espesor total promedio de 1.10 metros. Fotografías, archivo Jefatura Santuario Histórico de Machupicchu, 2016.



Figura 5.77: *Rellenos Controlados Inca, RCI – Recintos*. Conformado por Capas de Bolones del macizo rocoso, en la base; seguida de Gravas bien graduadas (GW); Gravas arcillosas (GC); y, Arcillas Areno Limosas compactadas (CL-SM); nótese la presencia de todos los componentes de los Rellenos Controlados Inca, que comprueban una técnica estandarizada, empleada por los Incas en todas las Llaqtas; donde el espesor de las Capas es la que varía, en función a la morfología del relieve y, la función de la superestructura 0.40 metros. Fotografías, archivo Jefatura Santuario Histórico de Machupicchu, 2016.

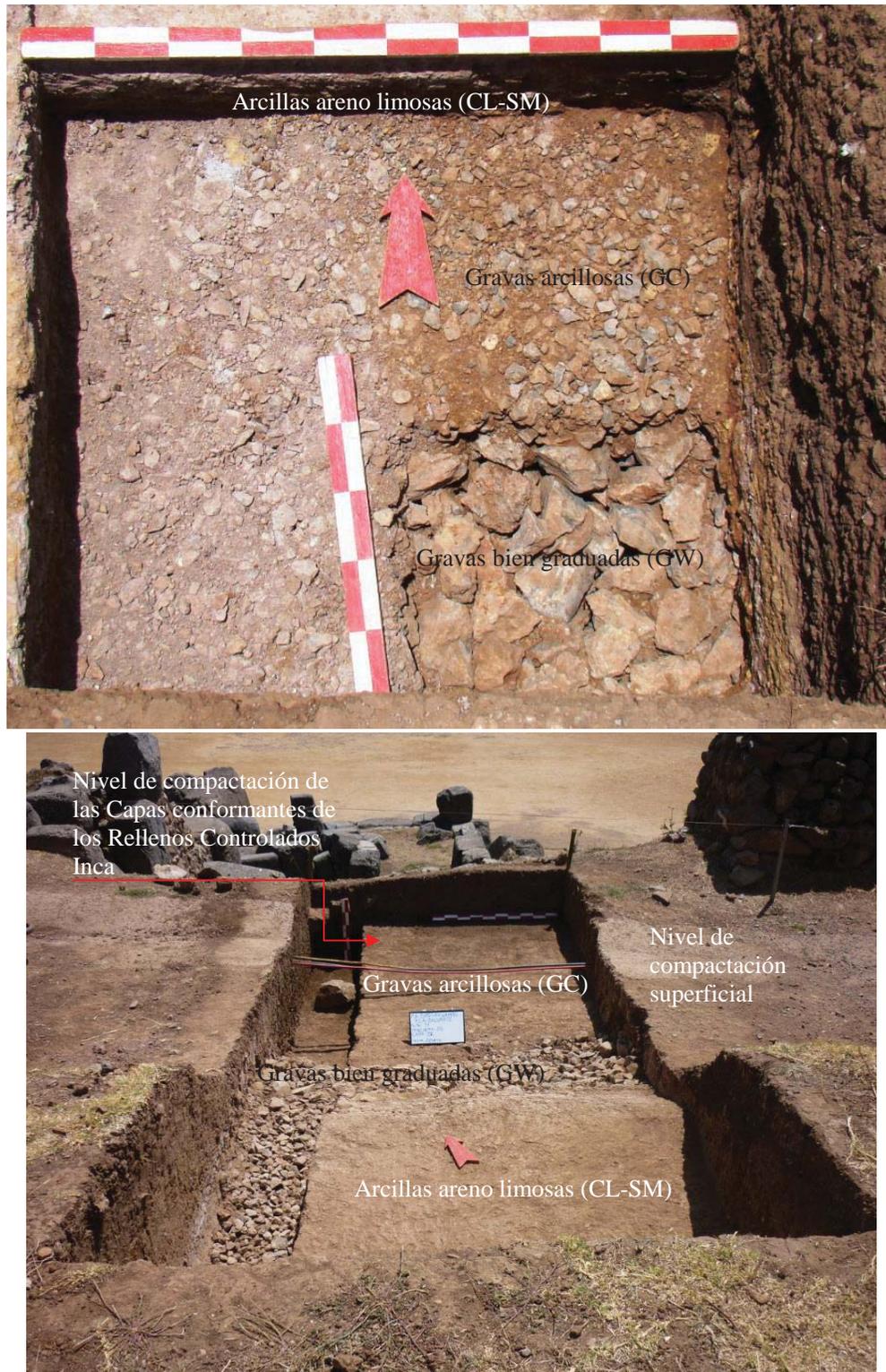


Figura 5.78: Relleno Controlado Inca, RCI – Plazas y Patios. Conformado por Capas de Gravas bien graduadas; Gravas arcillosas (GC) y Arcillas areno limosas (CL-SM); Nótese el nivel elevado de compactación, tanto a nivel superficial como de cemento; el promedio del espesor total es de 0.50 metros en Plazas y, 0.40 metros en Patios. Fotografías, Proyecto de Investigación Arqueológica Sector Baluartes – Saqsaywaman 2010.



Figura 5.79: Relleno Controlado Inca, RCI - Soterramiento y confinamiento de muros. La finalidad es lograr rigidez suficiente a la estructura suelo-cimiento-superestructura. Fotografías, Proyecto de Investigación Arqueológica Sector Baluartes – Saqsaywaman 2010.

5.5.2 Estratos de apoyo de la cimentación de las Llaqtas Incas

Las superestructuras Incas presentan dos tipos de apoyo: la primera, apoyada directamente sobre el macizo rocoso; y, la segunda apoyada a través de los *Rellenos Controlados Inca, RCI*; que, hacen las veces de suelo de fundación junto con los macizos rocosos y, cimientos a la vez. El uso de estos tipos de apoyo es recurrente en las Llaqtas y está en función a la complejidad y morfología de los relieves; en efecto, en sectores muy empinados, pero óptimos a su vez, para el acercamiento al Inti Tayta en el Hanan Pacha, se procede a cimentar directamente sobre la Pachamama (macizo rocoso); y, en aquellos sectores menos abruptos y más trabajables, se emplean los *Rellenos Controlados Inca; RCI*. Ver figuras 5.80 a 5.85.

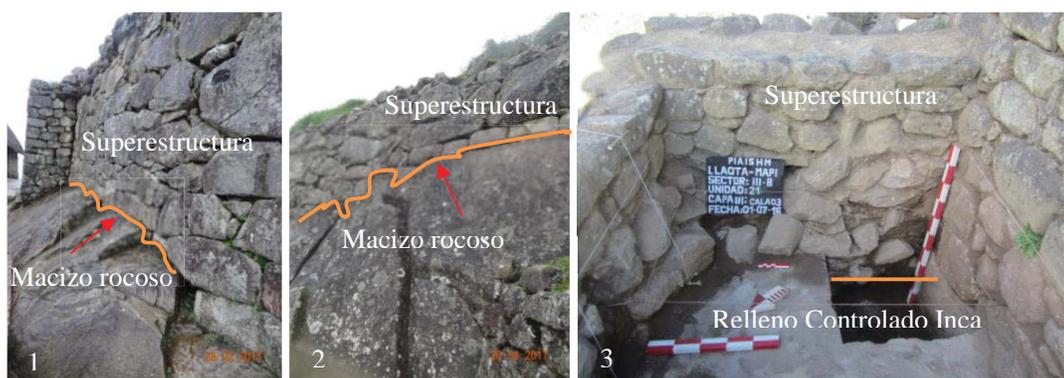


Figura 5.80: Tipos de apoyo de superestructuras en la Llaqta Inca de **Machupicchu**. Línea naranja, superficie de apoyo: (1) y (2), Directo sobre macizo rocoso; y, (3) sobre Rellenos Controlados Inca, que son del tipo de cimentaciones superficiales; ello, porque los Incas conocían que las Q'qaqas don se apoyaban, eran de calidad inmejorable. Fotografías, archivo personal, 2017.

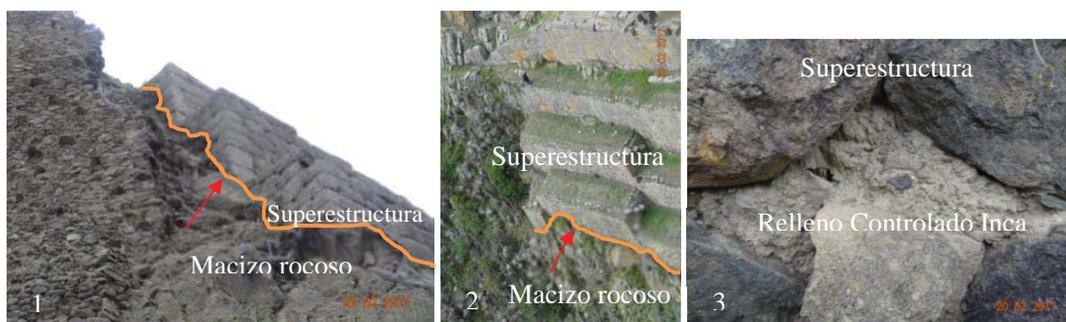


Figura 5.81: Tipos de apoyo de superestructuras en la Llaqta Inca de **Ollantaytambo**. Línea naranja, superficie de apoyo: (1) y (2), Directo sobre macizo rocoso; y, (3) sobre Rellenos Controlados Inca; sabían que para transmitir las fuerzas de los muros de carga, cuyas longitudes eran superiores a su ancho, se requería cimientos corridas. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.82: Tipos de apoyo de superestructuras en la Llaqta Inca de **Písaq**. Línea naranja, superficie de apoyo: (1) y (2), Directo sobre macizo rocoso; y, (3) sobre Rellenos Controlados Inca; éstos que constituyen los cimientos corridos, tienen un comportamiento similar al de una viga de cimentación; con este sistema, los Incas aseguraron dar la máxima rigidez a las cimentaciones e impedir que los muros absorbieran “solicitaciones inducidas por asentamientos diferenciales” (Rodríguez, et.al., 1989). Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.83: Tipos de apoyo de superestructuras en la Llaqta Inca de **Raqchi**. Línea naranja, superficie de apoyo: (1), Directo sobre macizo rocoso; y, (2) sobre Rellenos Controlados Inca. Una vez conocida la naturaleza y propiedades de los suelos de fundación, de seguro los Incas eligieron la solución de las cimentaciones más adecuadas, con base en la experiencia tecnológica que acumularon desde sus predecesores Pre Incas, como los Pikillaqta y los Choquepukio, cuyas cimentaciones se apoyan en macizos rocosos, facilitados por rellenos artificiales de suelo granular. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.84: Tipos de apoyo de superestructuras en la Llaqta Inca de **Tipón**. Línea naranja, superficie de apoyo: (1) y (2), Directo sobre macizo rocoso; y, (3) sobre Rellenos Controlados Inca. La acertada definición del tipo de cimiento, el nivel de apoyo y, la inexistencia de asientos, constituyen las condiciones de cimentación Inca, favorecidas por la alta competencia geotécnica de los macizos rocosos de fundación. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.85: Tipos de apoyo de superestructuras en la Llaqta Inca de **Saqsaywaman**. Superficie de apoyo: (1) y (2), Directo sobre macizo rocoso; y, (3) sobre Rellenos Controlados Inca. “...los castillos franceses y españoles ostentaban muros verticales, permitidos por la cimentación sobre roca” (Rodríguez et.al., 1989). Fotografías, archivo personal, 2017.

La posibilidad de tener contacto directo con la estratigrafía de los *Rellenos Controlados Inca*, *RCI*, no ha sido posible, por encontrarse éstos soterrados y con gran nivel de confinamiento, cuya remoción expondría la estabilidad de las superestructuras; además, por la condición patrimonial que presentan las Llaqtas Incas, los trámites de autorización para excavaciones son bastante complicados; por ello, se recurrió -como ya se dijo- a los Informes de excavaciones arqueológicas tutelares; sin embargo, en el recorrido que se hizo en cada una de las Llaqtas Incas en estudio, se pudo encontrar algunos Rellenos Controlados Inca expuestos (ver Figura 5.86), debido entre otros, al abandono en su conservación y mantenimiento.

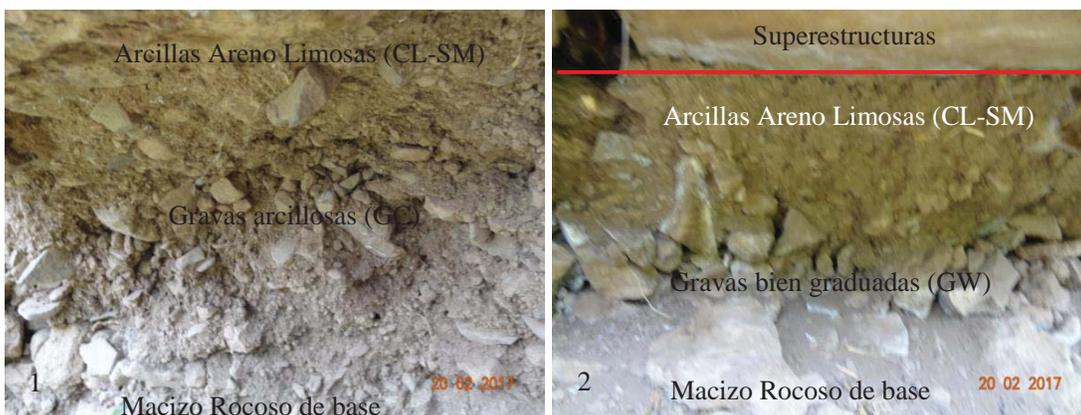


Figura 5.86: *Rellenos Controlados Inca*, en sus contextos originales I - **Pisac**. (1) Capas próximas al apoyo de las superestructuras Incas, conformadas por Arcillas Areno Limosas (CL-SM) y Gravas arcillosas (GC); (2) línea roja, superficie de apoyo de superestructuras Incas, subyacen capas de Arcillas Areno Limosas (CL-SM), Gravas bien graduadas (GW), cuyo apoyo de base son los macizos rocosos. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.87: Rellenos Controlados Inca, en sus contextos originales II - Písaq. (1) Capas próximas a los macizos rocosos de fundación, constituidas por fragmentos de roca de diferente tamaño; (2) capas constituidas por fragmentos de roca, con presencia de arcilla como material ligante. Las cimentaciones superficiales, pueden ser catalogadas “por su forma de trabajo... como continua bajo muro” (Rodríguez et.al., 1989, p. 89). Fotografías, archivo personal, 2017.

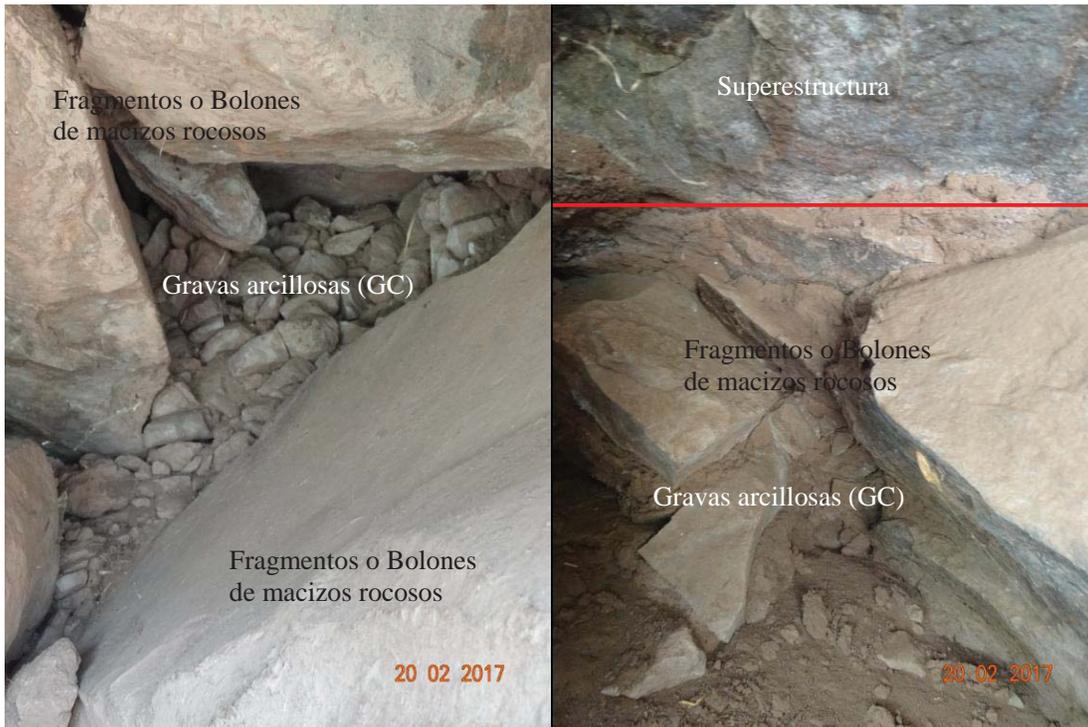


Figura 3.88: Rellenos Controlados Inca, en sus contextos originales III - Písaq. Composición trabajada de los rellenos, compuesta por fragmentos del sustrato rocoso, utilizando suelos mixtos (finos y granulares), como son las Gravas arcillosas (GC), cohesionando las gravas y, cubriendo los vacíos, para optimizar la compactación. Línea roja superficie de apoyo de la superestructura. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.89: Rellenos Controlados Inca, en sus contextos originales I - Ollantaytambo. Nótese la profusa utilización de la Arcilla (CL), combinada con las gravas (GW) para otorgarle a los Rellenos, máxima compactación, sobre todo en las capas próximas a la superficie de contacto con las superestructuras Incas. Fotografías, archivo personal, 2017.



Figura 5.90: Rellenos Controlados Inca, en sus contextos originales II - Ollantaytambo. (1) Capas superiores conformantes del Estrato 1 (E1, Relleno Controlado Inca), constituidas por Arcillas Areno Limosas (CL-SM), que además de coadyuvar en la compactación del relleno, posibilita homogeneizar las superficies de apoyo de las superestructuras Incas; la capa subyacente está constituida por Gravas Arcillosas (GC), cuya función es más bien ya de soporte inicial de las cargas que se transmiten hacia las gravas bien graduadas (GW), fragmentos de roca o bolones de roca de diverso tamaño, hasta alcanzar al macizo rocoso, que constituye el Estrato 2 (E2); (2) detalle de la capa constituida por Grava Arcillosa (GC); el espesor o potencia de las capas está en función a la morfología del relieve. Fotografías, archivo personal, 2017.

Para determinar la morfología de los Estratos de Apoyo o suelos de fundación de las superestructuras de las Llaqtas Incas de *Machupicchu*, *Ollantaytambo*, *Pisac*, *Raqchi*, *Tipón* y *Saqsaywaman*, fue fundamental los resultados de los ensayos In Situ con el Penetrómetro Dinámico Ligero (PDL), cuyas lecturas posibilitaron la identificación del tipo de suelo y su profundidad o potencia; a su vez, esta información ha sido contrastada (aunque con cierta limitación) con la observación directa de los suelos de fundación en sus contextos originales; así mismo, dado que no se hicieron calicatas a cielo abierto, se ha recurrido a la información consignada en los Informes de Investigación arqueológica, emprendidos por la entidad tutelar.

El análisis e interpretación de toda la información trabajada tanto de fuente primaria como secundaria, ha permitido sistematizar los Estratos de Apoyo o suelos de fundación de las superestructuras Incas; en efecto, se trata de dos Estratos bien diferenciados; el primero, que pasa a conformar el Estrato 1, (E1), y al que denominamos como *Relleno Controlado Inca*, RCI; y, el Estrato 2, (E2), constituido por el macizo rocoso. A su vez el *Relleno Controlado Inca*, está integrado por varias capas, cuyo espesor o potencia está en sujeción a la morfología del relieve del emplazamiento de las Llaqtas, su sistema edáfico y, el tipo de superestructura a soportar: muros de contención, plataformas agrícolas, recintos, plazas y patios.

Se comprueba, un patrón de conformación de los *Rellenos Controlados Inca*, recurrente en las seis Llaqtas Incas investigadas, diferenciadas sólo por el tipo del macizo rocoso y el espesor de los Estratos; así, a partir del macizo rocoso o Segundo Estrato (E2), se trabaja el Primer Estrato (E1) o *Relleno Controlado Inca*, de abajo hacia arriba; estando conformada una *primera capa* por *fragmentos o bolones* de diverso tamaño del mismo macizo rocoso; una *segunda capa*, constituida por *Gravas bien graduadas* (GW), una *tercera capa* integrada por *Gravas Arcillosas* (GC) y, una *cuarta capa* por Arcilla areno limosa (CL-SM); sólo en el caso de plataformas agrícolas, existe una quinta capa, constituida por suelo orgánico.

En consecuencia, comprobamos que se maneja una técnica estandarizada de Rellenos.

Queda claro que, los Rellenos Controlados Inca, además de cumplir funciones de transmisión y distribución de cargas de las superestructuras hacia los macizos rocosos de fundación, permitían también homogeneizar las superficies -en su mayoría muy irregulares- de los emplazamientos de las Llaqtas; así mismo, los Incas recurren a optimizar al máximo las propiedades geotécnicas de los suelos granulares y finos; pues, emplean las gravas por su resistencia y dureza, las Arenas y Limos para lograr permeabilidad y, las Arcillas para conseguir cohesión; consecuentemente, un *Relleno Controlado Inca*, integra y complementa eficientemente todas las propiedades de los suelos.

Una estrategia técnica en el manejo de los *Rellenos Controlados Inca* que posibilitó su éxito como suelo de fundación y cimiento a la vez, es la *compactación* de éstos; pues, se requería máxima compacidad, próxima a la naturaleza de los macizos rocosos, para poder soportar las cargas verticales y axiales de las superestructuras Incas; así mismo, dada la profusa utilización de gravas, cuya resistencia geotécnica está comprobada, su confinamiento era imprescindible, de lo contrario, se corría el riesgo de derrumbamientos; esto obligó a los Incas a otorgar a los Rellenos Controlados Inca, *máximo confinamiento*, soterrándolos en el subsuelo, conjuntamente con las hiladas pétreas de base de las superestructuras.

“Los rellenos artificiales compactados... con la misma técnica empleada en los terraplenes de carreteras... pueden considerarse de buena calidad para cimentar superficialmente, admitiendo presiones de trabajo del orden de 2kp/cm², siempre que se cumplan las siguientes condiciones: El relleno se haga con materiales adecuados... o materiales granulares con un contenido de arcilla no excesivo y exentos de elementos degradables o agresivos. El terreno de apoyo sea firme... y eliminando la capa vegetal y los terrenos flojos superficiales... La compactación se haga por tongadas delgadas (e=30 cm.)... mínimo... y existiendo un riguroso control de densidades y humedades de puesta en obra” (Rodriguez et.al., 1989, p. 261).

Los Rellenos Controlados Inca, constituyen una técnica óptima como cimientos.

En las Tablas 5.35 a 5.40 se presenta la síntesis de los Estratos de Apoyo o Estratigrafía de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas de *Machupicchu*, *Ollantaytambo*, *Pisac*, *Raqchi*, *Tipón* y *Saqsaywaman*, identificadas en la presente investigación; comprobándose en cada una de ellas, un mismo Patrón de conformación de estratos (Estrato 1 y Estrato 2); diferenciándose, en el tipo de macizo rocoso del emplazamiento de cada una de las Llaqtas y, en la profundidad, espesor o potencia de las capas conformantes de los *Rellenos Controlados Inca*, que dicho sea de paso, son rellenos construidos artificialmente por los Incas, aplicando conocimientos técnicos de avanzada para su tiempo, demostrado por su perennidad hasta nuestros días.

Tabla 5.35

Estratos de Apoyo de las superestructuras de la Llaqta Inca de Machupicchu

Puntos de Investigación (P)	Caracterización de Estratos		
	Estrato (E)	Profundidad	Composición
P-01 Muro de contención Sector I (parte superior)	E – 1	0.00 m. – 0.70 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Gravas Arcillosas (GC); y, Gravas Bien Graduadas (GW), con bolones de tamaño mediano a grande; color Claro.
	E – 2	0.70 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca ígnea Batolito – Granodiorita); color Claro.
P-02 Plataforma Agrícola Sector I-c (cerca viv. Guardián)	E – 1	0.00 m. – 1.90 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por suelo orgánico; Arcillas inorgánicas limosas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas bien Graduadas (SW), Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas Bien Graduadas (GW) en bolones de tamaño grande; color Claro.
	E – 2	1.90 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca ígnea Batolito – Granodiorita); color Claro.
P-03 Muro de contención Sector II-a (parte inferior)	E – 1	0.00 m. – 0.80 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Gravas Arcillosas (GC); y, Gravas Bien Graduadas (GW), con bolones de tamaño mediano a grande; color Claro.
	E – 2	0.80 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca ígnea Batolito – Granodiorita); color Claro.
P-04 Recinto	E – 1	0.00 m. – 1.30m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC) y, Gravas Bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.

Sector II-a (parte inferior)	E – 2	1.30 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca ígnea Batolito – Granodiorita); color Claro.
P-05 Espacio abierto Plaza	E – 1	0.00 m. – 1.20 m.	Relleño Controlado Inca ; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
Sector III-c (aledaño Plaza principal)	E – 2	1.20 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca ígnea Batolito – Granodiorita); color Claro.
P-06 Espacio abierto Patio	E – 1	0.00 m. – 0.50 m.	Relleño Controlado Inca ; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
Sector VI-c (aledaño espejos de agua)	E – 3	0.50 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca ígnea Batolito – Granodiorita); color Claro.
P-07 Muro de contención	E – 1	0.00 m. – 0.80 m.	Relleño Controlado Inca ; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Gravas Arcillosas (GC); y, Gravas Bien Graduadas (GW), con bolones de tamaño mediano a grande; color Claro.
Sector V-c	E – 2	0.80 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca ígnea Batolito – Granodiorita); color Claro.
P-08 Espacio abierto Patio	E – 1	0.00 m. – 0.60 m.	Relleño Controlado Inca ; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
Sector VI-d (aledaño Qolqas)	E – 2	0.60 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca ígnea Batolito – Granodiorita); color Claro.
P-09 Muro de contención	E – 1	0.00 m. – 0.70 m.	Relleño Controlado Inca ; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Gravas Arcillosas (GC); y, Gravas Bien Graduadas (GW), con bolones de tamaño mediano a grande; color Claro.
Sector VI-e	E – 2	0.70 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca ígnea Batolito – Granodiorita); color Claro.
P-10 Plataforma Agrícola	E – 1	0.00 m. – 1.10 m.	Relleño Controlado Inca ; conformado por suelo orgánico; Arcillas inorgánicas limosas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas bien Graduadas (SW), Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas Bien Graduadas (GW) en bolones de tamaño grande; color Claro.
Sector VI-e Oriental 1	E – 2	1.10 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca ígnea Batolito – Granodiorita); color Claro.
P-11 Plataforma Agrícola	E – 1	0.00 m. – 1.30 m.	Relleño Controlado Inca ; conformado por suelo orgánico; Arcillas inorgánicas limosas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas bien Graduadas (SW), Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas Bien Graduadas (GW) en bolones de tamaño grande; color Claro.
Sector Oriental 2	E – 2	1.30 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca ígnea Batolito – Granodiorita); color Claro.
P-12	E – 1	0.00 m. – 0.90 m.	Relleño Controlado Inca ; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL),

Muro de contención				compactadas; Gravas Arcillosas (GC); y, Gravas Bien Graduadas (GW), con bolones; color Claro.
Sector Oriental 3	E – 2	0.90 m. – 3.00 m.		Macizo rocoso (<i>roca ígnea Batolito – Granodiorita</i>); color Claro.
P-13	E – 1	0.00 m. – 0.80 m.		Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Gravas Arcillosas (GC); y, Gravas Bien Graduadas (GW), con bolones de tamaño mediano a grande; color Claro.
Muro de contención				
Sector Oriental 4	E – 2	0.80 m. – 3.00 m.		Macizo rocoso (<i>roca ígnea Batolito – Granodiorita</i>); color Claro.
P-14	E – 1	0.00 m. – 1.30 m.		Relleno Controlado Inca ; conformado por suelo orgánico; Arcillas inorgánicas limosas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas bien Graduadas (SW), Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas Bien Graduadas (GW) en bolones de tamaño grande; color Claro.
Plataforma Agrícola				
Sector Oriental 5	E – 2	1.30 m. – 3.00 m.		Macizo rocoso (<i>roca ígnea Batolito – Granodiorita</i>); color Claro.
P-15	E – 1	0.00 m. – 0.50 m.		Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Gravas Arcillosas (GC); y, Gravas Bien Graduadas (GW), con bolones de tamaño mediano a grande; color Claro.
Muro de contención				
Sector Oriental 6	E – 2	0.50 m. – 3.00 m.		Macizo rocoso (<i>roca ígnea Batolito – Granodiorita</i>); color Claro.

Nota: La Estratigrafía de los suelos de fundación de la Llaqta Inca de **Machupicchu**, está conformada por dos (2) Estratos característicos, tal como se detalla en la presente Tabla, para cada una de las superestructuras investigadas; descritas desde la superficie de contacto de éstas hacia el sub suelo; es decir, de arriba hacia abajo; en este contexto, el **primer Estrato (E-1)**, está representado por los *Rellenos Controlados Inca*, rellenos trabajados por los Incas, a partir de los fragmentos del macizo rocoso, conformando Capas de *suelos granulares* como Gravas bien graduadas (GW), Arenas bien graduadas (SW) y Limos (ML); y, *suelos finos* como las Arcillas (CL); advirtiéndose en algunas de las Capas, el empleo de suelos mixtos, predominantemente en las capas próximas a la superficie de apoyo de las superestructuras Incas, como: Arcillas areno Limosas (CL-SM) y Gravas arcillosas (GC); este estrato alcanza **ángulos de fricción** promedio de **30°**. El **segundo Estrato (E-2)**, subyace al primer Estrato (E-1) y está constituido por el Macizo rocoso, clasificado en este caso como: *roca ígnea*, de origen volcánico, *Granodiorita*, que alcanza **resistencias** promedio de **f'c=771Kg./Cm2**. Respecto a la profundidad de los Estratos, están en sujeción al espesor o potencia de cada una de las Capas que la conforman, en el caso de los *Rellenos Controlados Inca*; y, en el caso del macizo rocoso, se consigna como profundidad representativa 3.00 metros, tomando en consideración la profundidad mínima a alcanzarse según la Norma Técnica Peruana E.050 de Suelos y Cimentaciones; dejándose constancia, que la profundidad real del macizo rocoso es la de la montaña misma. Dado que los *Rellenos Controlados Inca*, están conformados por fragmentos del mismo macizo rocoso, cuya resistencia es elevada, coadyuvado por el óptimo compactado y confinamiento operado por los Incas. La estratigrafía del suelo de fundación de la Llaqta de Machupicchu, presenta competentes parámetros geotécnicos, que superan ampliamente a las resistencias exigidas, por la Normatividad Técnica Peruana, de Suelos y Cimentaciones (E.050), en Concreto Armado; siendo estas resistencias: f'c = 210 Kg./cm²; f'c = 240 Kg./cm²; f'c = 280 Kg./cm²; f'c = 350 Kg./cm²; demostrándose la acertada elección de suelos de fundación, entendido como conocimiento geotécnico Inca. Elaboración propia, 2017.

Tabla 5.36

Estratos de Apoyo de las superestructuras de la Llaqta Inca de Ollantaytambo

Puntos de Investigación (P)	Caracterización de Estratos		
	Estrato (E)	Profundidad	Composición
P-01 Recinto Cuadrado Sector Medio	E – 1	0.00 m. – 0.70 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC) y, Gravas Bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
	E – 2	0.70 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca metamórfica Arenisca – Cuarácitica); color Claro.
P-02 Recinto Cuadrado II Sector Medio	E – 1	0.00 m. – 0.30 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC) y, Gravas Bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano; color Claro.
	E – 2	0.30 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca metamórfica Arenisca – Cuarácitica); color Claro.
P-03 Recinto Rectangular Sector Medio	E – 1	0.00 m. – 1.20 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC) y, Gravas Bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
	E – 2	1.20 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca metamórfica Arenisca – Cuarácitica); color Claro.
P-04 Espacio abierto Plaza Sector Medio	E – 1	0.00 m. – 0.50 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano; color Claro.
	E – 2	0.50 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca metamórfica Arenisca – Cuarácitica); color Claro.
P-05 Espacio abierto Patio Sector Templo del Sol	E – 1	0.00 m. – 0.30 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); color Claro.
	E – 2	0.30 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca metamórfica Arenisca – Cuarácitica); color Claro.
P-06 Espacio abierto Plaza Sector Templo del Sol	E – 1	0.00 m. – 0.50 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); y, Gravas Bien Graduadas (GW); color Claro.
	E – 2	0.50 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca metamórfica Arenisca – Cuarácitica); color Claro.
P-07 Espacio abierto Patio Sector Templo	E – 1	0.00 m. – 0.20 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); color Claro.
	E – 2	0.20 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca metamórfica Arenisca – Cuarácitica); color Claro.

P-08	E – 1	0.00 m. – 0.60 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Gravas Arcillosas (GC); y, Gravas Bien Graduadas (GW), con bolones de tamaño mediano; color Claro.
Muro de contención			
Sector Pumatellis (lado izq.)	E – 2	0.60 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca metamórfica Arenisca – Cuarácica); color Claro.
P-09	E – 1	0.00 m. – 0.70 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Gravas Arcillosas (GC); y, Gravas Bien Graduadas (GW), con bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
Muro de contención			
Sector Pumatellis (parte central)	E – 2	0.70 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca metamórfica Arenisca – Cuarácica); color Claro.
P-10	E – 1	0.00 m. – 1.10 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por suelo orgánico; Arcillas inorgánicas limosas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas bien Graduadas (SW), Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas Bien Graduadas (GW) en bolones de tamaño grande; color Claro.
Plataforma Agrícola			
Sector Pumatellis (lado der.)	E – 2	1.10 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca metamórfica Arenisca – Cuarácica); color Claro.
P-11	E – 1	0.00 m. – 0.30 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); y, Gravas Arcillosas (GC); color Claro.
Espacio abierto Plaza	E – 2	0.30 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca metamórfica Arenisca – Cuarácica); color Claro.
Sector Pumatellis (Base lado izq.)			
P-12	E – 1	0.00 m. – 0.40 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); color Claro.
Espacio abierto Plaza	E – 2	0.40 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca metamórfica Arenisca – Cuarácica); color Claro.
Sector Pumatellis (parte central)			
P-13	E – 1	0.00 m. – 0.20 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); y, Arenas Limosas (SM); color Claro.
Espacio abierto Plaza	E – 2	0.20 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (roca metamórfica Arenisca – Cuarácica); color Claro.
Sector Pumatellis (Base lado der.)			

Nota: La Estratigrafía de los suelos de fundación de la Llaqta Inca de **Ollantaytambo**, está conformada por dos (2) Estratos característicos, tal como se detalla en la presente Tabla, para cada una de las superestructuras investigadas; descritas desde la superficie de contacto de éstas hacia el sub suelo; es decir, de arriba hacia abajo; en este contexto, el **primer Estrato (E-1)**, está representado por los *Rellenos Controlados Inca*, rellenos trabajados por los Incas, a partir de los fragmentos del macizo rocoso, conformando Capas de *suelos granulares* como Gravas bien graduadas (GW), Arenas bien graduadas (SW) y Limos (ML); y, *suelos finos* como las Arcillas (CL); advirtiéndose en algunas de las Capas, el empleo de suelos mixtos, predominantemente en las capas próximas a la superficie de apoyo de las superestructuras Incas, como: Arcillas areno Limosas (CL-SM) y Gravas arcillosas (GC); este estrato alcanza

ángulos de fricción promedio de **30.63°**. El **segundo Estrato (E-2)**, subyace al primer Estrato (E-1) y está constituido por el Macizo rocoso, clasificado en este caso como: **roca metamórfica**, de origen volcánico, **Arenisca Cuarcítica**, que alcanza **resistencias** promedio de **f'c=499 Kg./Cm2**. Respecto a la profundidad de los Estratos, están en sujeción al espesor o potencia de cada una de las Capas que la conforman, en el caso de los *Rellenos Controlados Inca*; y, en el caso del macizo rocoso, se consigna como profundidad representativa 3.00 metros, tomando en consideración la profundidad mínima a alcanzarse según la Norma Técnica Peruana E.050 de Suelos y Cimentaciones; dejándose constancia, que la profundidad real del macizo rocoso es la de la montaña misma. Dado que los *Rellenos Controlados Inca*, están conformados por fragmentos del mismo macizo rocoso, cuya resistencia es elevada, coadyuvado por el elevado nivel de compactación y confinamiento operado por los Incas, la estratigrafía del suelo de fundación de la Llaqta de Ollantaytambo, presenta óptimos parámetros geotécnicos que superan ampliamente los valores permitidos para superestructuras similares por la Normatividad Técnica Peruana como resistencias de f'c= 210 Kg. /cm2; f'c =240 Kg. /cm2; 280 Kg. /cm2; f'c =350 Kg. /cm2; tal como se detalló en las Tablas precedentes. Elaboración propia, 2017.

Tabla 5.37

Estratos de Apoyo de las superestructuras de la Llaqta Inca de **Pisac**

Puntos de Investigación (P)	Caracterización de Estratos		
	Estrato (E)	Profundidad	Composición
P-01 Espacio abierto Patio Qantu Raqay	E – 1	0.00 m. – 0.30 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); y, Gravas Arcillosas (GC); color Claro. Macizo rocoso (roca ígnea – Andesita Shoshonítica); color Claro.
	E – 2	0.30 m. – 4.50 m.	
P-02 Recinto mediano Qantu Raqay	E – 1	0.00 m. – 0.80 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC) y, Gravas Bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano; color Claro. Macizo rocoso (roca ígnea – Andesita Shoshonítica); color Claro.
	E – 2	0.80 m. – 4.50 m.	
P-03 Recinto grande Qantu Raqay	E – 1	0.00 m. – 0.50 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC) y, Gravas Bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano; color Claro. Macizo rocoso (roca ígnea – Andesita Shoshonítica); color Claro.
	E – 2	0.50 m. – 4.50 m.	
P-04 Recinto pequeño Qantu Raqay	E – 1	0.00 m. – 0.40 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Arenas Limosas (SM); y, Gravas Arcillosas (GC); color Claro. Macizo rocoso (roca ígnea – Andesita Shoshonítica); color Claro.
	E – 2	0.40 m. – 4.50 m.	

P-05 Muro de contención Qantu Raqay	E – 1	0.00 m. – 2.70 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Gravas Arcillosas (GC); y, Gravas Bien Graduadas (GW), con bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
	E – 2	2.70 m. – 4.50 m.	Macizo rocoso (<i>roca ígnea – Andesita Shoshonítica</i>); color Claro.
P-06 Recinto Kallakasa	E – 1	0.00 m. – 0.60 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC) y, Gravas Bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano; color Claro.
	E – 2	0.60 m. – 4.50 m.	Macizo rocoso (<i>roca ígnea – Andesita Shoshonítica</i>); color Claro.
P-07 Espacio abierto Plaza Pisaqa	E – 1	0.00 m. – 0.40 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); y, Gravas Bien Graduadas (GW); color Claro.
	E – 2	0.40 m. – 4.50 m.	Macizo rocoso (<i>roca ígnea – Andesita Shoshonítica</i>); color Claro.
P-08 Recinto pequeño Pisaqa	E – 1	0.00 m. – 0.20 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Arenas Limosas (SM); y, Gravas Arcillosas (GC); color Claro.
	E – 2	0.20 m. – 4.50 m.	Macizo rocoso (<i>roca ígnea – Andesita Shoshonítica</i>); color Claro.
P-09 Recinto grande Pisaqa	E – 1	0.00 m. – 0.20 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Arenas Limosas (SM); y, Gravas Arcillosas (GC); color Claro.
	E – 3	0.20 m. – 4.50 m.	Macizo rocoso (<i>roca ígnea – Andesita Shoshonítica</i>); color Claro.
P-10 Plataforma Agrícola Pisaqa	E – 1	0.00 m. – 2.70 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por suelo orgánico; Arcillas inorgánicas limosas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas bien Graduadas (SW), Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas Bien Graduadas (GW) en bolones de tamaño grande; color Claro.
	E – 3	2.70 m. – 4.50 m.	Macizo rocoso (<i>roca ígnea – Andesita Shoshonítica</i>); color Claro.

Nota: La Estratigrafía de los suelos de fundación de la Llaqta Inca de **Pisaq**, está conformada por dos (2) Estratos característicos, tal como se detalla en la presente Tabla, para cada una de las superestructuras investigadas; descritas desde la superficie de contacto de éstas hacia el sub suelo; es decir, de arriba hacia abajo; en este contexto, el **primer Estrato (E-1)**, está representado por los *Rellenos Controlados Inca*, rellenos trabajados por los Incas, a partir de los fragmentos del macizo rocoso, conformando Capas de *suelos granulares* como Gravas bien graduadas (GW), Arenas bien graduadas (SW) y Limos (ML); y, *suelos finos* como las Arcillas (CL); advirtiéndose en algunas de las Capas, el empleo de suelos mixtos, predominantemente en las capas próximas a la superficie de apoyo de las superestructuras Incas, como: Arcillas areno Limosas (CL-SM) y Gravas arcillosas (GC); este estrato alcanza **ángulos de fricción** promedio de **31.20°**. El **segundo Estrato (E-2)**, subyace al primer Estrato (E-1) y está constituido por el Macizo rocoso, clasificado en este caso como: *roca ígnea*, de origen volcánico, *Andesita Shoshonítica*, que alcanza **resistencias** promedio de **f'c=689 Kg./Cm2**. Respecto a la profundidad de los Estratos, están en sujeción al espesor o potencia

de cada una de las Capas que la conforman, en el caso de los *Rellenos Controlados Inca*; y, en el caso del macizo rocoso, se consigna como profundidad representativa 4.50 metros; dejándose constancia, que la profundidad real del macizo rocoso es la de la montaña misma. Dado que los *Rellenos Controlados Inca*, están conformados por fragmentos del mismo macizo rocoso, cuya resistencia es elevada, coadyuvado por el elevado nivel de compactación y confinamiento operado por los Incas, la estratigrafía del suelo de fundación de la Llaqta de Písaq, presenta óptimos parámetros geotécnicos que superan ampliamente los valores permitidos para superestructuras similares por la Normatividad Técnica Peruana como resistencias de $f'c = 210 \text{ Kg. /cm}^2$; $f'c = 240 \text{ Kg. /cm}^2$; 280 Kg. /cm^2 ; $f'c = 350 \text{ Kg. /cm}^2$; tal como se detalló en las Tablas precedentes. Elaboración propia, 2017.

Tabla 5.38

Estratos de Apoyo de las superestructuras de la Llaqta Inca de **Raqchi**

Puntos de Investigación (P)	Caracterización de Estratos		
	Estrato (E)	Profundidad	Composición
P-01 Espacio abierto Patio Sector Qolcas	E – 1	0.00 m. – 1.50 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
	E – 3	1.50 m. – 4.50 m.	Macizo rocoso (Roca volcánica ígnea - andesita); color Claro.
P-02 Espacio abierto Patio Sector Qolcas	E – 1	0.00 m. – 0.90 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
	E – 2	0.90 m. – 4.50 m.	Macizo rocoso (Roca volcánica ígnea - andesita); color Claro.
P-03 Recinto Sector Qolcas	E – 1	0.00 m. – 1.60 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC) y, Gravas Bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
	E – 2	1.60 m. – 4.50 m.	Macizo rocoso (Roca volcánica ígnea - andesita); color Claro.
P-04 Espacio abierto Patio Sector Aposentos	E – 1	0.00 m. – 0.80 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
	E – 2	0.80 m. – 4.50 m.	Macizo rocoso (Roca volcánica ígnea - andesita); color Claro.
P-05 Espacio abierto Plaza	E – 1	0.00 m. – 2.90 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.

Sector Aposentos	E – 2	2.90 m. – 4.50 m.	Macizo rocoso (Roca volcánica ígnea - andesita); color Claro.
P-06 Espacio abierto Patio	E – 1	0.00 m. – 1.00 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
Sector Aposentos	E – 2	1.00 m. – 4.50 m.	Macizo rocoso (Roca volcánica ígnea - andesita); color Claro.
P-07 Espacio abierto Patio	E – 1	0.00 m. – 0.20 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); y, Gravas Arcillosas (GC); color Claro.
Sector Fuentes Menores	E – 2	0.20 m. – 4.50 m.	Macizo rocosa (Roca volcánica ígnea - andesita); color Claro.
P-08 Espacio abierto Patio	E – 1	0.00 m. – 1.00 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
Sector Ushno Mesapata	E – 2	1.00 m. – 4.50 m.	Macizo rocoso (Roca volcánica ígnea - andesita); color Claro.
P-09 Espacio abierto Plaza	E – 1	0.00 m. – 1.50 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
Sector Fuentes Ceremoniales	E – 2	1.50 m. – 4.50 m.	Macizo rocoso (Roca volcánica ígnea - andesita); color Claro.
P-10 Recinto Templo de Wiracocha Lado izquierdo	E – 1	0.00 m. – 0.80 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC) y, Gravas Bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
	E – 2	0.80 m. – 4.50 m.	Macizo rocosa (Roca volcánica ígnea - andesita); color Claro.
P-11 Recinto Templo de Wiracocha Parte central	E – 1	0.00 m. – 2.30 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC) y, Gravas Bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
	E – 2	2.30 m. – 4.50 m.	Macizo rocoso (Roca volcánica ígnea - andesita); color Claro.
P-12 Recinto Templo de Wiracocha Lado derecho	E – 1	0.00 m. – 0.50 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Arenas Limosas (SM); y, Gravas Arcillosas (GC); color Claro.
	E – 2	0.50 m. – 4.50 m.	Macizo rocoso (Roca volcánica ígnea - andesita); color Claro.

Nota: La Estratigrafía de los suelos de fundación de la Llaqta Inca de **Raqchi**, está conformada por dos (2) Estratos característicos, tal como se detalla en la presente Tabla, para cada una de las superestructuras investigadas; descritas desde la superficie de contacto de éstas hacia el sub suelo; es decir, de arriba hacia abajo; en este contexto, el **primer Estrato (E-1)**, está representado por los *Rellenos Controlados Inca*, rellenos trabajados por los Incas, a partir

de los fragmentos del macizo rocoso, conformando Capas de *suelos granulares* como Gravas bien graduadas (GW), Arenas bien graduadas (SW) y Limos (ML); y, *suelos finos* como las Arcillas (CL); advirtiéndose en algunas de las Capas, el empleo de suelos mixtos, predominantemente en las capas próximas a la superficie de apoyo de las superestructuras Incas, como: Arcillas areno Limosas (CL-SM) y Gravas arcillosas (GC); este estrato alcanza **ángulos de fricción** promedio de **30.60°**. El **segundo Estrato (E-2)**, subyace al primer Estrato (E-1) y está constituido por el Macizo rocoso, clasificado en este caso como: *roca ígnea*, de origen volcánico, *Andesita*, que alcanza **resistencias** promedio de **f'c=648 Kg./Cm2**. Respecto a la profundidad de los Estratos, están en sujeción al espesor o potencia de cada una de las Capas que la conforman, en el caso de los *Rellenos Controlados Inca*; y, en el caso del macizo rocoso, se consigna como profundidad representativa 4.50 metros; dejándose constancia, que la profundidad real del macizo rocoso es la de la montaña misma. Dado que los *Rellenos Controlados Inca*, están conformados por fragmentos del mismo macizo rocoso, cuya resistencia es elevada, coadyuvado por el elevado nivel de compactación y confinamiento operado por los Incas, la estratigrafía del suelo de fundación de la Llaqta de Raqchi, presenta óptimos parámetros geotécnicos que superan ampliamente los valores permitidos para superestructuras similares por la Normatividad Técnica Peruana como resistencias de f'c= 210 Kg. /cm2; f'c =240 Kg. /cm2; 280 Kg. /cm2; f'c =350 Kg. /cm2; tal como se detalló en las Tablas precedentes. Elaboración propia, 2017.

Tabla 5.39

Estratos de Apoyo de las superestructuras de la Llaqta Inca de Tipón

Puntos de Investigación (P)	Caracterización de Estratos		
	Estrato (E)	Profundidad	Composición
P-01 Espacio abierto Patio Anden XII	E – 1	0.00 m. – 0.30 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); y, Gravas bien Graduadas (GW); color Claro.
	E – 2	0.30 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (<i>roca volcánica – Basalto Andesita</i>); color Claro.
P-02 Espacio abierto Patio Anden XII	E – 1	0.00 m. – 0.10 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); y, Arenas Limosas (SM); color Claro.
	E – 2	0.10 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (<i>roca volcánica – Basalto Andesita</i>); color Claro.
P-03 Recinto Iglesia Raki	E – 1	0.00 m. – 0.50 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC) y, Gravas Bien Graduadas (GW); color Claro.
	E – 2	0.50 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (<i>roca volcánica – Basalto Andesita</i>); color Claro.
P-04 Recinto Cancha Inca	E – 1	0.00 m. – 0.40 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC) y, Gravas Bien Graduadas (GW); color Claro.
	E – 2	0.40 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (<i>roca volcánica – Basalto Andesita</i>); color Claro.
P-05	E – 1	0.00 m. – 0.40 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); y, Gravas bien Graduadas (GW); color Claro.

Espacio abierto Patio	E – 2	0.40 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (<i>roca volcánica – Basalto Andesita</i>); color Claro.
Cancha Inca			
P-06	E – 1	0.00 m. – 1.10 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por suelo orgánico; Arcillas inorgánicas limosas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas bien Graduadas (SW), Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas Bien Graduadas (GW) en bolones de tamaño grande; color Claro.
Plataforma Agrícola			
Anden IV	E – 2	1.10 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (<i>roca volcánica – Basalto Andesita</i>); color Claro.
P-07	E – 1	0.00 m. – 1.00 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por suelo orgánico; Arcillas inorgánicas limosas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas bien Graduadas (SW), Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas Bien Graduadas (GW) en bolones de tamaño grande; color Claro.
Plataforma Agrícola			
Anden I	E – 2	1.00 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (<i>roca volcánica – Basalto Andesita</i>); color Claro.
P-08	E – 1	0.00 m. – 1.40 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
Espacio abierto Plaza			
Sinkuna Kancha	E – 2	1.40 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (<i>roca volcánica – Basalto Andesita</i>); color Marrón rojizo.
P-09	E – 1	0.00 m. – 1.50 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
Espacio abierto Plaza			
Sinkuna Kancha (Recinto semicircular)	E – 2	1.50 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (<i>roca volcánica – Basalto Andesita</i>); color Claro.
P-10	E – 1	0.00 m. – 0.60 m.	Relleno Controlado Inca ; conformado por suelo orgánico; Arcillas inorgánicas limosas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas bien Graduadas (SW), Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas Bien Graduadas (GW) en bolones de tamaño grande; color Claro.
Plataforma Agrícola			
Anden IX	E – 2	0.60 m. – 3.00 m.	Macizo rocoso (<i>roca volcánica – Basalto Andesita</i>); color Claro.

Nota: La Estratigrafía de los suelos de fundación de la Llaqta Inca de **Tipón**, está conformada por dos (2) Estratos característicos, tal como se detalla en la presente Tabla, para cada una de las superestructuras investigadas; descritas desde la superficie de contacto de éstas hacia el sub suelo; es decir, de arriba hacia abajo; en este contexto, el **primer Estrato (E-1)**, está representado por los Rellenos Controlados Inca, rellenos trabajados por los Incas, a partir de los fragmentos del macizo rocoso, conformando Capas de suelos granulares como Gravas bien graduadas (GW), Arenas bien graduadas (SW) y Limos (ML); y, suelos finos como las Arcillas (CL); advirtiéndose en algunas de las Capas, el empleo de suelos mixtos, predominantemente en las capas próximas a la superficie de apoyo de las superestructuras Incas, como: Arcillas areno Limosas (CL-SM) y Gravas arcillosas (GC); este estrato alcanza **ángulos de fricción** promedio de **31.12°**. El **segundo Estrato (E-2)**, subyace al primer Estrato (E-1) y está constituido por el Macizo rocoso, clasificado en este caso como: **roca ígnea**, de origen volcánico, **Basalto - Andesita**, que alcanza **resistencias** promedio de **f'c=564 Kg./Cm2**. Respecto a la profundidad de los Estratos, están en sujeción al espesor o potencia de cada una de las Capas que la conforman, en el caso de los Rellenos Controlados Inca; y, en

el caso del macizo rocoso, se consigna como profundidad representativa 4.50 metros; dejándose constancia, que la profundidad real del macizo rocoso es la de la montaña misma. Dado que los Rellenos Controlados Inca, están conformados por fragmentos del mismo macizo rocoso, cuya resistencia es elevada, coadyuvado por el elevado nivel de compactación y confinamiento operado por los Incas, la estratigrafía del suelo de fundación de la Llaqta de Raqchi, presenta óptimos parámetros geotécnicos que superan ampliamente los valores permitidos para superestructuras similares por la Normatividad Técnica Peruana como resistencias de $f'c = 210 \text{ Kg. /cm}^2$; $f'c = 240 \text{ Kg. /cm}^2$; 280 Kg. /cm^2 ; $f'c = 350 \text{ Kg. /cm}^2$; tal como se detalló en las Tablas precedentes. Elaboración propia, 2017.

Tabla 5.40

Estratos de Apoyo de las superestructuras de la Llaqta Inca de Saqsaywaman

Puntos de Investigación (P)	Caracterización de Estratos		
	Estrato (E)	Profundidad	Composición
P-01 Espacio abierto Plaza Baluarte I-2 Primer Nivel	E – 1	0.00 m. – 2.20 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
	E – 2	2.20 m. – 6.00 m.	Macizo rocoso (roca sedimentaria caliza diorita); color Claro.
P-02 Espacio abierto Plaza Baluarte I-15 Primer Nivel	E – 1	0.00 m. – 0.50 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); y, Gravas Arcillosas (GC); color Claro.
	E – 2	0.50 m. – 6.00 m.	Macizo rocoso (roca sedimentaria caliza diorita); color Claro.
P-03 Espacio abierto Plaza Baluarte I-11 Primer Nivel	E – 1	0.00 m. – 0.90 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); y, Gravas Bien Graduadas (GW); color Claro.
	E – 2	0.90 m. – 6.00 m.	Macizo rocoso (roca sedimentaria caliza diorita); color Claro.
P-04 Espacio abierto Plaza Baluarte I-7 Primer Nivel	E – 1	0.00 m. – 1.60 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
	E – 2	1.60 m. – 6.00 m.	Macizo rocoso (roca sedimentaria caliza diorita); color Claro.
P-06 Espacio abierto Patio Baluarte II-18 Segundo Nivel	E – 1	0.00 m. – 2.90 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
	E – 3	2.90 m. – 6.00 m.	Macizo rocoso (roca sedimentaria caliza diorita); color Claro.

P-06	E – 1	0.00 m. – 5.20 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
Espacio abierto Patio Baluarte II-11 Segundo Nivel	E – 3	5.20 m. – 3.00 m.	
P-07	E – 1	0.00 m. – 0.90 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
Espacio abierto Patio Baluarte II-7 Segundo Nivel	E – 3	0.90 m. – 6.00 m.	
P-08	E – 1	0.00 m. – 2.00 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
Espacio abierto Patio Baluarte III-6 Tercer Nivel	E – 2	2.00 m. – 6.00 m.	
P-09	E – 1	0.00 m. – 2.00 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC); Gravas Bien Graduadas (GW); y, Gravas bien Graduadas (GW), en bolones de tamaño mediano y grande; color Claro.
Espacio abierto Patio Sector Norte de Muyoqmarka	E – 2	2.00 m. – 6.00 m.	
P-10	E – 1	0.00 m. – 0.30 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas Limosas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL); Arenas Limosas (SM); y, Gravas Arcillosas (GC); color Claro.
Espacio abierto Plaza Sayaqmarka	E – 2	0.30 m. – 6.00 m.	
P-11	E – 1	0.00 m. – 0.70 m.	Relleno Controlado Inca; conformado por Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad (CL), compactadas; Arenas Limosas (SM); Gravas Arcillosas (GC) y, Gravas Bien Graduadas (GW); color Claro.
Recinto Sector Sur Sayaqmarka	E – 2	0.70 m. – 6.00 m.	

Nota: La Estratigrafía de los suelos de fundación de la Llaqta Inca de **Saqsaywaman**, está conformada por dos (2) Estratos característicos, tal como se detalla en la presente Tabla, para cada una de las superestructuras investigadas; descritas desde la superficie de contacto de éstas hacia el sub suelo; es decir, de arriba hacia abajo; en este contexto, el **primer Estrato (E-1)**, está representado por los *Rellenos Controlados Inca*, rellenos trabajados por los Incas, a partir de los fragmentos del macizo rocoso, conformando Capas de suelos granulares como Gravas bien graduadas (GW), Arenas bien graduadas (SW) y Limos (ML); y, suelos finos como las Arcillas (CL); advirtiéndose en algunas de las Capas, el empleo de suelos mixtos, predominantemente en las capas próximas a la superficie de apoyo de las superestructuras Incas, como: Arcillas areno Limosas (CL-SM) y Gravas arcillosas (GC); este estrato alcanza **ángulos de fricción** promedio de **30.43°**. El **segundo Estrato (E-2)**, subyace al primer Estrato (E-1) y está constituido por el Macizo rocoso, clasificado en este caso como: **roca sedimentaria, Caliza - Diorita**, que alcanza **resistencias** promedio de **f'c=564 Kg./Cm2**. Respecto a la profundidad de los Estratos, están en sujeción al espesor o potencia de cada una

de las Capas que la conforman, en el caso de los Rellenos Controlados Inca; y, en el caso del macizo rocoso, se consigna como profundidad representativa 6.00 metros; dejándose constancia, que la profundidad real del macizo rocoso es la de la montaña misma. Dado que los Rellenos Controlados Inca, están conformados por fragmentos del mismo macizo rocoso, cuya resistencia es elevada, coadyuvado por el elevado nivel de compactación y confinamiento operado por los Incas, la estratigrafía del suelo de fundación de la Llaqta de Saqsaywaman, presenta óptimos parámetros geotécnicos que superan ampliamente los valores permitidos para superestructuras similares por la Normatividad Técnica Peruana como resistencias de $f'c = 210 \text{ Kg. /cm}^2$; $f'c = 240 \text{ Kg. /cm}^2$; 280 Kg. /cm^2 ; $f'c = 350 \text{ Kg. /cm}^2$; tal como se detalló en las Tablas precedentes. Elaboración propia, 2017.

5.5.3 Parámetros Físico Mecánicos de los Suelos de Fundación de las Llaqtas Incas

Obtenidos a partir de Ensayos con Penetrómetro Dinámico Ligero In Situ, en cada una de las Llaqtas, correlacionadas en gabinete y, contrastadas con los pesos específicos o densidades de las muestras obtenidas en campo. Consignándose parámetros, tanto para el primer Estrato (E-1), constituido por los *Rellenos Controlados Inca*, como para el segundo Estrato (E-2), conformado por los Macizos rocosos. Los suelos granulares que conforman el primer Estrato (E-1), alcanzan ángulos de fricción similares a los aceptables para el caso de rellenos, que oscilan entre 27° y 30° (Braja, 2001); y, 32° a 35° , según los Parámetros Característicos del suelo, definido por la Grundbau-Taschenbuch, 1980 (Rodríguez et.al., 1989).

Según los Valores Típicos de Parámetros Geomecánicos de Algunas Rocas, éstas “suelen presentar una envolvente de resistencia de tipo parabólico, por lo que con tensiones bajas, los ángulos de rozamiento interno son bastante mayores...Granito 45° - 58° , Arenisca 45° - 50° , Caliza 37° - 54° ” (Rodríguez et.al., 1989, p. 80). En efecto, en la presente investigación, los valores de los ángulos de fricción (o ángulo de rozamiento interno) y densidades, que son los parámetros geotécnicos más representativos en el cálculo de las capacidades de carga de suelos (Braja, 2001), presentan valores competentes que superan los valores estándar normalizados, tanto de suelos granulares (Gravas, GW; Arenas, SW y Limos, ML), como de macizos rocosos.

Los Ángulo de fricción (ϕ) y densidad (γ), referentes al primer y segundo Estratos de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas investigadas, los mostramos en las Tablas 5.41 a 5.46.

Tabla 5.41

Parámetros geotécnicos de los suelos de fundación de la Llaqta Inca de Machupicchu

Puntos de Investigación (P)	Parámetros Geotécnicos de Estratos					
	Estrato (E)	Profundidad	φ (°)	C Kg/cm ²	γ tn/m ³	γ_{sat} tn/m ³
P-01	E – 1	0.00 m. – 0.70 m.	30.13	-	1.89	2.15
Muro de contención	E – 2	0.70 m. – 3.00 m.	39.70	-	2.46	-
Sector I P-02	E – 1	0.00 m. – 1.90 m.	29.82	-	1.85	2.15
Plataforma Agrícola	E – 2	1.90 m. – 3.00 m.	39.70	-	2.46	-
Sector I-c P-03	E – 1	0.00 m. – 0.80 m.	29.17	-	1.75	2.13
Muro de contención	E – 2	0.80 m. – 3.00 m.	38.68	-	2.44	-
Sector II-a P-04	E – 1	0.00 m. – 1.30 m.	30.49	-	1.94	2.16
Recinto	E – 2	1.30 m. – 3.00 m.	38.64	-	2.44	-2.11
Sector II-a P-05	E – 1	0.00 m. – 1.20 m.	31.75	-	2.09	-
Espacio abierto Plaza	E – 2	1.20 m. – 3.00 m.	38.21	-	2.43	2.12
Sector III-c P-06	E – 1	0.00 m. – 0.50 m.	29.77	-	1.84	-
Espacio abierto Patio	E – 2	0.50 m. – 3.00 m.	36.94	-	2.30	2.12
Sector VI-c P-07	E – 1	0.00 m. – 0.80 m.	30.16	-	1.90	-
Muro de contención	E – 2	0.80 m. – 3.00 m.	36.51	-	2.39	2.12
Sector V-c P-08	E – 1	0.00 m. – 0.60 m.	30.82	-	1.98	-
Espacio abierto Patio	E – 2	0.60 m. – 3.00 m.	35.87	-	2.37	2.12
Sector VI-d						
P-09	E – 1	0.00 m. – 0.70 m.	30.21	-	1.81	2.15
Muro de contención	E – 2	0.70 m. – 3.00 m.	35.24	-	2.14	-
Sector VI-e P-10	E – 1	0.00 m. – 1.10 m.	30.55	-	1.95	2.16
Plataforma Agrícola	E – 2	1.10 m. – 3.00 m.	35.02	-	2.13	-
Sector VI-e						

Sector Oriental 1							
P-11	E – 1	0.00 m. – 1.30 m.	31.19	-	2.03	2.18	
Plataforma Agrícola	E – 2	1.30 m. – 3.00 m.	44.17	-	2.52	-	
Sector Oriental 2							
P-12	E – 1	0.00 m. – 0.90 m.	30.86	-	1.99	2.17	
Muro de contención	E – 2	0.90 m. – 3.00 m.	34.38	-	2.29	-	
Sector Oriental 3							
P-13	E – 1	0.20 m. – 0.80 m.	29.92	-	1.86	2.15	
Muro de contención	E – 2	0.80 m. – 3.00 m.	44.17	-	2.52	-	
Sector Oriental 4							
P-14	E – 1	0.30 m. – 1.30 m.	29.62	-	1.82	2.14	
Plataforma Agrícola	E – 2	1.30 m. – 3.00 m.	35.02	-	2.13	-	
Sector Oriental 5							
P-15	E – 1	0.00 m. – 0.50 m.	29.65	-	1.83	2.14	
Muro de contención	E – 2	0.50 m. – 3.00 m.	35.24	-	2.14	-	
Sector Oriental 6							

Nota: Los parámetros geotécnicos de los estratos que conforman los suelos de fundación de la Llaqta Inca de **Machupicchu**, que se detallan en la presente Tabla, para cada una de las superestructuras investigadas; evidencian, para el **primer Estrato (E-1)**, constituido por los *Rellenos Controlados Inca*, **ángulos de fricción** que oscilan entre **29.17°** a **31.75°**; y, en el caso del **macizo rocoso Granodiorita**, que constituye el **segundo Estrato (E-2)**, oscilan desde **34.38°** a **44.17°**; en el primer caso, superan los valores competentes para casos de rellenos; y, respecto al segundo Estrato, superan los valores estándar de macizos rocosos. Elaboración propia, 2017.

Tabla 5.42

Parámetros geotécnicos de los suelos de fundación de la Llaqta Inca de Ollantaytambo

Puntos de Investigación (P)	Parámetros Geotécnicos de Estratos					
	Estrato (E)	Profundidad	ϕ (°)	C Kg/cm ²	γ tn/m ³	γ_{sat} tn/m ³
P-01	E – 1	0.00 m. – 0.70 m.	30.17	-	1.90	2.15
Recinto	E – 2	0.70 m. – 3.00 m.	44.60	-	2.53	-
Sector Medio						
P-02	E – 1	0.00 m. – 0.30 m.	32.04	-	2.12	2.20

Recinto	E – 3	0.30 m. – 3.00 m.	44.13	-	2.52	-
Sector Medio						
P-03	E – 1	0.00 m. – 1.20 m.	29.75	-	1.84	2.14
Recinto	E – 2	1.20 m. – 3.00 m.	44.39	-	2.53	-
Sector Medio						
P-04	E – 1	0.00 m. – 0.50 m.	31.62	-	2.07	2.19
Espacio abierto Plaza	E – 2	0.50 m. – 3.00 m.	44.74	-	2.54	-
Sector Medio						
P-05	E – 1	0.00 m. – 0.30 m.	31.4	-	2.05	2.18
Espacio abierto Patio	E – 2	0.30 m. – 3.00 m.	45.02	-	2.54	-
Sector Templo del Sol						
P-06	E – 1	0.00 m. – 0.50 m.	29.38	-	1.79	2.14
Espacio abierto Plaza	E – 2	0.50 m. – 3.00 m.	44.39	-	2.53	-
Sector Templo del Sol						
P-07	E – 1	0.00 m. – 0.20 m.	30.34	-	1.92	2.16
Espacio abierto Patio	E – 2	0.20 m. – 3.00 m.	44.18	-	2.54	-
Sector Templo						
P-08	E – 1	0.00 m. – 0.60 m.	30.82	-	1.98	2.17
Muro de contención	E – 2	0.60 m. – 3.00 m.	43.75	-	2.51	-
Sector Pumatellis (lado izq.)						
P-09	E – 1	0.00 m. – 0.70 m.	29.42	-	1.79	2.14
Muro de contención	E – 2	0.70 m. – 3.00 m.	43.96	-	2.52	-
Sector Pumatellis						
P-10	E – 1	0.00 m. – 1.10 m.	31.90	-	2.10	2.19
Plataforma Agrícola	E – 2	1.10 m. – 3.00 m.	44.17	-	2.52	-
Sector Pumatellis						
P-11	E – 1	0.00 m. – 0.30 m.	31.30	-	2.04	2.18
Espacio abierto Plaza	E – 2	0.30 m. – 3.00 m.	44.39	-	2.53	-
Sector Pumatellis						

P-12	E – 1	0.00 m. – 0.40 m.	30.23	-	1.91	2.16
Espacio abierto Plaza	E – 2	0.40 m. – 3.00 m.	43.96	-	2.52	-
Sector Pumatellis						
P-13	E – 1	0.00 m. – 0.20 m.	29.92	-	1.83	2.15
Espacio abierto Plaza	E – 3	0.20 m. – 3.00 m.	44.17	-	2.52	-
Sector Pumatellis						

Nota: Los parámetros geotécnicos de los estratos que conforman los suelos de fundación de la Llaqta Inca de **Ollantaytambo**, que se detallan en la presente Tabla, para cada una de las superestructuras investigadas; evidencian, para el **primer Estrato (E-1)**, constituido por los *Rellenos Controlados Inca*, **ángulos de fricción** que oscilan entre **29.38°** a **32.04°**; y, en el caso del **macizo rocoso Andesita Shoshonítica**, que constituye el **segundo Estrato (E-2)**, oscilan desde **43.96°** a **45.02°**; en el primer caso, superan los valores competentes para casos de rellenos; y, respecto al segundo Estrato, superan los valores estándar de macizos rocosos. Elaboración propia, 2017.

Tabla 5.43

*Parámetros geotécnicos de los suelos de fundación de la Llaqta Inca de **Pisac***

Puntos de Investigación (P)	Parámetros Geotécnicos de Estratos					
	Estrato (E)	Profundidad	φ (°)	C Kg/cm ²	γ tn/m ³	γ_{sat} tn/m ³
P-01	E – 1	0.00 m. – 0.30 m.	31.19		2.03	2.18
Espacio abierto Patio	E – 2	0.30 m. – 4.50 m.	45.02		3.04	-
Qantu Raqay						
P-02	E – 1	0.00 m. – 0.80 m.	31.01		2.01	2.17
Recinto mediano	E – 2	0.80 m. – 4.50 m.	44.39		2.53	-
Qantu Raqay						
P-03	E – 1	0.00 m. – 0.50 m.	32.68		2.17	2.21
Recinto grande	E – 2	0.50 m. – 4.50 m.	44.81		2.54	-
Qantu Raqay						
P-04	E – 1	0.00 m. – 0.40 m.	32.33		2.14	2.20
Recinto pequeño	E – 2	0.40 m. – 4.50 m.	45.24		2.55	-
Qantu Raqay						

P-05	E – 1	0.20 m. – 2.70 m.	30.02	1.88	2.15
Muro de contención	E – 2	2.70 m. – 4.50 m.	44.17	2.52	-
Qantu Raqay					
P-06	E – 1	0.00 m. – 0.60 m.	30.13	1.89	2.15
Recinto	E – 2	0.60 m. – 4.50 m.	45.24	2.55	-
Kallakasa					
P-07	E – 1	0.00 m. – 0.40 m.	29.49	1.80	2.14
Espacio abierto Plaza	E – 2	0.40 m. – 4.50 m.	45.02	2.54	-
Pisaqa					
P-08	E – 1	0.00 m. – 0.20 m.	32.04	2.12	2.20
Recinto	E – 2	0.20 m. – 4.50 m.	44.60	2.53	-
pequeño					
Pisaqa					
P-09	E – 1	0.00 m. – 0.20 m.	32.26	2.14	2.20
Recinto	E – 2	0.20 m. – 4.50 m.	44.81	2.54	-
grande					
Pisaqa					
P-10	E – 1	0.00 m. – 2.70 m.	30.75	1.97	2.17
Plataforma Agrícola	E – 2	2.70 m. – 4.50 m.	43.96	2.52	-
Pisaqa					

Nota: Los parámetros geotécnicos de los estratos que conforman los suelos de fundación de la Llaqta Inca de **Pisaq**, que se detallan en la presente Tabla, para cada una de las superestructuras investigadas; evidencian, para el **primer Estrato (E-1)**, constituido por los *Rellenos Controlados Inca*, **ángulos de fricción** que oscilan entre **29.49° a 32.68°**; y, en el caso del macizo rocoso, que constituye el segundo Estrato (E-2), oscilan desde 43.75° a 45.02°; en el primer caso, superan los valores competentes para casos de rellenos; y, respecto al segundo Estrato, superan los valores estándar de macizos rocosos. Elaboración propia, 2017.

Tabla 5.44

Parámetros geotécnicos de los suelos de fundación de la Llaqta Inca de Raqchi

Puntos de Investigación (P)	Parámetros Geotécnicos de Estratos					
	Estrato (E)	Profundidad	ϕ (°)	C Kg/cm ²	γ tn/m ³	γ_{sat} tn/m ³
P-01	E – 1	0.00 m. – 1.50 m.	31.83	-	2.09	2.19
Espacio abierto Patio	E – 2	1.50 m. – 4.50 m.	40	-	2.51	-
Sector Qolcas						

P-02	E – 1	0.00 m. – 0.90 m.	30.34	-	1.92	2.16
Espacio abierto Patio	E – 2	0.90 m. – 4.50 m.	43.11	-	2.50	-
Sector Qolcas						
P-03	E – 1	0.00 m. – 1.60 m.	32.10	-	2.12	2.20
Recinto	E – 2	1.60 m. – 4.50 m.	43.53	-	2.51	-
Sector Qolcas						
P-04	E – 1	0.00 m. – 0.80 m.	31.12	-	2.02	2.18
Espacio abierto Patio	E – 2	0.80 m. – 4.50 m.	43.96	-	2.52	-
Sector Aposentos						
P-05	E – 1	0.00 m. – 2.90 m.	30.16	-	1.90	2.15
Espacio abierto Plaza	E – 2	2.90 m. – 4.50 m.	43.11	-	2.50	-
Sector Aposentos						
P-06	E – 1	0.00 m. – 1.00 m.	30.87	-	1.99	2.17
Espacio abierto Patio	E – 2	1.00 m. – 4.50 m.	43.75	-	2.51	-
Sector Aposentos						
P-07	E – 1	0.00 m. – 0.20 m.	29.92	-	1.86	2.15
Espacio abierto Patio	E – 2	0.20 m. – 4.50 m.	44.17	-	2.52	-
Sector Fuentes Menores						
P-08	E – 1	0.00 m. – 1.00 m.	29.35	-	1.78	2.14
Espacio abierto Patio	E – 2	1.00 m. – 4.50 m.	42.90	-	2.50	-
Sector Ushno Mesapata						
P-09	E – 1	0.00 m. – 1.50 m.	30.61	-	1.96	2.16
Espacio abierto Plaza	E – 2	1.50 m. – 4.50 m.	43.32	-	2.51	-
Sector Fuentes Ceremoniales						
P-10	E – 1	0.00 m. – 0.80 m.	31,90	-	2.10	2.19
Recinto	E – 2	0.80 m. – 4.50 m.	44.17	-	2.52	-
Templo de Wiracocha						
Lado izquierdo						
P-11	E – 1	0.00 m. – 2.30 m.	29.52	-	1.81	2.14

Recinto	E – 2	2.30 m. – 4.50 m.	43.96	-	2.52	-
Templo de Wiracocha						
Parte central						
P-12	E – 1	0.00 m. – 0.50 m.	29.38	-	1.79	2.14
Recinto	E – 2	0.50 m. – 4.50 m.	43.75	-	2.51	-
Templo de Wiracocha						
Lado derecho						

Nota: Los parámetros geotécnicos de los estratos que conforman los suelos de fundación de la Llaqta Inca de **Raqchi**, que se detallan en la presente Tabla, para cada una de las superestructuras investigadas; evidencian, para el **primer Estrato (E-1)**, constituido por los *Rellenos Controlados Inca*, **ángulos de fricción** que oscilan entre **29.35° a 32.10°**; y, en el caso del macizo rocoso **Andesita**, que constituye el **segundo Estrato (E-2)**, oscilan desde **40° a 44.17°**; en el primer caso, superan los valores competentes para casos de rellenos; y, respecto al segundo Estrato, superan los valores estándar de macizos rocosos. Elaboración propia, 2017.

Tabla 5.45

Parámetros geotécnicos de los suelos de fundación de la Llaqta Inca de Tipón

Puntos de Investigación (P)	Parámetros Geotécnicos de Estratos					
	Estrato (E)	Profundidad	ϕ (°)	C Kg/cm ²	γ tn/m ³	γ_{sat} tn/m ³
P-01	E – 1	0.00 m. – 0.30 m.	30.98	-	2.00	2.17
Espacio abierto Patio	E – 2	0.30 m. – 3.00 m.	40.77	-	2.47	-
Anden XII						
P-02	E – 1	0.00 m. – 0.10 m.	29.70	-	1.83	2.14
Espacio abierto Patio	E – 2	0.10 m. – 3.00 m.	40.13	-	2.46	-
Anden XII						
P-03	E – 1	0.00 m. – 0.50 m.	31.14	-	2.02	2.18
Recinto	E – 2	0.50 m. – 3.00 m.	37	-	2.25	-
Iglesia Raki						
P-04	E – 1	0.00 m. – 0.40 m.	31.69	-	2.08	2.19
Recinto	E – 2	0.40 m. – 3.00 m.	39.7	-	2.46	-
Cancha Inca						
P-05	E – 1	0.00 m. – 0.40 m.	30.62	-	1.96	2.16
Espacio abierto Patio	E – 2	0.40 m. – 3.00 m.	39.92	-	2.46	-
Cancha Inca						

P-06	E – 1	0.00 m. – 1.10 m.	31.15	-	2.06	2.18
Plataforma Agrícola	E – 2	1.10 m. – 3.00 m.	41.19	-	2.48	-
Anden IV						
P-07	E – 1	0.00 m. – 1.00 m.	31.40	-	2.05	2.18
Plataforma Agrícola	E – 2	1.00 m. – 3.00 m.	41.62	-	2.48	-
Anden I						
P-08	E – 1	0.00 m. – 1.40 m.	32.08	-	2.12	2.20
Espacio abierto Plaza	E – 2	1.40 m. – 3.00 m.	42.90	-	2.50	-
Sinkuna Kancha						
P-09	E – 1	0.00 m. – 1.50 m.	31.92	-	2.10	2.19
Espacio abierto Plaza	E – 3	1.50 m. – 3.00 m.	43.53	-	2.51	-
Sinkuna Kancha						
(Recinto semicircular)						
P-10	E – 1	0.00 m. – 0.60 m.	30.70	-	1.97	2.17
Plataforma Agrícola	E – 2	0.60 m. – 3.00 m.	41.83	-	2.49	-
Anden IX						

Nota: Los parámetros geotécnicos de los estratos que conforman los suelos de fundación de la Llaqta Inca de **Tipón**, que se detallan en la presente Tabla, para cada una de las superestructuras investigadas; evidencian, para el **primer Estrato (E-1)**, constituido por los *Rellenos Controlados Inca*, **ángulos de fricción** que oscilan entre **29.70°** a **32.08°**; y, en el caso del macizo rocoso **Andesita Basalto**, que constituye el **segundo Estrato (E-2)**, oscilan desde **37°** a **43.53°**; en el primer caso, superan los valores competentes para casos de rellenos; y, respecto al segundo Estrato, superan los valores estándar de macizos rocosos. Elaboración propia, 2017.

Tabla 5.46

Parámetros geotécnicos para los suelos de fundación de la Llaqta Inca de Saqsaywaman

Puntos de Investigación (P)	Parámetros Geotécnicos de Estratos					
	Estrato (E)	Profundidad	φ (°)	C Kg/cm ²	γ tn/m ³	γ_{sat} tn/m ³
P-01	E – 1	0.00 m. – 2.20 m.	30.73	-	1.97	2.17
Espacio abierto Plaza	E – 2	2.20 m. – 6.00 m.	38	-	2.47	-
Baluartes I-2						
Primer Nivel						

P-02	E – 1	0.00 m. – 0.50 m.	32.11	-	2.12	2.20
Espacio abierto Plaza	E – 2	0.50 m. – 6.00 m.	42.26	-	2.24	-
Baluartes I-15						
Primer Nivel						
P-03	E – 1	0.00 m. – 0.90 m.	31.58	-	2.07	2.19
Espacio abierto Plaza	E – 2	0.90 m. – 6.00 m.	41.83	-	2.49	-
Baluartes I-11						
Primer Nivel						
P-04	E – 1	0.00 m. – 1.60 m.	30.74	-	2.02	2.17
Espacio abierto Plaza	E – 2	1.60 m. – 6.00 m.	42.47	-	2.49	-
Baluartes I-7						
Primer Nivel						
P-06	E – 1	0.00 m. – 2.90 m.	29.87	-	1.87	2.15
Espacio abierto Patio	E – 2	2.90 m. – 6.00 m.	43.90	-	2.50	-
Baluartes II-18						
Segundo Nivel						
P-06	E – 1	0.00 m. – 5.20 m.	29.54	-	1.81	2.14
Espacio abierto Patio	E – 2	5.20 m. – 3.00 m.	42.68	-	2.50	-
Baluartes II-11						
Segundo Nivel						
P-07	E – 1	0.00 m. – 0.90 m.	30.73	-	1.97	2.17
Espacio abierto Patio	E – 2	0.90 m. – 6.00 m.	43.11	-	2.50	-
Baluartes II-7						
Segundo Nivel						
P-08	E – 1	0.00 m. – 2.00 m.	29.33	-	1.88	2.15
Espacio abierto Patio	E – 2	2.00 m. – 6.00 m.	43.32	-	2.51	-
Baluartes III-6						
Tercer Nivel						
P-09	E – 1	0.00 m. – 2.00 m.	29.30	-	1.77	2.13
Espacio abierto Patio	E – 2	2.00 m. – 6.00 m.	41.41	-	2.48	-
Sector Norte de Muyoqmarka						
P-10	E – 1	0.00 m. – 0.30 m.	30.13	-	1.89	2.15
Espacio abierto Plaza	E – 2	0.30 m. – 6.00 m.	41.83	-	2.49	-

Sayaqmarka						
P-11	E - 1	0.00 m. – 0.30 m.	29.21	-	1.76	2.13
Recinto	E - 2	0.30 m. – 0.70 m.	30.71	-	1.97	2.17
Sector Sur Sayaqmarka	E - 3	0.70 m. – 6.00 m.	38.47	-	2.44	-

Nota: Los parámetros geotécnicos de los estratos que conforman los suelos de fundación de la Llaqta Inca de **Saqsaywaman**, que se detallan en la presente Tabla, para cada una de las superestructuras investigadas; evidencian, para el **primer Estrato (E-1)**, constituido por los *Rellenos Controlados Inca*, **ángulos de fricción** que oscilan entre **29.21°** a **32.11°**; y, en el caso del macizo rocoso **Caliza Diorita**, que constituye el **segundo Estrato (E-2)**, oscilan desde **38°** a **43.90°**; en el primer caso, superan los valores competentes para casos de rellenos; y, respecto al segundo Estrato, superan los valores estándar de macizos rocosos. Elaboración propia, 2017.

En la Tabla 5.47, se presenta la síntesis de los ángulos de fricción y las densidades, promedio de los suelos de fundación de las superestructuras, en cada una de las Llaqtas Incas; tanto para el primer Estrato (E-1), conformado por los *Rellenos Controlados Inca*, como para el segundo Estrato (E-2), constituido por los macizos rocosos.

Tabla 5.47

Síntesis de Ángulos de fricción y Densidades: suelos de fundación de superestructuras Incas

Llaqtas Incas	Muros de contención		Plataforma agrícola		Recintos		Plazas		Pacios	
	Parámetros geotécnicos									
	ϕ	γ	ϕ	γ	ϕ	γ	ϕ	γ	ϕ	γ
Mapy	30	1.86	30.10	1.91	30.49	1.94	31.75	2.09	30.30	1.91
	37	2.34	38.50	2.31	38.64	2.44	38.21	2.43	36.41	2.34
Ollanta	30.12	1.86	31.90	2.10	30.65	1.95	30.50	1.93	31.19	2.03
	43.86	2.52	44.17	2.52	44.40	2.53	44.33	2.53	45.02	3.04
Pisay	30.02	1.87	30.75	1.97	31.74	2.10	29.49	1.80	31.19	2.03
	44.17	2.52	43.96	2.52	44.85	2.54	45.02	2.54	45.02	3.04
Raqchi	-	-	-	-	30.73	1.96	30.40	1.93	30.60	1.94
	-	-	-	-	43.90	2.52	43.22	2.51	43	2.51
Tipón	-	-	31.10	2.03	31.42	2.10	32	2.11	30.43	1.93
	-	-	41.55	2.48	38.40	2.40	43.22	2.51	40.30	2.46
Saqsayw	-	-	-	-	30.71	1.97	31.10	2.01	29.80	1.86
	-	-	-	-	38.47	2.44	41.30	2.44	42.90	2.5

Nota: Mapy = Machupicchu; Ollanta = Ollantaytambo; Saqsayw = Saqsaywaman; ϕ = Ángulo de fricción; γ = Densidad; (-) no se tuvo acceso a esta información In Situ. Siendo los macizos rocosos de distinto tipo, por sus valores, todos son de elevada competencia geotécnica.

5.5.4 Conclusiones

✓ **Del Tipo de cimentación de las Llaqtas Incas**

Con la finalidad de nivelar la abrupta morfología del relieve de los emplazamientos de las Llaqtas Incas, se trabajaron *Rellenos Controlados Inca*; otorgándoseles paralelamente, funciones de cimiento para la transmisión y distribución de las cargas actuantes de las superestructuras al subsuelo.

En los sectores elevados del macizo rocoso y de difícil trabajabilidad, las superestructuras Incas fueron apoyadas directamente sobre el macizo rocoso, recurriendo a óptimas técnicas de empotramiento.

El tipo de cimentación operado en las Llaqtas Incas, son los cimientos corridos superficiales.

La compactación de los suelos de fundación, así como, su confinamiento, constituye la estrategia técnica utilizada con mayor profusión en las Llaqtas Incas; implicando ello, el soterramiento de las superficies de contacto de las superestructuras.

✓ **De los Estratos de apoyo de las superestructuras Incas**

Se identifican dos estratos de apoyo característicos: el primer Estrato (E-1), constituido por los *Rellenos Controlados Inca*; rellenos artificiales, que a su vez están conformados por capas de suelos granulares y finos, trabajados a partir del mismo substrato rocoso del emplazamiento de la Llaqta; el segundo Estrato (E-2), constituido por el macizo rocoso.

Las capas que conforman el primer Estrato (E-1) o *Relleno Controlado Inca*, están constituidas –desde el contacto con el macizo rocoso hacia la superficie- por fragmentos o bolones del mismo macizo rocoso de tamaños muy variado (grande, mediano y pequeño), con la finalidad de compactarse óptimamente entre sí; seguida de Gravas bien graduadas (GW), de gradiente descendente; complementadas por Gravas arcillosas (GC), Arenas bien graduadas (SW) y Arcillas arena limosas (CL-SM); éstas últimas, como capas sellantes compactas de contacto con las superestructuras.

Los espesores o potencias de las Capas conformantes de los *Rellenos Controlados Inca*, son muy variables; en función, a la morfología del relieve, el sistema edáfico del emplazamiento y, al tipo de superestructura.

✓ **De los Parámetros Físico Mecánicos de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas**

Los Parámetros Físicos y Mecánicos, tanto de los *Rellenos Controlados Inca*, *RCI*, que constituyen el primer Estrato (E-1), como del segundo Estrato (E-2), conformado por los Macizos Rocosos de los emplazamientos de las Llaqtas Incas, presentan valores geotécnicos muy competentes; representados predominantemente el primer Estrato por Suelos Granulares como las Gravas y, el segundo Estrato, por macizos rocosos tipificados como Roca dura.

Los ángulos de fricción (ϕ), para el caso de las Gravas del primer Estrato (E-1), varían en promedio desde 29.21° a 32.68° , superando los 27° a 30° , característicos para rellenos. El segundo Estrato (E-2), representado por los Macizos Rocosos, presentan ángulos de fricción que oscilan en promedio entre 34.38° y 45.02° , muy similares a rocas sanas y sus valores estándar. Respecto a las Densidades (γ), para el caso del primer Estrato (E-1), los valores promedio oscilan entre 1.88 Tn/m^3 a 2.24 Tn/m^3 ; y, para los Macizos Rocosos, segundo Estrato (E-2), entre 2.40 Tn/m^3 y 3 Tn/m^3 . Estos parámetros geotécnicos óptimos tienen incidencia directa en los cálculos de las Capacidades de Carga de los suelos de fundación.

5.6 Del Análisis y los cálculos de Capacidad de Carga de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas

5.6.1 De los cálculos de Capacidad de Carga

“La roca constituye en general un excelente terreno de cimentación,... para edificios normales, casi todas las rocas aseguran una presión de trabajo suficiente ($> \text{ó} = 3 \text{ Kg. /cm}^2$),... pero para fuertes cargas concentradas requiere un análisis de resistencia... En casos de carga sencillos sobre macizos homogéneos y potentes pueden emplearse directamente valores

normativos.” (Rodríguez et.al., 1989, p.75). Consideramos en la presente investigación, que los macizos rocosos de fundación, soportan superestructuras Incas, cuyas cargas son considerables por su magnitud; por ello, se precisa realizar los análisis de resistencia necesarios para determinar las capacidades de carga reales y, los probables asentamientos.

Para el análisis y cálculo de la Capacidad de Carga y Asentamientos de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, tomamos los parámetros geotécnicos obtenidos a partir de los Ensayos con el Penetrómetro Dinámico Ligero In Situ y sus correlaciones en Gabinete, contrastados con los Pesos Unitarios o densidades de las muestras obtenidas; considerando un **ancho promedio** de cimentación de **1.20 metros** por **1.00 metros** de **largo**, para **profundidades** de plano de cimentación y **alturas de encaje desde 1.00 metros** hasta **3.00 metros**; ello, para una carga que soporte un peso por unidad de superficie, siendo el **peso calculado: 13 872 Kg.**

Consignaremos *el análisis para 1.50 metro de encaje*, dado que es la profundidad más recurrente de los suelos de fundación Inca; los análisis correspondientes a 1.00, 2.00, 2.50 y 3.00 metros de profundidad, los adjuntamos a detalle en Anexos. Se precisa referir que, *en condiciones normales, los análisis para el cálculo de Capacidad de Carga, se realiza con los parámetros geotécnicos más críticos del suelo*; consecuentemente, para nuestro estudio no será diferente; sin embargo, dado el caso suigéneris, *considero importante incluir también el análisis de capacidad de carga con los parámetro geotécnicos óptimos*, que bien corresponderían mínimamente a las características físicas y mecánicas de los Suelos Inca.

En la Tabla 5.48, se consigna los **Datos Generales**, considerados para el análisis y cálculo de las Capacidades de Carga, de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman; entre ellas, el ancho de cimentación que, para las seis Llaqtas en estudio, se considera como promedio 1.20 metros; para un largo de cimentación de 1.00 metro, porque para esa longitud se hacen los cálculos de acuerdo a los

protocolos normativos; y, para una profundidad o encaje de cimentación de 1.50 metros, por ser la profundidad de cimentación más recurrente en las Llaqtas Incas investigadas. Respecto a la aceleración horizontal, ésta se considera frente a la posibilidad de la ocurrencia de sismo.

Tabla 5.48

Datos generales para cálculos de Capacidad de Carga

Datos generales	Llaqtas Inca					
	Machupicchu	Ollantaytambo	Pisac	Raqchi	Tipón	Saqsaywaman
Ancho de cimentación	1.20 m.	1.20 m.	1.20 m	1.20 m.	1.20 m.	1.20 m.
Largo de cimentación	1.00 m.	1.00 m.	1.00 m	1.00 m.	1.00 m.	1.00 m.
Profundidad cimentación	1.50 m.	1.50 m.	1.50 m	1.50 m.	1.50 m.	1.50 m.
Profundidad encaje	1.50 m.	1.50 m.	1.50 m	1.50 m.	1.50 m.	1.50 m.
Aceleración horizontal	0.25 m.	0.25 m.	0.25 m	0.25 m.	0.25 m.	0.25 m.
Asientos después de T años	10	10	10	10	10	10

Nota: Mostramos los datos generales y el dimensionamiento de la cimentación a considerarse en los cálculos de capacidad de carga; siendo éste: 1.20 m. x 1.50 m. por unidad de superficie, para cada una de las Llaqtas Incas. Elaboración propia, 2017.

En relación a los Asentamientos, y, considerando que los suelos de fundación están conformados por *Rellenos Controlados Inca*, constituidos predominantemente por suelos granulares, intervienen en su cálculo varios factores como las resistencias a la penetración capa por capa (Braja, 2001), entre otros, cuya explicación no es materia de la presente investigación; consignándose para los cálculos un valor de 10, valor asumido para el tipo de suelos en cuestión por el programa de cálculo utilizado en este estudio; así mismo, cabe referir que, por la

conformación de los suelos de fundación (macizos rocosos y fragmentos de éstos), es poco probable la ocurrencia de asentamientos como tales, aun así, se considera el valor respectivo.

En la Tabla 5.49, mostramos los valores de los parámetros geotécnicos más críticos (más bajos), obtenidos de los suelos de fundación de las diferentes superestructuras de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman; tanto del primer Estrato (E-1), constituido por los *Rellenos Controlados Inca*, como del segundo estrato (E-2), conformado por los macizos rocosos; los mismos que presentan diferentes potencias por corresponder a diferentes tipos de superestructuras cuyos parámetros geotécnicos se identificaron como los más bajos (densidades y ángulos de fricción, con sus respectivos valores corregidos por el programa de cálculo). No se consideran en los cálculos, los suelos finos.

Tabla 5.49

Datos Estratigráficos con parámetros geotécnicos críticos, de Llaqtas Incas

Llaqtas Incas	DH (m)	Gam (Kg/m ³)	Gams (Kg/m ³)	Fi (°)	Fi Corr. (°)	c (Kg/cm ²)	c Corr. (Kg/cm ²)	cu (Kg/cm ²)	Ey (Kg/cm ²)
Machupic.	0.7	1890.0	2150.0	30.13	21.25	0.0	0.0	0.0	500.0
	2.3	2460.0	0.0	39.7	29.08	0.0	0.0	0.0	1000.0
Ollantayt.	0.4	2000.0	2100.0	36.0	25.96	0.0	0.0	0.0	500.0
	2.6	2300.0	0.0	45.0	33.82	0.0	0.0	0.0	1000.0
Písaq	2.7	2000.0	2100.0	36.0	25.96	0.0	0.0	0.0	500.0
	1.8	2300.0	0.0	45.0	33.82	0.0	0.0	0.0	1000.0
Raqchi	1.5	2090.0	2190.0	31.83	22.58	0.0	0.0	0.0	500.0
	3.0	2500.0	0.0	42.68	31.71	0.0	0.0	0.0	1000.0
Tipón	0.5	2020.0	2180.0	31.14	22.04	0.0	0.0	0.0	500.0
	2.5	2450.0	0.0	39.28	28.72	0.0	0.0	0.0	1000.0
Saqsayw.	2.2	1970.0	2170.0	30.73	21.72	0.0	0.0	0.0	500.0
	3.8	2410.0	0.0	37.12	26.89	0.0	0.0	0.0	1000.0

Nota: DH: Espesor del estrato; Gam: Peso específico; Gams: Peso específico saturado; Fi: Ángulo de rozamiento interno; Fi corr: Ángulo de rozamiento interno corregido según Terzaghi; c: Cohesión; c Corr: Cohesión corregida según Terzaghi; Ey: Módulo elástico.

En la Tabla 5.49, se verifica la diferencia entre los valores de los ángulos de fricción como de las densidades, entre el primer Estrato (E-1) que constituyen los *Rellenos Controlados Inca*, y el segundo Estrato (E-2), que corresponde a los macizos rocosos; en efecto, el E-1, constituido por Gravas de diferente gradación, a pesar de ser del mismo substrato rocoso, por haber sido fracturadas, disminuyeron sus propiedades sobre todo mecánicas; por ello, sus valores son menores que los de los macizos rocosos que están íntegros, con sus propiedades físicas y mecánicas de roca; ambos Estratos, al compactarse y confinarse en conjunto, revelan valores competentes, que inciden directamente en la Capacidad de Carga.

Por otro lado, puede comprobarse también, que *los ángulos de fricción y densidades presentan valores distintos* para la ígnea **granodiorita de Machupicchu**, la **metamórfica arenisca cuarcítica de Ollantaytambo**, la ígnea **andesita de Písaq**, la ígnea **andesita de Raqchi**, la ígnea **andesita y basalto de Tipón** y la **sedimentaria arenisca de Saqsaywaman**; pues, *cada tipo de roca tiene particulares propiedades*. En el caso de los *Rellenos Controlados Inca*, el margen de diferencia en estos parámetros geotécnicos es mucho menor, por las condiciones ya mencionadas líneas arriba. La altura o profundidad de los estratos es importante, pues a mayor confinamiento de los suelos granulares, la capacidad de carga se incrementa.

Ahora bien, los suelos de fundación soportan **cargas verticales y horizontales**; las primeras, referidas al peso propio de las superestructuras y, la segunda al efecto sismo; para dar cara a esta última, los Incas se debieron concentrar en "...aumentar el arriostramiento entre los distintos elementos de apoyo, con que resultarán más adecuadas las cimentaciones que por su naturaleza supongan un alto grado de arriostramiento (losa y zapatas corridas) frente a las de menor arriostramiento (pilotes y zapatas aisladas)" (Rodríguez et. al., 1989, p. 265). En efecto, los cimientos corridos empleados por los Incas, en todas las cimentaciones, posibilitaron amarres casi monolíticos de la estructura suelo-cimiento-superestructura.

Para calcular la carga vertical actuante sobre el suelo de fundación consideramos una **altura**

Promedio de **3.00** metros para todas las superestructuras; con un **ancho**, en su base promedio de **1.20** metros y un **ancho promedio de coronación de 0.80 metros**; para una **profundidad del Relleno Controlado Inca** o cimiento de **1.50** metros por **1.20** metros de ancho; en ambos casos, el cálculo es por unidad de superficie; resultando una **carga total** actuante de **13 872 Kg.**; lo que quiere decir, que los Incas debieron "...proyectar la cimentación... de la forma más funcional y económica, teniendo en cuenta la naturaleza del terreno, de forma que se consiga una seguridad suficiente y unas deformaciones o asientos compatibles con las tolerancias de la estructura" (Rodríguez et. al., 1989, p. 36). Ver Tabla 5.50.

Tabla 5.50

Carga actuante sobre los suelos de fundación de las Llaqtas Incas

Llaqta Inca	Presión normal; Estado Límite de daño (S.L.D.)	Presión normal; Estado Límite último (S.L.U.)
Machupicchu		
Ollantaytambo		
Pisac	13 872 Kg./m ²	13 872 Kg./m ²
Raqchi		
Tipón		
Saqsaywaman		

Nota: Carga o peso actuante estándar sobre los suelos de fundación de las Llaqtas Incas investigadas, considerando dimensiones y pesos promedio. Elaboración propia, 2017.

Previo a los cálculos de las Capacidades de Carga y los Asentamientos de los Suelos de Fundación de las Llaqtas Incas, pasamos a calcular el **Esfuerzo actuante** de las superestructuras; para ello, dividimos el **peso o carga** total hallado, que es **13 872 Kg.** entre el área de apoyo de la unidad de superficie: 1.20 x 1.00 metros, convirtiéndolos a centímetros; así, realizadas las operaciones matemáticas, tenemos como **Esfuerzo actuante** sobre el suelo de fundación: **1.156 Kg./cm²**; consecuentemente, las Capacidades de Cargas de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas, deben ser mínimamente iguales o superiores a este valor, de acuerdo a la Norma Técnica Peruana E.050, de Suelos y Cimentaciones.

Para verificar dicha condición normativa, veamos los resultados calculados (Tabla 5.51).

Tabla 5.51*Cálculo de Capacidad de Carga con parámetros geotécnicos críticos*

Parámetros de Cálculo	Llaqtas Incas					
	Machupicchu	Ollantaytambo	Pisac	Raqchi	Tipón	Saqsaywaman
Factor Nq	13.75	23.18	9.93	18.28	13.23	6.51
Factor Nc	24.63	35.49	19.76	30.0	23.98	15.0
Factor Ng	10.08	22.02	6.03	15.51	9.49	2.96
Factor Sc	1.65	1.78	1.58	1.72	1.64	1.49
Factor Dc	1.41	1.45	1.39	1.43	1.41	1.36
Factor Sq	1.32	1.39	1.29	1.36	1.32	1.25
Factor Dq	1.21	1.23	1.19	1.22	1.2	1.18
Factor Sg	1.32	1.39	1.29	1.36	1.32	1.25
Factor Dg	1.21	1.23	1.19	1.22	1.2	1.18
Presión u	9.6	18.33	5.69	13.32	9.49	3.13
Presión a	3.2	6.11	1.9	4.44	3.16	1.04

Nota: Presión u = Presión última "...capacidad máxima de soporte de un suelo sin que se produzca un asentamiento catastrófico de la cimentación"; Presión a = Presión admisible "esfuerzo vertical al que puede ser sometida una masa de suelo, por efecto de la construcción de estructuras sobre ella, sin que presenten asentamientos que pongan en peligro la integridad o funcionalidad de dichas estructuras" (Hoyos, 2012, p. 33). Presión última y Presión admisible en Kg. /cm². Nótese, tanto la capacidad de carga admisible como la última, son superiores a 1.156 Kg. /cm².; a excepción de Saqsaywaman, que presenta una capacidad de carga admisible menor, pero respaldada por una capacidad de carga última de 3.13 Kg. /cm²; probablemente, en este caso excepcional, tenga que ver el actual estado de intemperización de los macizos rocosos aflorantes, cuyas propiedades geotécnicas puedan haber sido distorsionadas respecto a las reales.

En efecto, en la Tabla 5.51 mostramos la síntesis de los cálculos de las Capacidades de Carga de los Suelos de Fundación de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman; considerando los parámetros geotécnicos más críticos (más bajos) y, a una profundidad de cimentación de 1.50 metros. Puede advertirse en los resultados calculados, que, las **Capacidades de Carga o Presión admisible** (Presión a) de los suelos de fundación (resaltadas con el recuadro de color rojo), superan ampliamente la Presión o carga actuante sobre ellas, que es: **1.156 Kg. /cm²**; lo que significa, que los Incas no sobrecargaron los suelos con las superestructuras; y, en consecuencia, no podían generarse asentamientos.

Así mismo, en la Tabla 5.51, podemos evidenciar la diferencia entre las Capacidades de

Carga de cada uno de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas; así, en el caso de **Machupicchu**, la **Capacidad de Carga admisible** es de **3.2 Kg. /cm²**; **Ollantaytambo** presenta **6.11 Kg. /cm²**; respecto a **Pisac**, su Capacidad de Carga alcanza **1.90 Kg. /cm²**; **Raqchi** presenta **4.44 Kg. /cm²**; **Tipón** alcanza **3.16 Kg. /cm²**; y, **Saqsaywaman** tiene una Capacidad de Carga de **1.04 Kg. /cm²**. Las presiones admisibles características, según la DIN 1054, de Suelos no cohesivos – Estructuras poco sensibles a los Asientos, calculados a una profundidad de 1.50 m., con zapatas corridas, varía de *1 a 4.4 Kg. /cm²* (Rodríguez et. al., 1989, p. 43); esto demuestra, la óptima competencia geotécnica de los suelos de fundación Inca.

Ahora bien, realizando los cálculos con **parámetros geotécnicos óptimos**; es decir, con *ángulos de fricción interna y densidades elevadas*, advertimos su incidencia directa en el *incremento de la capacidad de carga*, respecto a los calculados con parámetros críticos y, a la misma profundidad. En efecto, **Machupicchu** presenta ahora una capacidad de carga de **5.52 Kg. /cm²**; por su parte **Ollantaytambo** alcanza **6.74 Kg. /cm²**; **Pisac**, incrementa a **6.95 Kg. /cm²**; mientras que **Raqchi** presenta ahora **5.75 Kg. /cm²**; en tanto **Tipón** sube a **4.96 Kg. /cm²**; y, excepcionalmente en el caso de **Saqsaywaman**, su capacidad de carga admisible disminuye a **0.88 Kg. / cm²**, pero su capacidad de carga última es de 2.65 Kg. /cm².

La explicación al caso de Saqsaywaman, nos permite precisar que la capacidad de carga depende en gran medida de la profundidad de encaje de la cimentación y, la proximidad o alejamiento del suelo competente de fundación; recordemos que en el caso de Saqsaywaman, en época Inca se hicieron rellenos masivos con material predominantemente fino, tanto así que en muchos de los sectores investigados el macizo rocoso se encuentra a una profundidad de hasta 2.90 y 5.20 metros; consecuentemente, las capas conformantes del *Relleno Controlado Inca* del primer Estrato (E-1), a la profundidad de 1.50 metros, están constituidas por Grava arcillosa (GC), cuya capacidad de carga admisible alcanza a 0.88 Kg. /cm².

Veamos el detalle de lo descrito, en la Tabla 5.52, que presentamos a continuación.

Tabla 5.52*Cálculo de Capacidad de Carga con parámetros geotécnicos óptimos*

Parámetros de cálculo	Llaqtas Inca					
	Machupicchu	Ollantaytambo	Pisac	Raqchi	Tipón	Saqsaywaman
Factor Nq	21.24	23.2	23.76	21.24	19.89	5.85
Factor Nc	33.35	35.52	36.12	33.35	31.83	14.02
Factor Ng	19.37	22.06	22.83	19.37	17.58	2.45
Factor Sc	1.76	1.78	1.79	1.76	1.74	1.47
Factor Dc	1.44	1.45	1.45	1.44	1.44	1.35
Factor Sq	1.38	1.39	1.39	1.38	1.37	1.24
Factor Dq	1.22	1.23	1.23	1.22	1.22	1.18
Factor Sg	1.38	1.39	1.39	1.38	1.37	1.24
Factor Dg	1.22	1.23	1.23	1.22	1.22	1.18
Presión u	16.57	20.22	20.84	17.26	14.89	2.65
Presión a	5.52	6.74	6.95	5.75	4.96	0.88

Nota: Presión u = Presión última; Presión a = Presión admisible; Presión última y Presión admisible en Kg. /cm². Nótese que las Capacidades de Carga de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas, calculadas con parámetros geotécnicos óptimos, son bastante elevadas (exceptuando Saqsaywaman); y, que en su mayoría, quintuplican la carga vertical actuante que es 1.156 Kg. /cm².

Aquí, conviene, para mejor entendimiento, ampliar la explicación respecto a la importancia que juega la profundidad de encaje o confinamiento de una cimentación, sobre todo en suelos granulares, que en nuestro caso forman predominantemente los *Rellenos Controlados Inca*, que constituyen el primer Estrato de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas investigadas. En primer término, si bien los suelos granulares presentan características físicas y mecánicas competentes como suelos de fundación, no tienen adherencia entre sí, lo que exige confinarlas para mantener sus propiedades e incluso recurrir a material seleccionado para lograr mayor compactación.

Así mismo, el confinamiento de suelos granulares permite enfrentar la presencia de cargas axiales (horizontales, como los sismos) y, ayuda a resistir mejor las fuerzas cortantes, además de evitar el pandeo (Braja, 2001). Definitivamente, los ingenieros Incas, manejaron perfectamente estos conceptos y los aplicaron para la cimentación de las superestructuras; por

ello, harto se ha evidenciado en esta investigación, la prolijidad de los confinamientos de los cimientos, incluso involucrando las primeras hiladas de base de las superestructuras; pues, cuanto más confinado, compactado y soterrado el suelo de fundación trabajado, mayor sería su capacidad de carga, con ello, se aseguraría su perennidad. La Tabla 5.53 evidencia lo afirmado.

Tabla 5.53

Cálculo de Capacidad de Carga con parámetros geotécnicos óptimos, a una profundidad de encaje 2.50 metros

Parámetros de cálculo	Llaqta Inca					
	Machupicchu	Ollantaytambo	Pisac	Raqchi	Tipón	Saqsaywaman
Factor Nq	21.24	23.2	23.76	21.24	19.89	19.48
Factor Nc	33.35	35.52	36.12	33.35	31.83	31.37
Factor Ng	19.37	22.06	22.83	19.37	17.58	17.05
Factor Sc	1.76	1.78	1.79	1.76	1.74	1.73
Factor Dc	1.74	1.75	1.75	1.74	1.73	1.73
Factor Sq	1.38	1.39	1.39	1.38	1.37	1.37
Factor Dq	1.37	1.38	1.38	1.37	1.37	1.36
Factor Sg	1.38	1.39	1.39	1.38	1.37	1.37
Factor Dg	1.37	1.38	1.38	1.37	1.37	1.36
Presión u	28.69	33.98	35.04	29.46	26.06	17.96
Presión a	9.56	11.33	11.68	9.82	8.67	5.99

Nota: Presión u = Presión última; Presión a = Presión admisible; Presión última y Presión admisible en Kg. /cm². Apreciamos en el recuadro resaltado con color rojo, el gran incremento de las Capacidades de Carga de las Llaqtas Incas, a una profundidad de encaje mayor; es decir, en este caso a 2.50 metros, quedando demostrado así, el importante papel que juega, en la capacidad de carga, la profundidad de encaje. Resaltamos también en la Tabla, con el recuadro naranja, cómo la capacidad de carga de los suelos de fundación de Saqsaywaman se incrementan de 0.88 a 5.99 Kg. /cm², cuando la profundidad de encaje es mayor; es decir de 1.50 a 2.50 metros. De igual forma, en los casos de las Llaqtas Incas de **Machupicchu**, la Capacidad de Carga se incrementa de **5.52 a 9.56 Kg. /cm²**; **Ollantaytambo** sube de **6.74 a 11.33 Kg. /cm²**; **Pisac**, incrementa de **6.95 a 11.68 Kg. /cm²**; mientras que **Raqchi** incrementa de **5.75 a 9.82 Kg. /cm²**; mientras que **Tipón** sube de **4.96 a 8.67 Kg. /cm²**. De acuerdo a las Presiones Admisibles, establecidas por la DIN 1054, para Suelos No Cohesivos – Estructuras poco sensibles a los Asientos, a una profundidad de 2 m., con cimiento corrido de 1.00 m. de ancho, se alcanza a 5 Kg. /cm²; y, a la misma profundidad, pero con un ancho de cimiento de 1.50 m., se alcanza una capacidad admisible de 6 Kg. /cm² (Rodriguez et. al., 1989, p. 43).

Cabe precisar, que para los cálculos de Capacidad de Carga, se utilizó la *Teoría de Meyerhof* (1963), que toma en cuenta los esfuerzos cortantes desarrollados en el suelo encima del nivel

de desplante del cimiento; así mismo, considera que las cimentaciones pueden tener una carga inclinada; y, toma en cuenta Factores como la cohesión (c), el esfuerzo efectivo al nivel del fondo de la cimentación (q), Factores de forma (Fcs, Fqs, F.s), Factores de profundidad (Fcd, Fgi, Fd), Factores de inclinación de carga (Fci, Fqi, Fi) y Factores de capacidad de carga (Nc, Nq, N). Los cálculos a detalle se adjunta en Anexos, tanto con parámetros geotécnicos críticos como óptimos y, a diferentes profundidades (desde 1 hasta 2.50 m. de profundidad de encaje).

Respecto a los Asentamientos, cabe precisar que “...depende de la rigidez de la estructura, de la rigidez de la cimentación, la deformabilidad del suelo y la distribución de cargas aplicadas sobre la estructura de la cimentación” (Wood D.M, 1990). Consecuentemente, comprobándose que los Incas consideraron estos cuatro aspectos de relevancia para operar el sistema suelo - cimiento - superestructura, era de esperar la inexistencia de asentamientos, tal como lo mostramos en las Tablas 5.54 (con parámetros críticos) y 5.55 (con parámetros óptimos), donde los asentamientos calculados son casi imperceptibles, frente al valor máximo permisible establecido por la Norma E.050 de Suelos y Cimentaciones, que es: 2.54 cm.

Tabla 5.54

Cálculo de Asentamientos, con Parámetros geotécnicos críticos

Llaqta Inca	Estratos	Z	Método	Wc (cm)	Ws (cm)	Wt (cm)	Wt (cm)
Machupicchu	2	2.25	Schmertmann	0.064	0.026	0.09	
Ollantaytambo	2	2.25	Schmertmann	0.064	0.026	0.09	
Pisaq	1	2.1	Schmertmann	0.097	0.039	0.136	
	2	3.6	Schmertmann	0.084	0.033	0.117	0.253
Raqchi	2	3	Schmertmann	0.164	0.066	0.23	
Tipón	2	2.25	Schmertmann	0.062	0.025	0.87	
Saqsaywaman	1	1.85	Schmertmann	0.045	0.018	0.063	
	2	4.1	Schmertmann	0.147	0.059	0.206	0.269

Nota: 1 = Primer Estrato; 2 = Segundo Estrato; Z = Profundidad promedio del estrato; Método = John H. Schmertmann, investigador más representativo en el cálculo de asentamientos sobre suelos granulares, a partir del uso del gráfico del factor de influencia de la deformación unitaria, el cual describe 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; no se acerca a 2.54 cm. tolerable.

Tabla 5.55*Cálculo de Asentamientos, con Parámetros geotécnicos óptimos*

Llaqta Inca	Estrato	Z	Método	Wc (cm)	Ws (cm)	Wt (cm)	
Machupicchu	2	2.25	Schmertmann	0.065	0.026	0.091	
Ollantaytambo	2	2.25	Schmertmann	0.06	0.024	0.084	
Pisaq	2	3	Schmertmann	0.148	0.059	0.207	
Raqchi	2	3	Schmertmann	0.154	0.062	0.216	
Tipón	2	2.25	Schmertmann	0.066	0.026	0.093	
Saqsaywaman	1	1.75	Schmertmann	0.029	0.029	0.012	
	2	4	Schmertmann	0.167	0.167	0.067	0.079

Nota: 1 = Primer Estrato; 2 = Segundo Estrato; Z = Profundidad promedio del estrato; Método = John H. Schmertmann; Wc = Asiento de consolidación; Ws = Asiento secundario; Wt = Asiento total. Resaltamos con el recuadro rojo, los asentamientos totales calculados con parámetros óptimos, distantes del máximo permisible por la Norma E.050 de Suelos y Cimentaciones: 2.54 cm.

Corresponde precisar que, conocidas las condiciones locales de los suelos de fundación Inca, las características físicas y mecánicas, las capacidades de carga y, la carga vertical actuante sobre éstos, queda descartada la posibilidad de asentamientos diferenciales en las Llaqtas Incas; a lo que sí, están expuestas las superestructuras de las Llaqtas Incas, es a los efectos devastadores de las agua pluviales, que se infiltran en los suelos de fundación, por carecerse de operativos sistemas de evacuación tanto superficial como subterráneas; recordemos que las capas más próximas a la superficie, están constituidas por suelos finos como las arcillas que al tener contacto con el agua modifican sus propiedades físicas y mecánicas.

En las Tablas 5.56 y 5.57, presentamos el resumen de las Capacidades de Carga de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, calculados a diferentes profundidades de encaje, desde 1.00 hasta 2.50 metros; pues, los Incas tuvieron que adecuar las cimentaciones a la morfología del relieve, manejando distintas profundidades, donde la capacidad de carga de los macizos rocosos, es muy competente (no deformable), coadyuvado por la rigidez de las superestructuras, la rigidez de los Rellenos Controlados Inca y, la óptima distribución de las cargas, a partir de los cimientos

corridos de tipo superficial; cargas que no deben superar el esfuerzo de resistencia del Suelo, para garantizar estabilidad de las superestructuras y, ausencia de Asentamientos.

Tabla 5.56

Resumen de Capacidades de Carga de los suelos de fundación de Llaqtas Incas, con Parámetros geotécnicos críticos

Llaqtas Inca	Profundidad (metros)	Q admisible (Kg./cm ²)	Asentamiento (cm.)
Machupicchu	1	2.17	0.182
	1.5	3.20	0.090
	2	4.33	0.037
	2.5	5.57	-
Ollantaytambo	1	4.31	0.178
	1.5	6.11	0.090
	2	8.09	0.038
	2.5	10.26	-
Pisac	1	1.90	0.253
	1.5	2.54	0.163
	2	3.23	0.102
	2.5	11.54	0.045
Raqchi	1	0.90	0.286
	1.5	4.44	0.230
	2	6.04	0.158
	2.5	7.78	0.082
Tipón	1	2.18	0.176
	1.5	3.16	0.087
	2	4.25	0.036
	2.5	5.53	-
Saqsaywaman	1	0.74	0.356
	1.5	1.04	0.296
	2	1.29	0.235
	2.5	2.98	0.201
	3	3.59	0.157

Nota: Q = Carga. Resaltamos en la Tabla, con rojo y negrita, el incremento de las Capacidades de Carga, calculados desde 1.00 hasta 2.50 metros de profundidad de encaje; nótese, que a mayor profundidad de encaje y confinamiento de la cimentación, mayor capacidad de carga. Los Asentamientos calculados, son casi imperceptibles frente a 2.54 cm. (máximo tolerable), Norma E.050 de Suelos y Cimentaciones. Elaboración propia, 2017.

Tabla 5.57

Resumen de Capacidades de Carga, de suelos de fundación de Llaqtas Incas, con Parámetros geotécnicos óptimos

Llaqtas Inca	Profundidad (metros)	Q admisible (Kg./cm ²)	Asentamiento(cm.)
Machupicchu	1	3.78	0.184
	1.5	5.52	0.091
	2	-	-
	2.5	9.56	-
Ollantaytambo	1	4.75	0.171
	1.5	6.74	0.084
	2	8.93	0.034
	2.5	11.33	-
Pisaq	1	4.90	0.287
	1.5	6.95	0.207
	2	9.21	0.138
	2.5	11.68	0.068
Raqchi	1	3.99	0.298
	1.5	5.75	0.216
	2	7.69	0.146
	2.5	9.82	0.074
Tipón	1	0.91	0.198
	1.5	4.96	0.093
	2	6.73	0.038
	2.5	8.67	-
Saqsaywaman	1	0.62	0.344
	1.5	0.88	0.274
	2	4.80	0.251
	2.5	5.99	0.203

Nota: En una misma montaña, pero con ensayos en diferentes sectores de investigación, los parámetros geotécnicos varían unos de otros; de hecho, la diferencia no es representativa, sin embargo, es de considerarse; por ello, la Norma E-050 exige, mínimo tres puntos de investigación. Las capacidades de carga del suelo de fundación con características físicas y mecánicas óptimas, también evidencian diferencia cuando la profundidad de encaje es 1.00 y 2.50 metros; en el primer caso, se tiene **3.78, 4.75, 4.90, 3.99, 4.96 y 0.62 Kg. /cm²**, respectivamente; y, a 2.50 metros, se tiene **9.56, 11.33, 11.68, 9.82, 8.67 y 5.99 Kg. /cm²**, respectivamente; son los valores de respuesta de los suelos Incas a la Carga actuante de las superestructuras que en promedio es **1.156 Kg. /cm²**. Esto comprueba, que en el Periodo Inca, se conocía plenamente la geotecnia de cada una de las Llaqtas.

5.6.2 La cimentación Inca y las capacidades de carga de los suelos de fundación

Los Incas demuestran mucha audacia, al cimentar superestructuras en montañas de abrupto relieve, de considerable altura y, de difícil acceso; sin embargo, éstas características, aunadas a las dificultades operativas, fueron aprovechadas para integrarse extraordinariamente a la Pachamama (Madre tierra, suelo de fundación); en efecto, las crestas de las montañas, donde los volúmenes de movimiento de suelo eran menores por estar los macizos rocosos aflorando, constituían emplazamientos con mayor estabilidad y muy aptos para cimentar, adecuándose así a la topografía, optimizando los desniveles naturales con la construcción de edificaciones de hasta dos pisos, en algunos casos.

Las convexidades, que representan los espacios más elevados, y con mayor exposición de los macizos rocosos, son destinadas para cimentar superestructuras ceremoniales; considerando aproximarse así, al Inti Tayta (Padre Sol). Las concavidades, fueron utilizadas con doble función: primero, a nivel de superficie o Kay Pacha, como grandes espacios públicos o plazas; y, segundo, a nivel del Uku Pacha (Sub Suelo), como grandes colectores de las aguas pluviales, que posibilitaban alejar el agua de los cimientos, a través de *Rellenos Controlados Inca*, y dirigirlos hacia drenajes fuera de las Llaqtas. Así, crestas, concavidades y convexidades de alta resistencia geotécnica comprobada, constituyen los suelos de fundación Inca.

En este contexto, a decir de Wright (2006), los Incas primero aseguraron estabilizar los taludes de la Pachamama (Madre tierra, macizo rocoso, montaña), desde las bases, desde el nivel más bajo de las montañas; recurriendo para ello, a los *muros de contención*; éstos, están apoyados e incrustados en el macizo rocoso a través de los *Rellenos Controlados Inca*, que presentan capas compactas de bolones o fragmentos rocosos de tamaño muy variado, con la finalidad de evitar vacíos; complementados con gravas bien graduadas que posibilitan uniformizar superficies; y, arcillas areno limosas compactadas para el apoyo de las piezas líticas de las superestructuras; el espesor de los *Rellenos Controlados Inca*, es muy variado.

En efecto, la profundidad o espesor de los *Rellenos Controlados Inca, RCI*, están en función del relieve, de la topografía y, del destino asignado a los *muros de contención*; pues, si sólo cumplían contención, la profundidad era menor, en un promedio de 0.80 metros; y, si además, posibilitaban ampliar suelo productivo, los muros de contención son más altos y en consecuencia, los *Rellenos Controlados Inca*, también, alcanzando profundidades promedio de hasta 1.50 metros. Una característica trascendente en el tratamiento del sistema suelo –cimiento superestructura, es el nivel de confinamiento, que garantiza estabilidad y rigidez de todo el sistema.

Cuando hablamos de confinamiento, nos referimos al soterramiento del sistema, no está expuesto al exterior; en consecuencia, las características físicas y mecánicas de los suelos que los componen no corren el riesgo de degradación, todo está controlado; este es el principio, que nos hizo definir el tratamiento de los suelos de apoyo como *Relleno Controlado Inca, RCI*; pues, en primer término, está conformado por material seleccionado, con características físicas y mecánicas óptimas, demostradas en las Tablas de Capacidad de Carga; donde, incluso con con parámetros geotécnicos críticos, superan los 3 Kg. /cm² y, con valores óptimos supera ampliamente los 6 Kg. /cm², establecido en la Norma E-050, para roca dura.

Los Rellenos Controlados Inca, RCI, constituyen la solución técnica suigéneris que posibilitó cimentar superestructuras en montañas rocosas abruptas; presentan estándares elevados de calidad constructiva, en cuanto a selección de materiales y técnica se refiere (macizos rocosos, suelos granulares y finos); la conformación de capas, para densificar los Rellenos Controlados Inca es prolija; la definición de espesores específicos para cada caso, es conocimiento; la compactación intensa, por capas de 0.30 a 0.40 metros, evitó asentamientos; en suma, encontraron en los *Rellenos Controlados Inca*, una eficaz solución para transferir las cargas de las superestructuras a los macizos rocosos de elevada capacidad de carga.

Los Rellenos Controlados Inca, son el mayor aporte técnico que nos legaron los Incas.

Los Rellenos Controlados Inca, RCI, tienen entonces dos funciones; la primera, nivelar pendientes; y, la segunda, servir de apoyo, distribución y transmisión de las cargas de la superestructura al suelo de fundación. Los Incas eligieron las gravas como principal material conformante, porque son resistentes, tienen una compacidad elevada, no tienen problema con la humedad, drenan muy bien, no acumulan agua, no se hinchan y no tienen variación de volumen significativo. *Los Rellenos Controlados Inca, RCI*, son una técnica constructiva que homogeniza y estandariza las cimentaciones en las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman; sin trastocar la morfología del relieve.

Estabilizados los taludes de la Pachamama, a través de los *muros de contención*, el siguiente paso era garantizar el inevitable tránsito del agua a lo largo de todas las Llaqtas Incas, desde la cima hasta las bases; para ello, emplearon los muros de contención, pero esta vez para contener las *Plataformas agrícolas*, que además de constituir amplias áreas productivas artificiales, hacían las veces de presas colectoras de aguas pluviales, donde los *Rellenos Controlados Inca*, mantienen los estándares constructivos de conformación, diferenciándose sólo en el espesor de los estratos y la inclusión de capas de Arena bien graduada que preceden al suelo agrícola u orgánico y posibilitan el paso del agua a través de las gravas bien graduadas hasta el subsuelo.

Además de estabilizar la Pachamama, los *muros de contención* -más conocidos como sistema de andenerías-, también posibilitaron revestirla; a partir del apoyo de las extensas *plataformas agrícolas*, que la cubren, permitiendo se exhiba esplendorosa en términos paisajísticos; mostrándose así la Pachamama en el Kay Pacha, con nueva piel pétrea, exquisitamente trabajada por los Incas, para agradar al Inti Tayta; pero a su vez, prodigándoles a sus hijos los Incas, seguridad desde el Uku Pacha, cuyos cimientos estaban apoyados en suelos de gran competencia geotécnica. Paralelamente, el agua, elemento vital y de gran significación ritual, fluía con libertad tanto por el Kay Pacha como por el Uku Pacha.

El agua no constituyó en el Período Inca riesgo alguno, lograron manejar su presencia.

En la Tabla 5.58, presentamos la síntesis de las características de cimentación de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman; consignando en cada una de ellas, el tipo de superestructura más representativa; así, en el caso de Machupicchu, los muros de contención; en Ollantaytambo y Písaq, las plataformas agrícolas; en el caso de Raqchi, los recintos; en el caso de Tipón, las plazas y, en Saqsaywaman los patios. Para cada tipo de superestructura, consignamos las capacidades de carga promedio de los suelos de fundación, constituidos por dos Estratos (Rellenos Controlados Inca, E-1; y, E-2, macizos rocosos); así como los asentamientos, con valores poco significativos.

Tabla 5.58

Condiciones de Cimentación de superestructuras de Llaqtas Incas

Llaqtas Inca	Tipo de cimentación	Profundidad de cimentación	Capacidad de Carga Kg. /cm ²	Asentamiento Cm.	Observaciones
Machupicchu	Superficial, Cimiento corrido	Muros de contención: 0.80 metros	3.20 - 5.52	0.090 - 0.091	Roca ígnea granodiorita
Ollantaytambo	Superficial, Cimiento corrido	Plataformas agrícolas: 1.50 metros	6.11 - 6.74	0.090 - 0.084	Roca metamórfica arenisca cuarcítica
Písaq	Superficial, Cimiento corrido	Plataformas agrícolas: 1.50 metros	2.54 - 9.21	0.163 - 0.138	Roca ígnea andesita
Raqchi	Superficial, Cimiento corrido	Recintos: 0.50 metros	4.44 - 5.75	0.230 - 0.216	Roca ígnea andesita
Tipón	Superficial, Cimiento corrido	Plazas: 1.10 metros	3.16 - 4.96	0.087 - 0.093	Roca ígnea Basalto- andesita
Saqsaywaman	Superficial, Cimiento corrido	Patios: 0.90 metros	1.29 - 4.80	0.235 - 0.251	Roca sedimentaria arenisca

Nota: Las profundidades consignadas, son el promedio de ubicación de los macizos rocosos. Las capacidades de carga, calculadas a 1.50 m. de profundidad; con parámetros geotécnicos críticos y óptimos, color rojo y en negrita, respectivamente. Elaboración propia, 2017.

5.6.3 Conclusiones

✓ De los cálculos de las Capacidades de Carga

Para los cálculos de las Capacidades de Carga, de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, utilizamos la **Teoría de Capacidad de Carga de Meyerhof** (1963), por considerarlo el más conservador, entre autores como Vesic y Terzaghi.

Los cálculos de Capacidad de Carga, se realizan **por unidad de superficie**; donde los suelos de fundación, reciben las cargas de **los cimientos**, constituidos por los *Rellenos Controlados Inca, RCI*, con dimensiones promedio de **1.20 m. x 1.50 m.**; y, el peso propio de **las superestructuras**, con dimensiones promedio de **1.20 m.** (base) y **0.80 m.** (coronación) y **3 m.** de altura.

El **peso** promedio del cimiento (Relleno Controlado Inca) y la superestructura, calculado por unidad de superficie es: **13 872 Kg.**, que genera un esfuerzo actuante vertical, sobre los suelos de fundación de: **1.156 Kg. / cm²**; esfuerzo que de acuerdo a la normatividad Peruana (E.050), debe ser igual o menor al esfuerzo resistente del Suelo, para garantizar la estabilidad de las superestructuras y evitar Asentamientos.

Las Capacidades de Carga, calculadas de los suelos de fundación, con *parámetros geotécnicos críticos* (bajos) y *óptimos* (altos), a *diferentes profundidades de encaje*, desde **1.00** hasta **3.00** metros; presentan resistencias elevadas, muy superiores al esfuerzo actuante sobre ellos; así, *con parámetros críticos* y, a una profundidad de 1.50 m., las capacidades de carga van desde **2.54** hasta **11.54 Kg. /cm²**, y, *con parámetros óptimos*, a la misma profundidad, presentan capacidades de carga desde **4.96** hasta **11.68 Kg. /cm²**; resistencias que responden al esfuerzo vertical actuante de **1.156 Kg. /cm²**; esto comprueba, la óptima competencia geotécnica de los suelos de fundación Inca y, el conocimiento geotécnico Inca, para su elección.

Conocimiento, a partir de la dureza y resistencia infalibles de las Q'aaqas de la Pachamama.

Respecto a los Asentamientos, los valores calculados para los suelos de fundación de las Llaqtas, no se aproximan al valor máximo tolerable por la Norma Técnica Peruana, E-050, que es 2.54 cm.; oscilando entre el cuarto de centímetro como máximo; esto comprueba, la incompresibilidad y dureza de los macizos rocosos; y, la óptima conformación de los Rellenos Controlados Inca, cuya eficiente técnica de conformación, compactación y soterramiento, evitaron asentamientos representativos.

Las Características Físicas y Mecánicas tanto de los macizos rocosos como de los Rellenos Controlados Inca, presentan óptima competencia geotécnica, por las Capacidades de Carga y, los imperceptibles Asentamientos; demostrándonos esto, que los Incas, no sólo se limitaron a elegir un emplazamiento de condiciones locales adecuadas, suelos de fundación competentes, sino además, crearon cinco siglos atrás, un sistema constructivo, que permitió cimentar superestructuras sin riesgo de asentamientos y fallas, como son: los *Rellenos Controlados Inca*.

✓ **De las condiciones de cimentación y las Capacidades de Carga**

Los *Rellenos Controlados Inca*, constituyen la solución técnica suigéneris Inca, que permitió nivelar la abrupta morfología de los relieves de los emplazamientos de las Llaqtas y, transmitir las cargas verticales de las superestructuras hacia los suelos de fundación; a partir de cimientos superficiales corridos.

Los *Rellenos Controlados Inca*, conjuntamente con los macizos rocosos de fundación, presentan Capacidades de Carga superiores al esfuerzo vertical que reciben: **1.156 Kg. /cm²**; demostrándonos esto, la prudencia geotécnica de los Incas, de no sobrecargar el Suelo, aún pudiéndolo hacer, ya que el esfuerzo de resistencia del suelo, podía tolerar ampliamente mayores esfuerzos.

Los grados de prolija compactación por capas y, el máximo confinamiento del sistema suelo - *Relleno Controlado Inca (cimiento)* – superestructura, otorgan estabilidad y rigidez, que garantizó la conservación de los cimientos y, en consecuencia, de las Llaqtas Incas, hasta hoy.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.2 Conclusiones.

6.2.1 Comprobación de las Hipótesis.

✓ **Comprobación de la Hipótesis general**

*La geotecnia, era conocida y manejada en el periodo Inca; a partir, de las **Condiciones Locales de Emplazamiento; las Características Físicas y Mecánicas; y, las Capacidades de Carga de los suelos de fundación, de las superestructuras de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, del departamento de Cusco;** en efecto, respecto a las **Condiciones Locales de emplazamiento,** los Incas eligieron emplazar las Llaqtas, en montañas rocosas, de origen ígneo, metamórfico y sedimentario; de roca dura y rocas y suelos muy rígidos, donde la amplificación de ondas sísmicas, es corta y rápida, con efectos mínimos de daño; con suelos orgánicos poco desarrollados, que facilitaron su manejo y operación.*

Condiciones Locales, con climas manejables, como las presipitaciones pluviales de alta y mediana intensidad, que fueron resueltas con ingeniería hidráulica, para evitar ser afectados por sus efectos; zonas sin presencia de Nivel Freático, que pueda amenazar los cimientos; donde la morfología del Relieve, permite una integración armónica entre la obra artificial y el paisaje natural que los cobija. **Son éstas óptimas Condiciones Locales de Emplazamiento, que constituyen el punto de partida del estudio geotécnico, las que comprueban que los Incas, conocían de geotecnia; ello, como resultado de experiencias pasadas de sus ancestros, la propia vivida y el buen juicio.**

En relación al conocimiento y manejo de las *Características Físicas y Mecánicas de los Suelos de Fundación*, los Incas utilizaron los fragmentos de los macizos rocosos de fundación (Q´aqqas), conocidos como suelos granulares (Gravas, Rumis), considerando las características físicas y mecánicas competentes que éstos presentan, como: la compacidad, incompresibilidad y resistencia, que garantizan estabilidad y solidez; creando los *Rellenos Controlados Inca*, para

nivelar superficies y transmitir uniformemente los esfuerzos actuantes al suelo de fundación, con eficientes técnicas de compactación y soterramiento del sistema: Suelo – Cimiento – Superestructura. Esto comprueba que, **el conocimiento geotécnico en el Período Inca, partía de la identificación de la resistencia de las Q´aqqas y los Rumis, que podrían soportar con garantía las Llaqtas.**

Finalmente, los Incas conocían y manejaban las *Capacidades de Carga de los Suelos de Fundación*, constituidos por roca dura y roca o suelos muy rígidos; considerando operativizar sólo cimientos superficiales; y, superestructuras cuyo peso propio, no supere la resistencia del suelo de fundación, para evitar asentamientos; ello explica, la incursión de edificaciones de sólo uno y dos niveles y, excepcionalmente de tres; cuya diseño simétrico, preveía responder sin problema, cargas axiales (sismo). Esto comprueba que, **los Incas manejaron la geotecnia con sabiduría y sensatez, sin sobrecargar el Suelo innecesariamente; respetuosos con lo que la Madre Tierra, les proveía: un Suelo geotécnicamente, muy competente.**

✓ **Comprobación de las Hipótesis específicas**

Primera hipótesis específica que, *los Incas, conocieron las Condiciones Locales de Emplazamiento de los suelos de fundación de las superestructuras de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman*; se comprueba que eligieron emplazar las Llaqtas Incas, en montañas rocosas, de origen ígneo predominantemente, metamórfico y sedimentario, de comprobada resistencia geotécnica, como: la roca ígnea *Granodiorita de Machupicchu*; la roca *metamórfica Arenisca – Cuarzítica, de Ollantaytambo*; la roca ígnea *Andesita – Shoshonítica, de Pisac*; la roca ígnea *volcánica Andesita, de Raqchi*; la roca ígnea *volcánica Andesita – Basalto, de Tipón*; y, la roca *sedimentaria Caliza – Diorita, de Saqsaywaman*.

Emplazamientos que recibieron un tratamiento diferenciado en cada una de las Llaqtas en función a las características particulares de ubicación geográfica; así, Machupicchu, emplazada

en la intersección de una zona andina y amazónica, con relieves abruptos y muy escarpados e intensas presipitaciones pluviales, priorizaron la estabilización de la montaña con profusos sistemas de contención; en el caso de Ollantaytambo y Pisaq, emplazados en un Valle interandino, de relieve empinado y antecedentes de fallas geológicas, con clima seco – frío y presipitaciones de mediana intensidad, priorizaron estabilizar los Suelos y aprovecharlos eficientemente con sistemas de andenería.

Respecto a los casos de Raqchi y Tipón, emplazados en concavidades producto de la erupción volcánica, se realizaron masivos Rellenos Controlados Inca para nivelar superficies y convertirlas en aprovechables, operándose sistemas de contención en el caso de Tipón que a su vez les posibilitó contar con amplias terrazas agrícolas. El caso de Saqsaywaman es también particular, porque se enfocaron en consolidar artificialmente la montaña de Saqsaywaman, realizando Rellenos Controlados Inca masivos, en tres niveles, conteniéndolos con piezas megalíticas. Este tratamiento diferenciado de los emplazamientos, marcó también diferencias en la arquitectura a nivel de densidad constructiva, uso de materiales y diseño arquitectónico.

Las similitudes en las seis Llaqtas están caracterizadas por el emplazamiento de las edificaciones en los sectores más elevados y de relativa mayor estabilidad y, en consecuencia seguridad física; por la separación espacial de la zona urbana y la agrícola, para alejar el agua de los cimientos; por la simetría formal de la arquitectura, con un diseño antisísmico; por el empleo de cubiertas ligeras constituidas por rollizos de madera y fibra vegetal, por la diferencia de sección de los muros tanto en base como en su coronación; en estos dos últimos casos, para disminuir el peso hacia los Suelos de Fundación; por la utilización de la piedra como material constructivo; coadyuvando así a la eficiencia del Sistema Suelo-Cimiento-Superestructura.

Las Rocas duras y Suelos de fundación muy rígidos, se verificaron en Campo (a partir de Ensayos Penetrométricos y Esclerométricos) y, en Laboratorio (con Ensayos de Compresión Simple no Confinada), siendo en promedio las resistencias, respectivamente: **320 Kg./cm²** y

771 Kg./cm², para el caso de **Machupicchu**; 440 Kg./cm² y 499 Kg./cm², en el caso de **Ollantaytambo**; 683 Kg./cm² y 689 Kg./cm², para **Pisac**; 407 Kg./cm² y 648 Kg./cm², en el caso de **Raqchi**; 564 Kg./cm² y 315 Kg./cm², en el caso de **Tipón**; y, 519 Kg./cm² y 282 Kg./cm², para el caso de **Saqsaywaman**; precisándose que, la Resistencia óptima normativa en Concreto Armado es de: **210 Kg./cm²**; resistencia ampliamente superada por los suelos de fundación de las Llaqtas Inca.

Así mismo, está demostrado en la literatura especializada que, la amplificación de ondas sísmicas, en zonas de *montañas rocosas*, de *gran competencia geotécnica*, como las que eligieron los Incas para emplazar sus Llaqtas, es *corta y rápida*; con efectos de *leve daño*; Consecuentemente, los Incas no se equivocaron en emplazarse en el departamento de Cusco, catalogado como **Zona Sísmica II**; alejándose así del riesgo sísmico severo, donde las *intensidades* características oscilan entre *II* y *V*, en la escala de Mercalli; y, de acuerdo al historial sísmico de Cusco, no existen reportes de sismos de escala mayor, que pudieran haber afectado a las Llaqtas Incas; siendo poco probable su ocurrencia; y, los Incas, lo sabían.

Los *suelos orgánicos poco desarrollados* en los emplazamientos de las Llaqtas Incas, facilitan **el manejo del suelo**; pues, *evitan grandes movimientos de tierra* (ahorro de horas hombre); limitándose los Incas, al descarte de suelo intemperizado y meteorizado, hasta alcanzar suelo de fundación competente; posibilitando, en algunos casos, cimentar las superestructuras Incas, directamente en las superficies de los macizos rocosos aflorantes; sobre todo, en los sectores más empinados, que simbólicamente significaba mayor acercamiento al Inti Tayta, en el Hanan Pacha; y, cimientos superficiales de 1.50 metros en promedio de profundidad, a partir de la operación de los *Rellenos Controlados Inca*.

Respecto a las *condiciones climáticas* (normalmente adversas), como las lluvias de alta y mediana intensidad, los Incas *implementaron eficientes sistemas de drenaje superficial y subterráneo*; así como, *sistemas de evacuación*, que **mantuvieron alejada el agua de los**

cimientos; empleando para ello, *suelos granulares bien graduados* (Gravas); comprobado en esta investigación, a partir de la conformación de los Perfiles Estratigráficos, de los *Rellenos Controlados Inca*; gravas, cuya propiedad permeable es elevada y, la posibilidad de modificación de sus características físicas y mecánicas, en presencia de agua, es **Nula**.

Así mismo, es a partir de los Perfiles Estratigráficos, de los *Rellenos Controlados Inca*, que se comprueba la doble función de las Plataformas Agrícolas, Plazas y Patios; que, además de cumplir funciones específicas como tales en el Kay Pacha (superficie), actúan también como *presas colectoras de las aguas pluviales* en el Uku Pacha (sub suelo), posibilitando infiltrar el agua hacia el subsuelo, evitando así, escurrimientos y empozamientos en la superficie; **recursos técnicos que forman parte del conocimiento geotécnico Inca**.

Se ha comprobado también en los emplazamientos de las Llaqtas Incas, la inexistencia de *Nivel Freático* como tal; ello, a partir de los Ensayos Penetrométricos In Situ, ratificado por los informes de investigaciones arqueológicas, que no evidencian presencia de agua; esto va en correspondencia al tipo de suelo de fundación de estas Llaqtas, constituidos por macizos rocosos del tipo ígneo, metamórfico y sedimentario.

Finalmente, la abrupta morfología de los *relieves* de emplazamiento de las Llaqtas, como: riscos, concavidades y convexidades, fue optimizada por los Incas, en la distribución espacial de las distintas funciones; a saber: áreas de residencia del Inca, zonas artificiales de cultivo, áreas de reunión, áreas de adoración, entre otras; posibilitándoles, integrarse armónicamente al paisaje natural; todo ello, sustentado en sus conocimientos geotécnicos, comprobados con la sola supervivencia por más de cinco siglos de las superestructuras Incas.

Segunda hipótesis específica que, los Incas, conocieron y manejaron las Características Físicas y Mecánicas de los suelos de fundación de las superestructuras de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman; se comprueba que, los suelos de fundación están constituidos por macizos rocosos y sus fragmentos trabajados en

lo que denominamos en esta investigación como Rellenos Controlados Inca; cuyas *Características Físicas y Mecánicas*, las tipifican como *Suelos Granulares*, con **Parámetros Geotécnicos óptimos**, como las Densidades (γ) y los Ángulos de rozamiento interno (ϕ), que constituyen los parámetros de mayor incidencia en los cálculos de Capacidad de Carga; superando incluso a los parámetros de *rocas sanas y frescas*, cuyas densidades óptimas son $\gamma=2.18$ a 2.8 Tn/m^3 y, sus ángulos de fricción son $\phi=36^\circ$ a 40° .

Así, en promedio, la roca ígnea Granodiorita de **Machupicchu**, presenta una *Densidad* de **2.34 Tn/m³** y, un *Ángulo de fricción* de **38°**; la roca metamórfica Arenisca - Cuarzítica de **Ollantaytambo**, presenta una *Densidad* de **2.53 Tn/m³** y, **44.30°** de *Ángulo de fricción*; la roca ígnea Andesita – Shoshonítica de **Pisac**, presenta una *Densidad* de **2.60 Tn/m³** y, **44.72°** de *Ángulo de fricción*; la ígnea volcánica Andesita de **Raqchi**, presenta una *Densidad* de **2.51 Tn/m³** y, un *Ángulo de fricción* de **43.53°**; la roca ígnea volcánica Andesita – Basalto de **Tipón**, presenta una *Densidad* de **2.48 Tn/m³** y, 41.10° como *Ángulo de fricción*; y, la roca sedimentaria Caliza – Diorita de **Saqsaywaman**, presenta una *Densidad* de **2.45 Tn/m³** y, un *Ángulo de fricción* de **41.60°**.

Estas Características Físicas y Mecánicas, con Parámetros Geotécnicos competentes, eran conocidas por los Incas, a partir de la operación de las Q'aaqas y Rumis, que les garantizaban compacidad, incompresibilidad y resistencia; y, en consecuencia, estabilidad y solidez, para emplazar las superestructuras en las Llaqtas Inca; creando para ello, los **Rellenos Controlados Inca**; un recurso ingenieril y técnico, que posibilitó nivelar las superficies abruptas, y distribuir adecuadamente las cargas actuantes sobre las Rocas y Suelos de fundación; son *rellenos artificiales* de buena calidad, muy compactados, realizados con material seleccionado del mismo substrato rocoso y, óptimos para cimentar superficialmente.

Los *Rellenos Controlados Inca*, presentan eficiencia técnica; cuidándose hasta el mínimo detalle en su composición; manteniéndolos exentos de elementos degradables o agresivos como

la vegetación y el agua; el terreno de apoyo, tenía que ser firme; y eligieron el mejor: un macizo rocoso; el cual, previamente fue liberado de la capa vegetal y los suelos flojos intemperizados o meteorizados. Están conformados por capas de suelos granulares, de gradación descendente; donde, la compactación se ha realizado por hiladas delgadas de 30 a 40 centímetros de espesor aproximadamente; con un riguroso control de densidades y humedad, para garantizar el sistema: Suelo – Cimiento – Superestructura. **Esto es manejar la Geotecnia y, los Incas, lo hicieron magistralmente hace 500 años; no puede ser coincidencia.**

Tercera hipótesis específica que, *Los Incas, conocieron la Capacidad de Carga de los suelos de fundación de las superestructuras de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman*; se comprueba que las superestructuras Incas, presentan una **carga total de 13872 Kg.** por unidad de superficie, en promedio; correspondiéndole un **esfuerzo actuante** sobre el suelo de fundación de: **1.156 Kg./cm².**; la Norma Técnica Peruana, E.050, de Suelos y Cimentaciones, establece que el suelo de fundación debe tener una resistencia igual o superior al esfuerzo actuante; y, los suelos de fundación de las Llaqtas Incas, cumplen y superan tanto con parámetros críticos como óptimos.

Así, las Capacidades de Carga calculadas con Parámetros Geotécnicos críticos y óptimos, respectivamente, a una profundidad de 1.50 metros., son: **3.20 Kg./cm²** y **5.52 Kg./cm²**, para el caso de **Machupicchu**; **6.11 Kg./cm²** y **6.74 Kg./cm²**, en el caso de **Ollantaytambo**; **2.54 Kg./cm²** y **9.21 Kg./cm²**, para **Pisac**; **4.44 Kg./cm²** y **5.75 Kg./cm²**, en el caso de **Raqchi**; **3.16 Kg./cm²** y **4.96 Kg./cm²**, en el caso de **Tipón**; y, **1.29 Kg./cm²** y **4.80 Kg./cm²**, para el caso de **Saqsaywaman**; resistencias que responden con superioridad al esfuerzo actuante sobre ellos, que es: **1.156 Kg./cm²**. Esto comprueba la sabiduría geotécnica de los Incas, no sobrecargaron los Suelos, lo que garantizó la conservación de las Llaqtas, hasta nuestros días.

Por otro lado, la estabilidad de las superestructuras Incas, depende en gran medida de la profundidad de soterramiento o encaje de los cimientos o *Rellenos Controlados Inca*; pues, a

mayor profundidad, mayor resistencia; esto lo comprobamos calculando las Capacidades de Carga, a una profundidad de 2.50 metros, con Parámetros Geotécnicos óptimos; reportándose elevadas resistencias, como: **9.56 Kg./cm²**, para el caso de **Machupicchu**; **11.33 Kg./cm²**, en el caso de **Ollantaytambo**; **11.68 Kg./cm²**, para **Pisac**; **9.82 Kg./cm²**, en el caso de **Raqchi**; **8.67 Kg./cm²**, en el caso de **Tipón**; y, **5.99 Kg./cm²**, para el caso de **Saqsaywaman**. Verificándose la óptima competencia geotécnica de los Suelos (el gran secreto); y, los Incas la conocían, por ello, no escatimaron en emprender mega superestructuras que incluso retan hoy a la ingeniería.

Ahora bien, se conoce el tipo de Roca y Suelo de fundación y las elevadas Resistencias que presentan, frente a la Carga actuante; siendo poco probables la ocurrencia de Asentamientos; que, en casos de roca o suelos granulares como los que conforman los *Rellenos Controlados Inca*, éstos se acusan de forma inmediata, frente a cargas estáticas y, con magnitudes considerables frente a cargas dinámicas; consecuentemente, en el caso investigado, sólo pudieron presentarse asentamientos diferenciales en el momento de construcción; sin embargo, calculamos los asentamientos probables para este tipo de Suelos y, verificamos que no se acercan al máximo tolerable por la Norma E.050, de Suelos y Cimentaciones, que es: 2.54 cm.

En efecto, los Asentamientos calculados con Parámetros Geotécnicos críticos y óptimos, respectivamente; y, a una profundidad de 1.50 metros de encaje, presentan los siguientes valores: *0.090 cm.* y *0.091 cm.*, para el caso de **Machupicchu**; *0.090 cm.* y *0.084 cm.*, en el caso de **Ollantaytambo**; *0.163 cm.* y *0.207 cm.*, para **Pisac**; *0.230 cm.* y *0.216 cm.*, en el caso de **Raqchi**; *0.087 cm.* y *0.093 cm.*, en el caso de **Tipón**; y, *0.296 cm.* y *0.274 cm.* para el caso de **Saqsaywaman**. Ninguno se aproxima a los 2.54 cm. tolerables; siendo casi imperceptibles, considerando la magnitud de las superestructuras Incas cimentadas; esto se logra, sólo con un avanzado conocimiento geotécnico, que queda demostrado, los Incas poseían, no puede ser mera coincidencia.

La Conservación del Patrimonio Cultural de la Nación, constituido en esta investigación, por las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, del departamento de Cusco; fue gestionada así por los Incas hace cinco Siglos, a partir del conocimiento geotécnico; esto es, eligiendo: óptimas Condiciones Locales de Emplazamiento; Suelos de Fundación de competentes Características Físicas y Mecánicas; y, Capacidades de Carga, de elevada resistencia geotécnica; comprobados objetivamente.

6.2.2 Conclusiones Generales

Las Llaqtas Incas investigadas, son aludidas en propiedad al Sapan Inca Pachacutec, quien conjuntamente con su Panaca, la élite Inca y la Casta Sacerdotal (S. XV), pasaba cortas estancias vacacionales en ellas, consideradas autosuficientes por la infraestructura, el equipamiento y, la logística que poseían; siendo una de las principales actividades desarrolladas, las rituales – ceremoniales, ofrecidas al Tayta Inti, en el Hanan Pacha. Presentan difícil acceso como estrategia de dominio y protección; hoy, forman parte de Parques Arqueológicos, declarados como integrantes del Patrimonio Cultural de la Nación, bajo el amparo de la Ley 28296, a nivel del Suelo y Sub Suelo, materia de la presente investigación.

De acuerdo a la Norma Técnica Peruana, E.050 de Suelos y Cimentaciones, las Llaqtas Incas estarían clasificadas como Edificaciones Especiales, Tipo A; condición que exige la obligatoria Investigación geotécnica de los Suelos de Fundación, previa a cualquier intervención; más aún hoy, que se muestra a partir del presente estudio que, los Suelos de fundación fueron trabajados artificialmente, para cumplir función estructural, a partir de los *Rellenos Controlados Inca*; y, cualquier intervención sin la presencia de especialistas en geotecnia, significaría un irreversible atentado estructural de los cimientos en el Uku Pacha, que pone en riesgo la salvaguarda y Conservación de este Patrimonio Cultural de la Nación, en el Kay Pacha.

Las Llaqtas Incas fueron cimentadas a partir de un profundo simbolismo andino; concibiendo estar emplazándose en el seno mismo de la Pachamama; implicando ello, un

prolijo trabajo del Suelo, sin trastocarlo en exceso, limitándose a remover sólo la parte herida de la Pachamama, que técnicamente lo entendemos como las partes degradadas del Suelo; trabajando los cimientos con fragmentos del propio substrato rocoso, en cada una de las Llaqtas; buscando extender las características físicas y mecánicas de los macizos rocosos a través de los artificiales *Rellenos Controlados Inca*, que fueron óptimamente compactados y soterrados, para asegurar desde el Uku Pacha, máxima estabilidad y solidez a las superestructuras Incas, en el Kay Pacha, sumándose a este propósito la Arquitectura Inca.

6.2.3 Conclusiones Específicas

La investigación de la geotecnia Inca, se ha desarrollado en la Llaqta Inca de *Machupicchu*, en los Sectores I, II, III, V, VI y Andenes Orientales; en la Llaqta Inca de *Ollantaytambo*, en los Sectores Medio, Templo del Sol y Andenes Pumataillis; en la Llaqta Inca de *Pisac*, en los Sectores de Qantus Raqay, Kalla Qasa, Pisaca y Andenes Qosqa; en la Llaqta Inca de *Raqchi*, en los Sectores Qolqas, Aposentos, Fuentes Menores, Ushno Mesapata y Templo de Wiracocha; en la Llaqta Inca de *Tipón*, en los Sectores de Iglesia Raki, Cancha Inca, Sinkuna Cancha y Andenes I, IV, IX y XII; y, en la Llaqta Inca de *Saqsaywaman*, en los Sectores Muyoq Marka, Sayaqmarka y, Baluartes I-2, I-7, I-11, I-15, II-7, II-11, II-18 y III-6.

Se ha comprobado In Situ, las Condiciones Locales de Emplazamiento de las Llaqtas Incas de *Machupicchu*, *Ollantaytambo*, *Pisac*, *Raqchi*, *Tipón* y *Saqsaywaman*; utilizando los equipos normalizados: **Penetrómetro Dinámico Ligero (PDL)** y **Esclerómetro**; ambos, métodos no destructivos. El primero, para conocer (sin trastocar el confinamiento original), las **Características Físicas y Mecánicas de los Suelos de fundación**; y, el segundo, para conocer la **Resistencia de los macizos rocosos**; realizándose 71 puntos de investigación con el Penetrómetro y, 67 con el Esclerómetro, cubriéndose así: *Muros de Contención*, *Plataformas Agrícolas*, *Recintos*, *Plazas* y *Patios*; superestructuras Incas, seleccionadas para el estudio.

Los Ensayos Penetrométricos In Situ, reportan recurrentemente, primero golpes de 6 a 9, por cada 10 centímetros de penetración, mostrando **presencia de capas de suelos finos y granulares como Arcillas areno – limosas (CL-SM)**; luego, golpes que van de 10 a 15, que advierten **presencia de Gravas arcillosas (CG)**; tercero, golpes de 16 a 24, que reportan **presencia de Gravas (G)**; y, finalmente, el rebote del Penetrómetro, indicando la **presencia del macizo rocoso**. Los espesores de la Estratigrafía identificada, varían, en función de: la morfología del relieve, el suelo orgánico y, el tipo de superestructura investigada; determinando ello, la profundidad a la que se encuentra el macizo rocoso en las Llaqtas Inca.

Los sondeos Penetrométricos y Esclerométricos In Situ, son contrastados con los Ensayos en Laboratorio, de las muestras obtenidas en Campo y, correlacionados en Gabinete, con el respectivo cotejo de investigaciones arqueológicas previas; comprobándose una Estratigrafía conformada por **dos Estratos característicos y estandarizados**, conformantes de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas: el **Primer Estrato (E-1)**, constituido por un relleno artificial, al que pasamos a definirlo en la presente investigación como: *Relleno Controlado Inca (RCI)*, por sus óptimas condiciones técnicas a nivel de operación y constitución de materiales; el **Segundo Estrato (E-2)**, conformado por el propio *macizo rocoso*.

Los *Rellenos Controlados Inca (RCI)*, están conformados a su vez, por **capas constituidas predominantemente por suelos granulares**, cuyas características físicas y mecánicas las identifican como **Gravas (G)**, las mismas que fueron trabajadas en variados tamaños, de los fragmentos del substrato rocoso. Estas capas de gradación descendente desde el macizo rocoso hacia la superficie, presentan altos niveles de compactación; facilitados en las capas próximas a la superficie de contacto con las superestructuras, por suelos finos como las arcillas por sus características físicas y mecánicas de cohesión; comprobándose el conocimiento geotécnico Inca, a partir de la resistencia de las Q'aaqas y Rumis; y, la cohesión de los Llinqq'is.

Los Incas eligieron Suelos cuyos Coeficientes de Uniformidad y Curvatura eran altos, que los hacían muy compactos; ello, a partir del conocimiento práctico, del ensayo y error y, de la experiencia de sus antecesores; así, sabían de la bajísima o nula posibilidad de modificar sus propiedades las Q´aqqas y Rumis, frente a cambios de temperatura y humedad; y, la gran permeabilidad y resistencia que éstas presentan; conocían también, las características sellantes de los Llinqq’is, pero a la vez, su vulnerabilidad en presencia del agua. Por lo tanto, para los cimientos, había que replicar la rigidez y estabilidad de la Pachamama, a partir de la operatividad de los artificiales *Rellenos Controlados Inca*, bien compactados y soterrados.

Para lograr calidad en la obra Inca, estandarizaron procesos constructivos; así, los espesores de los *Rellenos Controlados Inca*, presentan en el caso de **Muros de Contención**, una profundidad promedio de **0.80 metros**; las **Plataformas agrícolas, 1.50 metros**; los **Recintos, 0.40 metros** de potencia; las **Plazas, 1.10 metros** y, los **Patios**, un espesor promedio de **0.90 metros**. Excepcionalmente en las Llaqtas de Saqsaywaman y Raqchi, realizaron masivos rellenos para consolidar la montaña y uniformizar superficies, respectivamente; identificándose *Rellenos Controlados Inca* de hasta 5.20 metros en Saqsaywaman y 2.90 metros de profundidad en Raqchi; en ambos casos, predominantemente en Plazas y Patios.

Por las características estratigráficas de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas, los cimientos están tipificados como: Cimientos Corridos Superficiales; donde los *Rellenos Controlados Inca, RCI*, cumplen dos funciones paralelas: la primera, nivelar la abrupta morfología del relieve para el asentado de las superestructuras y, segundo: transmitir y distribuir uniforme las cargas verticales actuantes de las superestructuras, hacia los suelos de fundación. En sectores muy empinado y elevados de las Llaqtas, algunas superestructuras Incas, están apoyadas directamente sobre el macizo rocoso. En ambos casos, el sistema Suelo – Cimiento – Superestructura, presenta encajes muy bien trabajados que garantizan estabilidad.

Los Incas eligieron para el emplazamiento de las Llaqtas, suelos de altísima competencia geotécnica, comprobada con los valores que presentan los principales parámetros geotécnicos que son: los Ángulos de Fricción y las Densidades; así, los Suelos Granulares conformantes de los *Rellenos Controlados Inca*, presentan ángulos de fricción, cuyos valores oscilan entre 30° a 32°; y, en el caso de los macizos rocosos, los ángulos de fricción fluctúan entre 35° a 45°. Respecto a las densidades, los *Rellenos Controlados Inca*, presentan valores que van desde 1.88 Tn/m³ hasta 2.24 Tn/m³; y, los macizos rocosos, tiene valores que oscilan entre 2.40 Tn/m³ a 3 Tn/m³; éstos parámetros inciden directamente en la Capacidad de Carga.

Para el cálculo de las Capacidades de Carga, se ha utilizado la Teoría de Capacidad de Carga de Meyerhof (1963); realizándose éstos por unidad de superficie y, para dimensiones promedio de cimentación de 1.20 x 1.50 metros de alto; para una superestructura de dimensiones promedio de 1.20 metros como base de muro y, 0.80 metros de coronación de muro; y, 3.00 metros de altura. Con estas dimensiones, el peso resultante por unidad de superficie es de 13872 Kg. y, un esfuerzo actuante sobre el suelo de 1.156 Kg. / cm².

El amplio número de ensayos realizados en las Llaqtas Incas, posibilita obtener numerosos parámetros geotécnicos; distinguiéndose valores críticos (bajos) y óptimos (altos); con los cuales, calculamos las *Capacidades de Carga*, a diferentes profundidades de encaje, desde 1.00 hasta 3.00 metros; resultando, resistencias de los suelos de fundación, superiores al esfuerzo vertical actuante sobre ellos. Demostrándose así, la prudencia geotécnica de los Incas, que no sobrecargaron los Suelos, pudiéndolo hacer sin mayor problema; por el contrario, decidieron mantener esta superioridad. Esto queda demostrado con las elevadas capacidades de carga calculadas con Parámetros críticos, que oscilan desde 2.54 hasta 11.54 Kg. / cm².

Las capacidades de carga alcanzan valores mucho más elevados, al ser calculados con Parámetros geotécnicos óptimos, los cuales oscilan desde 4.96 hasta 11.68 Kg. / cm²; en ambos casos (críticos y óptimos), los cálculos se realizan a 1.50 metros de profundidad. Recuérdese

que el esfuerzo vertical actuante calculado sobre los suelos de fundación es sólo: 1.156 Kg./cm² y, la respuesta de los *Rellenos Controlados Inca* y, los macizos rocosos es muy superior, incluso con capacidades de carga 10 veces superiores; hecho que nos atrevemos a afirmar que serían las reales capacidades de carga de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas.

Los asentamientos totales calculados en los suelos de fundación de las Llaqtas Incas, oscilan entre 0.012 y 0.216 centímetros, valores bastante alejados de los asentamientos máximos permisible por la Norma E.050 de Suelos y Cimentaciones, que es: 2.54 cm.; lo que ratifica que los Incas, eligieron suelos de fundación sin riesgo de asentamientos y fallas; de hecho, en su momento, como es natural, se dieron asentamientos elásticos, que hoy son imperceptibles; sin embargo, no puede hablarse de asentamientos por consolidación, ya que éstos se producen en suelos de fundación constituidos por arcillas saturadas o expansivas; y, en nuestro caso los suelos de fundación están constituidos por macizos rocosos y fragmentos trabajados.

Queda comprobado que, en el Periodo Inca, conocían y manejaban las Condiciones Locales para el Emplazamiento de las Llaqtas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman; a partir de referencias pasadas y, la vivencia de experiencias propias; hecho que garantizó y aseguró localizaciones alejadas de riesgo sísmico severo y, de condiciones climáticas manejables.

Comprobamos también que, el conocimiento de las Características Físicas y Mecánicas de los suelos de fundación, de las superestructuras de las Llaqtas Incas, se da a partir de las potencialidades de los Tipos de Suelo; así, los Incas, no utilizan los Llinqq'is (arcillas) como suelo para cimiento, pues tuvieron que haber experimentado que éstas son susceptibles a modificar sus propiedades frente a la presencia de cambios de humedad y temperatura; más bien, las utilizan como material ligante y sellante por las características cohesivas que presentan; saben, que los rumis (gravas), provenientes de las Q'aaqas (macizos rocosos) de la Pachamama, mantienen sus propiedades de compacidad y resistencia, y los emplean como

material principal de cimiento, trabajándolos técnicamente a través de los *Rellenos Controlados Inca*.

Al conocer la elevada resistencia de las Q´aqqas (pues la manipularon y trabajaron arduamente), podían advertir los pesos que podrían soportar; en consecuencia, las cargaron prudentemente con cada tipo de superestructura que conformarían las Llaqtas, asegurándose no exceder la resistencia de los macizos rocosos; hecho que se demuestra con la superioridad de las Reisitencias, calculadas de los suelos de fundación de las superestructuras de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Pisac, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman, frente al esfuerzo actuante, sobre éstos.

Comprobamos, no sólo en una, sino en seis de las más emblemáticas Llaqtas Incas del departamento de Cusco y, en consecuencia del Perú, que los Incas, cimentaron las Llaqtas, en suelos de fundación muy competentes, constituidos por macizos rocosos de origen ígneo predominantemente, seguido de rocas metamórficas y sedimentarias; recurriendo, para mejor operatividad y funcionamiento, a los trabajados técnicamente, *Rellenos Controlados Inca*, conformados predominantemente por capas de suelos granulares bien graduados, provenientes del propio substrato rocoso, de competentes Características Físicas y Mecánicas, que posibilitaron presentar elevadas Capacidades de Carga y, mínimo o casi inexistente posibilidad de Asentamientos y fallas.

Finalmente, sí saber de geotecnia en el siglo XXI, es conocer las Condiciones Locales del Emplazamiento del Proyecto, las Características Físicas y Mecánicas de los suelos de fundación y, las Capacidades de Carga; los Incas, nos demuestran que, en el siglo XV, las Q´aqqas y Rumis de la Pachamama, ubicados próximos al Hanan Pacha, eran los lugares inmejorables y seguros para emplazarse; que la dureza y resistencia de las Q´aqqas y Rumis, aseguraban sólidos y estables cimientos; que las Pirk´as de Rumi de sus Llaqtas, tenían que ser Llanq´adas, respetando a la Pachamama que las sustentaba, sin sobrecargarla

innecesariamente; esto aseguraría: El Allin Causac (vivir bien) de las Llaqtas, hoy su Conservación. Esto, es conocimiento Geotécnico, en el Periodo Inca.

6.3 Recomendaciones

El conocimiento geotécnico Inca, debe ser declarado como integrante del Patrimonio Cultural de la Nación, considerándose a los Ingenieros Incas, como los Precursores de la Geotecnia Peruana, que gestionaron desde el Siglo XV, la Conservación de las Llaqtas Incas, hasta nuestros días, coadyuvada fundamentalmente por el diseño arquitectónico Inca.

Las Llaqtas Incas, deben estar consideradas en las Normas Técnicas Peruanas, como Estructuras de construcción Inca; caracterizadas por emplazarse en macizos rocosos de origen ígneo predominantemente, estar construidas íntegramente en piedra, con cimientos constituidos por *Rellenos Controlados Inca*, RCI, e integrados armónicamente a la morfología de los relieves del paisaje natural; ello garantizará, actuaciones reguladas que aseguren su Coinservación.

El conocimiento geotécnico Inca, basado en la elección de óptimas Condiciones Locales de Emplazamiento, competentes Características Físicas y Mecánicas de los Suelos de Fundación y, elevadas Capacidades de Carga del Suelo, que superen los esfuerzos verticales actuantes sobre él, complementado por un diseño arquitectónico antisísmico; debe constituir, una práctica obligatoria para los emprendimientos constructivos, para garantizar la Conservación y salvaguarda de las Llaqtas contemporáneas del Siglo XXI.

La eficacia de la técnica de los *Rellenos Controlados Inca*, debe ser difundida por las entidades tutelares, a fin de ser replicados y operados, en emplazamientos similares a las Llaqtas Incas.

Toda intervención de mantenimiento o Conservación en las Llaqtas Incas, debe iniciarse con el Estudio Geotécnico obligatoriamente, por que así lo exige la normatividad vigente; pero

sobre todo, conociendo hoy, a partir de la presente Investigación, que los suelos de fundación Inca, fueron trabajados artificialmente, a partir de los Rellenos Controlados Inca, cuya composición no puede ser trastocada ni modificada sin la directa intervención de especialistas en geotecnia; pues se trata de las estructuras de cimientos de las Llaqtas Incas, que forman parte indelible del Sistema Suelo-Cimiento-Superestructura.

Las investigaciones sobre las Llaqtas Incas, deben emprenderse a partir de proyectos integrales, con participación conjunta de especialistas en ingeniería, arquitectura, arqueología, medio ambiente, entre otros; para obtener mayor contenido de información y en consecuencia mayor conocimiento, para así garantizar la Conservación y Protección de las mismas y, evitar exploraciones individuales y aisladas, que las exponen a riesgos irreversibles.

Debe priorizarse, a corto plazo, investigaciones integrales que resuelvan la inoperatividad de los sistemas de drenaje y evacuación Incas; que hoy constituyen el principal peligro para los cimientos de las Llaqtas Incas; pues, las aguas pluviales, generan efectos devastadores en los cimientos y superestructuras.

Debe emprenderse a corto plazo, investigaciones sobre morteros impermeables, que eviten el paso del agua por las cabeceras de muros y las paredes, que afectan irreversiblemente los núcleos de los muros y, en consecuencia, trascienden hasta los cimientos de las Llaqtas Incas.

Las labores de mantenimiento rutinario de las Llaqtas Incas, deben estar integrados, controlados y supervisados por especialistas en geotecnia, sustentados en un programa operativo técnico; y no limitarlo a personal operario que no coadyuvan objetivamente en la Conservación del Patrimonio.

Los resultados de investigaciones arqueológicas, de las Llaqtas Incas, realizadas por la entidad tutelar, deben ser de manejo público y abierto, para posibilitar otras investigaciones especializadas y, generar mayor conocimiento sobre el Patrimonio heredado; hoy existe mucha reserva y restricción infundada.

Debe evitarse, masivas excavaciones en las Llaqtas Incas, conociendo hoy, a partir de la presente investigación, que los suelos de fundación están constituidos por *Rellenos Controlados Inca*, construidos artificialmente, donde el soterramiento y la compactación de materiales fue trascendental; y, cualquier movimiento de suelos sin la participación de especialistas en geotecnia, constituiría romper equilibrios logrados desde hace cinco Siglos en el sistema Suelo – Cimiento – Superestructura; exponiéndolos a daños estructurales irreversibles, con efectos devastadores; pues, si los cimientos fallan, falla toda la superestructura.

Debe evitarse la exclusividad de operación en las labores de conservación y mantenimiento de las Llaqtas Incas, a los Arqueólogos; pues, desconocen de geotecnia, hidráulica, comportamiento estructural y, manejo ambiental; limitándose la investigación a la interpretación de contextos, cuando podrían ser éstos enriquecidos con la participación multidisciplinaria de otros profesionales especialistas, con resultados de mayor contenido.

Los materiales a emplearse en las obras de mantenimiento y Conservación de las Llaqtas Incas, deben ser analizados en Laboratorio de Suelos especializados y acreditados; buscando sean compatibles a los originales, y evitar alterar y contaminar la composición de los suelos de fundación Inca.

Las entidades tutelares, deben impulsar y gestionar con urgencia más investigaciones que coadyuven a la salvaguarda y Conservación de las Llaqtas Incas, como: Geotecnia Inca, Hidráulica Inca, Estructuras Inca, Arquitectura Inca, entre otras; ello posibilitaría conocerlas mejor, y en consecuencia, desarrollar intervenciones pertinentes, contándose para ello, con la evidencia física In Situ, objetiva, que no necesita suponer o inventar nada.

Las Universidades del Perú, deben incluir en las currículas de las Facultades o Carreras Profesionales de Arquitectura e Ingeniería, el conocimiento de la Geotecnia Inca; ello motivaría mayor investigación y, en consecuencia el manejo de un conocimiento objetivo, real y, no

inventado ni superfluo, con la finalidad de elevar la identidad nacional, una identidad que proviene de una cultura extraordinaria para su tiempo, pero sobre todo para coadyuvar con conocimiento en la Conservación y Salvaguarda de tan valioso Patrimonio desde los cimientos.

VII. BIBLIOGRAFÍA.

- Álvarez, Lorena.** (2010). *Informe Final del P.I.A., Monumento Prehispánico del Parque Arqueológico de Pisaq – Sector Ajchapata 2010*. Ministerio de Cultura; Dirección de Investigación y Catastro; Sub Dirección de Investigación.
- Álvarez, Lorena.** (2011). *Informe de Proyecto de Investigación Sector Ajchapata, P.A. Pisaq*. Ministerio de Cultura Cusco; Dirección Regional de Cultura Cusco, Sub Dirección de Catastro.
- Beltrán, José A.** (2013). *Agua y Forma Urbana en la América Precolombina: El caso del Cusco como Centro del Poder Inca*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña – Barcelona Tech (UPC).
- Bueno, Alberto.** (2008). *Construcción y destrucción en los Andes: Terremotos, eventos geoclimáticos, calentamiento global y cambio climático*, Año XII, N° 21, Lima.
- Bueno, Ángel.** (2007). *Parque Arqueológico de Saqsaywaman*. Estudios Ingeniero Geológicos para la estabilización del décimo y noveno tramo del tercer baluarte.
- Braja M., Das.** (2001). *Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica*. Copyright International Thomson Editores, S.A. de C.V., una división de Thomson Learning, Inc., México.
- Braja M., Das.** (2006). *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*, 5ta. Edición. Copyright International Thomson Editores, S.A. de C.V., una división de Thomson Learning, Inc., México.
- Canziani, José.** (2012). *Ciudad y territorio en los Andes*. Contribuciones a la historia del urbanismo prehispánico. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

- Cárdenas, José; Carlotto, Víctor; Cano, Vilma, Flores, Tomasa; Oviedo, Martín.** (2009). *Estudio Geológico y Geodinámico de los Baluartes en el Sitio de Saqsaywaman – Cusco*. Sector Energía y Minas; Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMET); Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC).
- Carrillo Gil, Arnaldo.** (1998). *Geotecnia Histórica: Estudios de Cimentación en Muros Pre - Hispánicos*. WWW.acingenieros.com/cvesp_aog.htm
- Carrillo Gil, Arnaldo.** (1998). *Fallas Geotécnicas y Ejercicio Profesional*. WWW.acingenieros.com/cvesp_aog.htm.
- Castillo, Tula.** (2006). *Informe Anual, Proyecto de Investigación Arqueológica P.A. de Tipón*. Instituto Nacional de Cultura Cusco; Dirección de Conservación del Patrimonio Cultural Inmueble; Sub Dirección de Obras.
- Chacón, Cesar.** (2014). *Los Dibujos del Cronista Indio Guamán Poma*. Editorial Piki E.I.R.L., Cusco, Perú.
- Chambi, Piedad.** (2009). *Informe Anual del Proyecto de Investigación Arqueológica 2009, Ciudad Inka de Machupicchu: Sectores II, V, Sector Waynapicchu y Andenes Orientales Grupos 04 y 05*. Instituto Nacional de Cultura Cusco; Dirección Regional Cusco; Plan Maestro de Machupicchu; Dirección del Parque Arqueológico Nacional de Machupicchu.
- E. Bowles, Joseph.** (1998). *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil*. Edit. Mc Graw - Hill, Bogotá.

El Peruano. (2016). *Norma Técnica E.030 Diseño Sismo Resistente*. Normas Legales 576293.
Norma Técnica E.050 Suelos y Cimentaciones.

Estrada, Gustavo. (2008). *Informe Parque Arqueológico Nacional de Písaq – Sector Qhosqa*.
Instituto Nacional de Cultura Cusco; Dirección de Conservación del Patrimonio
Cultural Inmueble; Sub Dirección de Obras.

García, Rolando. (2006). *Sistemas complejos. Conceptos, método y fundamentación
epistemológica de la investigación interdisciplinaria*. Editorial Gedisa, S.A.,
Barcelona, España.

Gavazzi, Adine. (2010). *Arquitectura Andina. Formas e historia de los espacios sagrados*,
1ra. Edición Agosto 2010 – Apus Graph Ediciones, La Positiva Seguros, Lima –
Perú.

Guzmán, Carlos Enrique. (2013). *Llaqtas Incas, concepción del planeamiento e interacción
con el medio natural*. Editorial Universitaria – Universidad Nacional de Ingeniería.

Hoyos, Fabián. (2012). *Geotecnia, diccionario básico*, Medellín.

Hyslop, John. (2016). *Asentamientos Planificados Inka*. Ediciones Copé, Lima, Petróleos del
Perú, 2016.

Instituto de la Construcción y Gerencia. (2013). *Manual de Carreteras: Suelos, Geología,
Geotecnia y Pavimentos – Sección Suelos y Pavimentos*. Fondo Editorial ICG.

Juárez Badillo, Eulalio y Rico Rodríguez, Alfonso. (1998). *Mecánica de Suelos Tomo I
Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos*. Edit. Limusa, S.A. de C.V. Grupo
Noriega Editores, Balderas 95, México, D.F.

Juárez, Badillo; Rico, Rodríguez. (2005). *Mecánica de Suelos, Tomo 1, Fundamentos de la Mecánica de Suelos*, Limusa Noriega editores.

Krzysztof, Makowski. (2016). *Urbanismo Andino. Centro ceremonial y Ciudad en el Perú prehispánico*. Apus Graph Ediciones, Lima 2016.

Kuroiwa, Julio. (2002). *Reducción de Desastres. Viviendo en armonía con la naturaleza*, Primera edición, Lima 2002, PNUD.

Laurel, Yolanda. (2007). *Informe de Investigación Arqueológica 2007, Parque Arqueológico de Raqchi, San Pedro, Sector Urupampa, Sub Sector Urinsaya*. Dirección Regional de Cultura Cusco; Dirección de Conservación del Patrimonio Cultural Inmueble.

Macedo, Orlando; Taipe, Edu; Del Carpio, José; Ticona, Javier, Ramos, Domingo; Puma, Nino; Aguilar, Víctor; Machac, Roger; Torres, José; Cueva, Kevin; Cruz, John; Lazarte, Ivonne; Centeno, Riky; Miranda Rafael; Álvarez, Yobana; Masias, Pablo; Vilca, Javiuer; Apaza, Fredy; Chijcheapaza, Rolando; Calderón, Javier; Cáceres, Jesús; Vela, Jesica. (2016). *Informe Técnico Evaluación del Riesgo Volcánico en el Sur del Perú, situación de la vigilancia actual y requerimientos de monitoreo en el futuro*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – Instituto Geofísico del Perú – Universidad Nacional San Agustín de Arequipa.

Miranda, Kelly. (2004). *Informe de Investigación Arqueológica Parque Arqueológico de Raqchi*. Instituto Nacional de Cultura Cusco; Departamental Cusco; Dirección de Conservación del Patrimonio Cultural Inmueble – Sub Dirección de Obras.

- Mormontoy, Alfredo.** (2003). *Informe de Investigación Arqueológica: Sector I Agrícola, II y V en la Ciudad Inka de Machupicchu*. Instituto Regional de Cultura Cusco; Parque Arqueológico Nacional de Machupicchu; Dirección de Patrimonio Cultural Inmueble; Sub Dirección de Obras.
- Pérez, Amelia.** (2008). *Informe de Investigación Arqueológica P.A. Ollantaytambo Sector Q'ellorakay – 2008*. Instituto Nacional de Cultura Cusco; Dirección de Conservación del Patrimonio Cultural Inmueble; Sub Dirección de Obras.
- Protzen, Jean-Pierre.** (2005). *Arquitectura y Construcción Incas en Ollantaytambo*, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Ramírez, Pedro y ALEJANO, Leandro.** (2004). *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Madrid, España.
- Rodríguez, José María; Serra, Jesús; Oteo, Carlos.** (1989). *Curso Aplicado de Cimentaciones*. Cuarta Edición. Servicio de Publicaciones del Colegio Oficial de Arquitecto de Madrid.
- Rosa, Maritza.** (1998). *Informe de Investigación Arqueológica Sector Andenes Qosqa – Parque Arqueológico de Písaq*. Instituto Nacional de Cultura Cusco; Sub Dirección de Obras.
- Rostworowski, María.** (2001). *Pachacutecq*, Instituto de Estudios Peruanos, IEP, Primera edición como primer volumen de Obras Completas de María Rostworowski.
- Rostworowski, María.** (2015). *Los Incas*, Instituto de Estudios Peruanos, IEP, Ediciones; Primera edición, Lima.

Solís, Francisco. (2000). *Informe Anual de Investigación Arqueológica Ciudad Inca Machupicchu 2000*. Instituto Nacional de Cultura Cusco, Dirección del Parque Nacional de Machupicchu.

Sullivan, William y Valencia, Alfredo. (2000). *Investigación Arqueológica en Ollantaytambo; Proyecto Cápac*. Instituto Nacional de Cultura Cuzco.

Valencia, Alfredo. (2001). *Informe de Excavación Arqueológica en Ollantaytambo – Proyecto Cápac*. Instituto Nacional de Cultura Cusco.

Wright, Kenneth y Valencia, Alfredo. (2006). *Machupicchu Maravilla de la Ingeniería Civil*. Copyright 2006, Universidad Nacional de Ingeniería – UNI.

Zegarra, Freddy. (2010). *Informe de Proyecto de Investigación Arqueológica Sector Baluartes - Saqsaywaman*. Ministerio de Cultura Cusco; Dirección Regional de Cultura - Cusco, Dirección del Parque Arqueológico de Saqsaywaman.

Zegarra, Freddy. (2010). *Informe Final Proyecto de Investigación Arqueológica Sector Baluartes – Saqsaywaman 2010*. Ministerio de Cultura; Dirección Regional del Cultura Cusco; Dirección del Parque Arqueológico de Saqsaywaman. Plan Maestro del Parque Arqueológico de Saqsaywaman.

Normas y Reglamentos

- Marco Legal de Protección del Patrimonio Cultural, Ministerio de Cultura, 2016.
- Documentos Fundamentales para el Patrimonio Cultural, Instituto Nacional de Cultura del Perú, 2007.
- Reglamento de Intervenciones Arqueológicas, aprobado por Decreto Supremo N° 003-2014-MC.

Planes Maestros

- Plan Maestro del Santuario Histórico de Machupicchu 2015 - 2019.
- Plan Maestro del Parque Arqueológico de Ollantaytambo.
- Plan Maestro del Parque Arqueológico de Pisaq.
- Plan Maestro del Parque Arqueológico de Raqchi.
- Plan Maestro del Parque Arqueológico de Tipón.
- Plan Maestro del Parque Arqueológico de Saqsaywaman.

Páginas Web.

- <https://hidraulicainca.files.wordpress.com/2013/06/redescubriendo-la-ciudad-perdida-civil-engineering-magazine-january-2001.pdf>.
- <http://www.pbs.org/wgbh/nova/ancient/wright-inca-engineering.html>.
- <http://bifea.revues.org/4491>.
- www.conanma.com/descargas/cap_12_geotecnia.pdf

VIII. ANEXOS

Cálculos

1. Determinación de las Características Físicas y Mecánicas de los suelos de fundación de las Llaqtas Incasde Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman.
2. Cálculos de Resistencia a la Compresión de Corazones Diamantinos de los suelos de fundación de las Llaqtas Incasde Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman.
3. Cálculos de Correlaciones Esclerométricas de los suelos de fundación de las Llaqtas Incasde Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman.
4. Cálculos de Correlaciones Penetrométricas de los suelos de fundación de las Llaqtas Incasde Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman.
5. Cálculos de los Pesos Unitarios de los suelos de fundación de las Llaqtas Incasde Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman.

Registros Fotográficos

1. Registro Fotográfico de Ensayos de Compresión Simple no Confinada de Corazones Diamantinos en Laboratorio de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman.
2. Registro Fotográfico de Ensayos Esclerométricos In Situ de los suelos de fundación de las Llaqtas Incas de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman.

Documentos de Gestión para la realización de la Investigación

1. Carta N° 013-2016-AAA/ARQ, de fecha 31 de mayo de 2016, presentado a la Dirección Desconcentrada de Cultura Cusco, solicitando Autorización para la realización de Estudios de Mecánica de Suelos en los Parques Arqueológicos de Machupicchu, Ollantaytambo, Pikillaqta, Písaq, Raqchi, Sacsaywaman y Tipón, como parte del trabajo de investigación de la Tesis de Maestría.
2. Autorización N° 115 2016-DDC-CUS/MC, mediante la cual la Dirección Desconcentrada de Cultura Cusco, autoriza a la Suscrita realizar los Estudios de Mecánica de Suelos en los siete (07) Parques Arqueológicos solicitados.
3. Carta N° 017-2016-AAA/ARQ, de fecha 09 de noviembre de 2016, presentada a la Dirección Desconcentrada de Cultura Cusco, tomando conocimiento de la Autorización N° 115 2016-DDC-CUS/MC.
4. Carta N° 001-2017-AAA/ARQ-TESIS, de fecha 25 de enero de 2017, presentada a la Dirección Desconcentrada de Cultura Cusco, presentando el Plan de Trabajo para la realización de los Estudios de Mecánica de Suelos en los Parques Arqueológicos de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman.
5. Carta N° 002-2017-AAA/ARQ-TESIS, de fecha 06 de marzo de 2017, presentada a la Dirección Desconcentrada de Cultura Cusco, solicitando Información digital de Trincheras investigadas con Estratigrafía de los Suelos de Fundación de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Saqsaywaman.
6. Carta N° 005-2017-AAA/ARQ, de fecha 25 de abril de 2017, presentado a la Dirección Desconcentrada de Cultura Cusco, haciendo entrega de los Estudios de Mecánica de Suelos de los Monumentos Arqueológicos de Machupicchu, Ollantaytambo, Písaq, Raqchi, Tipón y Sacsaywaman, en atención a la Autorización N° 115 2016-DDC-CUS/MC.