

# MACHUPICCHU

INVESTIGACIONES INTERDISCIPLINARIAS

TOMO I

FERNANDO ASTETE y JOSÉ M. BASTANTE, editores.



PERÚ

Ministerio de Cultura

Dirección  
Desconcentrada de Cultura  
de Cusco

# MACHUPICCHU

## INVESTIGACIONES INTERDISCIPLINARIAS

TOMO I

FERNANDO ASTETE y JOSÉ M. BASTANTE. editores



PERÚ

Ministerio de Cultura

Dirección  
Desconcentrada de Cultura  
de Cusco

© MACHUPICCHU. INVESTIGACIONES  
INTERDISCIPLINARIAS / TOMO I  
Fernando Astete y José M. Bastante, editores

© De esta edición:  
Dirección Desconcentrada de Cultura de Cusco  
Área Funcional del Parque Arqueológico Nacional de  
Machupicchu  
Calle Maruri 340, Palacio Inka del Kusikancha. Cusco  
Central telefónica (051) – 084 – 582030  
1a. edición - Setiembre 2020

Corrección de estilo:  
Eleana Llosa Isenrich

Diagramación:  
Saúl E. Ponce Valdivia

Arte de portada:  
Saúl E. Ponce Valdivia  
Miguel A. Aragón Collavino

Foto de portada:  
José M. Bastante Abuhadba

Foto de solapa:  
Sandro Aguilar

Coordinación:  
Alex I. Usca Baca  
Alicia Fernández Flórez

Revisión:  
Carmen C. Sacsá Fernández  
Alicia Fernández Flórez

ISBN: 978-612-4375-13-2  
Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2020-03378

Impreso en:  
GD Impactos  
Calle Mártir Olaya 129, Of 1905, Miraflores - Lima

Tiraje: 1000 ejemplares

Impreso en Perú  
Printed in Perú  
*Perú suyupi ruwasqa*

MINISTERIO DE CULTURA DEL PERÚ

**Ministro de Cultura**  
Alejandro Arturo Neyra Sánchez

**Viceministra de Patrimonio Cultural  
e Industrias Culturales**  
Leslie Carol Urteaga Peña

**Viceministra de Interculturalidad**  
Angela María Acevedo Huertas

**Director de la Dirección Desconcentrada  
de Cultura de Cusco**  
Fredy D. Escobar Zamalloa

**Jefe del Área Funcional del Parque Arqueológico Nacional  
de Machupicchu**  
José M. Bastante Abuhadba

Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta publicación por cualquier medio o procedimiento sin autorización expresa y por escrito de los editores.

# Índice

## TOMO I

Presentación

*Dirección Desconcentrada de Cultura de Cusco* 11

Prólogo

*John Hemming* 13

Introducción

*Mechtild Rössler* 21

Los trabajos de las Expediciones Peruanas de Yale en la *llaqta* de Machupicchu

*José M. Bastante* 25

Machu Picchu. Entre el cielo y la tierra

*Luis Millones* 59

Nuevos alcances científicos sobre la vida diaria en Machu Picchu

*Richard L. Burger* 77

Percepciones sobre inmigración y clase social en Machu Picchu, Perú, basadas en el análisis de isótopos de oxígeno, estroncio y plomo

*Bethany L. Turner, George D. Kamenov, John D. Kingston y George J. Armelagos* 107

Estado de la cuestión: historia y arqueología de la *llaqta* de Machupicchu

*José M. Bastante, Fernando Astete, Alicia Fernández y Alex I. Usca* 141

Machu Picchu. Monumento arqueológico

*Rogger Ravines* 237

Avances de las investigaciones interdisciplinarias en Machupicchu

*José M. Bastante y Alicia Fernández Flórez* 269

Machu Picchu: el centro sagrado

*Johan Reinhard* 289

|   |     |
|---|-----|
| <i>Llaqta</i> de Machupicchu: sacralidad y proceso constructivo<br><i>José Fernando Astete Victoria</i>   | 313 |
| Aspectos constructivos en Machupicchu<br><i>Arminda Gibaja</i>  | 327 |
| Machu Picchu: maravilla de la ingeniería civil<br><i>Kenneth R. Wright y Alfredo Valencia Zegarra</i>   | 335 |
| Tecnomorfología de la <i>llaqta inka</i> de Machupicchu. Materiales, métodos y resultados del levantamiento arquitectónico y paisajístico<br><i>Adine Gavazzi</i>                             | 353 |
| Avances preliminares de la investigación con <i>lidar</i> en Machupicchu<br><i>Roland Fletcher, Nina Hofer y Miguel Mudbidri</i>  | 383 |
| Lagunas sagradas de Salkantay. Investigaciones subacuáticas en el Santuario Histórico de Machu Picchu<br><i>Maciej Sobczyk, Magdalena Nowakowska, Przemysław Trzeźniowski y Mateusz Popek</i> | 393 |
| Ingeniería <i>inka</i> de Machupijchu<br><i>Jesús Puelles Escalante</i>   | 409 |
| Contexto funerario bajo en el sector noreste de Machupicchu, 2002<br><i>Alfredo Mormontoy Atayupanqui</i>   | 447 |
| Los esqueletos humanos de Machu Picchu. Un reanálisis de las colecciones del Museo Peabody de la Universidad de Yale<br><i>John Verano</i>  | 455 |
| <b>TOMO II</b>  |     |
| La mayoría silenciosa de Machu Picchu: una consideración de los cementerios incas<br><i>Lucy C. Salazar</i>   | 11  |
| El cementerio de los incas<br><i>Christopher Heaney</i>   | 25  |
| Quilcas en el Santuario Histórico-Parque Arqueológico Nacional de Machupicchu: análisis y perspectivas arqueológicas<br><i>Fernando Astete, José M. Bastante y Gori-Tumi Echevarría López</i> | 35  |

|   |     |
|---|-----|
| Las quilcas del Santuario Histórico-Parque Arqueológico Nacional de Machupicchu: evaluación y secuencia arqueológica preliminar<br><i>José M. Bastante y Gori-Tumi Echevarría López</i>   | 59  |
| El calendario solar de Machupicchu y otras incógnitas<br><i>Eulogio Cabada</i>  | 99  |
| Observaciones astronómicas en Intimachay (Machu Picchu): un nuevo enfoque para un antiguo problema<br><i>Mariusz Ziółkowski, Jacek Kościuk y Fernando Astete Victoria</i>   | 131 |
| Acercas de los instrumentos astronómicos de los incas: el mirador de Inkaraqay (Parque Arqueológico Nacional de Machu Picchu)<br><i>Fernando Astete Victoria, Mariusz Ziółkowski y Jacek Kościuk</i>  | 143 |
| Machu Picchu: sobre su función<br><i>Federico Kauffmann Doig</i>  | 159 |
| Machu Picchu, el mausoleo del emperador<br><i>Luis Guillermo Lumbreras</i>  | 193 |
| Investigaciones interdisciplinarias en Machupicchu. Temporada PIAISHM 2017<br><i>José M. Bastante, Alicia Fernández y Fernando Astete Victoria</i>  | 233 |
| Investigaciones en el monumento arqueológico Choquesuysuy del Santuario Histórico-Parque Arqueológico Nacional de Machupicchu<br><i>José M. Bastante y Emerson Pereyra</i>  | 269 |
| Investigaciones en el monumento arqueológico Chachabamba<br><i>José M. Bastante, Dominika Sieczkowska y Alexander Deza</i>  | 289 |
| Arqueogeofísica aplicada a la arqueología inca: el caso del monumento arqueológico Chachabamba<br><i>Nicola Masini, Luigi Capozzoli, Gerardo Romano, Dominika Sieczkowska, Maria Sileo, José M. Bastante, Fernando Astete, Mariusz Ziolkowski y Rosa Lasaponara</i> | 305 |
| Materialización del culto al agua a través de la arquitectura hidráulica en la <i>llaqta</i> de Machupicchu<br><i>Alicia Fernández Flórez</i>   | 321 |

|   |     |
|---|-----|
| La Reforma Agraria en el Santuario Histórico-Parque Arqueológico Nacional de Machupicchu<br><i>Alex Usca Baca</i>   | 337 |
| La ciudad de San Francisco de Victoria de Vilcabamba y el pueblo antiguo del Ynga nombrado Huaynapicchu<br><i>Donato Amado Gonzales</i>                               | 361 |
| Biodiversidad anotada del Santuario Histórico de Machupicchu: especies endémicas y amenazadas<br><i>Julio Gustavo Ochoa Estrada</i>                                   | 375 |
| Reportes anotados de mamíferos silvestres del Santuario Histórico de Machupicchu<br><i>Julio Gustavo Ochoa Estrada</i>  | 395 |
| Quinquenio orquidáceo del Santuario Histórico de Machu Picchu. Géneros, especies nuevas y nuevos reportes<br><i>Benjamín Collantes</i>                                | 407 |
| <i>Vasqueziella</i> boliviana, conocida desde hace tiempo y de amplia distribución, pero muy poco frecuente<br><i>Benjamín Collantes y Günter Gerlach</i>             | 411 |
| Una vista desde la bóveda: fotos de las expediciones a Perú de la National Geographic Society-Yale University<br><i>Sara Manco, Renée Braden y Matthew Piscitelli</i> | 421 |
| Autenticidad de Machupicchu, 100 años después<br><i>Ricardo Ruiz Caro y Fernando Astete Victoria</i>  | 427 |
| <b>ANEXOS</b>   |     |
| Anexo 1. Relación de monumentos arqueológicos en el Santuario Histórico-Parque Arqueológico Nacional de Machupicchu y la Zona Especial de Protección Arqueológica     | 439 |
| Anexo 2. Términos en quechua en los artículos   | 456 |

# Ingeniería *inka* de Machupijchu<sup>1</sup>

Jesús Puelles Escalante<sup>2</sup>

## **I.** Ingeniería *inka*

El cúmulo de los conocimientos de la tecnología *inka* aplicados en la edificación de la ciudad de Machupijchu demuestra de forma indubitable la existencia de una ingeniería *inka* compatible con el contexto de la tecnología actual, lo que está demostrado por la afinidad encontrada en la aplicación de la ingeniería en sus diferentes especialidades, como: geológica, civil, hidráulica, vial, agrícola y ambiental, por citar las de mayor intervención y repercusión. La ingeniería *inka* alcanzó su mayor desarrollo y relevancia en la época del imperio del Tawantinsuyu, lo que fue favorecido por su ubicación geopolítica y estratégica, ocupando la parte central del continente sudamericano, al abarcar extensos territorios de los actuales países de Perú, Ecuador y Bolivia y parte del norte de Argentina y Chile.

Asimismo, la ciudad de Machupijchu constituye un paradigma de la ingeniería ancestral, en la que *in situ* se puede admirar la original tecnología *inka*, que asombra al mundo. Es posible imaginar cómo los ingenieros *inka*, a través de sus conocimientos técnicos, desafiaron y lograron vencer los factores agrestes y agresivos de la naturaleza, de manera que adecuaron la ciudad a la topografía de la zona. Para los constructores *inka* no existieron escollos que imposibilitaran el logro de sus objetivos, metas y fines. En este sentido, analizaron con mucha sapiencia, de una parte, las fortalezas y oportunidades de su avanzada tecnología; y, de otra parte, supieron prever la reversión de las amenazas de riesgo de los fenómenos geodinámicos externos, riesgo originado por el agua y la gravedad. El conjunto de estos factores fue evaluado antes de tomar la decisión de emprender la edificación de la ciudad.

El análisis de los alcances de la ingeniería *inka* es una fuente inagotable de investigación, que siempre despertará el interés de explicaciones técnicas para

---

<sup>1</sup> En el presente artículo, el autor ha condensado su libro *Machupijchu. Arquitectura e ingeniería inka* (publicado en Lima en 2010).

<sup>2</sup> Ingeniero civil; magíster en Gerencia de la Construcción y doctor en Medio Ambiente; investigador de la ingeniería inca (puellesjesus@yahoo.com).



relevar cada vez más la originalidad de la tecnología *inka*. Es importante aclarar la utilización del vocablo ciudad *inka* de Machupijchu, ciudad y también ciudadela, tal como la denominó Hiram Bingham.

La justificación y el sustento técnico de la intervención de la ingeniería en sus diferentes especialidades y se desarrollan a continuación.

## II. Ingeniería geológica

En el campo de la ingeniería geológica, la ubicación de la ciudadela es un factor de seguridad para garantizar la estabilidad y perdurabilidad de la ciudad *inka*, por haberse construido encima de un batolito de granito; lo es también el conocimiento de la prevención de las fallas y de la posible ocurrencia de fenómenos de geodinámica externa de la zona. La ingeniería geológica aplicada por los constructores *inka* demuestra un conocimiento especializado de la petrología del lugar, lo que contribuyó a la elección del sitio para garantizar la calidad y cantidad de los materiales requeridos para la obra. La ubicación estratégica logra una ciudad inexpugnable, por estar rodeada de farallones rocosos y de taludes con inclinaciones muy pronunciadas.

El Santuario Histórico de Machupijchu, según los estudios del doctor Víctor Carlotto Caillaux, se halla sobre un conjunto de rocas ígneas intrusivas del batolito de Vilcabamba, de edad Pérmica-Tiásica, encontrándose también rocas metamórficas del Paleozoico Inferior, rocas sedimentarias de la edad Mesozoica y Cenozoica y depósitos recientes del Cuaternario. El levantamiento geológico detallado de los cerros de Machupijchu y Waynapijchu y los alrededores, incluyendo el área de la ciudad *inka*, permite precisar cuatro unidades cartografiadas muy fracturadas y movidas por gravedad, de bloques de granitos separados, que también se conoce como caos granítico, depósitos coluviales y material de relleno.

En el camino *inka*, entre los cerros de Uñapijchu y Machupijchu, el mismo investigador ha identificado otras formaciones geológicas, como un dique de tonalita de 0.30 m de espesor. Esta roca presenta una textura de grano fino; es de tono gris claro a verde y está constituida por abundante plagioclasa, con cuarzo, biotita, ortosa y hornablenda en menor proporción y escasa presencia de máficos. Al sur de la ciudadela, existe una veta de talco serpentínico-clorítico encajada en las paredes de esquisto clorítico, micáceo y cuarzoso. El color del talco y del esquisto varía de verde claro a verde oscuro; es un material utilizado por los artesanos de la zona para esculpir íconos y estatuillas de diferente significación. Los granitos de Machupijchu están fracturados por sistemas de diaclasas y fallas que muestran tres direcciones principales: noroeste-sureste, noreste-suroeste, este-oeste. Esta precisión se identifica en la figura 1.

## Petrología de rocas

La petrología es una ciencia que estudia la génesis y composición mineralógica de las rocas. Considera dos disciplinas bien definidas: la petrogénesis, que trata del origen y formación del granito; y la petrografía, que se refiere a la composición mineralógica del mismo. La petrología es importante para el conocimiento del granito de Machupijchu, por cuanto es esencial para determinar la patología del grado de afectación de los líticos, las causas de su deterioro y la propuesta de posibles alternativas de tratamiento y conservación del patrimonio *inka*.

## Origen del batolito de granito

El afloramiento del granito de Machupijchu, conocido también como batolito de Vilcabamba, es de origen ígneo y corresponde a una roca básica, intrusiva mayor de formación plutónica que afloró a la

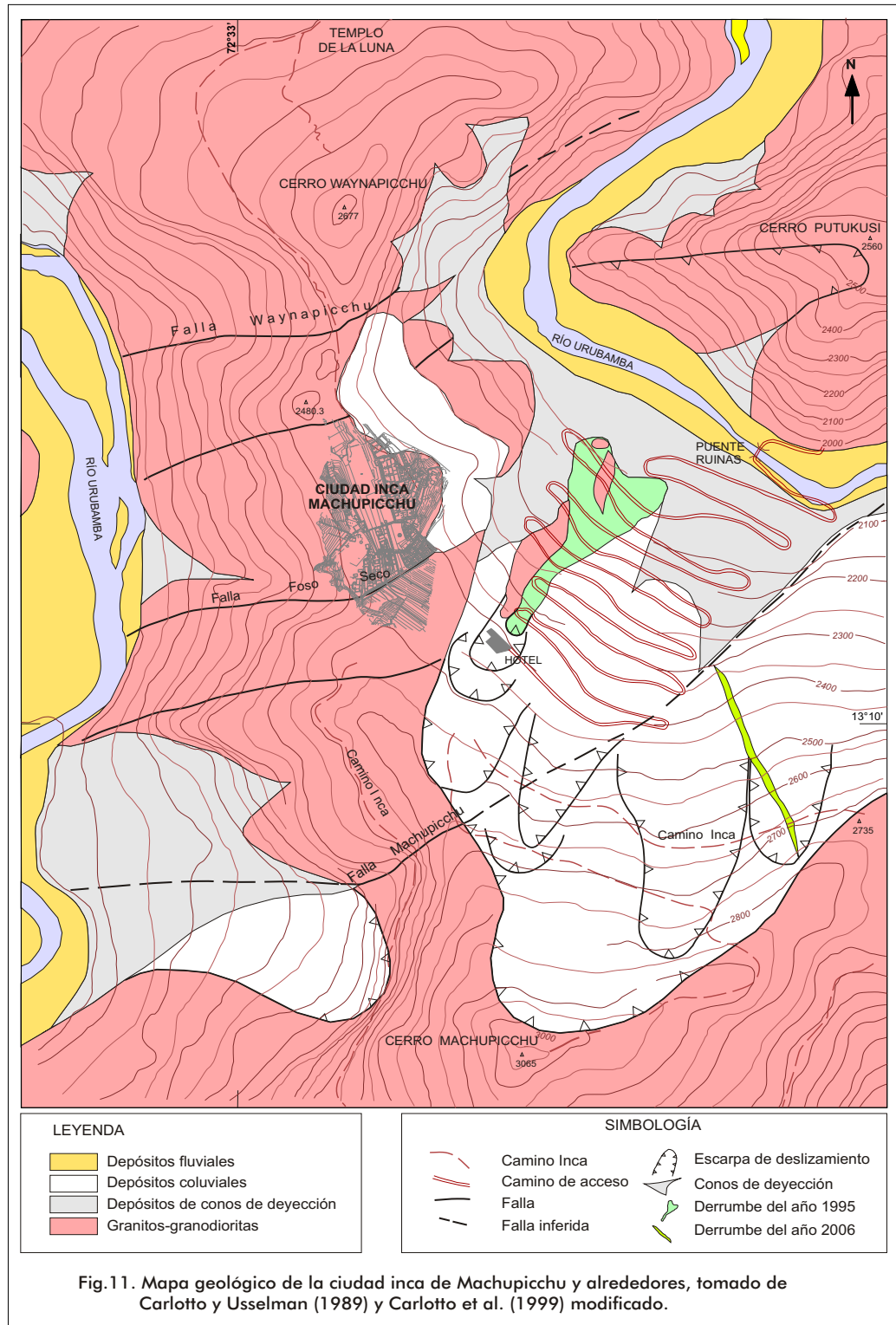


Figura 1. Mapa geológico de la ciudad de Machupijchu y alrededores (versión modificada, 1999; Víctor Carlotto Cailloux).

superficie<sup>3</sup>. Pertenece al clan o familia de la granodiorita y la tonalita, rocas ligadas por el parecido en su composición mineralógica; destacando que el granito de Machupijchu tiene abundante cuarzo.

Aquí es importante abordar el concepto de excavación magmática, que significa que un cuerpo de magma excava o abre su camino hacia arriba dentro de la corteza terrestre, es decir, se trata del mecanismo de desplazamiento vertical del batolito, siendo posible la ubicación a gran profundidad de la enorme masa de granito enfriado, donde pudo sufrir una reacción con el magma caliente y ser asimilado por el batolito, originando un empuje hacia arriba que se concretó en el afloramiento en la capa superficial de la corteza terrestre. En este proceso, cuando el magma en su recorrido ascendente calienta rápidamente a la roca fría, esta se dilata y puede fracturarse. Esto es lo que pudo suceder con el batolito en el sector de Machupijchu. Como una consecuencia de este proceso, el granito estuvo sujeto a numerosas fuerzas que originaron esfuerzos de torsión, tracción, fractura y empuje, a manera de cuñas de rocas laterales producto de la geodinámica interna del magma, que finalmente facilitó la expulsión del batolito a la superficie de la Tierra. Obviamente, tal proceso tuvo una duración de millones de años. Esta explicación es válida para justificar el origen de las fallas geológicas, que fueron de conocimiento de los *inka*, quienes supieron prever la posible afectación de la perdurabilidad de las edificaciones. Por esta razón, el foso seco coincide con una de estas fallas y allí no existe construcción alguna.

La era geológica de la formación del batolito se sitúa en el Paleozoico antiguo, periodo del Ordovícico, comprendido entre el Silúrico y el Cámbrico,

<sup>3</sup> Se tiene que, en el planeta Tierra, las rocas ígneas son las más abundantes (95%), sedimentarias (1%) y metamórficas (4%), que cubren la corteza en un espesor promedio de 16 kilómetros.

con una duración de 67 millones de años y una edad geológica aproximada al presente de 505 millones de años. Es decir, la formación del batolito estaría ubicada a continuación del periodo Cámbrico, el cual tuvo una duración aproximada de 85 millones de años y una edad de 590 millones de años, considerando la edad de la Tierra en 4600 millones de años.

### **Composición mineralógica del granito**

El cromatismo del afloramiento de granito varía de blanco a gris, teniendo ambos abundante cantidad de cuarzo, que puede verificarse visualmente. El de color blanco lo debe a la presencia de plagioclasa, la cual forma parte de una serie de los feldespatos que en algunos casos representan hasta el 50% de la estructura cristalina, los que se forman por la mezcla de albita y anortita en porcentajes que varían entre 30% y 70%. El granito gris debe su color a su composición de materiales máficos u oscuros, como biotita y hornablenda, por citar algunos. La textura es granular, con grado de cristalinidad holocristalino, al estar totalmente compuesto de cristales debido al enfriado lento; en él pueden distinguirse cristales individuales, siendo el tamaño del cristal mediano promedio de 2 mm. Los cristales en algunos sectores son equigranulares, es decir, aproximadamente del mismo tamaño, mientras que en otros sectores son porfiríticos, con cristales grandes rodeados por otros más pequeños. La forma de los cristales es euédral, con diseños bien definidos. La composición mineral del granito de color blanco y gris está constituida por cuarzo en porcentaje elevado y microclina, ortosa, plagioclasa, biotita, zircón, epidota y clorita, en porcentajes menores.

### **Granitos fracturados y movidos por gravedad**

Se denomina así a unidades de granitos muy fracturados que han sufrido un proceso de meteorización e

intemperismo con desplazamiento por la gravedad. El agua que entra por las fracturas y la gravedad hacen que los bloques de granito semejantes a paralelepípedos traten de separarse del afloramiento en el tiempo en unidades aisladas de granitos de forma irregular, llegando a ser bloques de volúmenes con tamaños desde medianos hasta megalíticos. Este proceso de meteorización se conoce como caos granítico, definido así, por el doctor Carlos Kalafatovich Valle en 1963.

Un sector muy importante de la ciudadela se ha construido acondicionada al estado del granito. Existen piezas aisladas inamovibles de gran tamaño, semejantes a picos pronunciados del afloramiento que no se han desprendido del substrato de la roca matriz, que fueron consideradas para las edificaciones más importantes e impactantes de algunos conjuntos urbanos. De ahí el Torreón, donde se ubica el Mausoleo Real, el Templo del Sol, el Templo del Cóndor y de manera relevante el conjunto del Intiwatana o reloj solar, dando la impresión de ser la protuberancia granítica más importante y más elevada del sitio. Las *waka* fueron esculpidas en afloramientos importantes. Así mismo, se observa la presencia de rocas sueltas relevantes en los conjuntos de los andenes y en tramos del camino *inka* o Qhapaq Ñan (figura 2). Estas piezas megalíticas han servido de base y apoyo estable e inamovible para construir muros de líticos de cantería depurada, tal como se aprecia en las figuras 3 y 4, con la utilización de rocas aisladas en la construcción de una de las fuentes de agua y el conjunto del Torreón.

### III. Ingeniería de edificaciones

Es relevante el estilo único y original de las edificaciones de Machupijchu, caracterizado por un sello de identidad inconfundible: las jambas de puertas, ventanas y hornacinas trapezoidales, que

se conjugan con la inclinación de los muros, de parámetros con aparejos de líticos de belleza incomparable. En su conjunto, ellos constituyen la ingeniería constructiva *inka*.

Es importante destacar que la aplicación de la ingeniería civil en la época incaica es de consenso mundial, reconocida por instituciones y entidades renombradas, entre estas, la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles y la Sociedad de Ingenieros Profesionales de los Estados Unidos. En la 30ª Convención Panamericana de Ingenieros de la Unión Panamericana de Asociaciones de Ingenieros (Upadi), efectuada en el Instituto de Tecnología de Georgia, Atlanta, en setiembre de 2006, la ciudad de Machupijchu fue declarada Monumento Histórico Internacional de la Ingeniería Civil.

En el campo de la ingeniería constructiva *inka*, se tiene identificado un conjunto de actividades o partidas de ejecución, como los trabajos de cantera, la preparación y transporte de piezas líticas, su colocado en los muros aplicando con maestría gran variedad de estilos de aparejos, definidos estos por la importancia, significación y uso de los recintos. Esto se complementa con los trazos de la geometría ortogonal, la construcción de andenes con objetivos agrícolas y la de muros de contención, que en su integridad lograron un portento sin paragón.

Se puede compatibilizar el proceso constructivo *inka* con los aplicados en el contexto de la tecnología actual, es decir, es factible aplicar un orden secuencial de la ejecución de las partidas consideradas en las edificaciones actuales, planificando trabajos de cantera, transporte de las piezas de granito, elección del tipo de suelo y programación del proceso constructivo. Para ello, se puede plantear la ejecución de las partidas en el orden siguiente: trazo y replanteo de edificaciones, excavaciones, construc-



Figura 2. Se aprecia el foso seco, que divide las zonas agrícola y urbana. Es coincidente con una falla geológica, conocida por los constructores *inka*, por lo que no existe edificación alguna (fotografía: Ruperto Márquez H.).

ción de cimentaciones, muros o estructuras líticas y techos de madera, además de otras obras complementarias relacionadas con la infraestructura urbana (calles, escaleras, losas y circuitos peatonales, complementados por andenes).

### 1. Proceso constructivo

Es importante considerar la optimización de las áreas disponibles durante el proceso constructivo de la ciudadela en función a la topografía y la ubicación de la cantera, lo que se llevó a cabo con la idea de la priorización de edificaciones por sectores. Primero, el sector Urbano Alto, de fina cantería para edificar jerarquizando los conjuntos más importantes de la ciudad, donde los muros muestran una variedad de los estilos de aparejos más depurados. Los andenes se construyeron utilizando los trozos de rocas rústicas y las obtenidas como excedentes de piezas de los primeros trabajos de cantería. Por la envergadura de los trabajos, fue imprescindible la programación de la obra para optimizar la utilización temporal de



Figura 3. El Templo del Sol y el conjunto del Torreón; al fondo el Waynapijchu (fotografía: Ruperto Márquez H.).





Figura 4. Una de las expresiones geológicas más importantes del caos granítico. Adelante, la roca inamovible, en donde se ubica una de las fuentes de agua; al fondo el Torreón, construido sobre otra roca emblemática (fotografía: Manuel Chávez).

los espacios destinados a la habilitación de las piezas líticas, lo que se hizo extensivo al requerimiento de miles de personas que intervinieron en las construcciones. Es posible que ellos se instalaran provisionalmente en viviendas precarias, ubicadas en las primeras terrazas de los andenes o en instalaciones en el entorno de la ciudadela.

## 2. Trabajos en cantera

La ciudadela se edificó encima del batolito de granito, planificándose la traza urbana y el ordenamiento territorial sobre el macizo de granito. Imaginemos apreciar panorámicamente la expresión geológica visual de la volumetría espacial del área ocupada por la ciudad *inka*, es decir, divisar una serie de picos y protuberancias más elevados del afloramiento de la roca matriz. Ello incita a concluir que la edificación de la ciudadela y la infraestructura urbana se adecuaron a la topografía del lugar, acondicionada con

plataformas de diferentes niveles. Se priorizó el uso de las rocas que más resaltaban en el área, como producto del caos granítico. Estas piezas no han perdido el substrato de la roca madre, es decir, constituyen piezas únicas originales y fueron consideradas en las edificaciones de los recintos emblemáticos sobre una base estable. Los trabajos de explotación de la cantera se ejecutaron en la zona concentrada del caos granítico, habiéndose priorizado la extracción de los bloques de granítico de mayor tamaño para las edificaciones más importantes; los trozos restantes fueron utilizados en los aparejos rústicos. Es decir, no se desperdició fragmento alguno, inclusive los más pequeños fueron usados como cuñas, lo que ha permitido aplicar una diversidad de variantes de aparejos, que son explicados más adelante. Esta labor de extracción se facilitó al tomar como guías las líneas de las disyunciones, o clivajes, dispuestas casi paralelas a manera de un enjambre, lo que define las



Figura 5. La cantera *inka*; se observa rocas de gran tamaño de formas irregulares producto del caos granítico.



Figura 6. Roca de cantera *inka*; se aprecia las líneas de los clivajes o disyunciones, lo que facilita la extracción de los trozos de roca (fotógrafo: Manolo Chávez).



superficies de las microfallas o diaclasas, de tal manera que los trozos, o el tajo de las rocas, tenían medidas aproximadas a los requerimientos de la obra y eran habilitadas (desbastadas) con una cantería preliminar antes de ser transportadas (figuras 5 y 6).

### 3. Transporte de elementos líticos

Las piezas de rocas, al ser extraídas, tenían por lo general la forma de paralelepípedos, de diferente tamaño y peso, en algunos casos de varias toneladas, que necesariamente se debieron transportar en las condiciones físicas existentes, como es el caso de los líticos del conjunto de los templos, que fueron desplazados en rampas de poca pendiente, por cuanto se tiene indicios de que las rocas de mayor tamaño se extrajeron en un afloramiento situado en el área que corresponde a la Plaza Sagrada, adonde convergen el Templo Principal y el Templo de las Tres Ventanas.

Para el transporte de las piezas pesadas a mayores distancias, además de rampas, se utilizaron rodillos de madera rolliza de apoyo en la base y palancas

de madera aplicadas en la parte posterior (*wanqhana*), complementadas con fuerzas de tracción aplicadas en la parte delantera, jaladas con cuerdas de alta resistencia, conocidas como cabuya, fabricadas de maguey u otras especies vegetales. La mayor cantidad de líticos fueron transportados de la zona alta a niveles más bajos.

Para un mayor conocimiento, se tiene que esta forma de transporte se aplicó también para distancias más considerables, como es el caso del grupo arqueológico de Ollantaytambo, adonde se transportó piezas líticas únicas de roca riolita rosada provenientes de la cantera de Kachiqhata, a 7 km de Ollantaytambo, en la parte alta de la margen izquierda del río Vilcanota. La ruta en el primer tramo se utilizó para bajar las piezas desde la cantera por una ladera de una pendiente muy pronunciada, luego se continuó el recorrido por una distancia considerable con menor pendiente hasta cruzar a la margen derecha del río aguas abajo y finalmente se culminó por un tramo muy inclinado hasta la cima de otra ladera,



Figura 7. Mural en el que se aprecia el transporte de un lítico pesado en plano inclinado y trabajos de cantería motivados por músicos (*harawi*) (Víctor R. Tapia, 1993).



donde se ubica este grupo arqueológico. Tal recorrido es una proeza, considerando que cada pieza tiene un peso promedio de 40 toneladas y que ellas fueron utilizadas exclusivamente en un muro, posiblemente ceremonial. Quedaron en el trayecto otras piezas aisladas de gran tamaño; es decir, es posible que el conjunto arqueológico quedara sin concluir por razones desconocidas. Este es un hecho, que demuestra la capacidad de los *inka* para transportar líticos de gran tamaño y peso a distancias considerables. Ello se ilustra en el mural del Museo Inka del Cusco de la figura 7.

#### 4. Tipología de muros

Compatibilizando con la tecnología actual, se define el tipo de la mampostería lítica diseñado para soportar cargas verticales. La capacidad y comportamiento estructural están definidos por la calidad constructiva y el estilo de los aparejos, aplicándose el diseño para cargas verticales en los conjuntos principales del sector Urbano Alto: el Torreón, la Residencia Real, el Templo Principal y el Templo de las Ventanas, por citar algunos. En otros recintos del mismo sector, se utilizaron muros de aparejos de estilo poligonal celular con mortero, edificándose con este estilo, en el sector Urbano Bajo, el conjunto de los Morteros y el grupo de las Tres Portadas. En los andenes, el tipo de muro corresponde a mamposterías de sostenimiento, actuando las cargas verticales y horizontales, estas últimas generadas por el empuje lateral del material de relleno. Las fuerzas actuantes definen las dimensiones de las secciones transversales, logrando un diseño típico, con algunas variantes, por considerar requerimientos de cargas similares. Los muros de los andenes cumplían dos funciones: contención, para consolidar los rellenos que forman las plataformas de uso agrícola; y estabilización de laderas, para proteger las edificaciones y la infraes-

tructura urbana de la ciudad ante la eventualidad de posibles erosiones y deslizamientos de los taludes originados por fenómenos geodinámicos externos. En conclusión, se tienen muros utilizados en las edificaciones de los conjuntos y recintos y aquellos que corresponden a los andenes de diferente uso.

#### 5. Estructuras líticas de muros

En la tipología de los muros de las edificaciones, se han identificado aquellos que corresponden a estructuras líticas verticales y de tipo portante, con un comportamiento estructural en función a la importancia y envergadura de la edificación, ubicación del sitio, capacidad de carga del suelo, estilo de aparejos y otros factores constructivos. En cuanto al diseño arquitectónico de las edificaciones, se tiene que aproximadamente el 95% son de un piso y uniespaciales, por tanto, la incidencia de sobrecarga es mínima y, de existir, se transmite directamente al suelo. Las edificaciones de dos pisos (figura 8), conocidas ancestralmente como *markawasi*, tienen una presencia de 5%; son de diseño arquitectónico peculiar, el primer piso destinado a uso de vivienda, el segundo como depósito de productos agrícolas y diversos enseres domésticos. Esta concepción arquitectónica requiere adicionar la carga permanente del peso propio del segundo piso, constituida por el de muros y techo y del entrepiso, que posiblemente estuvo constituido por una capa de mezcla de diversos materiales (arcilla, cal, agregados gruesos y finos mezclados con agua), colocada sobre una tarima de caña, abarcando la superficie del segundo piso, lo que generó una carga distribuida sobre las viguerías de madera rolliza que trasmitían la carga total (la suma de la carga permanente y la carga viva o sobrecarga) sobre los muros del primer piso, al apoyarse y fijarse en ensanches situados a lo largo de los muros longitudinales, ensanches formados al disminuir el ancho del muro de 0.85

m en el primer piso a 0.60 m en el segundo piso. Los muros de las edificaciones no están sujetos a cargas laterales. Estas actúan en los muros de contención de los andenes, en los que sí interviene el empuje de los rellenos, generando cargas horizontales.

En las estructuras líticas, la calidad del suelo, el estilo de aparejo, el grado de inclinación, las secciones transversales, el espesor, la altura y la esbeltez de los muros, asociado todo ello al peso específico del granito, son factores concurrentes y determinantes que definen el comportamiento estructural requerido en las edificaciones y andenerías de Machupijchu. Los estilos de aparejos son parámetros constructivos de tal gravitación que, a mayor perfección de la cantería, se logró juntas muy herméticas entre líticos hasta alcanzar la condición monolítica de los muros, que permite la estabilidad de las estructuras, garantizando la inclinación de los muros hasta donde no exista el riesgo de pérdida de estabilidad al volteo. Contribuye a la condición monolítica el alto peso unitario del granito ( $2700 \text{ kg/m}^3$ ), lo que, relacionado al bajo coeficiente de esbeltez, lleva a una estructura poco vulnerable, inclusive para los requerimientos sísmicos<sup>4</sup>.

## 6. Condición sismorresistente

En el tema de sismicidad, los muros tienen condiciones monolíticas y actúan de manera semejante a placas antisísmicas ubicadas ortogonalmente, por lo que cumplen una función mitigadora del efecto de las ondas sísmicas. Complementan pues la enorme masa del batolito de granito sobre el que está edificada la ciudadela, actuando esta como un gran amortiguador de sismos, de manera que históricamente se desconoce en ella alteraciones por la acción impactante de fenómenos geodinámicos internos.

<sup>4</sup> El peso unitario del granito es superior al del concreto normal, que es de  $2400 \text{ kg/m}^3$ .

Se constata la presencia de parámetros constructivos estructurales sismorresistentes. En la permanente aplicación de la tecnología *inka*, algunas variables de los elementos constructivos estructurales se perfeccionaron, convirtiéndose en constantes, para luego constituir parámetros. La inclusión de tales parámetros constructivos fue prioritaria y esencial para lograr edificaciones relevantes con las características físicas tantas veces expresadas con admiración. La perfección alcanzada coadyuvó al logro de modelos de la arquitectura e ingeniería *inka* con condiciones sismorresistentes únicas, analizadas y explicadas a continuación.

En cuanto a la forma y configuración de las estructuras, la distribución de la planta es:

- Simple: con recintos generalmente de formas rectangulares: las irregulares son más vulnerables.
- Compacta: las dimensiones de los recintos guardan una proporción coherente entre largo y ancho (2.5 veces, en promedio), que contribuye también a la compacidad; además, el área esencial de los vanos de puertas y ventanas hace que los muros sean más compactos y monolíticos.
- Simétrica: la planta y la estructura de los recintos son simétricas; el centro de rigideces está lo más cercano posible al centro de masas, que a su vez es casi coincidente con la simetría de la planta. Las deformaciones son casi nulas debido a la masa y la poca asimetría.

Por su parte, las elevaciones tienen:

- Continuidad: sin entrantes y salientes desde el arranque hasta la culminación del muro;

las secciones de los muros son de formas geométricas regulares.

- Esbeltez: los muros son estructuras simples y compactas, con un bajo coeficiente de esbeltez (relación entre altura y espesor). Al verificar esto en los recintos más relevantes, se obtienen valores que fluctúan en el rango de 2.5 a 3.0, condición que permite la concentración de un gran volumen de masa, lo que contrarresta con eficiencia las ondas sísmicas.

Además, son características de los muros:

- Uniformidad y cerradura: muros continuos y distribuidos uniformemente, alineados en ejes ortogonales.
- Redundantes y monolíticos: el diseño arquitectónico y el estilo constructivo son casi repetidos, lo que contribuye al perfeccionamiento de los modelos de patrones

de constantes; el perfeccionamiento de los estilos de aparejos, especialmente de juntas herméticas, coadyuva a la obtención de una estructura monolítica.

- Rigidez: capacidad de controlar las deformaciones bajo carga; debido a la gran cantidad de juntas horizontales y verticales, los muros actúan como estructuras semiflexibles.
- Arriostres: de tipo vertical, mediante muros transversales de secciones considerables, espaciadas adecuadamente. Esta disposición garantiza la estabilidad de los muros.

La mayor cantidad de materiales utilizados está constituida por roca granito de propiedades físicas y comportamiento mecánico apropiado y poco degradable. Estas condiciones garantizan una baja vulnerabilidad de las edificaciones. Finalmente, el análisis técnico de los parámetros constructivos estructurales y de los modelos arquitectónicos permite concluir



Figura 8. Edificación de dos pisos de uso múltiple ubicada en el entorno del conjunto El Cóndor. Se observa el diseño arquitectónico adecuado a la topografía y las ventanas y accesos orientados al este, con fin bioclimático (fotografía: Teo Allain Chambi).

que las edificaciones de Machupijchu garantizan un óptimo comportamiento sismorresistente.

### 7. Estilos de aparejos

Los aparejos tienen diferentes estilos, que se identifican por la belleza y estética de los muros y se definen por el objetivo social, cultural y religioso de las edificaciones. Las piezas líticas colocadas con maestría muestran diversas formas geométricas y acabados, apreciándose paramentos (superficies exteriores de los muros) de estilos insuperables, que confirman las condiciones artísticas y creadoras de los *inka*.

Para una mejor explicación del tipo de muros y estilo de los aparejos, se recurre en el contexto de la tecnología actual al ejemplo siguiente, la construcción de muros de albañilería de material noble usando ladrillos de arcilla. El tipo de muro corresponde al de cabeza o sogá, según sea su espesor, definido por los lados de mayor o menor dimensión de los ladrillos, estando relacionado directamente con el objeto del muro, y en ambos casos unido con mortero de cemento-arena. En el estilo de acabados, se tiene el caravista y el revocado; en el primero, los muros muestran los ladrillos con sus características externas de fabricación; en el segundo, los paramentos se cubren, revocando con mezcla de cemento y arena. En el citado ejemplo se distinguen dos tipos de muro y dos estilos del aparejo.

En la tecnología *inka*, la interpretación es similar. Se consideró la roca granito como material, para luego habilitar los líticos con diferentes formas geométricas y acabados, para ser colocados en los muros sin la utilización de mortero en las edificaciones de fina cantería y los líticos del estilo poligonal celular con mortero en las edificaciones de menor jerarquía. A partir de la apreciación constructiva de la ciudad *inka* en su conjunto, se precisa reiteradamente la intervención de las diferentes espe-

cialidades de la ingeniería. En un recorrido por los circuitos peatonales de las edificaciones, se aprecia la fortaleza y energía que se tuvo para desafiar a la naturaleza y construir la ciudad y para perennizar el legado del espacio-tiempo sagrado andino, expresado de forma incólume en Machupijchu, la nueva maravilla cultural y natural del mundo.

Los estilos de aparejos más importantes identificados en Machupijchu son: el megaciclópeo poliédrico de textura canteada, el megaciclópeo poliédrico de fina cantería y el estilo rectangular en sus variantes (almohadillado, intermedio, plano, liso y curvo). Estas variantes se precisan considerando el isódomo, cuando se trata de hiladas de la misma altura, y el pseudoisódomo, cuando se refiere a hiladas de alturas diferentes o alternadas; Adicionalmente, los aparejos poligonal celular simple y poligonal ciclópeo rústico se observan entre los más repetitivos, por encontrarse en los muros de los andenes (figuras 9 a 14).

### 8. Evaluación de suelos

Los constructores *inka* eran expertos en elegir suelos de buena calidad para garantizar la estabilidad y perdurabilidad de sus edificaciones; así mismo, con un criterio de prevención y precaución, ubicaban las construcciones más importantes en lugares con relieve topográfico de cotas elevadas, lo que protege de la erosión por causa de fenómenos naturales, como lluvias, deshielo, avalanchas y otros relacionados a la geodinámica externa. La calificación y la elección de suelos se definían considerando, de una parte, la importancia, tamaño, uso y envergadura de las edificaciones; y, de otra parte, el ordenamiento territorial, topografía, geología y condiciones ambientales, por citar algunas variables. El suelo del área donde se ubica Machupijchu tiene una alta capacidad portante, al estar construido sobre un afloramiento de roca maciza de granito cubierta por una capa de





Figura 9. Muro exterior del Templo del Sol; estilo de aparejo rectangular intermedio.



Figura 10. Estilo de aparejo celular simple sin mortero.



Figura 11. Andenes con muros de aparejo poligonal ciclópeo. Se aprecia la biodiversidad de la flora natural.



Figura 12. Detalle central del muro anterior: piezas megaciclópeas de cantería depurada y encima líticos de estilo rectangular isódomo.





Figura 13. Muro que integra el conjunto Los Morteros; en su paramento se observan líticos diversos de diferentes tamaños y formas y de fina cantería.



Figura 14. Detalle del paramento del muro anterior: líticos de textura granular que muestran la optimización del uso de rocas de diferentes tamaños.

residuos cuaternarios de origen coluvial, materiales aluviales y otros provenientes de meteorización e intemperismo, proceso que tuvo una duración de millones de años. Estas condiciones geológicas del lugar fueron analizadas y consideradas por los constructores. Es importante, así, tener en cuenta el ancho de los cimientos, que varían entre 0.80 y 0.90 m, constituyendo un parámetro constructivo que define una mejor estructuración de los muros de mampostería y así mismo permite incrementar el área de distribución y transmisión de las cargas de la estructura lítica en el suelo, de tal forma que, además de contar con una buena capacidad portante del suelo, se logra un mayor coeficiente de seguridad para prever posibles asentamientos diferenciales.

### 9. Trazo y replanteo

Los ingenieros *inka*, al replantear en planta los recintos, definieron los trazos y ejes, aplicando la relación 3:4:5 que forma con los dedos índice y pulgar un triángulo con ángulo recto, lo que luego se aplicaba a una gran escala y se adecuaba a las medidas y constantes de mensura utilizadas en el incanato. Este principio de la geometría ortogonal se usó en los trazos perpendiculares para fijar los ejes centrales de los muros de los cimientos y luego para verificarlos con el cruce de diagonales de la misma longitud, uniendo las cuatro esquinas de los recintos. De esta manera, se lograba la perfección del trazo en ángulo de 90° utilizando una metodología práctica.

### 10. Excavaciones

Considerando los ejes definidos, se trazaron líneas paralelas auxiliares para delimitar un sobrecimiento considerable a ambos lados de los ejes, fijando de esa forma el área de la excavación de las zanjas. El incremento de la superficie a excavar se justificaba técnicamente para disponer temporalmente de áreas

libres tanto para el desplazamiento de las personas como para la ejecución de los trabajos de cantería y colocación de los líticos en los muros de los cimientos.

Al concluir la excavación, se nivelaba y compactaba la cota de fondo para facilitar el replanteo del ancho de los cimientos.

### 11. Muros de los cimientos

Los cimientos en las construcciones *inka* son muros de paramentos verticales con líticos grandes y medianos de una cantería preliminar de diferentes longitudes y alturas estandarizadas. Los cimientos tienen una altura promedio de 1 m y un ancho variable de 0.80 a 0.90 m. Estas estructuras de líticos se apoyan sobre suelos de alta resistencia; en casos especiales se construyó directamente sobre el afloramiento del granito. Una vez concluida esta etapa, se reponía el relleno del sobrecimiento con el material proveniente de las excavaciones en capas compactadas hasta alcanzar la cota del piso terminado. Este nivel se consideraba para el inicio de la elevación de los muros, por lo tanto, los cimientos quedaban enterrados.

### 12. Elevaciones de los muros

La expresión espacial de las edificaciones está identificada con la elevación de los muros. Es así que para continuar con el proceso constructivo se verificaba el replanteo simétrico de los recintos en planta con trazos ortogonales proyectados encima de la coronación de los cimientos, para luego colocar el plantillado de la primera hilera de líticos, abarcando ambos lados de los muros y constituyendo así el arranque. A partir del plantillado, se procedía al replanteo de las elevaciones de las secciones transversales de los muros, teniendo estas formas de trapecio o paralelogramo, según el caso, lo que consideraba las inclinaciones de los muros y los vanos de puertas, ventanas y hornacinas.



Para la construcción de muros con el estilo de aparejo elegido, se utilizaba cuerdas indeformables, plomadas y escantillones. La colocación de los líticos se verificaba por hileras, tanto el alineamiento horizontal como las inclinaciones y los ejes simétricos, verificándose las secciones transversales que consideraban los vanos de puertas, ventanas y hornacinas, además del engastado y biselado perfecto.

Para alcanzar una adherencia cohesiva con un ensamblaje perfecto, las superficies de contacto entre los líticos colocadas por hileras son convexas y cóncavas, según el caso, lo que permite encajar de forma inamovible con juntas herméticas y se consigue entonces que el muro tenga un comportamiento monolítico. Esta condición se alcanzaba aplicando el método del ensayo-error tantas veces como fuera necesario, coadyuvando a este logro el alto peso específico del granito.

Los líticos se colocaban en este caso sin mortero, es decir, piedra sobre piedra. Sin embargo, observando algunos muros, se tiene indicios de la presencia de una capa de arcilla fina y muy delgada en algunas superficies de contacto, utilizada tal vez como deslizante para facilitar la colocación definitiva de las piezas líticas de manera yuxtapuesta.

Existen casos especiales, como los muros del Templo de las Tres Ventanas, donde debido al estilo de aparejo megaciclópeo poliédrico de textura granular, los líticos tienen gran tamaño. Esta condición permitió colocar elementos de una sola pieza, abarcando ambos lados de los paramentos de los muros. Es obvio que en un inicio las juntas horizontales y verticales entre los líticos fueron herméticas; a la fecha tienen aberturas debido al asentamiento diferencial de los muros, que no compromete su estabilidad. Son muros que están

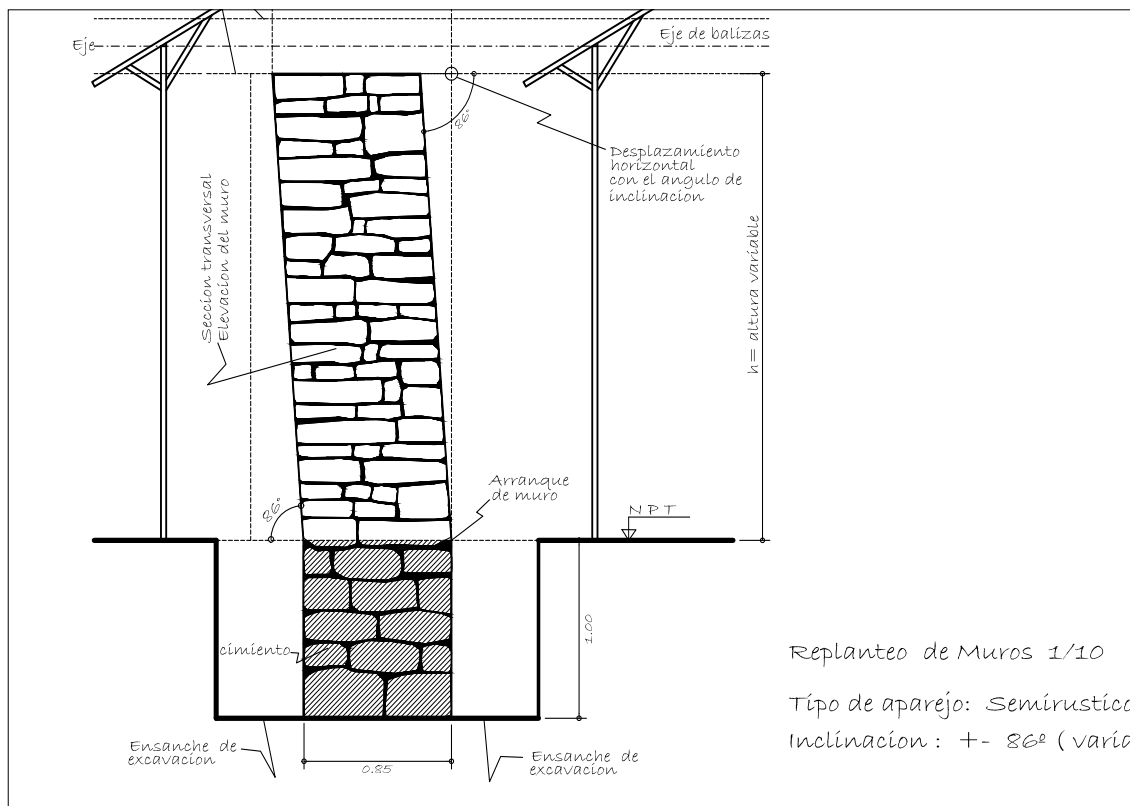


Figura 15. Reconstrucción hipotética de un muro *inka*. Elevación de muro: sección transversal.

bajo control, sin registrar variación alguna en los últimos años.

El referido estilo de aparejo se aplicó en la base de los muros laterales del Templo Principal. La colocación de los líticos requirió la utilización de rampas de longitudes considerables de poca pendiente, utilizadas para el transporte, aplicando el procedimiento explicado anteriormente.

En el proceso constructivo de algunos conjuntos, se aplicó en los muros diferentes estilos de aparejos de cantería: un estilo depurado hasta alcanzar alturas intermedias; que se completó en la parte superior con líticos de estilo poligonal celular unidos con mortero, obviamente aplicando el mismo proceso de la tecnología constructiva, por cuanto los muros se comportan como estructuras de gravedad y portantes. El mortero está constituido por una mezcla de arcillas, tierra natural y agregados de arena gruesa mezclados con fragmentos pequeños de granito. En la construcción de los muros con mortero era factible transportar gran número de piezas líticas de forma individual, lo que permitió construir varios conjuntos en poco tiempo (ver en la figura 15 un ejemplo de construcción de muro *inka*).

Es importante destacar el perfeccionamiento del estilo constructivo de muros aplicando ciertos parámetros, que se explican al detalle en la sección de análisis de la estabilidad de muros.

### 13. Herramientas

En las excavaciones del Qorikancha, como en las realizadas en Machupijchu, se han encontrado herramientas similares utilizadas para el pulido de piezas líticas por percusión, consistentes en martillos y guijarros de alta dureza, conocidos como piedra *hiwaya*. Se trata de un oligisto pesado de gran dureza y de textura compacta, considerado en la tradición como de origen meteórico. Se caracteriza por su forma

ovalada y redondeada; contiene óxidos de hierro (6%), citándose algunos, como la geotita ( $\text{Fe}^2\text{O}^3\text{H}^2$ ). Estas herramientas son de diferentes pesos, variando desde uno hasta diez kilogramos y fueron utilizadas como pulidores de bordes y desbastadores, y los de mayor peso para compactar rellenos de tierra.

Para esculpir, se utilizó una variedad de cinceles planos; y en la colocación de los líticos, barretas cortas y largas de bronce. En el replanteo de las inclinaciones de los muros, se emplearon elementos metálicos sueltos y rocas de tamaño pequeño en forma de ovoides, semejantes a las plomadas de albañilería utilizadas en la actualidad. Para las excavaciones y el volteo de suelos se usó la *chakitaqlla*, larga y corta.

Algunas de estas herramientas fueron encontradas por Bingham, habiendo sido devueltas parcialmente, después de varios años, por la Universidad de Yale. Es posible apreciar las muestras de las herramientas referidas en el Museo Inka de la ciudad de Cusco (ver las figuras 16 a 22).

### IV. Estructura de techos

Es de suma importancia abordar analíticamente la construcción de los techos, por cuanto el 99% de los recintos carecen de la estructura y cobertura de techos, de manera que panorámicamente se puede ver una infinidad de hastiales o mojinetes que muestran la belleza de la elevación espacial de lo que fueron los techos de la ciudadela. Analizando las elevaciones de los muros y mojinetes de la ciudadela en su conjunto, se puede determinar que la solución a los techos fue definida por tres tipos de vertientes o caídas de agua: con una, dos y cuatro vertientes. El primer tipo corresponde a recintos en los que los lados laterales tienen poca profundidad, identificándose entre ellos algunas *wayrana* simples y recintos de menor importancia; el segundo corresponde a la mayoría de los ambientes, entre ellos: los conjuntos



Figura 16. Piezas de *hiwaya* para pulir líticos por percusión; son oligistos pesados de gran dureza.



Figura 18. Herramienta para el pulido de líticos compuesta de un manguillo de cuarzo empotrado en un casquete de bronce de color verde



Figura 17. Elemento filudo de roca de alta dureza con forma de hacha.



Figura 19. Pulidores de borde utilizados en el biselado y engastado de líticos (fotografía: Ruperto Márquez H.).



Figura 20. Barretas de bronce largas, medianas y cortas (Museo Inka de Cusco) (fotografía: Ruperto Márquez H.).



Figura 21. Elementos metálicos y de piedra de diferentes formas y pesos, utilizados como plomadas en el replanteo de la construcción de muros.



Figura 22. Cinceles metálicos y afiladores.

principales y las *wayrana* dobles; finalmente, el tercer tipo se refiere a los recintos con cuatro muros inclinados en el mismo sentido, como es el caso de las *qolqa*.

### 1. Techo de una vertiente

Se utilizó en recintos de muros laterales de un promedio de 3,50 m, como se ha observado en techos similares de la tecnología ancestral. La estructura principal está constituida por madera rolliza colocada en forma inclinada, apoyada en su extremo

superior en la coronación del muro más alto y ubicada al fondo. A lo largo de este muro se coloca una viga para repartir uniformemente la carga del peso del techo: 50% a cada lado. El extremo inferior se apoya en otra viga similar a la anterior, colocada encima de la coronación del muro más bajo, actuando ambas como viga solera. La cantidad de maderas rollizas está en relación al espaciamiento promedio de 1 m. En forma transversal a la madera inclinada, se colocaban los cabíos con madera rolliza de

menor diámetro, resultando finalmente un reticulado preparado para la colocación de la cobertura de paja. Este tipo de techo se ha aplicado también en otros recintos abiertos de solo tres muros, por ejemplo, las *wayrana* simples, como la del Centro Ceremonial. También se utilizó para acondicionar las dos vertientes independientes de la *wayrana* doble, en el conjunto Los Morteros.

## 2. Techo de dos vertientes

La proyección de la elevación de los techos de dos vertientes está definida por el ángulo de inclinación de los mojinetes, alcanzando en promedio  $55^\circ$ . Para el análisis de la real función arquitectónica y constructiva de los mojinetes, se toma de muestra los que corresponden a la *wayrana* doble, ubicada en el conjunto Los Morteros.

Observando los mojinetes, se tiene la visión de un techo a dos vertientes, con la aparente continuidad de las estructuras de los tijerales. Sin embargo, no es así, como se explicará más adelante, siendo este caso único. En la longitud de los ejes centrales de los mojinetes, se colocan con un espaciamiento promedio de 1.40 m elementos líticos en forma de clavijas, con cabezas semejante a aros de 0.17 m y 0.06 m de diámetro exterior e interior, respectivamente, y 0.05 m de espesor. En los paramentos exteriores de los mojinetes, se ubican empotradas otras piezas líticas de forma cilíndrica de 0.18 m de diámetro y 0.40 m de longitud. Los elementos líticos descritos se han ubicado en todos los mojinetes y fueron utilizados para el montaje, fijación y estabilidad de la estructura del techo mediante amarras de cuero a los elementos descritos.

En cuanto a la estructura de madera de los techos a dos vertientes de diseño normal, se ha utilizado el tijeral, conocido ancestralmente como par-nudillo, que se apoya y fija en la cumbre mediante una viga rolliza. Los extremos inferiores se fijan sobre vigas

de madera colocadas encima de la coronación de los muros, actuando como vigas soleras para distribuir el peso en forma proporcional para cada vertiente.

En el caso de las *wayrana* o recintos de tres muros, los apoyos inferiores de los tijerales se fijaban sobre una viga de madera, que a su vez se apoyaba en la parte intermedia de una pilastra, y los extremos se empotraban en las cajuelas de los muros laterales. Por las evidencias encontradas, este tipo de techo se utilizó en el Templo Principal, el Templo de las Tres Ventanas y algunas *wayrana* simples, como las ubicadas muy cerca del conjunto de la Roca Sagrada, donde se puede apreciar una variante del techo, para adecuarlo a los mojinetes que proyectan techos con vertientes de diferentes longitudes laterales (ver las figuras 23 y 24).

Este tipo de techo también se utilizó en las edificaciones de dos pisos o *markawasi*, que esencialmente



Figura 23. Techo a dos vertientes; corresponde a una edificación de dos pisos (*markawasi*) en la que se aprecia el mojinete y las vertientes de diferentes longitudes.





Figura 24. Cobertura de techos; arriba: la edificación del *markawasi* a dos vertientes; abajo: el recinto de la *qolqa* a cuatro vertientes.

son construcciones de un piso con altillo o ático. En la actualidad, los campesinos construyen de forma similar (ocupan el primer piso dándole uso de vivienda y el altillo lo utilizan para almacenar la cosecha anual de los productos agrícolas y como depósito de diversos enseres de uso doméstico).

### 3. Techo de cuatro vertientes

El tipo de techo de cuatro vertientes ha sido definido de manera *sui géneris* por el arquitecto Santiago Agurto Calvo como techo de dos vertientes con faldones laterales. Estos techos cubren recintos cerrados por los cuatro muros inclinados y sin mojinetes, condición que permite una elevación piramidal, con estructuras de madera rolliza y cobertura vistosa de paja o material similar de la zona. Este techo se aprecia en una de las *qolqa* (figura 24).

La estructura del techo en su integridad es de madera rolliza. La parte central de la elevación tiene

tijerales de dos tipos: el par-nudillo alterna con el par-hilada simple, y ellos culminan en la parte superior en aberturas en forma de tijera que permiten colocar una viga, cuya función es ser la línea maestra para alinear y fijar los tijerales y para definir la cumbrera superior; así mismo fijan los vértices de las otras dos vertientes laterales o faldones. El techo tiene una elevación piramidal, de tal forma que las dos vertientes centrales son trapezoidales, coincidiendo la parte superior o cumbrera con la base del trapecio de menor longitud y apoyándose la base mayor en una viga solera colocada a lo largo de los muros. Las otras dos vertientes laterales son de forma triangular (faldones), ubicándose los vértices en los extremos de la cumbrera central. La estabilidad de la elevación de la estructura de madera se logra colocando, transversalmente encima de los tijerales, madera rolliza de menor diámetro, conocida como *cabíos* o *alfajías*, con espacios de 0.30 a 0.35 m. Las uniones de la madera de los tijerales se



Figura 25. Recinto de la *qolqa*, con estructura de madera del techo a cuatro vertientes; en la parte central se aprecia el diseño del tijeral de tipo par-nudillo; al fondo la vertiente lateral.

logran mediante nudos con rebajes, traslapes y otros detalles, fijándose con amarras de cuero fresco de llama (*wiri*), que al secar da gran adherencia, semejante a un empotramiento. Es importante analizar el tratamiento del perímetro exterior del recinto para cubrir adecuadamente el sobrecancho o alero, que sirve de protección a los cimientos de las aguas pluviales. Esto se logra adicionando madera corta con ligera inclinación que se apoya en la parte inferior de los tijerales, lo que se denomina soberado. La madera rolliza que se usa corresponde a las especies de la zona (figura 25).

#### 4. Cobertura

Los paneles reticulados e inclinados de la estructura de madera de los techos se cubrían progresivamente con paja de la zona –conocida como *yunka ichu*–, en

unidades de superficie constante y modular preparadas y habilitadas con dimensiones que permitían traslaparlas, fijándose con una trama de soguillas de paja trenzada, amarrada alrededor de los cabíos o madera rolliza de menor diámetro colocada transversalmente a los tijerales. Al ver las construcciones, la imaginación hace concebir superficies vistosas con superposición de hileras de paja alineadas en línea recta, destacando así el espesor del traslape. El último toque del acabado se conseguía peinando toda la cobertura, lo que da una estética de belleza exquisita. La cobertura era sometida a mantenimiento periódico, especialmente de renovación de la paja, por tener esta una vida útil muy corta debido al intemperismo y al cambio de las estaciones del año.

### V. Parámetros constructivos de arquitectura e ingeniería

#### 1. Parámetros constructivos

Durante el periodo de avance del desarrollo de la tecnología, los constructores crearon parámetros en base a algunas variables que se convirtieron en constantes, que tenían en cuenta la estética y belleza de las edificaciones y se iban perfeccionando a través de modelos constructivos, los que se aplicaron con gran eficiencia y perdurabilidad. A su vez, se complementaron con modelos que consideraban las condiciones sismorresistentes tratadas con anterioridad. El autor, respecto al tema, desarrolló investigaciones en el Templo del Qorikancha del Cusco y en Machupijchu, encontrándose en ambos casos al-

Tabla 1. Parámetros constructivos

| Muestra          | Ángulo de inclinación | Espesor de muro | Altura | Esbeltez (relación altura/espesor) | Inclinación de la proyección horizontal |
|------------------|-----------------------|-----------------|--------|------------------------------------|---|
| Templo Principal | 86°20'                | 0.90 m          | 4.05 m | 4.5                                | 0.26 m                                  |
| <i>Qolqa</i>     | 86°00'                | 0.80 m          | 2.00 m | 2.5                                | 0.14 m                                  |
| <i>Wayrana</i>   | 86°20'                | 0.85 m          | 2.50 m | 3.0                                | 0.14 m                                  |
| Qorikancha       | 85°55'                | 0.85-0.90 m     | 2.80 m | 3.4                                | 0.20 m                                  |

gunos parámetros constructivos similares, aplicados con tal maestría que inclusive asombran las aproximaciones numéricas. Así, se efectuaron mediciones del ángulo de inclinación y del ancho, altura y esbeltez en los muros de recintos elegidos por muestreo: el Templo Principal, la *qolqa* ubicada al iniciar la zona Agrícola y la *wayrana* doble ubicada en el conjunto de Los Morteros. Los datos obtenidos se resumen en la tabla 1.

La inclinación varía en el rango de  $86^\circ$  a  $86^\circ 20'$ , teniendo el muro más inclinado del Qorikancha  $85^\circ 55'$ . En la medición de las alturas de los muros más inclinados de Machupijchu, se obtuvieron 2.00 m y 2.50 m, excepcionalmente 4.05 m, y espesores de 0.80 m, 0.85 m y 0.90 m, respectivamente. Estos valores han permitido obtener la esbeltez (relación entre la altura y el espesor del muro) con valores de 2.5, 3.0 y 4.5. La inclinación de las jambas de hornacinas y ventanas fluctúa en el rango de  $86^\circ 30'$  a  $87^\circ 30'$  y en los vanos de las puertas varía de  $87^\circ$  a  $88^\circ$ . Los resultados obtenidos demuestran la aplicación de parámetros constructivos que fluctuaban en los rangos indicados, los que se repetían y perfeccionaban en el tiempo.

Los muros de secciones transversales con forma de paralelogramo, con paramentos inclinados en un mismo sentido, son los de mayor riesgo en cuanto a estabilidad, a diferencia de los de secciones trapezoidales, que por su forma e inclinación en ambos sentidos son más estables. Es gravitante la utilización del granito, cuyo peso unitario, como vimos, es de  $2700 \text{ kg/m}^3$ . Este valor y su origen en roca ígnea intrusiva mayor (petrogénesis) y la textura granular, compuesta de cristales equigranulares (petrografía) son garantía para lograr aparejos más depurados y vistosos, lo que además contribuye a la estabilidad de los muros y a su resistencia al intemperismo y la meteorización.



Figura 26. Aparejo que actúa como una cuña para dar estabilidad a las rocas laterales del Mausoleo Inka.



Figura 27. En el lado derecho, una roca de granito de gran tamaño; en el izquierdo, el muro de contención para dar estabilidad a la roca.





Figura 28. El aposento de la Ñusta; a la derecha, las escaleras de acceso al Torreón. El diseño es compatible con el requerimiento actual de arquitectura de ocho pasos (fotografía: Ruperto Márquez).

## 2. Detalles arquitectónicos y constructivos

Durante el recorrido de visita a la ciudadela, se perciben y observan detalles arquitectónicos y constructivos únicos y especiales que demuestran la capacidad creadora y técnica de los constructores para dar un toque de estilo singular y sugerir soluciones ante posibles contingencias de riesgo de las estructuras líticas. Ello colabora con la viabilidad sin restricciones en los circuitos peatonales en algunos casos y en otros asegura la estabilidad de las edificaciones apoyadas en las rocas aisladas. Así se materializó la planificación de la ciudad *inka*, previendo su perdurabilidad. Uno de los detalles que se observa con interés y cierto enigma constituye la presencia de un elemento estructural de líticos de perfiles curvilíneos ubicado entre dos rocas a la entrada del Mausoleo Inka que actúa a manera de una cuña para evitar el empuje y desplazamiento lateral de las mismas y asegurar la estabilidad del conjunto del Templo del Sol o del El Torreón. Otros detalles arquitectónicos y constructivos se aprecian en las figuras 26 a 29.



Figura 29. Templo de las Tres Ventanas de estilo megaciclópeo de cantería depurada.

## VI. Análisis de estabilidad: muestras

Los ingenieros *inka* no solo cuidaron el estilo constructivo de las edificaciones con estética y maestría en la colocación de los líticos, sino que además buscaron su perdurabilidad: fueron expertos en definir las condiciones de estabilidad de los muros, aplicando los principios de la estática de cargas relacionados directamente con la inclinación, altura y espesor de los muros, y con la esbeltez y arriostre de las elevaciones, obviamente considerando el peso unitario del granito. Para el análisis de la tecnología constructiva y la estabilidad de los muros, se han elegido dos muestras en base a consideraciones de carácter técnico: la primera corresponde al recinto de la *wayrana* doble, ubicada en el conjunto de Los Morteros y el Templo Principal, ubicado en el sector Urbano Alto.

### 1. La *wayrana* doble

Ubicada en el conjunto de Los Morteros, es un recinto de gravitante importancia por su envergadura y caracteres únicos. Ocupa la parte central de la *kancha* o patio, destacando sobre los demás por la altura de los mojinetes, dado que en su conjunto es más elevada (ver más adelante las figuras 30 a 34). Los muros laterales son inclinados, hasta la altura de 2.50 m, para luego continuar los mojinetes verticales de 5.00 m de altura. El estilo de aparejo es poligonal celular con mortero, siendo este una mezcla de tierra natural con arcillas utilizadas como aglutinantes a las que se ha adicionado como agregados arena gruesa y partículas de granito. El plano de distribución de la *wayrana* considera dos recintos simples, con un muro vertical divisorio, estructuralmente esbelto, de 7.50 m de altura, cuya función es además dar estabilidad y arriostre vertical a los dos mojinetes por la parte central. El frontis tiene luces libres de 7.10 m, espesor del muro de 0.85 m y longi-

tud lateral de 7.70 m; en la parte central del alineamiento frontal existe una pilastra de base cuadrada de 1.10 m x 1.10 m de lado y 2.10 m de altura, elemento donde posiblemente estuvo apoyada una viga de madera para soportar el alero y parte del techo. Las vertientes de los mojinetes tienen una inclinación de 55° para el montaje y estabilidad de la estructura de madera rolliza. Se utilizaron amarras de cuero fijadas a los aros de las clavijas y a las piezas cilíndricas laterales.

En cuanto al techo, visualizando el conjunto, se aprecia la proyección de los mojinetes para un techo típico a dos vertientes de diseño integral. En realidad, esta constituido por dos techos de una vertiente unidos por una cumbrera, ubicada en la parte superior del muro divisorio. El tipo de techo de la *wayrana* doble es singular: como no es factible utilizar tijerales del tipo par-nudillo, la solución considera madera rolliza inclinada y fijada en el extremo superior en una viga de madera colocada a lo largo de la coronación del muro divisorio y en el extremo inferior en una viga de madera de mayor diámetro ubicada en la parte baja, empotrada por los extremos en las cajuelas ubicadas en los muros laterales izquierdo y derecho. En la parte intermedia de la madera inclinada, se arriostraba y empotraba en ángulo recto un extremo de una pieza adicional de madera, empotrándose el otro extremo en el muro divisorio; esta pieza cumplía la función de una viga-tensor para evitar la flexión de la madera rolliza y, por consiguiente, el pandeo del techo. La elevación actual de los muros sugiere un techo de 10 m de largo en el frontis y 15 m de longitud total, siguiendo la inclinación de las dos vertientes. Al deducir el peso del techo, se considera un valor de 100 kg/m<sup>2</sup>, con posibles sobrecargas por la saturación de la cobertura de paja debido a lluvias, hielo y otros elementos. Con los datos indicados, se obtiene el área de la cobertura del techo: 150 m<sup>2</sup>, y el peso total: 15 000 kg, de los cuales el 50% incide



Figura 30. Vista lateral del conjunto Los Morteros, donde se distingue la elevación volumétrica de la *wayrana* doble.



Figura 31. *Wayrana* doble, constituida por dos recintos simples unidos por el muro divisorio del fondo; ver, además, la pilastra central para apoyo de la viga de madera y el techo.





Figura 32. Ventana del muro divisorio de la *wayrana* doble; al fondo, la ventana de observación astronómica.

sobre el muro divisorio y 25% sobre cada una de las vigas de madera del frontis. Esta condición permite deducir la carga del techo que incide en los muros laterales, un valor poco considerable en relación a las otras cargas, por lo que se ha obviado considerarlo en el análisis de la estabilidad de los muros inclinados (ver las figuras 30 a 34).

Respecto a la estabilidad de los muros de la *wayrana* doble, en el estilo inclinado de la elevación de los muros concita interés analizar el comportamiento de las cargas que soportan las estructuras líticas y su incidencia en dicha estabilidad, para lo cual se ha elegido el muro del lado derecho, visualizado desde el frontis del recinto de Los Morteros. Esta estructura lítica inclinada tiene una altura de 2,50 m y una inclinación de  $86^{\circ}20'$ , y soporta el peso del mojinete de proyección vertical. Considerando

las características físicas y el estilo constructivo de la *wayrana*, se analiza la estabilidad al volteo, por tanto, es imprescindible ubicar el tercio central<sup>5</sup> de la base y la distancia de la línea de la resultante de las cargas verticales, constituidas por el peso propio del muro y del mojinete y las posibles cargas vivas que soporta; no se tienen cargas horizontales de empuje. Es condición *sine qua non* que la línea de la resultante esté ubicada en un rango de variación entre los límites del tercio central, pues, de lo contrario, la estructura del muro corre el riesgo de fallar por volteo bajo estas horizontales de empuje. Bajo estas condiciones se analiza la muestra elegida.

La sumatoria de las cargas verticales referidas anteriormente tiene una resultante cuyo eje vertical debe proyectarse en un punto de la base comprendido dentro de la tercera parte del espesor del muro ubicada en la parte central de la base. En el contexto de la tecnología actual, se aplica el teorema de momentos en relación al punto o, situado a la izquierda del muro, con una proyección horizontal de la inclinación de 0,14 m proyectada en la base. Se debe ubicar el extremo más cercano del límite del tercio central de la base que sirve de apoyo a las cargas del muro inclinado y del mojinete. El 50% del peso total del mojinete soporta el muro inclinado, en este caso 18 593 kg, valor que se obtiene considerando el espesor de 0,85 m y el peso específico de  $2500 \text{ kg/m}^3$  (para el aparejo poligonal celular con mortero). La distancia al límite más desfavorable del tercio central (Tc) referido al punto o se deduce como sigue:

<sup>5</sup> El tercio central se refiere al arranque de la elevación del muro, que al apoyarse sobre la cimentación forma un ángulo de inclinación con la línea horizontal de la base, de tal forma que la abertura del ángulo tiene directa relación con la altura del muro y con la estabilidad del mismo; por tanto, a mayor ángulo, el muro es más estable.

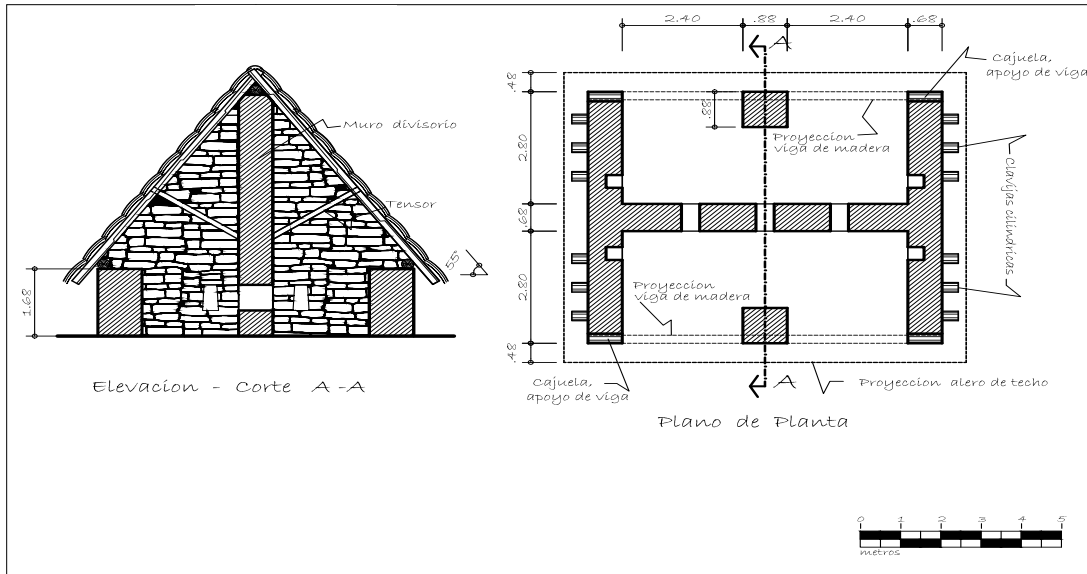


Figura 33. Wayrana doble. Elevación (corte A-A) y plano de planta.

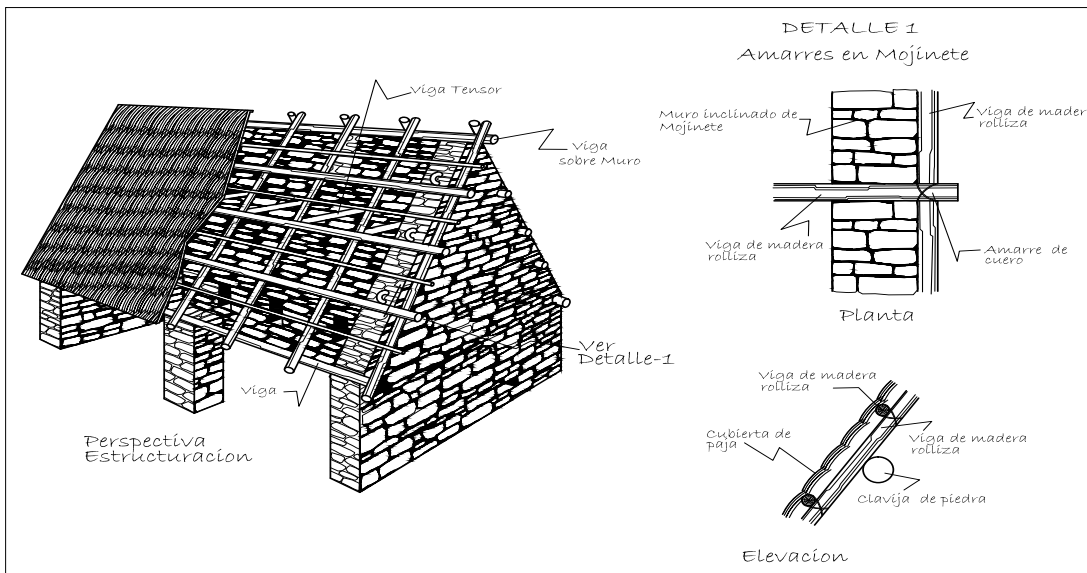


Figura 34. Wayrana doble. Perspectiva de estructura lítica y techo.

$T_c = 14 \text{ cm} + 85 \text{ cm} / 3 = 42.34 \text{ cm}$  (aplicación del teorema de momentos,  $M_o$ )

$M_o = R \times p_e \times D = p_e (p_m \times d_m + p_{d1} + p_{d2} + p_{d3})$

$M_o$  = sumatoria de los momentos

$R$  = resultante de las cargas verticales

$p_e$  = peso específico del muro

$D$  = distancia a la línea de la resultante de las cargas referida al punto  $o$

$p_m$  = carga del peso del mojinete

$d_m$  = distancia de la carga, del peso del mojinete, referido a  $o$

$p_d$  = momentos parciales, considerando la sección transversal del muro

Aplicando esta fórmula, se tiene<sup>6</sup>

$$23\,838 \text{ kg} \times D = 10\,532 \text{ kg/m}^3$$

$$D = 0.4418 \text{ m}$$

$$D > T_c; 44.18 \text{ cm} > 42.34 \text{ cm}$$

Se concluye entonces que el muro es estable, dado que la línea vertical de la resultante está comprendida dentro del rango de variación entre los límites del tercio central. En este caso, a 1.84 cm del límite izquierdo del tercio central y a 44.18 cm del punto  $o$ , al que está referida la aplicación del teorema de momentos. Es importante analizar el caso hipotético de considerar el muro y el mojinete con la misma inclinación de  $86^\circ 20'$ ; en esta hipótesis, se prescinde de la verticalidad del mojinete, asumiendo una altura total de 7.50 m y una proyección horizontal de 0.42 m en la línea del apoyo de la base del muro. Bajo estas condiciones, se obtienen las distancias de ubicación de la resultante (0.675 m) y el límite del tercio central (0.783 m) en relación al punto  $o$ , valores numéricos que demuestran que la

<sup>6</sup> Se ha obviado insertar las operaciones aritméticas de la fórmula con el objeto de simplificar el desarrollo numérico.

línea de la resultante se ubica fuera de los límites del tercio central, determinando la posible pérdida de estabilidad del muro. Esta conclusión demuestra el porqué de los mojinetes verticales.

## 2. El templo principal

Como su nombre indica, este templo tiene una significación sagrada y ceremonial. Por sus características arquitectónicas y constructivas, se define como una *wayrana* simple, constituyendo uno de los recintos más importantes del sector Urbano Alto, que representa el sincretismo religioso y la expresión de la concepción de la cosmogonía del espacio-tiempo sagrado andino (ver mas adelante las figuras 35 a 38). Este recinto es el más controvertido en lo referente a su estabilidad, ya que tiene una variedad de estilos de aparejos –como el megacíclope poliédrico canteado– ubicados en la base de los muros laterales que luego se completa con líticos de formas geométricas regulares de fina cantería; así mismo, el muro del fondo es de estilo rectangular intermedio, con nichos u hornacinas alternados. Es preocupación de acuciosos y conspicuos investigadores dar una explicación técnica coherente sobre el estado actual y una posible intervención en relación a la estabilidad de este templo, al ser perceptible el hundimiento presentado en la esquina del fondo (lado derecho), hundimiento que ha ocasionado el reacomodo en el tiempo de los líticos de ese sector, mostrando separaciones de las juntas verticales y horizontales del muro.

No es posible precisar la antigüedad de esta alteración, por cuanto en las fotografías de Bingham (1912) ya se aprecia la pérdida de horizontalidad de la coronación del muro, así como en las de Chambi (1925). Se tiene información confirmada del Ministerio de Cultura respecto al tema respecto a que en la parte más crítica, coincidente con la esquina del fon-

do, lado derecho, se han colocado testigos con una antigüedad de 30 años. En esa ocasión, se detectó el hundimiento de 0.40 m. El monitoreo constante de estos testigos sirve para verificar periódicamente los posibles cambios, que no se han registrado desde entonces; por tanto, la estructura lítica está exenta de un mayor hundimiento.

El marco referencial anterior es vital para el análisis de la estabilidad de los muros laterales inclinados ( $86^{\circ}20'$ ), considerando como una referencia válida y formal las dos piezas únicas y similares colocadas al empezar estos muros que abarcan gran parte de los mismos. Ambos tienen una altura promedio de 2.50 m, espesor de 0.85 m y longitudes en planta de 3.20 m para el muro izquierdo y 3.60 m para el derecho; por consiguiente, en la misma posición o Los tres muros del templo tienen la altura de 4.05 m. Considerando esta constante, existen encima de las referidas piezas muros de 1.55 m de altura en donde se ubican seis hileras de líticos de estilo rectangular pseudoisódomo, además de cinco hornacinas que en su conjunto forman las bases de los mojinetes del techo.

Es de interés técnico analizar el comportamiento del suelo donde se ubica el Templo Principal, en particular, la esquina derecha del muro del fondo. Se ha recurrido a un análisis preliminar considerando las normas peruanas de estructuras, con lo que se obtienen datos del estado físico actual y las deducciones de las cargas. Los valores se contrastan con los términos y parámetros de las normas. Destaca la presencia de la pieza lítica ubicada en el muro del fondo, en referencia a la esquina derecha, donde se ha perdido la secuencia horizontal y vertical de las juntas de los líticos, ocasionando el desplazamiento de las hileras. En el tema de suelos, se analiza la tecnología y los criterios aplicados en la distribución de las cargas del muro del fondo. De manera especial, se tiene una pieza lítica ubicada en la parte central,

cuyas dimensiones son: 4.25 m de largo, 1.40 m de altura y 1.00 m de espesor, y cuyo peso llega a 16 toneladas. Esta pieza forma parte del muro del fondo de 4.05 m de altura y sostiene el peso de la parte superior del mismo, que abarca 0.25 m de espesor y 2.65 m de altura. Además, por su ubicación y forma geométrica, actúa como un ensanche adicional de la base del muro, abarcando 0.75 m de ancho a lo largo del lítico.

Así mismo, se tiene el muro del fondo de 0.90 m de espesor, Al descontar el ancho que se apoya sobre el lítico (0.25 m), se puede establecer el área neta de presión admisible o presión de trabajo en un ancho de 0.65 m proyectado a lo largo del muro, además del apoyo directo al suelo del área que corresponde al lítico (que tiene 4.25 m de longitud y 1 m de ancho). Imaginariamente, se podría considerar el muro del fondo como una estructura constituida por dos partes yuxtapuestas al interior de la sección transversal, con diferente presión admisible. Para la deducción de las cargas, se considera el peso específico de  $2700 \text{ kg/m}^3$ , obteniéndose cargas admisibles de  $5569 \text{ kg/m}^2$  para el lítico central (incluido el muro de 0.25 m de ancho) y  $7108 \text{ kg/m}^2$  para el resto del muro (de 0.65 m de ancho). Bajo estas condiciones, se produce la superposición del bulbo de presiones, dando lugar a la sumatoria de las cargas, de tal manera que la resultante alcanza un valor de  $12\ 677 \text{ kg/m}^2$ , lo que equivale a una presión admisible de  $1.27 \text{ kg/cm}^2$ . Considerando el peso adicional estimado de la cimentación de  $4455 \text{ kg/m}^2$ , se deduce una carga de contacto de  $17\ 132 \text{ kg/m}^2$ , equivalente a  $1.71 \text{ kg/cm}^2$ . Al considerar un coeficiente de seguridad, se podría establecer un valor de  $2 \text{ kg/cm}^2$  para la capacidad de carga del suelo. Es importante expresar que no ha sido posible obtener los estudios de exploración de los cimientos del Templo Principal para establecer la posible unión de las piezas megalíticas con el sustrato de la roca matriz.

En un marco teórico que considere la mecánica de suelos, es posible referirse a la microzonificación sísmica y a los estudios de sitio, que establecen condiciones geotécnicas tomando en cuenta las propiedades mecánicas del suelo, el espesor del estrato, el periodo fundamental de vibración y la velocidad de propagación de las ondas sísmicas de corte. Bajo este contexto, se establecen cuatro tipos de suelos, de los cuales, el de Machupijchu compatibiliza con el suelo de perfil (S<sub>1</sub>), constituido por rocas o suelos muy rígidos, con una resistencia a la compresión no confinada de 5 kg/cm<sup>2</sup>. Por las características de los suelos de la ciudadela, se establece que en algunos sitios el macizo granítico fue cubierto por un manto de materiales de origen coluvial y aluvial, con detritos ocasionados por los procesos de meteorización e intemperismo de las rocas. Analizando este tipo de suelo, es posible afirmar que en tiempo pretérito tuvo un comportamiento uniforme con una buena ca-

pacidad portante, alterándose su composición mecánica original debido al fenómeno de la sufusión originado por la infiltración de aguas pluviales. Esto ocasionó pérdida permanente de componentes del suelo, por tanto, se produjo erosión interna con disminución paulatina de su capacidad admisible (resistencia del suelo), afectando el área de confluencia de la esquina.

Con una visión empírica, es posible analizar el comportamiento estructural del lítico central –al asumir su condición de baluarte inamovible– como la continuación del substrato de la roca matriz, es decir, el lítico actúa estabilizando el muro del que forma parte. Asumiendo la hipótesis de una pieza suelta, esta distribuiría las cargas con una presión admisible de 0.56 kg/cm<sup>2</sup>. Este valor es poco significativo en relación a la presión real de contacto con el suelo, siendo esta de 2 kg/cm<sup>2</sup>. Observando las fotografías (figuras 35 a 38), es posible apreciar



Figura 35. Templo Principal; al fondo se observa una piedra megalítica central; a ambos lados otras dos piezas líticas del mismo tamaño y estilo de unión con los muros laterales. En la esquina derecha, al fondo, se alteró el alineamiento horizontal y vertical de las juntas.





Figura 36. Detalle del Templo Principal: dos piezas líticas, la primera tiene 1.00 m de altura; la segunda 4.25 m de largo, 1.40 m de alto y 1.00 m de espesor y pesa 16 toneladas. Ambas soportan parte del muro; se percibe un asentamiento diferencial permisible.



Figura 37. Detalle del Templo Principal: esquina derecha con hundimiento del muro y reacomodo de las piezas líticas ocasionado por la disminución de la resistencia del suelo.



Figura 38. Detalle del Templo Principal: apoyo del muro del fondo sobre la pieza megalítica central, afectando 0.25 m de su espesor.

y analizar el paramento del fondo, donde se distinguen dos piezas de líticos semejantes con forma de cubo ubicadas a los costados del lítico central, cuyas dimensiones son: 1.25 m de largo, 1.00 m de altura y 0.85 m de espesor. Estos líticos también soportan parte del muro del fondo en la longitud que les corresponde, de forma similar al lítico central. Siguiendo un recorrido visual de izquierda a derecha, se puede establecer que el primer y el segundo lítico han sido afectados por asentamientos diferenciales compatibles con la tecnología actual, a diferencia del tercero, que muestra evidencia de hundimiento de 33 cm, valor que se obtiene al contrastar la altura visible (0.67 m) con la que corresponde al primer lítico. Con equipos de precisión se ha establecido la altura promedio de hundimiento en 40 cm.

Con referencia al tipo de techo del Templo Principal, visualizando el frontis, se aprecian en la parte superior de los muros laterales seis hileras de líticos que constituyen la base de los mojinetes con



Figura 39. Piezas megalíticas de los muros laterales del Templo Principal y del Templo de las Tres Ventanas; cajuelas para el empotramiento de vigas de madera y, además, proyección inclinada de los mojinetes. En ambos casos, la solución al tipo de techo es a dos vertientes.

una inclinación de  $57^{\circ}39'$ ; empiezan en las cajuelas esculpidas en las dos piezas megalíticas laterales ubicadas a una altura de 2.50 m y luego los tres muros alcanzan la altura de 4.05 m. El tercio superior de los muros tiene el mismo estilo de aparejo, condición que define el tipo de techo a dos vertientes, siendo la de mayor área y longitud la proyectada hacia una viga de madera a empotrarse por sus extremos en las cajuelas y apoyarse en la parte intermedia en un posible soporte central, mientras que la de menor área se apoyaría en el muro del fondo. La solución es semejante a la de los techos del *markawasi* y de las *wayrana* simples ubicadas en las cercanías del conjunto de la Roca Sagrada. Las partes faltantes de los mojinetes debieron ser verticales para cum-



Figura 40. Techo a dos vertientes de diferentes longitudes laterales. Se muestra el perfil de una *wayrana* simple, próxima a la Roca Sagrada. Es posible considerar este diseño para el techo del Templo Principal.

plir la exigencia técnica de no comprometer la estabilidad de los muros. Es posible entonces completarlos con el estilo poligonal celular, de forma similar al mojinete del Templo de las Tres Ventanas, donde se aprecia la proyección de las dos vertientes del techo. Es, por tanto, un referente de carácter técnico. Con los datos numéricos obtenidos *in situ*, se dedujo geoméricamente las longitudes de las dos vertientes: 8.67 m la de mayor dimensión, que debe fijarse en una viga de madera, y 6.84 m la otra vertiente, con apoyo en el muro del fondo (figuras 39 y 40).

Para la estabilidad de muros del Templo Principal, se considera el muro lateral izquierdo, aplicando la misma metodología de los casos anteriores. Se tiene los siguientes datos: altura del muro 4.05 m, espesor 0.85 m, inclinación  $86^{\circ}20'$ , proyección horizontal en la base 0.28 m y peso específico  $2700 \text{ kg/m}^3$ . La sección transversal de los muros es un paralelogramo.

Aplicando el teorema de momentos en relación al punto o –como en la *wayrana* doble–, se obtiene una distancia de la ubicación de la resultante de las cargas (D) de 53.42 cm, así mismo queda definido el límite del tercio central (Tc) en 56.33 cm, referido al mismo punto. Es importante considerar la condición del lítico de la base, de 2.50 m de altura, al constituir un baluarte natural inamovible que garantiza la estabilidad del muro en su conjunto. El plano de planta y su elevación se aprecian en la figura 41.

Analizando los resultados matemáticos, se obtiene que la distancia donde se ubica el eje de la resultante de las cargas verticales es casi coincidente con la ubicación del límite del tercio central, lo que demuestra que el muro todavía mantiene la estabilidad al volteo, tanto más si se considera la pieza megalítica que, por su gran tamaño, peso excepcional y condición monolítica, garantiza la estabilidad del muro.

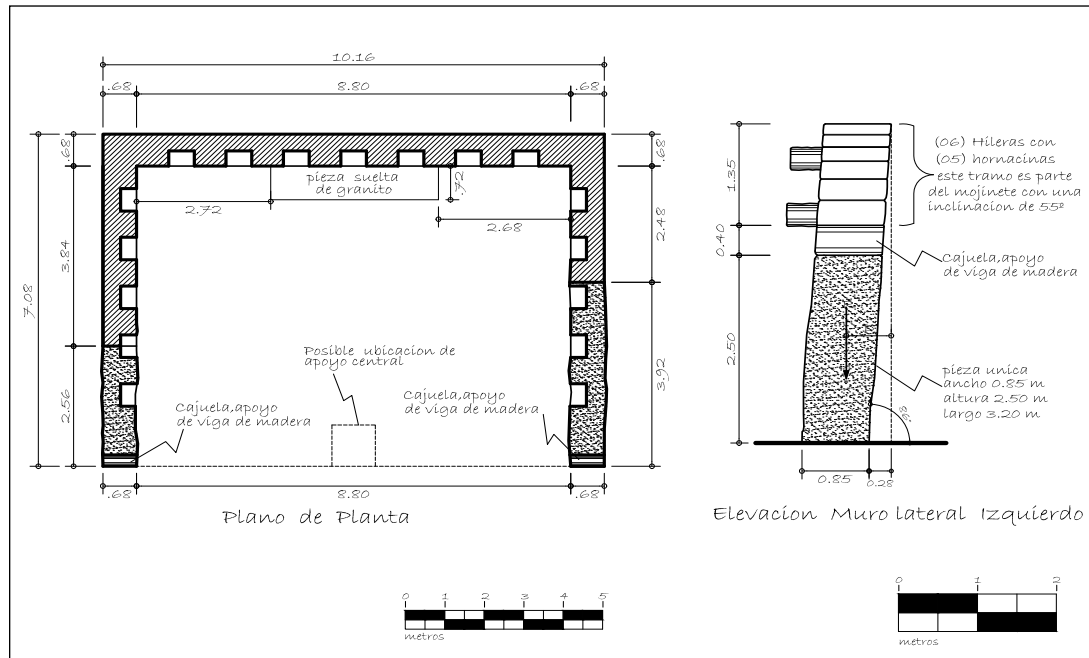


Figura 41. Templo Principal. Plano de planta y elevación del muro lateral izquierdo.





Organización  
de las Naciones Unidas  
para la Educación,  
la Ciencia y la Cultura

**Comisión  
Nacional  
Peruana**

de Cooperación  
con la UNESCO



PERÚ

Ministerio de Cultura

Dirección  
Desconcentrada de Cultura  
de Cusco