

Estado de conservación del *Large Temple* de Sikait, Egipto. El gran templo de talco de Wadi El-Gemal

Estefanía Martín García, Luis Jordá Bordehore, Adriana Molina Pérez, Delia Eguiluz Maestro, Joan Oller Guzmán

Resumen: Se presenta el estudio del el *Large Temple*. (s. I a.n.e – s. I n.e.), uno de los templos más singulares del yacimiento de Sikait (desierto oriental de Egipto). La concurrencia de múltiples grietas motivó este análisis no destructivo, cuyo objetivo principal fue la inspección, seguimiento y prediagnosis global de su estado de conservación. Debido a la naturaleza excavada del templo, se implementó una metodología híbrida que integra la ingeniería de minas y la arquitectura, combinando los estándares de la mecánica de rocas con el diagnóstico patológico arquitectónico (normas UNE 41805 IN). En cuanto a las técnicas utilizadas: para la documentación geométrica se empleó fotogrametría SfM y levantamiento tradicional; para la caracterización del macizo, estación geomecánica y esclerómetro; y para la inspección técnicas como la cartografía de lesiones, endoscopia, ensayos Lutton, monitorización termohigrométrica y control de fisuras (regletas y testigos de yeso). La diferenciación entre juntas de origen geológico (bandas o vetas blandas) y fracturas o grietas mecánicas (inducidas por las tensiones) permitió constatar la precariedad estructural del monumento. Los cálculos analíticos demuestran que el templo ya presentaba unas condiciones de inestabilidad intrínseca en el momento de su construcción. El posterior deterioro y disgregación de estas vetas, por fatiga y/o solicitaciones externas — como el posible derrumbe del farallón rocoso superior—, transformó estas discontinuidades geológicas en grietas críticas. Las conclusiones confirman la correlación entre las bajas resistencias esclerométricas entre bandas y el avanzado estado patológico del conjunto, identificando la columna y pared sur como los focos más vulnerables. Se determina que el templo presenta una inestabilidad de carácter endémico (diseño de mínimos) e intrínseco (geológico) que justificaría su estado inacabado. El estudio pluridisciplinar que aquí se presenta, representa la primera aproximación científica al proceso patológico del hemispeos más oriental del Alto Egipto.

Palabras clave: arquitectura excavada, arquitectura Antiguo Egipto, métodos no destructivos, Mecánica de Rocas, Wadi Sikait, conservación y restauración preventiva

State of conservation of the Large Temple of Sikait, Egypt. The great talc temple of Wadi El-Gemal

Abstract: This article presents a study of the Large Temple (1st century BC - 1st century AD), the most unique temples of the site of Sikait (Eastern Desert of Egypt). The presence of multiples fractures and cracks prompted a non-destructive analysis aimed at the inspections, monitoring, and preliminary diagnosis of its conservations state. Due to the excavated nature of the temple, a hybrid methodology combining mining engineering and architectural pathology was implemented. Geometric documentation was conducted through SfM photogrammetry and traditional surveying, while rock mass characterization included geomechanical station analysis and Schmidt hammer testing. Additional inspection techniques comprised damage mapping, endoscopy, Lutton tests, thermos-hygrometric monitoring, and crack monitoring. The differentiation between geological joints and stress-induced mechanical fractures revealed the structural precariousness of the monument. Analytical calculations suggest that the temple already presented intrinsic instability at the time of its construction. The deterioration of these geological discontinuities, possibly aggravated by the collapse of the upper rocky cliff, later transformed them into critical cracks. The conclusions confirm the correlation between low sclerometric strength in the bands and the advanced pathological condition of the complex, identifying the column and the south wall as the most vulnerable areas. The temple's intrinsic geological instability and minimal structural design may explain its unfinished state. This multidisciplinary study provides the first scientific assessment of the pathological processes affecting the easternmost hemispeos of Upper Egypt.

Keywords: excaved architecture, Ancient Egyptian architecture, non-destructive testing methods, Rock Mechanics, Wadi Sikait, preventive conservation and restoration

Estado de conservação do Large Temple de Sikait, Egito. O grande templo de talco de Wadi El-Gemal

Resumo: Apresenta-se o estudo e o diagnóstico preliminar de um dos templos mais singulares do sítio de Sikait (deserto Arábico do Egito), o Large Temple. Este foi construído entre o final do séc. I a.C. e o início do séc. I d.C., encontrando-se escavado na vertente oriental do wadi do assentamento de Sikait. Desde o início do século XXI, os critérios da conservação curativa regem as intervenções de consolidação do templo. No entanto, a presença de múltiplas fraturas levou ao início de uma análise não destrutiva e de caráter pluridisciplinar, exposta no presente artigo. Como resultado do trabalho, foi possível distinguir as fraturas de origem "geológica" das fraturas mecânicas induzidas por tensões. Constata-se, através dos cálculos analíticos e empíricos realizados, que o templo apresentava condições precárias de estabilidade no momento da sua construção, com numerosas juntas ou descontinuidades geológicas a atravessar a escavação. Estas fraturas naturais (geológicas) voltaram posteriormente a ativar-se devido à ação de solicitações exteriores, provavelmente um grande desabamento do farilhão rochoso superior, em conjunto com a própria degradação do material. A estabilidade atual da cobertura foi avaliada combinando diversas metodologias.

Palavras-chave: arquitetura escavada, arquitetura do Antigo Egito, métodos não destrutivos, Mecânica das Rochas, Wadi Sikait, conservação e restauro preventiva

Introducción

—*Antecedentes y objetivos de la investigación*

Las campañas arqueológicas y las intervenciones de conservación y restauración, que desde el año 2018 se suceden en el yacimiento de *Sikait*, situado en el parque nacional *Wadi El-Gemal*, se engloban dentro del *Sikait Project* (Oller et al. 2019). Este proyecto cuenta con un equipo pluridisciplinar que aborda la investigación del asentamiento desde múltiples enfoques, como el territorial, geológico, gemológico, socio-económico, arquitectónico y arqueológico, entre otros.

El objetivo principal de esta investigación es establecer las bases de las prospecciones diagnósticas del singular *Large Temple* mediante una metodología híbrida que combina la ingeniería de minas y la arquitectura. El fin último es definir los criterios para una futura intervención de restauración. Como objetivos parciales se plantean la documentación y caracterización técnica del templo, la evaluación de su estabilidad estructural y la identificación y control de sus puntos críticos. De esta forma, se aportan datos inéditos sobre la estabilidad estructural del hemispeos, ofreciendo una metodología extrapolable al estudio de otros templos excavados del Alto Egipto.

En resumen, este trabajo propone un protocolo de diagnóstico estructural aplicado a templos excavados en roca, combinando herramientas de análisis arquitectónico y principios procedentes de la ingeniería de minas.

• Restauración y conservación curativa

Las primeras intervenciones de conservación conocidas en el templo se llevaron a cabo a raíz de las excavaciones de principios del s. XXI por el equipo dirigido por S. E. Sidebotham (*University of Delaware*). Estas consistieron en el restablecimiento de lagunas murarias y el recalce de estructuras mediante el relleno de las ausencias materiales con ripio y piedra en seco. Del mismo modo, en 2008 se sellaron las grietas del fuste sur con mortero, y con mampostería en seco se realizó un encamisado hueco donde se ubicaba la columna norte.

A partir de 2016 nace el *Sikait Project* en el área de H*istoria Antigua del Departament de Ciències de l'Antiguitat i l'Edat Mitjana de la Universitat Autònoma de Barcelona* en colaboración con el *Polish Centre of Mediterranean Archaeology* (Sikait Project 2024), lo que permitirá el estudio y desarrollo continuado, desde 2018, de actuaciones de mantenimiento bajo los mismos criterios adoptados en intervenciones anteriores. Se prioriza el uso de técnicas constructivas preexistentes mediante el empleo de materiales autóctonos, sostenibles y compatibles con la obra histórica. Así, tras las excavaciones del templo en 2020, se iniciaron las intervenciones en las estructuras exteriores entre 2022 y 2023.

De forma sistemática se han llevado a cabo consolidaciones anuales tanto de las estructuras excavadas, para garantizar su protección; como de las exentas para evitar daños a corto y medio plazo (conservación curativa). Además, se han restaurado edificaciones que manifestaban un cuadro patológico desfavorable con la finalidad de recuperar la legibilidad del conjunto y preservar las estructuras edilicias del yacimiento, garantizando la seguridad de uso.

Además, se debe tener en cuenta que los tiempos de actuación se reducen a unas pocas semanas cada año y la logística necesaria para estos trabajos es compleja al encontrarse situados en una zona desértica remota, alejada de núcleos poblacionales con recursos materiales y medios auxiliares para la restauración. Por todo ello, las intervenciones efectuadas son las mínimas e imprescindibles, y aquellas que requieren menor cantidad de maquinaria.

Para comprender la relevancia del templo dentro del asentamiento, es necesario contextualizar el sitio de *Sikait* y profundizar en la arquitectura del hemispeos. Por este motivo, el artículo se estructura de la siguiente forma: en primer lugar se presenta el estado de conservación del templo junto con su contexto histórico y arquitectónico;

posteriormente se expone la metodología de análisis y el conjunto de ensayos y prospecciones realizados; a continuación, se presentan los resultados del diagnóstico y la identificación de los puntos críticos; finalmente se discuten las implicaciones de estos resultados y las futuras líneas de investigación y conservación.

— *Contexto histórico y geográfico*

Durante el Imperio Romano el sitio de *Sikait* o *Senskis* se situaba en la región conocida como "*Smaragdus*" tratándose de un asentamiento dedicado a la minería de las esmeraldas (Oller *et al.* 2023). El material arqueológico hallado demuestra que las actividades no se limitaban únicamente a la extracción, sino que posiblemente se tratase de un complejo artesanal de clasificación y procesado de minerales. Su localización, en las laderas de un valle seco o "*wadi*", es estratégica respecto a la que sería una próspera ruta comercial de caravanas, que cruzaría desde el interior del territorio egipcio hacia la zona portuaria del Mar Rojo, donde domina el sitio de Berenike.

Su fundación data de entre el s. I a.n.e. y el siglo I n.e., pero el momento de mayor crecimiento urbanístico se fecha a partir del s. IV y s. VI n.e., con la consolidación del entramado urbano adaptado a la orografía mediante terrazas, rampas y escalonamientos. Hasta el momento se han identificado más de ciento cincuenta edificios (Oller *et al.* 2024; 2023) de carácter secular y cuatro templos que presiden el núcleo urbano en su desarrollo meridional. Siguiendo un eje ascendente desde el mar Rojo hacia el Nilo, se localizan en la ladera oriental el *Small Temple*, el *Mountain Shrine* y el *Large Temple*; mientras que en un promontorio del meandro occidental se halla el *Southern Temple*, datado de época altoimperial.

Tras el posible declive de las rutas comerciales y el paulatino abandono de las minas el asentamiento de *Sikait* fue abandonado según las evidencias arqueológicas (Oller *et al.* 2021).

—*Arquitectura del Large Temple*

El *Large Temple* es un edificio de tipo hemispeos que se excavó y labró entre finales del s. I a.n.e. e inicios del s. I n.e. en la ladera oriental del *Wadi Sikait*, junto a dos capillas adyacentes y varios nichos diseminados alrededor de un afloramiento de roca blanda de talco esquisto. Para acceder al templo desde el *wadi* se disponía de un sistema de escalinatas y terrazas pétreas que salvaban el desnivel.

El templo asemeja en su primera crujía con el pronaos de un dístilo *in antis*. Su planta es ligeramente rectangular y tripartita, de unos 5,40 m de ancho por 9,50 m de largo, y alcanza una superficie interior aproximada de 49,50 m^2. Su altura libre disminuye de los 3,50 m del acceso a los 2,50 m en el extremo más profundo. El sistema estructural podría considerarse una composición trilítica basada en columnas y arquitrabes confinados en una envolvente muraria continua, pero al tratarse de una construcción totalmente horadada en la roca hallamos sus paralelos en los apuntalamientos naturales al propio proceso de excavación de cuevas, minas y otras galerías subterráneas como hipogeos. Su doble condición monomaterial y monolítica, la equipara a una estructura hiperestática con momentos de empotramiento perfecto en sus hipotéticas uniones.

El templo se divide en tres naves formadas por paredes laterales labradas aplomadas y macizos rocosos excavados a modo de columnas y pilares. Cabe destacar que en sus paramentos presenta numerosas hornacinas y concavidades, inscripciones e iconografía relacionada con la toponimia del lugar. Las naves tienen luces o vanos desiguales; la norte y la central superan los 2,00 m de luz (distancia entre ejes) y; la nave sur cubre aproximadamente 1,50 m. Las naves se dividen transversalmente en cuatro crujías: la primera parece haber perdido el par de columnas entre las antas y presenta un voladizo de unos 3,20 m, lo que genera una condición estructural crítica cuyo comportamiento depende de las características del macizo rocoso. La segunda crujía la delimitan dos columnas de sección circular y dos pilares al interior, que salvan una luz de 2,30 m; la siguiente crujía inicia la pérdida de paralelismo y cubre del orden de 1,80 m; y la última se corresponde con la pared de cierre de la cavidad, formalizada con dos capillas con altares y una tercera capilla inacabada (no se labró el altar sur), que van de los 2,20 m a los 2,70 m como consecuencia de dicha irregularidad. Estos espacios también están divididos en tres niveles, que van desde los 3,40 m a los 2,60 m de altura libre y están vinculados entre sí por peldaños. La fachada del templo está labrada en la misma roca y se caracteriza por tener dos pilastras semicirculares que flanquean la oquedad del acceso (de unos 4,40 m de ancho por 3,80 m de altura hasta el capitel) a modo de cierre de las antas. En el interior, las dos columnas mencionadas antes, presentan un fuste liso de sección circular (ni poligonal ni acanalado) cuyo diámetro medio es 1/4 de su altura. Las proporciones generales (dórico primitivo), más que ptolemaicas, remiten a las egipcias del 3er y 4º orden (Gardner 1853: 293-393; Prisse d'Avennes 1868-1877; Lepsius 1849) debido a la pronunciada éntasis, aunque sin plinto. Columnas y pilastras están esculpidas de una sola pieza y disponen de capiteles sin ornato, próximos al orden toscano. El cielo o techo del templo mantiene la horizontalidad del plano hasta el extremo más profundo de la cavidad. En el exterior, la fachada muestra unos mechinales en la parte superior que apuntan a la existencia de un entablamento y/o frontón de mampostería según el tipo compositivo de los hemispeos o speos. Son ejemplos plausibles los egipcios de Derr o Artemidos (*wadi Bat el-Baqara*) y *el-Kanais* (*wadi Abbad*), u otros nabateo-romanos clásicos [Figura 1].

En el caso de las arquitecturas excavadas en roca, el comportamiento estructural del edificio no puede

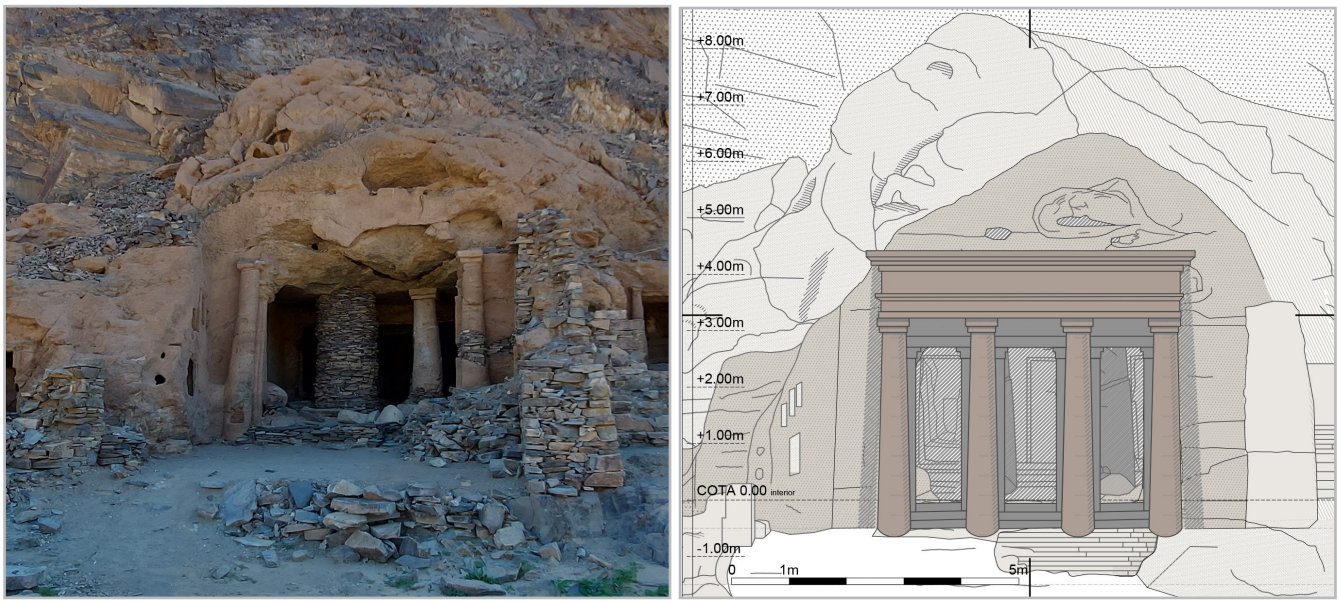


Figura 1.- Comparativa del estado actual e hipótesis reconstructiva de la fachada basada en el templo de *Dushara* situado en el *Wadi Musa*, cerca de *Little Petra* (*Siq al-Barid*) debido a sus proporciones similares (aunque no de sus dimensiones). Izquierda: fachada actual del templo, con las pilastras laterales y la pérdida del par de columnas centrales entre las antas; al fondo se distingue la columna sur recalzada y la columna de mampostería que sustituye a la columna norte tras su desplome. Derecha: interpretación gráfica del frontispicio completo.

analizarse de forma independiente del macizo geológico que lo contiene. La estabilidad del templo depende, por tanto, de la interacción entre la geometría excavada y los sistemas de discontinuidades preexistentes del afloramiento rocoso, que condicionan el comportamiento estructural (Sani *et al.* 2012).

Análisis geomécanico y arquitectónico con métodos no destructivos de reconocimiento y prospección *in situ*

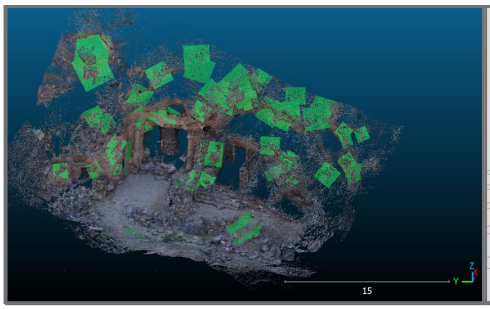
—*Aproximaciones metodológicas y acotación del sitio*

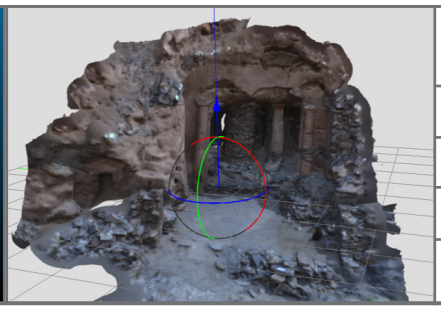
En enero de 2003, el Parque Nacional *Wadi El Gemal* fue declarado Área Protegida según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) y en virtud de la Ley 102/1983 de los Protectorados Naturales. Dado que el sitio arqueológico de *Sikait* se ubica en dicho parque y posee un gran valor patrimonial, se optó por una toma de datos no destructiva basada en observaciones y mediciones *in situ*, sin extracción de muestras.

La escasez de recursos, condicionada por el lugar y el formato de las campañas, condujo a un acercamiento tradicional mediante metodologías estandarizadas que hibridan la ingeniería de minas y el estudio de lesiones arquitectónicas. De la primera se aplicó el estándar de la mecánica de rocas y el análisis de estabilidad, cuya fase fundamental es la estación geomecánica — basada en la caracterización de la resistencia de la roca (UNE 22950), orientación de estratos, rugosidad y grado de meteorización— seguida del análisis de esfuerzos. De la segunda, se aplicó el método basado en el proceso de diagnóstico patológico regulado por las normas UNE 41805 IN (Diagnóstico de edificios) y el Método SCCM de restauración monumental (Gonzàlez 1999). Ambos enfoques coinciden en una estructura de conocimiento previo y toma de datos (caracterización y cartografía de daños), otra fase analítica y de diagnóstico (ensayos y reflexión) y finalmente el dictamen y propuesta de restauración. Esta metodología dual ha demostrado ser plenamente compatible y contrastable.

Para la documentación base, aparte del levantamiento ortofotográfico inicial complementado con fotografías con luz rasante y planimetrías vectoriales[1], se generó una nube de puntos mediante escaneado con sensor LiDAR de *smartphone* (sistema iOS) y fotogrametría *Structure from Motion* (SfM), referenciada localmente respecto al Norte [Figura 2]. Estos modelos tridimensionales permiten revisitar virtualmente el templo y ofrecen mayor definición de las irregularidades y deformaciones, así como inspeccionar sistemáticamente (mediante yuxtaposición de datos anuales) la evolución de los daños.

Tras la toma de datos previa se emplearon técnicas de inspección —como la endoscopia, esclerometría y ensayos *Lutton*— que completaron el diagnóstico patológico basado en la cartografía de lesiones con mapeo tradicional. Finalmente, la estabilidad se evaluó mediante la monitorización con testigos de yeso, regletas de control y registros termohigrométricos. Este flujo de trabajo, con margen de mejora, permitirá alcanzar una diagnosis más madura en futuras campañas.





	Eje X	Eje Y (Norte M)	Eje Z (vertical)
Punto 1	0	0,0848 m	0
Punto 2	-0,0848 m	0	0
Punto 3	0	- 0,0848 m	0
Punto 4	0,0848	0	0

Figura 2.- Coordenadas de los puntos de referencia para escalado y orientación mediante SfM y medida de discontinuidades en nube de puntos en modelo tridimensional (programa Cloud Compare).

—*Caracterización geológica y petrográfica*

A nivel geotectónico *Sikait* está situado en el extremo sud-este del desierto Oriental egipcio, en una región de *wadis* delimitada por el Nilo a poniente (a la altura de Luxor) y por el Mar Rojo a levante, en la que se podría considerar una zona con proliferación de inundaciones y sismos por la proximidad entre las placas arábiga y africana. Geológicamente, prácticamente toda la provincia o gobernación del Mar Rojo (Hurgada), pertenece al Palezoico y proliferan rocas plutónicas, efusivas o ígneas volcánicas y metamórficas (metasedimentarias) (Badawy *et al.* 2017).

Según la información geológica consultada (Harrell 2004; Ibrahim *et al.* 2010; Abd El-Wahed *et al.* 2019) en la zona del *Wadi Gimal* o *Wadi Sikait* aflora el granito (feldespatos, micas y cuarzos), predominando una mezcla de esquistos con talco, biotita/flogopita, actinolita, turmalina, clorita y esquistos de cuarzo-moscovita (Harrell 2006).

La caracterización mineralógica de los fragmentos dispersos de las columnas del templo, realizada de forma organoléptica o macroscópica con parámetros del Dpto. Cristalografía y Mineralogía (UCM), identifica el material como un filosilicato (clase 9.EC.05 de la clasificación Strunz), cuyas propiedades físicas sugieren una composición de talco o similar. El mineral presenta un hábito laminar con planos cristalográficos definidos y una exfoliación de buena a imperfecta, lo que resulta en una fractura de tipo fibroso. Visualmente, destaca un aspecto moteado en tonos grises y beige (referenciados bajo la Tabla Munsell como 2.5YR 5/2 y 10YR 7/6-8/8, respectivamente), condicionado por la presencia de inclusiones de óxidos férricos. El talco, junto al carbón y el grafito, presenta el menor ángulo de fricción y, por tanto, una muy baja resistencia al corte de las diaclasas. Al encabezar la escala de Mohs (dureza 1), es uno de los minerales más blandos que existen, siendo rayado incluso por la uña.

El proceso de excavación o sustracción del material para formar la cavidad del templo habría seguido la metodología aplicada en la cantería tradicional, donde se extraen bloques de manera escalonada mediante el uso de cinceles, cuñas y palancas (Harrell y Storemyr 2013). Así pues, el templo fue excavado a favor de un afloramiento de talcoesquistos rodeados de un macizo rocoso de areniscas fracturadas, una situación *a priori* nada recomendable para su uso constructivo debido al tipo de rotura laminar del esquisto (Harrell 2016). Por lo que se trata de un material fácilmente excavable en relación al entorno, pero aparentemente no durable en el tiempo.

• Lectura de paramentos y orientación de los niveles de foliación

La lectura de paramentos permitió identificar diferentes vetas y bandas o niveles de foliación del material. Las paredes, techo y columnas del templo muestran una alternancia de talcoesquistos más verdosos bandeados y otros más rojizos. La diferenciación cromática evidenció la desigual consistencia, rugosidad y porosidad entre las bandas de esquisto de talco verde (laminado) con respecto a las vetas de talco blanco pulverulento, de tacto jabonoso-graso y brillo de carácter nacarado.

En el paramento norte del templo la inclinación de la foliación sigue un ángulo de aproximadamente 20º, partiendo del capitel de la pilastra para morir en los peldaños de la segunda crujía. El paramento sur presenta bandas y vetas con una inclinación de 10º que ascienden desde la basa de la pilastra hasta la mitad del pilar de la segunda crujía. La asimetría de las bandas de los paramentos pone de manifiesto que el templo se excavó en la singularidad o anomalía geológica de un cambio de inclinación (buzamiento) de la foliación del talcoesquisto.

Durante el reconocimiento de los niveles de foliación (bandas, vetas o juntas geológicas) se detectó que toda la oquedad está surcada de varias familias de discontinuidades: 1) juntas geológicas preexistentes (foliación y vetas talcosas débiles), las cuales son previas a la excavación del templo (Martínez *et al.* 2024) y que este puso de manifiesto, 2) fracturas mecánicas puras (grietas y fisuras) inducidas por la excavación o por tensiones externas y 3) fracturas estructurales evolutivas, surgidas de la degradación de las vetas geológicas más blandas, por fatiga o solicitaciones externas — como el posible derrumbe del farallón rocoso superior—. Desde el punto de vista geomecánico, estas juntas potencialmente activas son

grietas críticas puesto que el talco reduce la cohesión y el rozamiento interno, actuando como un lubricante natural en los planos de fractura.

Para el análisis de dichas discontinuidades se realizaron dos estaciones geomecánicas en el interior del templo y en el exterior (esta última mediante técnicas fotogramétricas). Una estación geomecánica es un conjunto de mediciones estructurales del macizo, anotaciones de las propiedades de las fracturas (rugosidad, relleno, orientación) y propiedades mecánicas de la matriz rocosa (mediante esclerómetro) registradas en unas plantillas normalizadas. Tal y como señalan Benrabah y equipo Benrabah *et al.* (2024), mediante técnicas remotas y medidas manuales con brújula es factible establecer la fracturación "natural" del terreno e inferir qué daños son de origen geológico y cuáles se deben a la construcción o a solicitaciones externas.

En la Figura 3 se muestran las medidas de fracturación natural del macizo rocoso encajante y en la Tabla 1 se recoge la orientación de dichas fracturas. Hay una notable diferencia entre la fracturación medida en el interior excavado del *Large Temple* y el afloramiento del entorno. Esta variación normalmente no debería ser por la existencia de fracturas "naturales" geológicas diferentes entre fuera y dentro puesto que el templo se ha excavado precisamente en ese mismo afloramiento. De hecho, se ha comprobado que la foliación de los esquistos es muy variable en el exterior debido a su elevadísima ondulación que provoca importantes cambios en la orografía.

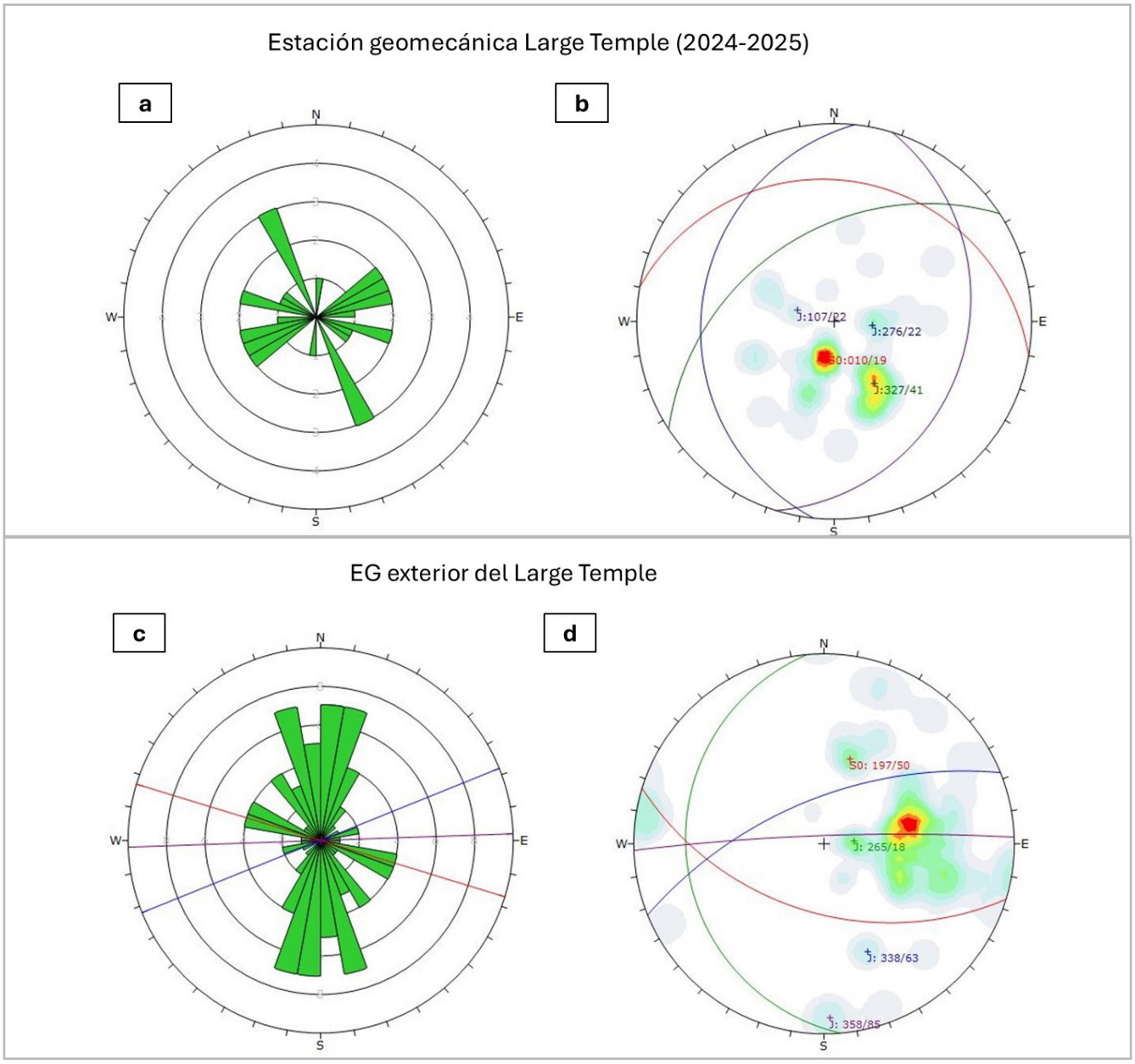


Figura 3.- Diagramas de fracturación. Arriba Estación Geomecánica del interior del *Large Temple* (izquierda roseta de rumbos de fracturas, derecha polos y planos). Abajo mediciones en el entorno del templo excavado a partir de la fotogrametría y medidas de brújula complementarias.

Esta diferenciación suele deberse a las condiciones térmicas (Eppes *et al.* 2010), a la descompresión de zonas de borde (Naime y García 2023) y finalmente, por el colapso o acomodación del macizo (Zhang *et al.* 2021). No obstante, parte de esta dispersión podría estar también condicionada por el propio proceso de toma de datos y por el estado de degradación del macizo exterior, donde los cascotes procedentes de colapsos superiores pueden ocultar algunas discontinuidades visibles en el interior del templo.

	Estación geomecánica interior templo	Fotogrametría macizo circundante
Medidas fracturación Dirección de buzamiento y buzamiento (DipDir / Dip)	S0: 010/19	S0:197/50
	J: 276/22	J:265/18
	J3: 107/22	J:338/63
	J4: 327/41	J:358/85

Tabla 1.- Orientación de las principales familias de fracturas.

- Control higrotérmico y ensayo para determinar las propiedades hídricas de la roca

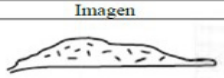
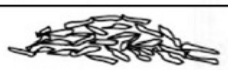
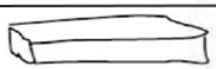
Pese a que predomina un clima desértico hiperárido (BWh según la clasificación Köppen-Geiger), dominado por veranos calurosos e inviernos suaves, se han registrado catástrofes atmosféricas provocadas por lluvias intensas (Abdel-Fattah *et al.* 2015) e inundaciones recientes del *wadi* en 2023 y 2024. La temperatura media mensual varía entre 24 ºC y 38 °C durante el verano y 12 ºC y 26 °C durante el invierno, con humedades relativas (HR) entre el 28 % en verano y el 57 % en invierno.

Debido a estos saltos térmicos, el año 2020 se tomaron datos higrotérmicos mediante dos sensores digitales de temperatura y humedad relativa ThermoPro® TP50[2]. Se posicionaron uno en una zona asoleada del exterior del templo (anta norte), y el otro en la capilla sur. Mientras que en el exterior se dieron oscilaciones térmicas extremas de entre 42,9 ºC de máxima y 9,2 ºC de mínima, en el interior las oscilaciones fueron menos contrastadas, con una temperatura máxima de 25,4 ºC y una mínima de 16,5 ºC. La diferencia de temperatura media interior (21 ºC) es un 14% inferior a la exterior (24,6 ºC), lo que indica que el templo tiene inercia térmica y amortigua los efectos de la radiación solar (dilataciones y contracciones). No obstante, mientras que la HR media exterior es baja (29%), en el interior es significativamente superior (42,5%) alcanzando máximas del 58,4%. Esto implica que, en el momento más seco del día, el interior del templo retiene más del doble de humedad que el exterior. Esta higroscopicidad podría generar estrés hídrico en una roca laminar como el talcoesquisto, dificultando la evaporación de la humedad absorbida.

Con esta premisa se buscó cuantificar y determinar las diferencias de durabilidad y alterabilidad de los materiales del templo (terrenos más o menos "talcosos" y arcillosos) frente a los agentes externos. Se llevó a cabo un ensayo de inmersión en agua tipo "*Lutton*" (Lutton 1977) con fragmentos de material de recuperación de desprendimientos próximos al templo. Los resultados del ensayo demostraron la resistencia al agua líquida de los fragmentos analizados, ya que ningún material se desmoronó pasadas las 24 horas de inmersión, permitiendo constatar la alta resistencia del talcoesquisto fuera de la matriz rocosa (carácter hidrófobo). Este ensayo para caracterizar el desmoronamiento de materiales pizarrosos con zonas alteradas está ampliamente descrito (Santi 1998, Wong & Abdul 2018) y en la Figura 4 se recoge la tabla de referencia. Debido a las limitaciones del campamento, en pleno desierto, no fue posible aplicar otros ensayos de inmersión y absorción más complejos

Esquema del ensayo:

Sumergir la muestra en agua **durante 24 h** y comparar el "aspecto" resultante con las siguientes figuras:

Ij	Imagen	descripción
1		Barro, se degrada a una consistencia parecida al barro
2		Copos. Las muestras se redfucen a copos, la forma original de la muestra ya no se aprecia
3		Astillas, fragmentos de roca. Se desprendenm astillas de los lados de la muestra. La muestra también puede fracturarse. La forma original de la muestra apenas perceptible
4		Fractura a través de la roca creando una apariencia grosera
5		Lajas. La muestra se divide de lado a lado según algunas supericies planas
6		No hay cambios. No hay aspectos discernibles

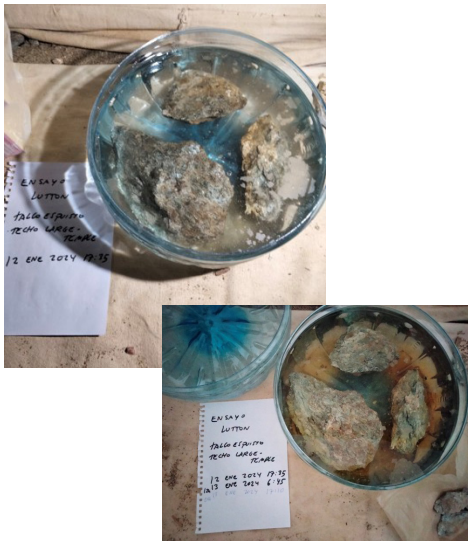


Figura 4.- Tabla de clasificación de durabilidad para materiales pizarrosos y esquistosos (traducido de Santi, 1998) y fotografías del ensayo *Lutton en Sikait*. La resistencia de las muestras tras 24h confirma el carácter hidrófobo del material y desplaza el posible foco de alterabilidad a la humedad higroscópica (entre láminas).

y regulados por el marco europeo y americano (UNE-EN 13755:2008, UNE-EN 12370:2020, UNE-EN 19376, ASTM C97, ASTM D5313 y ASTM D4644).

- Ensayo para determinar las propiedades mecánicas de la roca

Dado el carácter no destructivo de los reconocimientos, se empleó el esclerómetro o martillo Schmidt de Tipo N (Jordá *et al.* 2016). A pesar de la baja dureza del material, su portabilidad permitió estimar la resistencia a compresión simple (uniaxial) de la matriz rocosa (ASTM D5873, UNE 22950-6 e ISRM Suggested Methods) y el factor de seguridad de pilares rocosos, parámetro clave en la puntuación y caracterización empírica de obras subterráneas.

Se seleccionaron puntos de prospección situados a diferentes distancias y niveles de foliación, evitando generar patrones de impacto identificables en los paramentos de talcoesquisto del templo. De igual forma, la aplicación en series de impactos con diferentes direcciones (perpendicular e inclinado) demostró su adecuación en una estructura laminada y meteorizada.

Los datos obtenidos [Tabla 2 y Figura 5] revelaron la heterogeneidad de la estructura: los puntos de ensayo de la pared derecha (7-10) presentaron una muy marcada anisotropía predominando valores inferiores a 5 MPa; la pared izquierda ofreció mayor resistencia (1-4); las pilastras dieron una resistencia mínima de 5 MPa (5 y 6); los trozos o fragmentos de la columna norte mostraron resistencias muy bajas en todos los puntos e inclinaciones del esclerómetro y; finalmente, la columna sur preservada registró una resistencia ínfima en el tercio superior y la máxima obtenida en el templo en su tercio inferior con 10 MPa. Sin embargo, un valor de 10 MPa sigue siendo considerado como una "Roca muy blanda" (Grado R1 según la ISRM).

— Estado de conservación y degradación

- Cuadro patológico y cartografía de las discontinuidades estructurales

El templo presenta procesos patológicos de origen intrínseco e inducidos. Los primeros están relacionados con la propia naturaleza foliada del macizo rocoso y

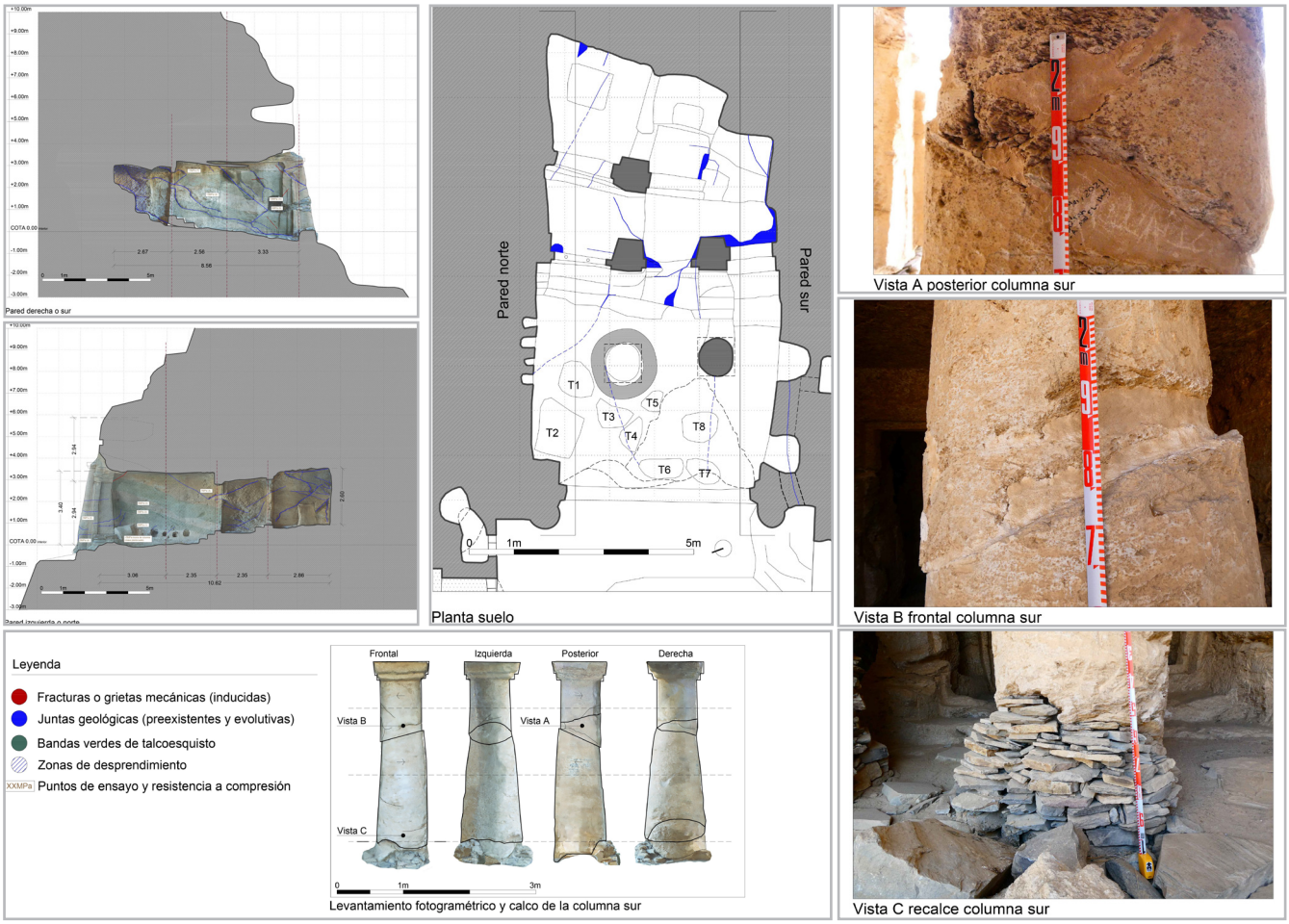


Figura 5.- Izquierda: Secciones con la caracterización de niveles de foliación y vetas de talco pulverulento. En los paramentos se puede distinguir la localización de los puntos de ensayo y el resultado obtenido en MPa. Derecha: Planta del suelo con el mapeado de discontinuidades e indicación de los puntos de prospección en los fragmentos dispersos del fuste de la columna norte (desaparecida). Con líneas a trazos se proyectan las grietas del techo. Abajo, levantamiento fotogramétrico de la columna sur.

Ubicación medidas en el Large Temple	Inclinación del esclerómetro	Promedio de rebotes del esclerómetro	Resistencia a compresión de la matriz rocosa (MPa)
Pared izquierda (pared norte) templo veta verdosa inferior (1)	horizontal	18	8
Pared izquierda (pared norte) templo veta verdosa superior (2)	horizontal	15	5
Pared izquierda (pared norte) templo zona intermedia anaranjada porosa (3)	horizontal	15	5
Pared izquierda (pared norte) templo esquina superior anaranjada (4)	horizontal	17	7
Columna-pilastra adosada izquierda (anta norte) parte inferior (5)	horizontal	15	5
Columna-pilastra adosada izquierda (anta norte) parte superior (6)	horizontal	15	5
Pared derecha (pared sur) superior (7)	horizontal	14	< 5
Pared derecha (pared sur) inferior (8)	horizontal	12	< 5
Hornacina en pared derecha (pared sur) (9)	Vertical hacia abajo	13	8
Pared derecha (pared sur) inferior cerca columna (10)	horizontal	12	< 5
Trozo de columna norte nº 1	Vertical hacia abajo	12	<5
Trozo de columna norte nº 2	Horizontal	13	<5
Trozo de columna norte nº 3	Horizontal	10	<5
Trozo de techo nº 4	Vertical hacia abajo	10	<5
Trozo de techo nº 5	Vertical hacia abajo	10	<5
Trozo de columna norte nº 6	Vertical hacia abajo	13	<5
Trozo de columna norte nº 7	Inclinado hacia abajo	13	<5
Trozo de columna norte nº 8	Vertical hacia abajo	12	<5
Fuste columna sur parte baja	Horizontal	20	10
Fuste columna sur parte superior	Horizontal	14	<5

Tabla 2.- Resultados de las medidas de esclerómetro y correlación con la resistencia a compresión simple de la roca. El número entre paréntesis corresponde al punto de inspección y se encuentran localizados en las planimetrías de la Figura 5.

con el buzamiento de sus niveles, agravados por la presencia de vetas talcosas; los segundos se deben al proceso de excavación del templo y a la posterior redistribución tensional o acomodación del macizo. Durante este proceso pudo producirse la reactivación de las juntas geológicas preexistentes descritas en el apartado anterior.

Estos sistemas de discontinuidades pueden aparecer hoy parcialmente enmascarados por desprendimientos externos, procesos de erosión exógena —tanto ambiental como antrópica (grafitis y rayaduras vandálicas)—, así como por marcas o hendiduras asociadas a la construcción.

La alteración epidérmica o anomalía mayoritaria (Laborde 2013; Vergès-Belmin 2010; Lisci 2021) corresponde a la pérdida material en forma de erosión y como desprendimiento. La primera, aparte de diferencial, aparece en forma de abrasión [Figura 6, derecha] debido al desgaste homogéneo por fricción o rozamiento de la arena transportada por el viento (tormentas desérticas). La segunda se manifiesta en forma de exfoliación, descamación perimetral y fragmentación en esquirlas, que pueden estar asociadas tanto a un trauma mecánico como a la higroscopicidad de la foliación. Asimismo, de forma minoritaria, se observan alteraciones por depósitos de material debidos a colonizaciones biológicas como son los nidos de avispa alfarera y otros sedimentos de insectos y reptiles [Figura 9].

En cuanto a las lesiones de origen mecánico, se interpretan de forma conjunta las discontinuidades inducidas y las evolutivas. Estas discontinuidades, previamente descritas, presentan un desarrollo desigual y coexisten con las vetas de esquisto de talco y las bandas foliadas. Algunas se manifiestan de forma tridimensional por las paredes, suelo y cielo de la cavidad. Las pérdidas mayoritarias se hallan en torno a la embocadura o umbral del templo, con el desprendimiento parcial del techo [Figura 6, izquierda] y total de la columna norte, y en la pérdida del último pilar de la nave sur y el final de la cavidad agrietada [Figura 7].

La columna sur presenta un recalce de piedra en seco como consecuencia de una fractura y pérdida de material en la parte inferior frontal. En el tercio superior del fuste manifiesta una grieta a 45 º con desplazamiento lateral (desencaje). Este tipo de grieta suele responder al movimiento horizontal de un extremo respecto a la reacción del otro. En el caso que nos ocupa el tercio superior se ha desplazado siguiendo la dirección de solicitación. Aparece también una discontinuidad horizontal, vinculada a la grieta diagonal, que podría



Figura 6.- Izquierda: ámbito del desprendimiento del techo del frontispicio (que trabaja como voladizo). Derecha: Proceso de abrasión (erosión eólica) en las zonas más expuestas de la fachada y en los elementos salientes, donde el impacto de las partículas trasportadas por el viento es más virulento.

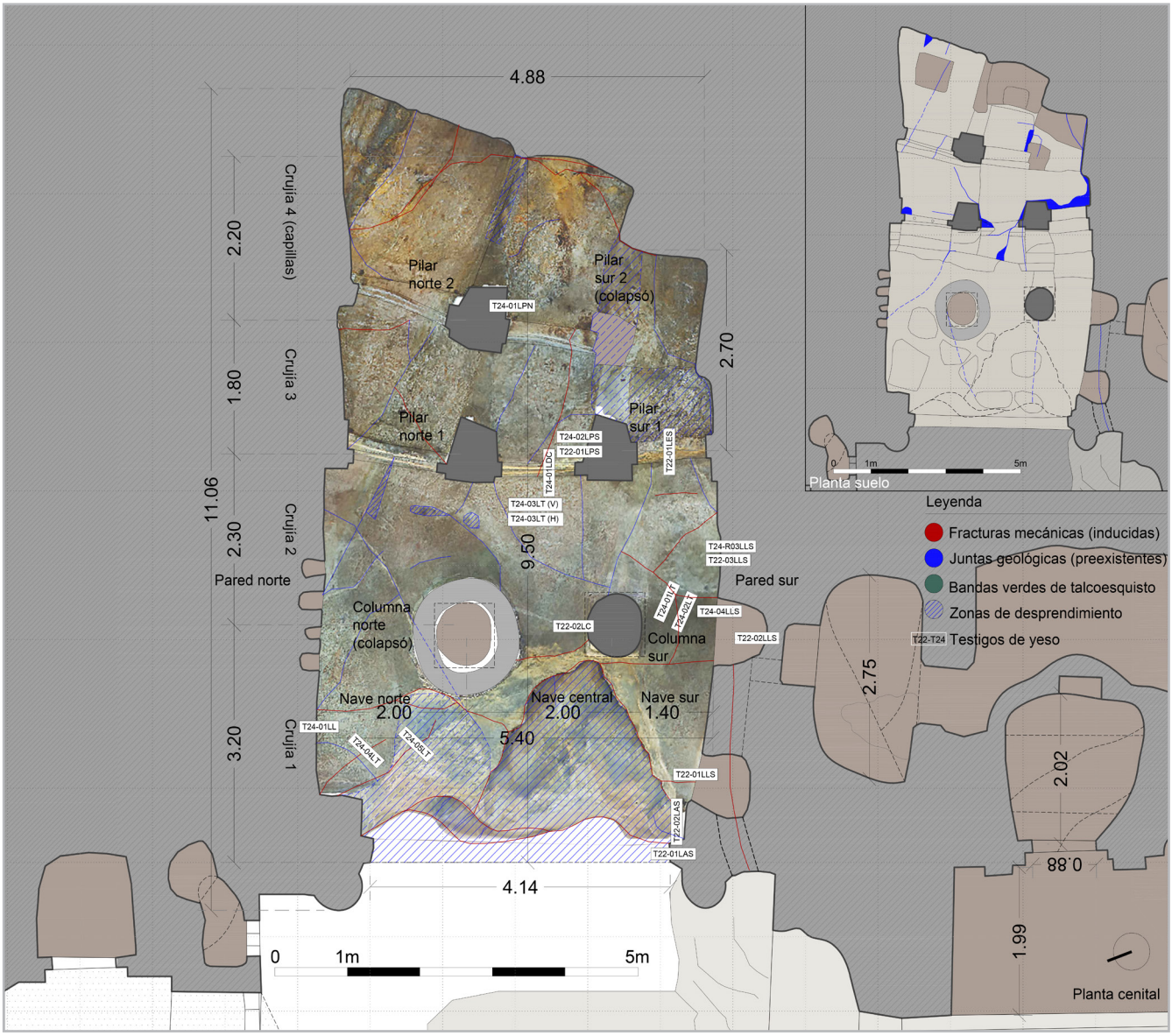
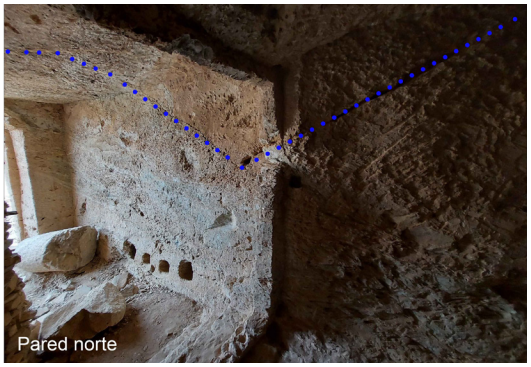


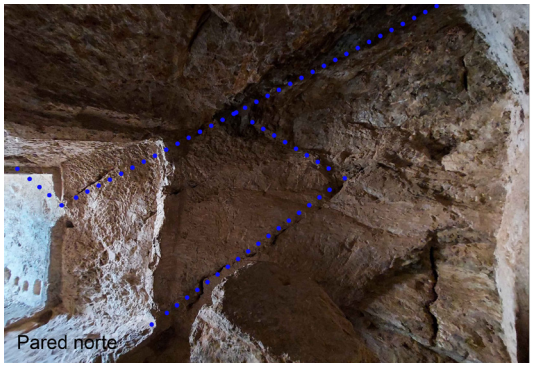
Figura 7.- Resumen cartográfico de los daños en la planta cenital o de techo. La trama de líneas azules a 45º indica las zonas de desprendimientos o de lagunas matéricas. Se destaca el desprendimiento parcial del voladizo asociado a la pérdida de columnas del frontispicio y el desprendimiento foliado del techo de las crujías 3 y 4 de la nave sur. En la parte superior derecha se ven las discontinuidades de la planta suelo.

Pared norte

Veta tridimensional por techo crujía 2 y 3 (preexistente)

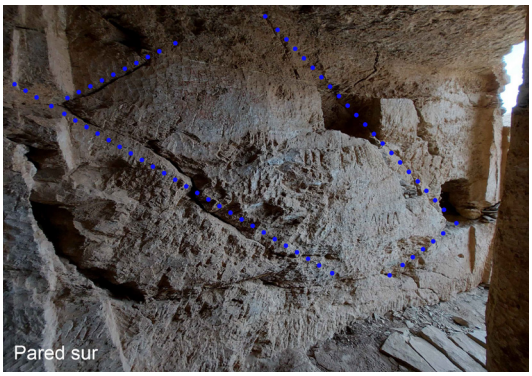


Intersección de juntas en la crujía 4 (evolutiva)

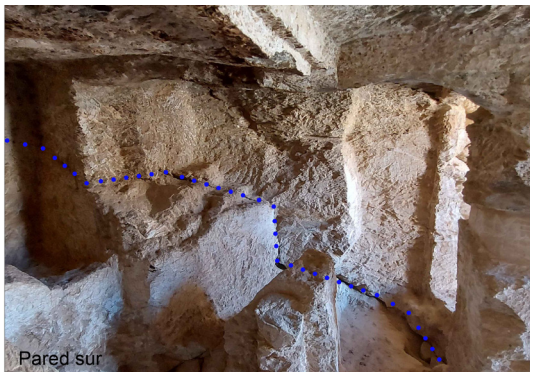


Pared sur

Fracturas en techo y juntas en las crujías 1 y 2 (evolutiva)

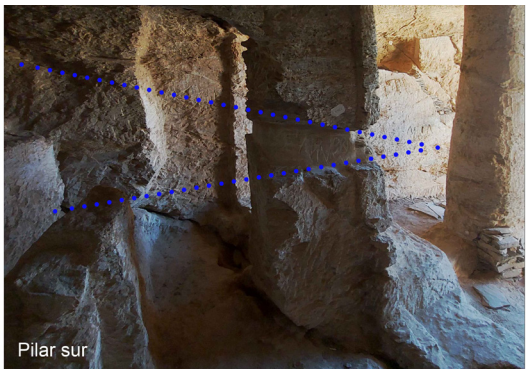


Discontinuidad por el suelo, en las crujías 3 y 4 (evolutiva)



Pilares sur (1 y 2 desaparecido)

Fractura en cuña, vista desde la crujía 3, cara norte

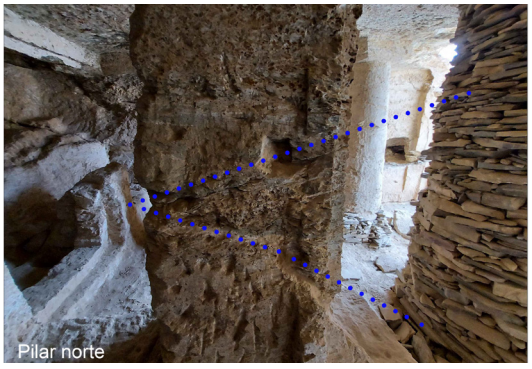


Fractura en cuña, vista desde la crujía 2, cara este



Pilares norte (1)

Fractura en cuña, crujía 3, cara norte



Fractura en cuña, crujía 3, cara sur



Figura 8.- Discontinuidades y fracturas detectadas en el templo, marcadas con líneas azules. Imágenes de las paredes norte y sur, y de los pilares sur y norte, evidenciando lesiones mecánicas inducidas e intrínsecas, relacionadas con la reactivación de juntas geológicas y redistribución tensional del macizo.

deberse al aplastamiento de una veta. El capitel presenta una grieta tridimensional en la parte frontal y podría estar desconectado del macizo superior.
Se han detectado unos 8 fragmentos, parcialmente angulares, del colapso de la columna norte y ninguno del pilar sur de la última crujía.

En cuanto a las grietas del pilar sur de la segunda crujía, estas se manifiestan a mitad del fuste coincidiendo con la intersección de varias juntas geológicas preexistentes y definen una geometría en cuña, con vértice en el interior. Una discontinuidad tridimensional (diaclasa) que recorre parte de la pared sur y el suelo de la tercera crujía separa el pilar en su base y se ramifica tenuemente hacia el pilar norte. Este último presenta la cuña a la inversa, con el vértice al exterior.

En la pared norte las fracturas geológicas y mecánicas siguen un recorrido diagonal inverso al de las bandas de talcosquisto. Tienen mayor presencia y amplitud en las dos últimas crujías, donde se entrecruzan. La pared sur presenta discontinuidades con la misma inclinación a la norte, pero se extienden a lo largo de toda la nave y tienen un ancho y profundidad superiores [Figura 8]. Su desarrollo provoca la conexión de las hornacinas y la sección del anta sur. El anta sur dispone de un refuerzo asociado a dicha discontinuidad horizontal que, en la fachada oeste encuentra dos réplicas equidistantes en altura.

El techo presenta el gran desprendimiento a sur (voladizo) y uno leve a norte. Está surcado de grietas en todas direcciones.

Al tratarse de una excavación, la interpretación de las lesiones se aborda desde la óptica de fallos del terreno o de la cimentación. Las primeras podrían deberse a asentamientos (grietas diagonales) y corrimientos o deslizamientos (grietas verticales); las segundas, a quebrantos y arrufos (deformaciones convexas) de la base de apoyo. Sin embargo, la fuerte anisotropía del material desvirtúa cualquier esquema de isostáticas (tensiones principales) y su correlación con la solicitación generadora de la lesión. De igual modo, la degradación matérica por efectos intrínsecos (disminución de resistencia por agotamiento o fatiga del material) o exogénicos (embates) favorecería la apertura o el juego de discontinuidades u oquedades entre niveles de foliación o planos de las vetas. Este proceso de reactivación podría convertirlas en grietas mecánicas y favorecer el desarrollo de nuevas lesiones tensionales.

- Método para cuantificar el alcance de las discontinuidades

Se emplearon métodos cuantitativos de lectura discontinua como el pie de rey y de métodos cuantitativos simples como la regleta de fisuras permitieron tomar mediciones entre los labios de las fracturas más significativas. Los valores en los paramentos oscilan entre 2,5 y 6,5 mm, y se registró una separación máxima de 10 mm en la columna.

Las oquedades y discontinuidades más profundas se inspeccionaron con un endoscopio flexible de visión frontal con lente de 7 mm y de 2 m de longitud, conectado a smartphone con sistema Android para el registro de datos. En el interior de las perforaciones de la pared sur se registraron materiales tanto orgánicos como inorgánicos propios de un medio extremo como el desértico [Figura 9]. Se capturaron restos de fauna ovípara, fibras y cáscaras de semillas.

En el barrido de la grieta longitudinal superior del frontispicio del templo se estimó que su profundidad podría superar la distancia que cubre el capitel. En el interior se confirmó la descamación de los labios y cavidad, así como la aparición de grietas, fisuras y microfisuras. En ningún caso pudo observarse el fondo de la grieta, lo que indica que su profundidad podría superar los límites de la inspección y constituir un punto crítico para la estabilidad.



Figura 9.- Inspección endoscópica y capturas de los barridos. Izquierda y centro: capturas del barrido endoscópico en la pared sur donde se identificaron depósitos orgánicos (huevos y semillas) y capturas de la descamación interna de la discontinuidad del techo, respectivamente. Derecha: inspección de la discontinuidad del techo (donde se presume el desprendimiento parcial del mismo) mediante endoscopio flexible.

- Método cualitativo simple de control de la dinámica de las lesiones

En 2022 se procedió a la colocación de 9 testigos de yeso natural, de la empresa egipcia Gipsina (Osman Group), en el interior del templo para determinar la dinámica (activa o pasiva) del movimiento de las fracturas (geológicas y mecánicas indistintamente) en un lapso temporal de dos años. En 2024 se comprobó que 2 de ellos habían desaparecido (1LAS y 3LLS) y otros 2 (1LLS y 2LC) estaban ligeramente separados del soporte por la parte inferior [Figura 10]. De igual forma se inspeccionaron las consolidaciones realizadas con mortero de 2008 de la columna y pilastra sur [Figura 5] y se detectó la formación de una junta fría entre materiales (fisuraciones), signo de un posible movimiento. El mismo año se dispusieron 12 nuevos testigos de yeso con la finalidad de verificar, en la siguiente campaña, si los desprendimientos se deben a auténticos desplazamientos estructurales y no son debidos a las limitaciones de la técnica de testeado ni a las acciones antrópicas.

Resultados y discusión

— Estudio geométrico formal y análisis estructural mediante estimación de acciones

El presente análisis constituye un estudio y cálculo teórico de carácter arquitectónico, basado en la geometría y proporciones del templo, y en estimaciones de cargas estructurales derivadas de la tipología constructiva y del estado de conservación descrito anteriormente. Este enfoque permite predecir el comportamiento estructural del templo y proporciona un marco de referencia para comparar posteriormente los datos empíricos obtenidos mediante ensayos y el análisis de estabilidad geomecánico. No se aplican los Eurocódigos, dado que no están diseñados para arquitecturas excavadas en roca foliada. En su lugar, y pese a seguir las UNE, se adopta un cálculo teórico adaptado a la construcción histórica.

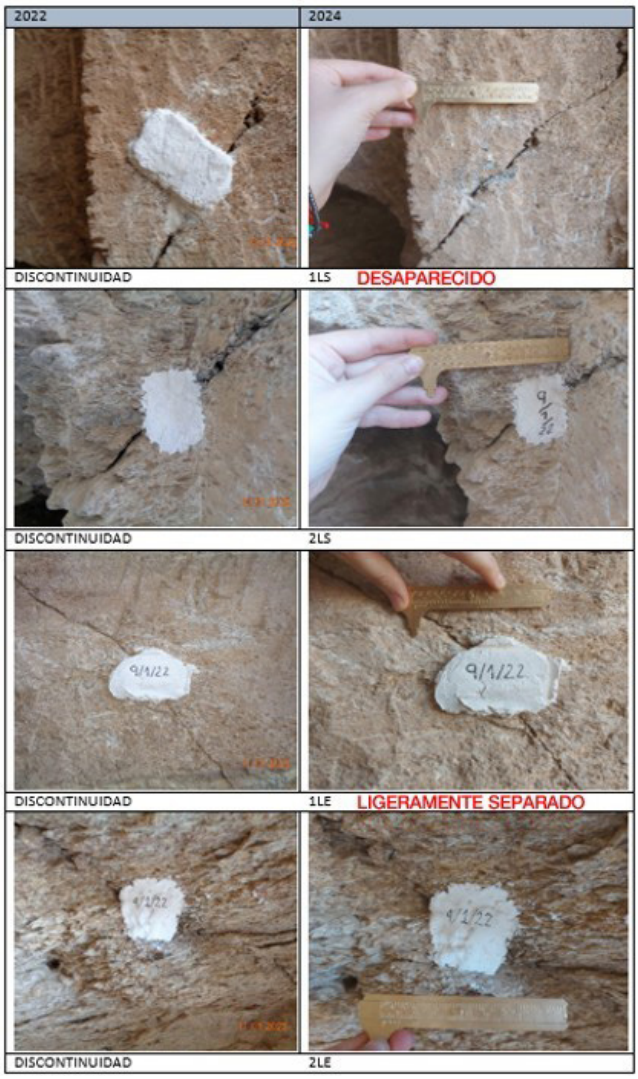




Figura 10.- Colocación y registro de los testigos de yeso. Izquierda: registro fotográfico de los 4 testigos de yeso alterados o desprendidos. La nomenclatura hace referencia a su situación (véase Figura 07), la primera L corresponde al nombre: AS Anta sur, LS Lateral sur y LC Large columna. Derecha: colocación de testigos en el anta sur. Pese a reconocer su baja fiabilidad debido por su higroscopicidad y su vulnerabilidad a los saltos térmicos, se estimó su empleo como primera aproximación para determinar la actividad del macizo.

El *Large Temple* presenta una euritmia arquitectónica simplista (Choisy 1900) y posee una estructura que difiere de otras construcciones excavadas e hipóstilas (Giedion 1981: 332-377). En el primer caso es habitual encontrar interiores abovedados y arcos torales cuyo comportamiento estructural favorece la distribución de las cargas, el contrarresto de los empujes y permite cubrir luces superiores. En el segundo caso predominan luces pequeñas, naves axiales equidistantes salvadas por dinteles o arquitrabes, que reducen la altura libre entre columnas robustas. El estudio empírico nos indica que el *Large Temple* se encuentra en un estadio intermedio ya que dispone de luces generosas (pero desiguales) para columnas esbeltas en relación al macizo encajante.

Si a ello le sumamos la pérdida del pilar sur de la última crujía y de la columna norte de la primera, se reduce el número de apoyos (asimétricos) y se descompensa el

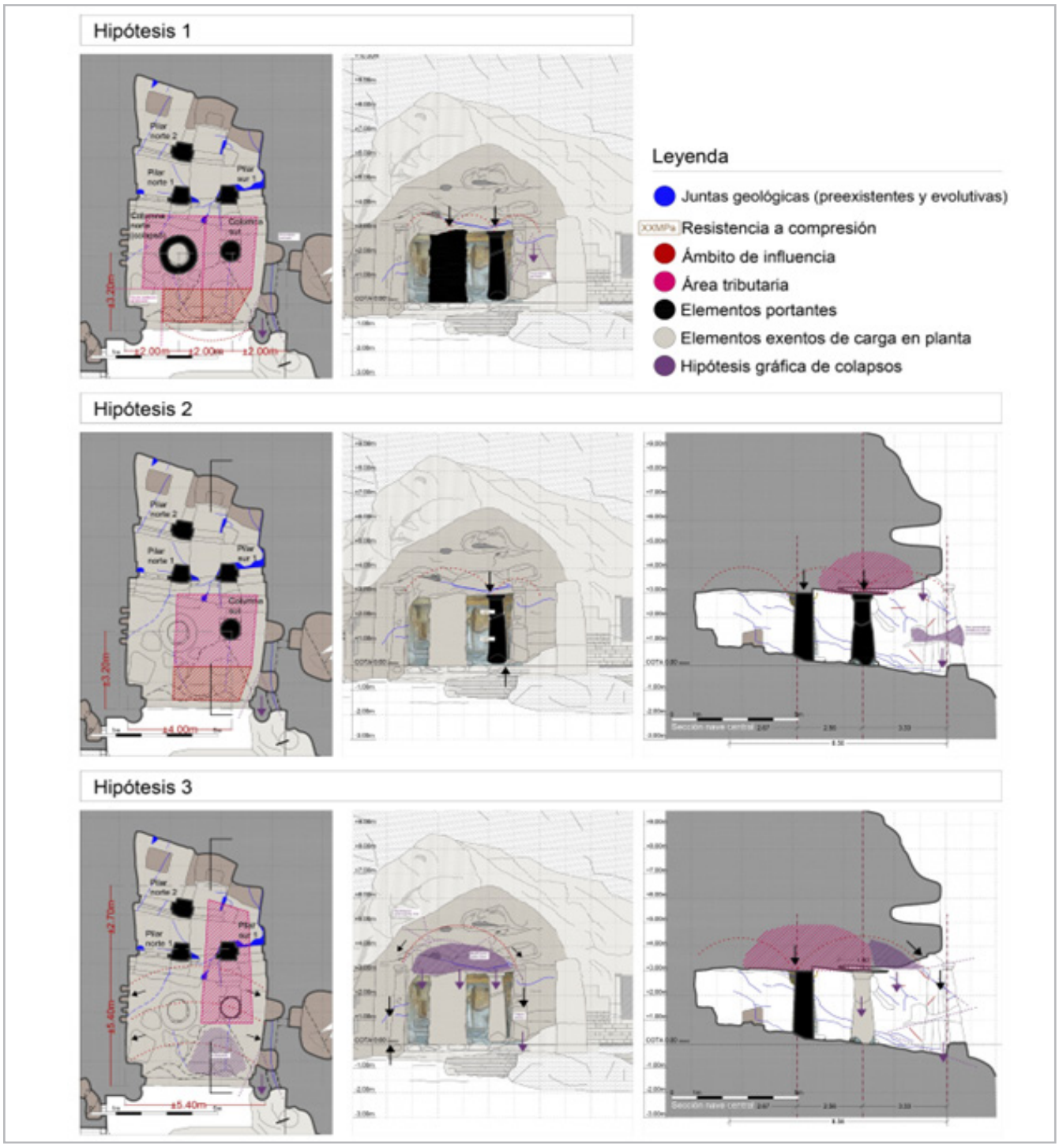


Figura 11.- Resumen de las tres hipótesis del estado de cargas. En la hipótesis 1 se considera que encamisado y pilar sur soportan cargas, pero el cálculo demuestra que el encamisado no llega a transmitir carga y por lo tanto no contribuye. En la hipótesis 2 se asume que en encamisado no funciona y solo actúa la columna sur, y en este caso la tensión calculada sí cumple. En la hipótesis 3 se considera que la columna sur no carga por estar hipotéticamente desvinculada del techo.

descenso de cargas. Cabe destacar que el anta de la pared sur no dispone de machón como la norte, reduciendo su ámbito de contribución a la estructura.

El análisis se centra en las dos primeras crujías dado que presenta un voladizo en el umbral, luces de mayor dimensión y la columna de sección circular que preserva muestra una grieta a cortante. Se realiza una comprobación de la capacidad portante por descenso de cargas (posterior al colapso de la columna norte) teniendo en cuenta tres hipótesis que van de la más favorable a la menos; Estado de cargas 1: Encamisado norte y columna sur están en carga; Estado de cargas 2: Solo la columna sur es portante; Estado de cargas 3: Encamisado y columna son autoportantes y el pilar sur asume la carga.

Pese a los datos obtenidos con el esclerómetro, cabe señalar su limitación al no registrar valores inferiores a 5 MPa [Tabla 2]. Por este motivo, y con objeto de analizar la situación más desfavorable, se procederá a definir la resistencia de cálculo mediante el CTE-DB-SE-C apoyado por la NBE-AE-88 y el CTE-DB-SE-AE y F apoyados por el P.I.E.T 70 (prescripciones del Instituto Eduardo Torroja).

En primer lugar, se asigna a las rocas presentes en el templo un equivalente constructivo convencional, tomando como referencia valores normalizados de resistencia a compresión según la clase de piedra [Tabla P.I.E.T. 70]. Así, las rocas metamórficas del lugar, como la cuarcita, el esquisto (esquisto de arenisca, grauvaca o piedra Bekhen), el esquisto cuarcítico, la pizarra y el calcesquisto, se corresponden respectivamente con las rocas sedimentarias areniscas, arcilla, arenisca arcillosa, *shale* y la carcilla calcárea (magra). Los datos de referencia (R normalizada) no consideran ni el origen monolítico de la estructura ni su evolución altamente estratificada [Tabla 3]. Por ello, se toma el valor de la sillería de arenisca cuarzosa labrada, 3,9 MPa, al que se aplica un coeficiente parcial se seguridad [Tabla 4.8 CTE-DB-SE-F] para una categoría de ejecución paupérrima γ_M=2,7 reduciéndose a 1,45 MPa.

Para determinar el estado de cargas, se estiman una serie de acciones variables que solicitan la estructura como sobrecargas de desprendimientos, empujes del terreno, acciones sísmicas, acciones del viento, acciones térmicas y reológicas multiplicadas por un coeficiente de seguridad de 1,5. Y de igual forma se tiene en cuenta las concargas o cargas permanentes mayoradas por 1,35 [Tabla 4.1 CTE-DB-SE-C]. En cuanto a la densidad del esquito se tom 2.700 kg/m3 según Antonucci, A. *et al.* (2007).

Para la hipótesis 1 se obtienen tensiones de 1,55 y 0,88 MPa en encamisado (minorado un 30% por vacío o discontinuidad en su interior) y columna sur respectivamente; para la hipótesis 2 la tensión en la columna sur es de 1,34 MPa y para la hipótesis 3, se obtiene una tensión de 1,94 MPa [Tabla 5].

Finalmente, los resultados se contrastan de forma orientativa con la presión admisible del terreno de cimentación- según un criterio de rocas- a efectos orientativos. A partir de la Tabla 8.1 de la AE-88 y la de Tabla D.25 del Anejo D del DB-SE-C, se obtiene que para un suelo de rocas estratificadas y esquistos la presión admisible se sitúa entre 1,9 MPa y 3 MPa. Las tensiones calculadas para las tres hipótesis se encuentran dentro de este rango, por lo que puede descartarse el asentamiento del terreno como mecanismo dominante. No obstante, en la hipótesis 1 el encamisado alcanza 2,06 MPa y en la hipótesis 3 el pilar sur llega a los 1,94 MPa, valores muy próximos al límite inferior, lo que confirma el precario equilibrio del conjunto frente a cualquier solicitación externa.

De los resultados [Tabla 5] se deduce que la hipótesis 1 es coherente con la hipótesis 2, que igualmente muestra una resistencia próxima al límite de cálculo. A partir de estas observaciones se plantea una cuarta hipótesis de estado de cargas relacionada con la posible discontinuidad horizontal que separa el macizo superior de la laja inferior del techo y que parece discurrir sobre

Clase de piedra	R. piedra (kp/cm²)	Sillería			Mampostería		
		A hueso, asientos labrados (kp/cm²)	Sillares h≥30cm, mortero M-80 (kp/cm²)	Sillares h<30cm, mortero M-40 (kp/cm²)	Escuadrada y mortero tipo mínimo M-40 (kp/cm²)	Escuadrada con mortero tipo mínimo M-5 (kp/cm²)	En seco (kp/cm²)
Granito Sienita Basalto	≥1.000	80	60	40	25	10	7
Arenisca cuarzo Caliza dura Mármol	≥300	40	30	20	12	8	6
Arenisca caliza Caliza blanda	≥100	20	15	10	8	6	5

Tabla 3.- Resistencia a compresión de cálculo según la clase de fábrica del P.I.E.T 70.

Hipótesis 1	**CP kg/m²**	**coef**	**CV kg/m²**	**coef**	**Σ cargas kg/m²**	**Luz min (m)**	**Total kg/m**
Macizo superior	10449	1,35	10449	1,5	29779,65	2,28	67898
Hipótesis 1 pesos	**H (m)**	**e1 (m)**	**e2 (m)**	**δ (kg/m3)**	**coef**	**Peso kg/m**	
Encamisado y Columna	3	0,80	0,90	2700	1,35	7873,2	
Resultados Hipótesis 1							
Tensión del encamisado		Σ cargas kg/m	Base (cm²)	Total kg/cm²	Total MPa	NO CUMPLE	
		75771	3600	21,05	2,06		
Tensión de la columna		Σ cargas kg/m	Base (cm²)	Total kg/cm²	Total MPa	CUMPLE	
		64455	7200,00	8,95	0,88		

Hipótesis 2	**CP kg/m²**	**coef**	**CV kg/m²**	**coef**	**Σ cargas kg/m²**	**Luz min (m)**	**Total kg/m**
Macizo superior	10449	1,35	10449	1,5	29779,65	3,03	90232
Hipótesis 2 peso	H (m)	e1 (m)	e2 (m)	δ (kg/m3)	coef	Peso kg/m	
Columna sur	3	0,80	0,90	2700	1,35	7873,2	
Resultados Hipótesis 2							
Tensión de la columna		Σ cargas kg/m	Base (cm²)	Total kg/cm²	Total MPa	CUMPLE	
		98106	7200,00	13,63	1,34		

Hipótesis 3	**CP kg/m²**	**coef**	**CV kg/m²**	**coef**	**Σ cargas kg/m²**	**Luz min (m)**	**Total kg/m**
Macizo superior	14067,0	1,35	14067	1,5	40090,95	1,99	79781
Hipótesis 3 peso	**H (m)**	**e1 (m)**	**e2 (m)**	**δ (kg/m3)**	**coef**	**Peso kg/m**	
Pilar sur	2,3	0,70	0,60	2700	1,35	3536,379	
Resultados Hipótesis 3							
Tensión del pilar		Σ cargas kg/m	Base (cm²)	Total kg/cm²	Total Mpa	NO CUMPLE	
		83317	4200,00	19,84	1,94		

Tabla 4.- Descenso de cargas. Tensiones calculadas para las tres hipótesis consideradas, incluyendo cargas permanentes y variables con sus coeficientes parciales. Las tensiones se muestran en kg/cm² y MPa, y la verificación indica si superan la presión admisible del macizo rocoso. Los resultados reflejan un equilibrio precario del encamisado y del pilar.

el capitel sur [Figura 11]. En tal caso, encamisado y pilar sur estarían asumiendo las cargas de una columna sur parcialmente desvinculada del techo, lo que podría explicar el desprendimiento observado en ese sector, al no poder absorber dichas solicitaciones. Este precario equilibro deberá contrastarse en futuras campañas, ampliando el alcance de los registros actuales. Para ello se propone comprobar la contribución del pilar sur mediante esclerómetro, analizar la separación de la columna sur (laja inferior) mediante endoscopio con mayor rango de penetración, y verificar el retacado en todo el perímetro e interior del encamisado, mediante cala y endoscopio.

Con los valores de resistencia y coeficientes de seguridad establecidos, se analiza a continuación la estabilidad de

Hipótesis	**Elemento analizado**	**Luz (m)**	**Carga total (kg/m)**	**Tensión (MPa)**	**Verificación**
H1	Encamisado	2,28	75,77	2,06	No cumple
	Columna sur	2,28	64,46	0,88	Cumple
H2	Columna sur	3,03	98,11	1,34	Cumple
H3	Pilar sur	1,99	83,32	1,94	No cumple

Tabla 5.- Resumen de los resultados obtenidos para las tres hipótesis principales.

las columnas mediante métodos empíricos de macizos rocosos, adaptando criterios de túneles y minas al contexto del templo.

— Análisis de estabilidad de obras subterráneas mediante métodos empíricos

La estabilidad de los espacios subterráneos puede evaluarse inicialmente mediante las denominadas clasificaciones geomecánicas de macizos rocosos. Los índices geomecánicos RMR y Q provienen de la metodología de análisis de estabilidad de obras subterráneas, principalmente túneles y minas. Definen el vano máximo y necesidades de sostenimiento en función de la calidad de la roca, índices que dependen de una serie de propiedades consensuadas desde os años 1970 como rugosidad de las juntas, espaciado, resistencia de la matriz etc.

El índice Q (Barton *et al.* 1974) y la clasificación del macizo rocoso RMR (Bieniawski 1973) son los más utilizados. El índice Q, desarrollado en el Instituto Geotécnico Noruego en 1974, asigna una puntuación a cada dominio del macizo rocoso y aumenta su valor con la calidad del macizo rocoso. El índice Q se puede obtener de la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{RQD}{Jn} \times \frac{Jr}{Ja} \; x \frac{Jw}{SRF}$$

Dada la singularidad del templo, se va a proceder a estudiar la estabilidad de las columnas mediante un símil con metodologías empíricas de cámaras y pilares de mina, en concreto la metodología propuesta por Lunder y Pakalnis (1997) y aplicada entre otros por Muñoz (2009). Se trata de un gráfico empírico que relaciona el grado de estabilidad de pilares y su factor de seguridad con la ratio tensión/resistencia y esbeltez del pilar (altura / ancho).

Para el cálculo de la tensión que reciben los pilares se aplica la formula del área atribuida para pilares aislados:

$$\sigma p = \gamma * z * \left(1 + \frac{Wo}{Wp}\right)^2$$

Donde, el peso específico es γ, z es la profundidad y Wo es el vano de la cámara entre pilares y Wp es el ancho del pilar (diámetro).

A diferencia del estudio arquitectónico-estructural, se tomarán las medidas más favorables de resistencia a compresión del templo [Tabla 2] con una máxima de 8 MPa en las paredes, 10 MPa en la columna erguida, e inferior a 5 MPa en los fragmentos de la columna caída. De forma resumida, el vano (en inglés span) entre columnas varía entre 1,05 y 2,54 m con un máximo en el umbral o portal de 3 m.

Con estos datos se cumplimenta el conjunto de parámetros del RMR y se obtiene una puntuación de 57 que equivale a una clase III, es decir, una roca tipificada como media y que requiere de refuerzo (estructura vertical) al no soportar la ejecución de vanos amplios.

Parámetro		Valor	Puntuación
Resistencia a compresión uniaxial		5 – 8 MPa	2
Rock Quality Designation RQD%		90%	17
Espaciado de juntas (promedio)		50 cm	10
Condición de juntas	Continuidad	Mas de 20 m	0
	Apertura	<0,1 mm	5
	Rugosidad	Ondulada suave	1
	Meteorización	II	5
	Relleno	Talco (blando) < 5 mm	2
Presencia agua en juntas		Seco	15
RMR básico 89			57
			Clase III

Tabla 6.- Determinación del *Rock Mass Rating del Large Temple*.

A continuación, se procede al análisis empírico de la estabilidad del templo excavado, según el índice Q.

Parámetro	Valor	Puntuación
Rock Quality Designation	90%	90
Join number Jn	3 joints sets + random (x entrance factor)	12x2
Joint roughness Jr	Ondulated and lisa	2
Joint alteration Ja	Filled with soft material (talc)	4
Water reduction factor in joints Jw	dry	1
Stress Reduction Factor SRF	Shallow excavation, low tension and some parts where span wider that depth	2,5 - 5

Tabla 7.- Determinación del índice de calidad de roca Q.

$$Q = \frac{RQD}{Jn} \times \frac{Jr}{Ja} \; x \frac{Jw}{SRF} = \frac{90}{2} \; x \frac{2}{4} \; x \frac{1}{2,5(5)} = 0,75 \; (min.\; 0,375 \; at entrance)$$

El vano entre columnas o ancho de excavación se aumenta o escala mediante un factor o coeficiente de seguridad llamado ESR, que en este caso asumimos un valor de 0,8 para espacios de acceso público.

Se han tomado las hipótesis descritas en el apartado anterior [Figura 11] y se han analizado según el índice Q.

Para la hipótesis 1 se han medido anchos variables entre columnas de 1-1,9 metros y en el voladizo de 2,56 m. Estos vanos se dividen por el ESR resultando: Máximo entre columnas *Span* /ESR = 1,9 / 0,8 = 2,4 m; Voladizo: 2,56/ESR = 3,3 m.

Para la hipótesis 2 se toma la distancia entre la columna sur y el paramento norte obteniendo 4,12 / ESR= 5,2 m.

Y finalmente, para la hipótesis 3, donde se considera que las columnas de la primera crujía no están trabajando, asumimos un vano máximo del templo de 5,9 m / ESR = 5,9/0,8= 7,4 m.

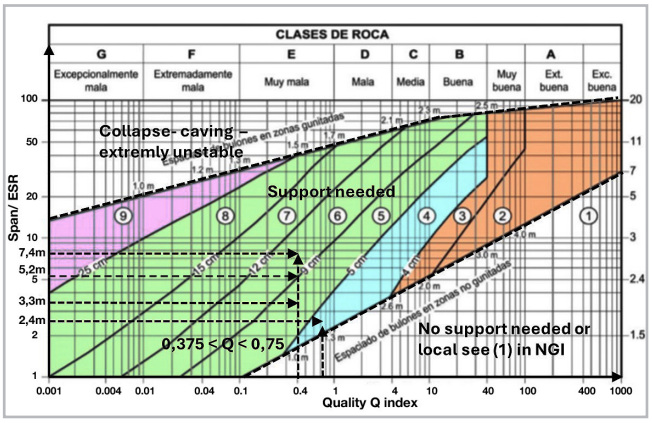


Figura 12.- Análisis empírico de estabilidad de los vanos del *Large Temple*. Fuente gráfico base: Laboratorio Oficial Madariaga, 2015.

La conclusión inmediata del grafico superior [Figura 12] es que ninguno de los vanos ajustados mediante ESR se encuentra en la zona 1, correspondiente a huecos estables sin sostenimiento. Por tanto, todos los vanos requieren la presencia de la estructura vertical que los sostiene y, en algunos casos, de un puntal intermedio, lo que descarta la estabilidad autónoma de las hipótesis consideradas. Asimismo, el análisis evidencia la necesidad de reforzar el voladizo o umbral, que constituye el punto más crítico del conjunto.

La Tabla 8 muestra los resultados de los cálculos previos para los parámetros de entrada en la Figura 13. En la Figura inferior en el eje de ordenadas se emplaza el cociente entre la tensión en el pilar, cuya fórmula de cálculo se ha descrito y los resultados de la columna sigma P y de la resistencia de la roca a compresión de la Tabla 9. En el eje de ordenadas se sitúa el cociente de esbeltez, es decir altura dividida por el ancho del pilar.

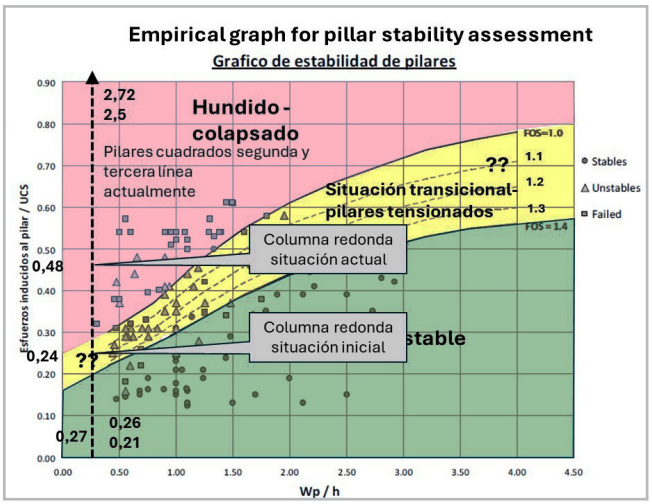


Figura 13.- Análisis empírico de los pilares y vanos del *Large Temple* según la metodología de Lunder y Pakalnis (1997) y Muñoz (2009).

La Figura 13 muestra el grado de estabilidad de los pilares relacionándolos con su altura/ancho y la carga sobre ellos que depende de la profundidad y vanos máximos. Se ha considerado la resistencia promedio de las columnas. En lo que respecta a la columna cizallada, su situación ya era precaria en el momento de su construcción, con un factor de seguridad rozando estrictamente la unidad, que implica equilibrio estricto. Datos que coincidan con los obtenidos en el descenso de cargas [Tabla 5].

— Discusión y prediagnosis

La comparativa entre el análisis geomecánico y arquitectónico ha permitido corroborar la correspondencia entre las resistencias obtenidas con esclerómetro y el estado patológico de los elementos arquitectónicos, siendo la pared sur la más dañada y vulnerable. Los fragmentos del colapso de la columna norte confirman que se trataba del elemento más débil del conjunto, y la diferencia de resistencias registrada en la columna sur, surcada de vetas, explicaría su predisposición al deslizamiento de la parte superior ante un acción externa o embate.

Elemento	Wo max (m)	Wp min (m)	Z (m)	H (m)	Wp/H	σp MPa	UCS (min) MPa	σp/UCS
Pilar exento última crujía	3,3 m	0,52 m	9 m	2 m	0,26	13,6	5	2,72
Pilares cuadrados segunda crujía	2,54	0,42	9 m	2 m	0,21	12,5	5	2,5
Columnas antes del fallo (inicial)	1,9	0,85	4 m	3,15 m	0,27	1,2	5	0,24
Columnas (actual)	3,10	0,85	4 m	3,15 m	0,27	2,4	5	0,48

Tabla 8.- Aplicación de los criterios de estabilidad de pilares.

La coexistencia de daños mecánicos y diaclasas de gran magnitud, junto al desprendimiento parcial del techo del templo, lleva a considerarlos manifestaciones consecutivas de una causa compartida y de carácter global en relación a la tipología arquitectónica y la roca foliada donde se halla. El estudio de las crujías muestra luces (vanos) y vuelos variables que podrían tener relación con el agotamiento de los niveles y/o con un predimensionado de mínimos optimista. En este sentido, podría hablarse de una causa endémica (arquitectónica) e intrínseca (geológica), que justificaría que el templo se encuentre inconcluso (altar de la capilla sur), tal y como ocurre en ciertos hipogeos de *Qubbet el-Hawa* (Martínez *et al.* 2024) o en la tumba tebana de *Senenmut* (TT353), donde la excavación fue interrumpida o alterada como respuesta a la calidad y discontinuidades del macizo (Soliman 2015).

Los resultados obtenidos se alinean con los protocolos de seguridad de la normativa vigente; sin embargo, se advierte que el carácter restrictivo de tales métodos requiere una lectura crítica cuando se aplican a estructuras históricas. Este análisis actúa, por tanto, como un puente necesario entre la exigencia reglamentaria y la singularidad de un templo ya debilitado por procesos patológicos.

Del estudio de juntas y lesiones [Figura 5 y 7] se determinan dos focos de aceleración de la degradación. El primero se localiza en el extremo interior de la cavidad inacabada (capilla sur), donde los pilares de las dos últimas crujías aparecen seccionados en cuñas por el cruce de fracturas. Puede que alguna de estas cuñas tarde cierto tiempo en desprenderse, "esperando" la degradación progresiva de la roca que alterase algún puente de roca entre juntas.

El segundo foco se localiza en el umbral, debido a la ausencia de las dos columnas de la fachada y a la gran luz que cubre el vano. Estas columnas podrían haber colapsado en primer lugar. A continuación, la acomodación del macizo habría provocado el fallo del anta sur (pared sur perforada), lo que precipitaría el desplazamiento del macizo superior (articulación en intradós de bóveda por fallo de estribo sur) y el consiguiente desplazamiento de las columnas interiores. Finalmente, debido a la descompresión de la zona de borde (sector en voladizo), se habría producido el desprendimiento del techo, entendido como precipitación del sector traccionado. La cronología de los eventos sugiere que el foco 2 se originó primero y desencadenó el posterior desprendimiento de la cuña del pilar sur. Dado que este se ubica en la capilla sur inacabada (cuyo altar no llegó a labrarse), indicaría que todo el proceso traumático probablemente se desarrolló durante la construcción en un lapso de tiempo relativamente breve. La ausencia de restos del pilar sur sugiere el intento de desescombrar y reutilizar el templo, hasta que finalmente se desplomó la columna interior norte, de la que sí se conservan fragmentos in situ que confirman el abandono definitivo.

Otra posibilidad es que ambos focos se originasen simultáneamente. Sin embargo, la dificultad de observación de los fragmentos y restos de la columna norte, junto con la dirección del corte observado en fotografías históricas (Oller 2021), nos condiciona a mantener los focos separados. De confirmarse el origen común en futuras campañas, significaría que el pilar sur de la última crujía se deslizó (a comprobar) por la discontinuidad tridimensional que discurre por el suelo y la pared sur de las últimas crujías (diaclasa), provocando la pérdida de parte del fuste por desprendimiento de una cuña, tanto en el pilar sur como en la columna circular norte. Al desaparecer este último apoyo, y siendo el vano de gran luz, la columna restante pudo sufrir un aumento de tensiones y desplazarse también a favor de juntas preexistentes. Esto desencadenaría el desprendimiento del techo al quedar sin apoyo norte.

En cualquier caso, la imposibilidad de registrar el fondo de las discontinuidades, sumada a la apertura métrica de las grietas, sugiere que el macizo ha superado su comportamiento monolítico original para articularse en un sistema de macrobloques independientes (Sani *et al.* 2012). Por lo tanto, el estado de conservación estructural presenta un grado elevado de precariedad como resultado de la acumulación histórica de daños, y los recursos mecánicos del templo están en el límite de su capacidad portante.

Conclusiones preliminares y líneas futuras

Las conclusiones preliminares de la discusión confirman una correlación directa entre las bajas resistencias obtenidas con el esclerómetro y el avanzado estado patológico del templo foliado, identificando la pared sur, la columna sur y el umbral como los elementos de mayor vulnerabilidad. Se determina que el templo presenta una inestabilidad de carácter endémico (arquitectónico, diseño de mínimos) e intrínseco (geológico), lo que justificaría su estado inacabado. No obstante, el templo permanece en pie gracias a la contribución de la segunda línea de pilares y al soporte del macizo rocoso.

La prediagnosis identifica dos focos críticos de degradación: un seccionamiento por cuñas en el interior de la cavidad y un fallo estructural en el umbral. La secuencia de colapso propuesta sugiere que el fallo del estribo sur provocó el desplazamiento del macizo superior y el posterior colapso de las columnas y el techo.

Actualmente siguen los estudios de verificación de las hipótesis sobre la funcionalidad estructural del templo y el desarrollo cronológico de las lesiones.

Entre las líneas futuras destacan la caracterización minero-petrográficos mediante ensayos de laboratorio, las propiedades higrotérmicas de la roca junto a la monitorización microclimática, el análisis estructural del estado actual mediante elementos finitos (FEA), la comparativa de la dinámica del movimiento mediante métodos cuantitativos de lectura discontinua (pie de rey) y la lectura simple de fisurómetros más precisos y de metacrilato (testigos bidimensionales de alta precisión) para cuantificar

la cinemática de las fracturas y el grado de afectación, completar el modelo tridimensional y realizar dos nuevas estaciones geomecánicas, entre otras.

Por último, destacar que todos los estudios e intervenciones mencionadas son posibles gracias a la formación de un equipo multidisciplinar compuesto por conservadoras-restauradoras, arquitectas, ingenieras de minas y arqueólogas. El trabajo sinérgico entre todas las disciplinas hace posible afrontar retos tan complejos como la estabilización y recuperación de este excepcional templo.

Notas

[1] EGUILUZ, D., MOLINA, A., BURGAYA, B. & MARTÍN, E. (2024). "Preserving the local, to become global. Six years of conservation interventions in Wadi Sikait". Conference poster. En Red Sea Conference XI, Barcelona: Universidad Autónoma de Barcelona.

[2] MOLINA, A. (2020). Estudio del Estado de Conservación del Large Temple de Sikait (Egipto). Proyecto Final de Máster, [Inédito]. Sevilla: Universidad Pablo de Olavide.

Referencias

ABD EL-WAHED, M., KAMH, S., ASHMAWY, M. & SHEBL, A. (2019). "Transpressive Structures in the Ghadir Shear Belt, Eastern Desert, Egypt: Evidence for Partitioning of Oblique Convergence in the Arabian-Nubian Shield during Gondwana Agglutination". En *Acta Geologica Sinica -English Edition*, 93, 6: 1614-1646.

ABDEL-FATTAH, M., KANTOUSH,S. & SUMI, T. (2015). "Integrated Management of Flash Flood in Wadi System of Egypt: Disaster Prevention and Water Harvesting". En *Annu. Disas. Prev. Res. Inst*., Kyoto Univ, 58, B: 485-496.

ANTONUCCI, A., ANTONUCCI, R. & MICOZZI, M. (2007). *La pratica del restauro degli edifici a struttura muraria*. Napoli: Sistemi editoriali.

BADAWY A., HEGAZI, M., GABER, H. & KORRAT, I. (2017). "Crustal structure of northern Egypt from joint inversion of receiver functions and surface wave dispersion velocities". En *Journal of Seismology,* 22: 697–719.

BARTON, N., LIEN, R. AND LUNDE, J. (1974). "Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support". En *Rock Mechanics*, 6: 189-236

BENRABAH A, SENENT DOMÍNGUEZ S, COLLADO GIRALDO H, CHAVES RODRÍGUEZ C, JORDA BORDEHORE L.(2024). "Stability Assessment of the Maltravieso Cave (Caceres, Spain) Through Engineering Rock Mass Classification, Empirical, Numerical and Remote Techniques". En *Remote Sensing*; 16(20): 3883. https://doi.org/10.3390/rs16203883

BIENIAWSKI, Z.T. (1973). "Engineering Classification of Jointed Rock Masses". En *Transaction of the South African Institution of Civil Engineers*, 15: 335-344.

EPPES, C. M., MCFADDEN, LD., WEGMANN, K., SCUDERI, L. (2010). "Cracks in desert pavement rocks: Further insights into mechanical weathering by directional insolation". En *Geomorphology*, 123 (1-2): 97-108. https://10.1016/j.geomorph.2010.07.003

GARDNER WILKINSON, J. (1853). *Los Egipcios su vida y costumbres* (vol II). Madrid.: Edimat Libros S.A.

GIEDION, S. (1981). *El presente eterno: Los comienzos de la arquitectura*. Madrid: Alianza Forma.

GONZÀLEZ, A. (1999). *La restauración objetiva (Método SCCM de restauración monumental), 1993-1998*. Barcelona: Ediciones de la Diputació de Barcelona.

HARRELL, J.A. (2004). "Archaeological geology of the world's first emerald mine". En *Geoscience Canada*, 31, 2: 69-76.

HARRELL, J.A. (2006). "Archaeological geology of Wadi Sikait". En *PalArch's Journal of Archaeology of Egypt/Egyptology,* 4, 1: 01-12.

HARRELL, J. A. & STOREMYR, P. (2013). "Limestone and sandstone quarrying in Ancient Egypt: tools, methods and analogues". En *Marmora – an Int. J.Archaeol. Hist. Archaeom. marbles stones*, 9: 19-43.

HARRELL, J. A. (2016). "Archaeological geology of Wadi Sikait". En *PalArch's J. Archaeol. Egypt/Egyptology*, 4: 1-12.

IBRAHIM, M. E., SALEH, G. M. & IBRAHIM, W. S. (2010). "Low grade metamorphosed sandstone-type uranium deposit, Wadi Sikait, South Eastern Desert, Egypt". En Journal of Geology and Mining Research, 2(6): 129-141.

JORDÁ BORDEHORE, L., ROBERTO TOMÁS J., MANUEL ARLANDI RODRÍGUEZ Y ANTONIO ABELLÁN FERNÁNDEZ (2016). *Manual de estaciones geomecánicas. Descripción de macizos rocosos en afloramientos*. Madrid: Entorno gráfico.

LABORATORIO OFICIAL MADARIAGA (COORD.) (2015). "Guía sobre control geotécnico en minería subterránea", Convenio de colaboración entre la Secretaría de Estado de Energía del Ministerio de Industria, Energía y Turismo y la Universidad Politécnica de Madrid. Laboratorio Oficial Madariaga (LOM). https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/mineria/Seguridad/Guias/Gu%C3%ADas/Guia-control-geotecnico-mineria-subterranea.pdf [consulta: 31/1/2025].

LABORDE MARQUEZE, A. (COORD.) (2013). *Proyecto COREMANS: criterios de intervención en materiales pétreos*. Madrid: Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.

LEPSIUS, K. R. (1849-1858). Denkmäler aus Äegypten und Äethiopien. Berlín: Nicolaische Buchhanlung. Berlín : Nicolaische.

LISCI C. & SITZIA, F. (2021). *Degrado, danni e difetti delle pietre naturali e dei laterizi.* Santarcangelo de Romagna: Maggioli Editore.

LUNDER, P.J. AND PAKALNIS, R. (1997). "Determination of the strength of hard rock mine pillars". En B*ulletin of the Canadian Institute of Mining and Metallurgy*, 68: 55–67.

LUTTON, R. J. (1977). *Design and Construction of Compacted Shale Embankments: Vol. 3. Slaking Indexes for Design. Report No. FHWA-RD-77-1*. Washington, D.C.: Federal Highway Administration (FHWA), Offices of Research and Development.

MARTÍNEZ HERMOSO, J. A., GARCÍA MELLADO, I., & SÁNCHEZ GÓMEZ, M. (2024). "Increase in the geotechnical heritage of rock cut-tomb builders between the Old and Middle Kingdom (Qubbet el-Hawa Necropolis, Aswan)". En *Boletín Geológico y Minero,* 135(1): 59–78. https://doi.org/10.21701/bolgeomin/135.1/004

MUÑOZ, E. (2009). "Levantamiento geotécnico y recomendaciones al diseño proyecto mina Rulita", en internet. https://www.academia.edu/34498193/INFORME_MINA_RULITA_Copy [consulta: 3/8/2024].

NAIME, W., GARCÍA, R. (2023). "The rock mass and the development of joints during the tunnel excavation". En *IOP Conf. Ser.: Earth Environmental Science, Rock and Fracture Mechanics in Rock Engineering and Mining* 1124: 012058. Helsinki, Finland. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1124/1/012058

OLLER GUZMÁN, J., FERNÁNDEZ ABELLA, D., TREVÍN PITA, V., ACHÓN CASAS, O. (2019). "La explotación de esmeraldas en el Egipto romano. Primeros resultados del Sikait Project". En *Trabajos de Egiptología*, 10: 283-303.

OLLER, J. (2021). "La «Pompeya del desierto». 200 años del redescubrimiento del Mons Smaragdus por Frédéric Cailliaud". En *Athenaeum*, 109/2: 555-596.

OLLER GUZMÁN, J., FERNÁNDEZ ABELLA, D., TREVÍN PITA, V., ACHÓN CASAS, O., GARCÍA-DILS, S. (2021). "New evidence regarding Emerald Production in Roman Egypt at Wadi Sikait (Eastern Desert)". En *Journal of Near Eastern Studies*, 80 (1): 123.

OLLER GUZMÁN, J. & GARCÍA-DILS DE LA VEGA, S. (2023). "De esmeraldas, legiones y nómadas: últimos resultados del Sikait Project". En *DOSSIER Rihao*, 24: 143-159.

OLLER GUZMÁN, J., GARCÍA-DILS DE LA VEGA, S., FERNÁNDEZ ABELLA, D., OZCOZ BENITO, P., OLEKSIAK, J., EGUILUZ MAESTRO, D., MOLINA PÉREZ, A., BURGAYA MARTÍNEZ, B., SAGRISTÀ MALLOL, L., SALVIA VIDAL, S., CARRASCO LÓPEZ, JM. (2024). "The 2023 Archaeological Season in the Emerald Mines of Wadi Sikait: Excavation in Sikait, Documentation of the Mining Regions, and Survey of the Wadi el Gemal National Park". En THETIS, 28: 17-303.

PRISSE D'AVENNES, E. (1868-1877). Histoire de l'art égyptien d'après les monuments depuis les temps les plus reculés jusqu'à la domination romaine, atlas. Paris: Gallica. https://doi.org/10.11588/diglit.3741

SANI, F., MORATTI, G., COLI, M., LAUREANO, P., ROVERO, L., TONIETTI, U., COLI, N. (2012). "Integrated geological-architectural pilot study of the Biet Gabriel-Rufael rock hewn church in Lalibela, northern Ethiopia". En *Italian Journal of Geosciences*, 131(2): 171-186. https://doi.org/10.3301/IJG.2011.26

SANTI, P.M. (1998). "Improving the Jar Slake, Slake Index, and Slake Durability Tests for Shales". En E*nvironmental & Engineering Geoscience*, IV(3): 385-396.

SIKAIT PROJECT (2024). "El Proyecto", en la página oficial. https://sikaitproject.wordpress.com/

SOLIMAN, R. (2015). "Courtiers with dual tombs". En *Egyptian Journal of Archaeological and Restoration Studies*, 5(2): 123-138.

VERGÈS-BELMIN, V. (ED.) (2010). Glosario ilustrado de formas de deterioro de la Piedra. Madrid: ICOMOS-ISCS. https://openarchive.icomos.org/id/eprint/2089/1/spanish_glossary.pdf

WONG JIA MANG & ABDUL GHANI MD RAFEK (2018). "Durability characterisation of weathered sedimentary rocks using slake durability index and jar slake test". En Bulletin of the Geological Society of Malaysia, 66: 81 – 88.

ZHANG, J-C., PEI, S., LI, H-R. (2021). "Insights into Unloading Relaxation Mechanism of Columnar Jointed Basalt at the Baihetan Left Dam Foundation". En *Advances in Materials Science and Engineering,* 3: 1-13. https://doi.org/10.1155/2021/9953768

Autor/es



Estefanía Martín García
estefania.martin@upc.edu
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona (ETSAB), Universidad Politécnica de Cataluña
https://orcid.org/0000-0002-4359-7164

Arquitecta licenciada por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona (ETSAB-UPC) y doctoranda del programa de Tecnología de la Arquitectura, Edificación y Urbanismo. Máster en Estudios Avanzados de Arquitectura (MBArch), con doble especialidad en Teoría, Historia y Cultura y Rehabilitación y Restauración arquitectónica (ETSAB-UPC, 2018). Experto en Conservación, Restauración e Interpretación del Patrimonio por la Universidad de Alcalá de Henares (Udima-ETSAM, 2016). Especialista Universitario en Estructuras Históricas de fábricas y de madera por la Universidad de Extremadura (UEX, 2021). Posgrado en Rehabilitar des de la estructura por el Colegio Oficial de Arquitectos de Cataluña (COAC, 2021). Laboralmente, desde 2015 participa en proyectos de restauración arquitectónica en Cataluña. Profesional independiente con despacho propio desde 2019, ha redactado y dirigido múltiples proyectos que abarcan la recuperación y adecuación a la visita de yacimientos y fortificaciones de época ibérica, la conservación de monumentos de época romana, la restauración de castillos, murallas y torres medievales, así como el estudio e intervención en construcciones de cronología más reciente (s.XIX-XX). Profesora asociada del Departamento de Tecnología de la Arquitectura en la ETSAB-UPC desde 2016. Profesora invitada des de 2020 en la asignatura de Conservación de Bienes Culturales del Grado de Historia del Arte (Universidad de Barcelona). Profesora del Máster Rehabilitación en edificación del CATEB Building School desde 2025. Miembro de ICOMOS España (International Council of Monuments and Sites) desde 2020.



Luis Jordá Bordehore
l.jorda@upm.es
ETSI Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid
https://orcid.org/0000-0002-2332-5647

Luis Jordá es profesor de la Universidad Politécnica de Madrid desde 2019, cuando se incorporó tras trabajar en el Servicio Geológico Español. Imparte clases de túneles, geotecnia y mecánica de rocas. Luis Jordá (50 años) es doctor ingeniero de minas por la Universidad Politécnica de Madrid con un máster en Ecole Superieure du Petrole en Francia (2000) y una beca Erasmus de intercambio en Mons Bélgica (1998-1999). Ha trabajado como ingeniero geotécnico superior en perforación, diseño de túneles y minas subterráneas. Tiene experiencia universitaria impartiendo clases de riesgos geológicos, estabilidad de taludes e ingeniería de rocas en España y Sudamérica. De 2012 a 2016 ha estado viviendo en Perú, Bolivia y Ecuador, donde ha desarrollado e intenso networking en geoingeniería en universidades y empresas e instituciones privadas. Uno de sus principales temas de investigación y trabajo es la localización mediante técnicas geofísicas y evaluación de estabilidad de cuevas volcánicas y kársticas, así como cavidades subterráneas artificiales. Ha diseñado y supervisado el refuerzo de bodegas de vino y aceite del siglo XVIII y de minas de yeso romanas. Ha analizado la evaluación de la estabilidad de muchas explotaciones mineras poco profundas y canteras bajo carreteras. También es un experto explorador de cuevas y ha participado en numerosas expediciones desde 1993.



Adriana Molina Pérez
adrianarestauradora@gmail.com
Conservadora–restauradora de Sikait Project
https://orcid.org/0009-0003-6901-7134

Técnico superior en conservación y restauración de bienes culturales, en la especialidad de arqueología, por la Escuela Superior de Conservación y Restauración de Bienes Culturales de Cataluña (ESCRBCC) (2010) y Licenciada en Historia por la facultad de Filosofía y Letras de la UAB (2008), ha formado parte de múltiples excavaciones arqueológicas, tanto en Cataluña, el Estado Español como en el extranjero. Cabe destacar su participación en proyectos como el de «Mines d'or antiques de Dacie» (Rumanía) con el CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) o en excavaciones del Departamento de Ciencias de la Antigüedad y la Edad media de la UAB como las excavaciones iberas y romanas de «El Castellot de Bolvir», «El Tossal de Baltarga» (La Cerdaña) o en excavaciones de época medieval del grupo OCORDE (Ocupació, organització i defensa del territori medieval). Por otro lado ha realizado trabajos de conservación y restauración para diferentes centros de investigación como el CSIC, el CNRS, o el Departamento de Ciencias de la Antigüedad y la Edad media de la UAB, juntamente a otras instituciones en el extranjero como el Museo Agli Eremitani de Padova. En la actualidad se ha integrado como conservadora – restauradora y responsable de registro en el Sikait Project.



Delia Eguiluz Maestro
delia.eguima@gmail.com
Conservadora–restauradora del CRIP (Barcelona)
https://orcid.org/0009-0006-4767-1161

Conservadora-restauradora de bienes arqueológicos y paleontológicos, título obtenido en la ESCRBBC en Barcelona, y licenciada en Historia del Arte por la Universidad de Salamanca. Ha realizado un curso de posgrado en Preparación, Conservación y Restauración de material fósil en el CRIP (Barcelona). En la actualidad dirige los trabajos de conservación-restauración de varios yacimientos arqueológicos tanto en España, en la Colonia Clunia Sulpicia (Burgos), el Castro de Doade (Pontevedra) y El Castellot de Bolvir (Girona); como a nivel internacional, en los yacimientos de Berenike y Sikait (Egipto). Además, es coordinadora técnica en el proyecto arqueológico de los yacimientos autrigones de «La Mesa» y «La Muela» en Belorado (Burgos).



Joan Oller Guzmán
joan.oller@uab.cat
Universitat Autònoma de Barcelona
https://orcid.org/0000-0001-5002-4914

Joan Oller Guzmán (Barcelona, 1984) es Doctor en Historia Antigua por la Universitat Autònoma de Barcelona. Su estudio doctoral consistió en un análisis histórico-arqueológico del territorio y poblamiento de la región de la Layetania Interior (actual Barcelona) en época antigua. A partir de ello, sus líneas de investigación se han centrado en la arqueología del paisaje y los estudios del territorio en época romana. De este modo, participa como director de diversas intervenciones arqueológicas en el proyecto PATCA, en los Pirineos orientales. A la vez, desde el año 2013 dirige el proyecto de investigación PROTA en la comarca de Montes de Oca (Burgos). Finalmente, también desde el año 2013 participa como arqueólogo en el yacimiento greco-romano de Berenike y desde el año 2016 dirige el Sikait Project, proyecto de intervenciones arqueológicas en el Desierto Oriental egipcio. Actualmente es Profesor Agregado en el Departament de Ciències de l'Antiguitat i l'Edat Mitjana de la misma universidad.

Artículo enviado 09/07/2025
Artículo aceptado el 07/01/2026

CC BY NC ND

https://doi.org/10.37558/gec.v29i1.1413