CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA DEL PUENTE DE PIEDRA, GRECIA, ALAJUELA: DE LA LEYENDA A LA REALIDAD GEOLÓGICA

M.Sc. Rolando Mora
Geól. Jeisson Chaves
Geól. Maritta Alvarado
Geól. Douglas Camacho
Geól. Daniel Murillo
Geól. Manuel Barrantes
Geól. Pablo Herrera

G-4213 Mecánica de Rocas, II/2003
Escuela Centroamericana de Geología
Universidad de Costa Rica

Diciembre, 2003

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA DEL PUENTE DE PIEDRA, GRECIA, ALAJUELA: DE LA LEYENDA A LA REALIDAD GEOLÓGICA

M.Sc. Rolando Mora
Geól. Jeisson Chaves
Geól. Maritta Alvarado
Geól. Douglas Camacho
Geól. Daniel Murillo
Geól. Manuel Barrantes
Geól. Pablo Herrera

G-4213 Mecánica de Rocas, II/2003
Escuela Centroamericana de Geología
Universidad de Costa Rica

RESUMEN.

Este trabajo comprende la reproducción de la leyenda sobre la forma en que el Puente de Piedra fue construido. Por otro lado, se presenta la descripción geológica de los materiales que componen esta estructura natural y se reconstruye su historia geológica. Adicionalmente, se caracteriza el macizo rocoso desde una perspectiva geomecánica, se calcula la capacidad de soporte de la base del puente, se determina la resistencia del macizo rocoso fracturado y se establecen las necesidades de soporte

ABSTRACT.

This study includes the presentation of a legend on how Puente de Piedra (rock bridge) was built up. On the other hand, a geological description has been done of the materials that form this natural structure and the reconstruction of its geological history as well. Then, the rock mass is geomechanicaly characterized, the bearing capacity of the bridge's base is calculated, the rock mass strength is determined and support requirements are established.

1.1 INTRODUCCIÓN.

El Puente de Piedra es una estructura natural con un fuerte sabor a leyenda, "el puente que construyó el Diablo", según la cultura popular del Cantón de Grecia y que llena de tanto orgullo a sus habitantes. Este puente se ubica en la comunidad de Puente de Piedra de Grecia, sobre el río Poró, en las coordenadas Lambert 500500 E y 224595 N, según la hoja topográfica Puente de Piedra, escala 1:10000 del I.G.N. (Fig.1)

Debido a su origen, su importancia como vía de comunicación (Fig. 2) y como patrimonio natural, el puente representa un elemento de estudio, donde la descripción geológica asume un papel relevante. En este trabajo se pretenden analizar los tipos de materiales geológicos que componen esta estructura natural (Fig. 3), con el fin de explicar su génesis y contribuir con los tomadores de decisiones en cuanto a su conservación y uso futuro.

Los autores de este trabajo desean manifestar su profundo respeto por la tradición oral de los pueblos, por tal motivo es que a continuación se incluye la leyenda que se narra sobre el origen del Puente de Piedra, la cual ha sido recopilada por la Profesora. Iveth Jiménez Quesada y publicada en el Periódico Occidente de Mayo-Junio de 1978:

EL PUENTE QUE HIZO EL DIABLO

Allá por el año 1800 habitaba en el lugar que hoy conocemos como "Puente de Grecia", un puñado de indios corobicíes. Estos se habían dedicado exclusivamente a la siembra del maíz, aprovechando las fértiles tierras regadas en ambos márgenes por el río Poró.

En aquellos tiempos lejanos, en épocas lluviosas, los indígenas tenían problemas para regresar con pesadas cargas de maíz por el gran caudal del río. Frecuentemente algunos de ellos eran arrastrados por las turbulentas aguas, pagando con sus vidas en la lucha por la subsistencia. Por igual causa las pérdidas del preciado grano eran considerables.

En vista de lo que ocurría, el cacique decidió delegar en Sabojique el cuidado de los indios al hacer la travesía. Sabojique era un hombre fornido, muy respetado por su arrojo, astucia y valentía. Con frecuencia se le oía decir que era más fácil pasar el río con carga que comerse un elote tierno.

Al mando del mozo, la indiada trabajaba con gran eficacia, aunque esto no impedía que de vez en cuando se repitiera el percance con fatales consecuencias. Resueltamente el Cacique mandó llamar a su súbdito para advertirle, de una vez por todas, que si perdía a un solo hombre más en la empresa antes de recoger las cosechas de todas las milpas, sería maniatado y arrojado a las aguas del Poró. Sabojique, que conocía muy bien a su jefe, comprendió que este no vacilaría en cumplir la terrible amenaza.

Muy impresionado, el joven indio se fue al bosque y toda la tarde la pasó de rodillas, haciendo reverencias al dios Sol, suplicando a este que le solucionara tan terrible dilema; pero su dios, inconmovible, se ocultó tras la cordillera, sin escuchar sus ruegos. Llegó la noche y el desconcertado Sabojique no sabía qué hacer.

Sin encontrar el consuelo fue a sentarse a la orilla del causante de su pena. De pronto, recordó a un espíritu maligno llamado Diablo, del que había oído hablar en cierta ocasión como aliado en los apuros, y sin pensarlo dos veces, oculto en las sombras de la noche, comenzó

a llamar a Lucifer. Al rato Satán acudió a la cita y Sabojique, aunque un tanto temeroso, expuso su problema al extraño ser.

Yo solucionaré el asunto dijo el Diablo. Eso sí, a cambio de ello vendré por tu alma cuando mueras. Y para que veas que no soy tan malo ni tan diablo como suelen pintar esos frailecillos españoles que andan por ahí, te daré una oportunidad. El gallo canta antes que sea de día, a las cinco de la mañana; pues bien, si a esa hora aún no he terminado el trabajo, no dispondré de tu alma; pero si al cantar el gallo ya he concluido el puente, entonces tu ánima será mía.

—Aceptado, más... ¿qué es eso del puente?—, respondió el indio incrédulo y perplejo.
—Bueno, tonto, el puente es la solución al embrollo en que estás metido. Ahora que el pacto está hecho, firma este papel con tu sangre y a trabajar. No dispongo de mucho tiempo, pero realizaré la obra en menos de lo que canta un gallo.

El indio firmó y apresuradamente el Diablo se dedicó a la tarea de halar piedras, grandes y pequeñas, las que iba colocando en la ribera del río con una velocidad vertiginosa.

Al diablo —se decía Satán— en este mundo he hecho trabajos difíciles; pero como este, muy pocos.

En tanto, Sabojique, resignado al triste futuro que le esperaba, se lamentaba de su reciente decisión.

Ya es muy tarde para echarme atrás —murmuraba— parece mentira, pero en estos momentos mi vida, más que del diablo, depende del gallo. ¡Si tan solo se le ocurriera cantar antes de las cinco, aunque quede sin terminar el maldito puente!

Mientras el aturdido indio meditaba, el Cuijen no perdía ni un minuto. Corría desaforadamente de un lado al otro. Varias veces viajó en diabólica carrera hasta lo que hoy es el centro de Grecia, a Sarchí, Naranjo, Palmares, San Ramón y hasta Zarcero, siempre en pos de más piedras.

Serían las cuatro de la mañana cuando ya los trabajos del puente iban muy avanzados. Por supuesto no amanecía todavía y el gallo dormía a pierna suelta.

Sabojique, que no se había movido del lugar donde hiciera el pacto, reaccionó.

Tengo que hacer algo —se dijo— el único que me puede salvar es el gallo... a ver... ¿por qué canta ese animalucho? ¡Ajá!, porque amanece... y ¿si yo pudiera engañarlo?

Por la mente del indio cruzó una idea; era una posibilidad remota, suicida, mas no había tiempo para escoger y presto fue a ponerla en práctica como último y único recurso.

Corriendo más que el mismo Diablo, Sabojique se dedicó a recoger cuanta tusa seca y olote encontró a su paso, agregando ramas, leña y todo cuanto fuese capaz de arder. El material recogido lo depositó en hileras, a unas veinticinco varas del árbol en el cual dormía el imperturbable gallo.

A grandes zancadas irrumpió en el patio donde diariamente sancochaban maíz en una inmensa paila. Por gran suerte encontró un tizón a punto de apagarse, lo tomó en sus manos y corrió como alma que lleva el diablo. Sin pérdida de tiempo dio fuego a la mole de material seco que había recogido. En pocos minutos y mientras la comarca dormía, una fulgurante claridad se propagó por la aldea silenciosa y quieta.

Una vez realizado el trabajo, que lo mantuvo ocupado por largo rato, el astuto indio retornó al lugar donde ya prácticamente estaba construido el puente de piedra, en espera de un desenlace milagroso.

Jadeante se acercó a Luzbel, este, al ver a su socio, le dijo con voz de triunfo.

—He ganado, mentecato. Solo me falta colocar la última piedra. Ahora observa; en el puente hay un hueco por rellenar y aquí a mi espalda, la piedra que calza ahí precisamente y faltan aún siete minutos para que cante el gallo.

El Pisuicas, despectivamente dio media vuelta, caminó dos pasos para recoger y colocar la piedra que culminaría la obra, cuando...

¡¡QUIQUIRIQUÍ!!

—Maldito animal —dijo el Diablo echando chispas y ardiendo de cólera— he perdido esta vez, mas... te quemarás en mis infiernos por inoportuno y torpe.

Satanás se alejó asándose en rabia. Sabojique, rebosante de alegría, limpió con su mano bronceada las gotas de sudor y congojas que rodaban por su rostro altivo para perderse en la amplitud del descubierto pecho. Sonrió satisfecho de su hazaña y endiablada suerte y después, lentamente, fue a recogerse en su choza.

Esa mañana, los pobladores de aquella aldea, no cabían de felicidad al descubrir el enigmático puente de piedra, aparecido ahí como por arte de magia. Alegres como nunca, dieron inicio a un gran festín, donde hubo tanta chicha para todos y tantas danzas de júbilo, que nadie se percató de que Sabojique, después de una apremiante labor nocturnal, no participaba en la bulliciosa celebración. Dormía plácidamente sobre su rústica manta, en tanto que por allá en un rincón, un desventurado gallo, yacía inmóvil, con los ojos desorbitados y las plumas de punta.

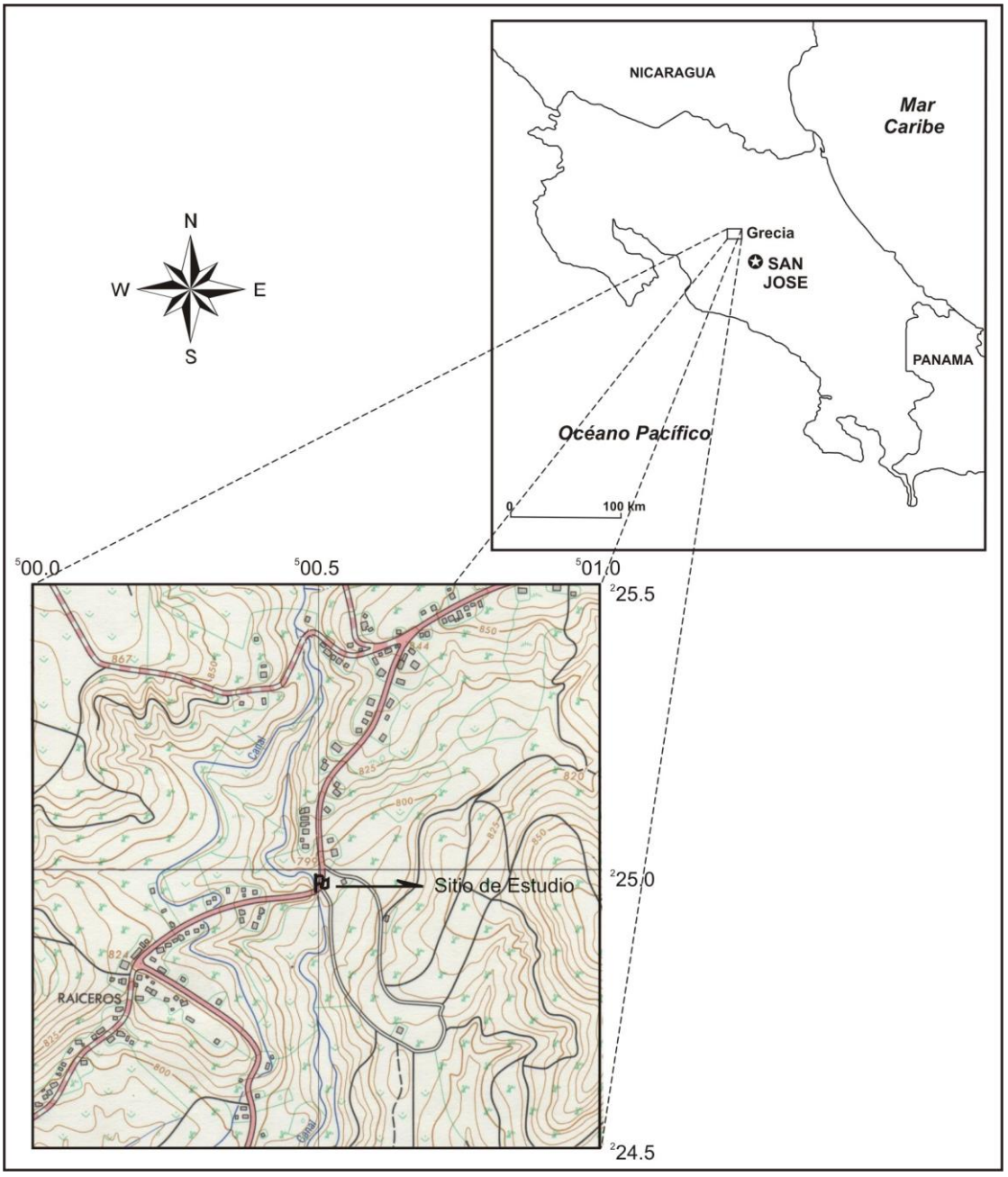

Figura 1: Ubicación geográfica del Puente de Piedra, Grecia.

Fig. 2 Vista panorámica desde el acceso norte del Puente de Piedra.

Fig. 3 Vista desde el oeste del Puente de Piedra.

2 GEOLOGÍA

En el sitio de estudio se encuentran materiales volcánicos de tipo explosivo y de caída. El primer autor en estudiar la zona es Salazar (1995), quien describe las rocas presentes utilizando unidades informales: Unidad de Alternancias de Tobas Lítico-pumíceas, Unidad de Ignimbritas Puente de Piedra, Unidad de Tobas Pumíceas y Líticas; y Tobas Recientes. Posteriormente Pérez (2000) le asigna el nombre de Litofacies tipo Puente de Piedra a las Ignimbritas que afloran en dicho puente.

Mediante trabajo de campo los autores han redefinido la geología del sitio, con la utilización de unidades informales y tomando como punto de partida el trabajo de Pérez (2000). La descripción de las unidades geológicas se hace en orden cronológico de la más antigua a la más reciente.

Unidad Brechas Río Poró.
Sobre el cauce del río Poró, 10 m aguas abajo del Puente de Piedra, aflora una brecha compuesta por fragmentos de lavas afaníticas (Fig. 4), de formas angulares a subredondeadas, de tamaños centimétricos a decimétricos, en una matriz de color oscuro. El soporte del material es por matriz, pero algunas veces se presentan contactos puntuales. La matriz es una arena fina, de color café, con un 15-20% de líticos angulares y de tamaño milimétrico. Este depósito corresponde con la subfacie de brechas líticas descrita por Salazar (1995). Pérez (2000), en su columna de litofacies para el Puente de Piedra, correlaciona estas brechas con las Brechas del Grupo Aguacate.

Unidad Tobas Río Poró
Esta unidad puede ser diferenciada en dos subunidades (Fig. 4):

Subunidad Tobas Masivas Río Poró:
Toba con matriz cinerírita de color gris, compacta, con fragmentos de pómez subredondeados y meteorizados, de hasta 0,5 cm de diámetro, los cuales, en algunos casos conservan su estructura fibrosa.

Subunidad Tobas Laminadas Río Poró:
Tobas de caída de color amarillento, matriz cinerítica con gran acumulación de pómez subredondeados de 1,5 cm de diámetro y dispuestos en gradación positiva, además, se encuentran fragmentos de tamaño lapilli en menor cantidad. En esta capa se alternan estratos de diferentes espesores, que van desde 40 cm hasta 2 cm, con buzamiento de N20ºE/20^0. El espesor medido de esta capa es de 2,12 m. Este depósito fue descrito como Unidad de Tobas Lítico-pumítica por Salazar (1995).

Unidad Ignimbrita Puente de Piedra.
Esta Unidad se diferencia en dos Subunidades (Figs. 4 y 5):

Subunidad Toba Masiva Puente de Piedra:
Constituida por una roca blanda con un espesor de 3,5 m, contiene fragmentos milimétricos de obsidiana de color negro y pómez de color blanca, ambas muy alteradas. La matriz esta formada por cenizas de color café. En general la textura de la roca es granular, presenta un alto grado de meteorización directamente afectada por la humedad aportada por el río y el goteo a través de las fracturas de las rocas que la sobreyacen. Esta subunidad representa la parte basal de la Unidad Ignimbrita Puente Piedra.

Subunidad Ignimbrita Columnar Puente de Piedra:
En la base la roca es de color gris oscuro, con textura ignimbrítica granular, la cual cuando se meteoriza presenta colores pardos, con una pátina de espesor milimétrico. Está compuesta por ceniza, líticos, pómez y fragmentos de obsidiana. La matriz está constituida por un 90% de ceniza y cristales angulares de plagioclasa de tamaño milimétrico, así como, por un 10% de fragmentos de lava, color gris oscuro a pardo, con tamaños promedios entre 2 y 1 mm. Los fragmentos de pómez tienen tamaños que varían entre 5 y 1 mm. También se observan estructuras fluidales, color amarillento y los fragmentos de obsidianas se presentan con tamaños milimétricos y formas angulares de alta esfericidad. En la parte superior del flujo las estructuras son más granulares y gruesas, el tamaño de los fiames de obsidiana es mayor (aprox. 8 cm de largo por 4 mm de ancho).

El espesor medido de la subunidad es de 7 m y en el se diferencian tres unidades de enfriamiento. La inferior forma columnas de 5 y 6 caras y tiene un espesor de 2 m. La intermedia es blocosa y de 1,60 m de espesor. La superior también es columnar, con 4, 5 y 6 caras, y un espesor de 3,40 m.

La Unidad Ignimbrita Puente de Piedra se correlaciona con la Formación Tiribí de acuerdo con Pérez (2000).

Unidad Cenizas Raicero
Sobreyaciendo a la Unidad Ignimbrita Puente de Piedra (Fig. 4) se encuentra una alternancia de materiales volcánicos de caída, los estratos presentan espesores centimétricos, con colores que varían desde anaranjado hasta café. Comúnmente en los estratos se encuentran fragmentos de pómez, líticos y carbón, con tamaños milimétricos hasta centimétricos. Los estratos presentan una posición horizontal.

3 HISTORIA GEOLÓGICA

El origen geológico del Puente de Piedra se inicia mucho antes de lo mencionado en su leyenda, además es factible que no estuviesen incluidos los indígenas Corobicíes y mucho menos algún demonio imprudente.

Hace aproximadamente 5 millones de años (5 Ma) en el período Plioceno, la actividad volcánica iniciada desde el Oligoceno (34 Ma) e intensificada en el Mioceno (24 Ma), generaba los últimos depósitos del Grupo Volcánico Aguacate, entre los que se destacan campos de lava y brechas volcánicas. Hoy día las brechas se observan a lo largo del curso del Río Poró, y conforman la base sobre la cual se erigió el Puente de Piedra.

Para el Período Cuaternario (1,8 Ma) se establecieron las cordilleras volcánicas recientes, con un vulcanismo activo en la cordillera Central, el cual se inició en su posición actual hace unos 600000 años (Denyer et al., 2000). Este proceso dejó a la depresión del Valle Central en medio de dos arcos volcánicos, uno extinto (Aguacate) y otro naciente. Posteriormente la depresión inició un proceso de relleno con productos aluviales, lahares, cenizas y otros flujos volcánicos (Denyer et al., 2000).

El Puente de Piedra está compuesto por material piroclástico, derivado de explosiones volcánicas en forma de enormes flujos ignimbríticos (nubes ardientes) y caída de cenizas Este proceso ocurrió hace unos 390000-320000 años (Marshall et al., 2003) y se puede relacionar con la explosión de la caldera del volcán Barva (Pérez, 2000). La temperatura de los flujos ignimbríticos es extremadamente alta (> 600 ºC), y al enfriarse lentamente originan una disposición de las rocas en forma de columnas prismáticas.

El río Poró probablemente estuvo represado por el depósito ignimbrítico, posteriormente se inicio un proceso de erosión de la toba masiva, el cual pudo involucrar un proceso de tubificación o erosión interna del material. En la medida en que las rocas fracturadas quedaron expuestas, las mismas iniciaron un proceso de desprendimiento, ampliando la sección transversal del arco a través de cual fluye el río.

Este proceso de ampliación de la sección transversal está gobernado por la tendencia del material de buscar su equilibrio natural, el cual ha desarrollado una sección en forma de elipse acostada. Una sección de este tipo causa el desarrollo de esfuerzos tensionales en la bóveda del arco, lo cual implica que se producirán más desprendimientos de rocas y la tendencia será el desarrollo de una sección más esbelta y estable.

Como se puede apreciar del último párrafo, la interpretación de los autores conduce a la conclusión de que la naturaleza construyó un arco en roca, a través del cual fluye el río Poró y que el encargado de la obra fue el mismo río. Es decir, no se trata de un puente para atravesar el río, sino de un arco para que el río atraviese un macizo rocoso.

4. CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO DE PUENTE DE PIEDRA

El macizo rocoso se ha caracterizado considerando que el arco o puente se ha desarrollado en los materiales correspondientes con las Subunidades Toba Masiva Puente de Piedra e Ignimbrita Columnar Puente de Piedra. La resistencia a la compresión simple de la toba masiva oscila de 160 a 247 kPa, por lo que se puede considerar como un suelo rígido o una roca extremadamente blanda según la estimación y clasificación de Gonzáles de Vallejo et al. (2002). La ignimbrita presenta una resistencia compresiva uniaxial de 23 MPa y se clasifica como una roca blanda (Gonzáles de Vallejo et al., 2002).

Por lo anterior y considerando el grado de fracturamiento que presenta la ignimbrita, para su estudio el macizo rocoso se ha dividido en dos partes: la base compuesta por la toba masiva y la parte superior (macizo rocoso fracturado) compuesta por la ignimbrita columnar (Fig. 6).

4.1 Características físicas y mecánicas de la toba masiva.

Las principales características físicas de este material se aprecian en el cuadro 1. Los resultados son los esperables para un suelo de origen volcánico.

Cuadro 1: Propiedades físicas de la toba masiva, Puente de Piedra, Grecia.

Propiedad	Resultado
Gravedad Específica	2.44
Contenido de humedad	45 %
Peso unitario húmedo	12.4 kN/m^3
Peso unitario seco	8.5 kN/m^3
Peso unitario saturado	14.8 kN/m^3
Peso unitario de los sólidos	23.9 kN/m^3
Relación de vacíos	1.81
Porosidad	64 %
Grado de saturación	61%

El material se puede clasificar como una arena limosa sin plasticidad, donde el porcentaje de arena es de 66% y el de limo es de 34%. Al no contar con plasticidad y tener un porcentaje de finos superior al 12%, este material no pude clasificarse con la utilización del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (ASTM, 1993).

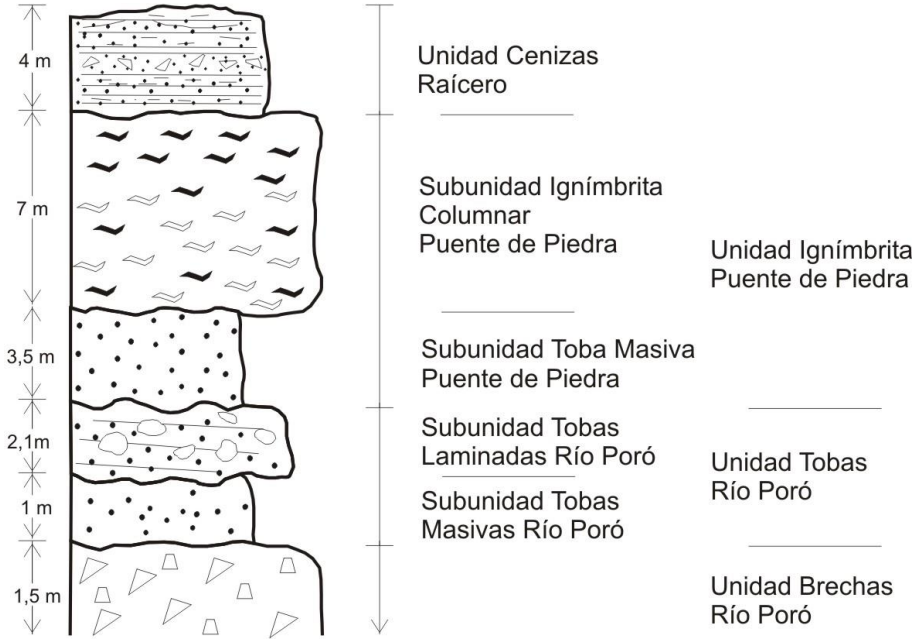

Figura 4: Columna estratigráfica de Puente de Piedra.

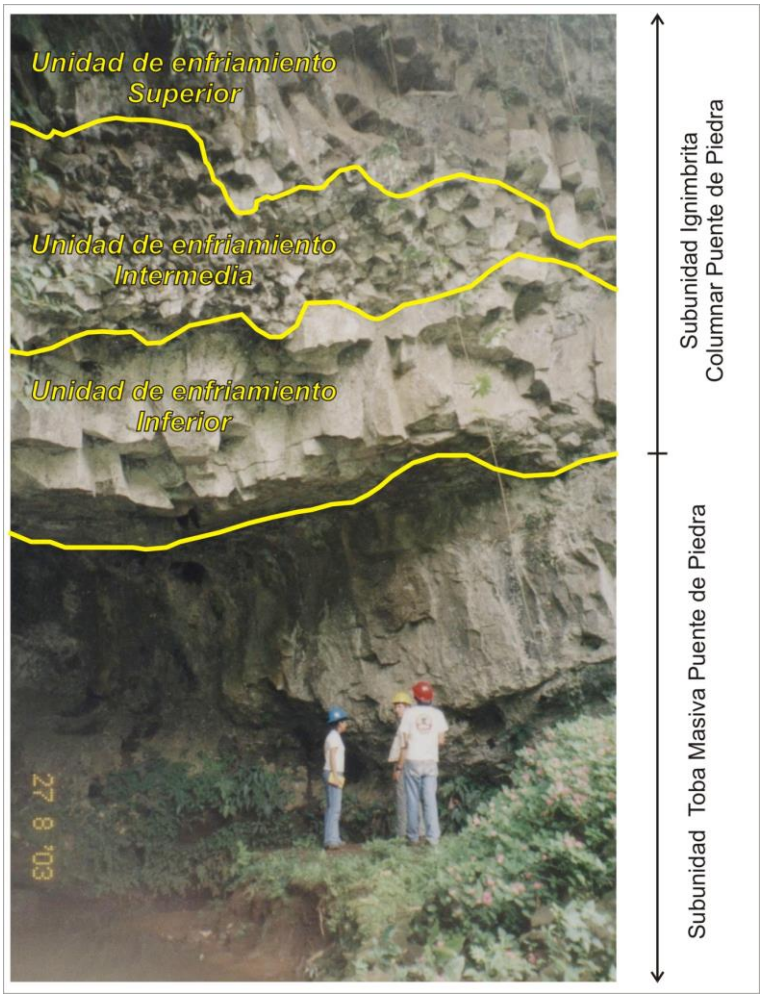

Figura 5: Fotografía mostrando la Unidad Ignimbrita Puente de Piedra en el sector oeste de la estructura.

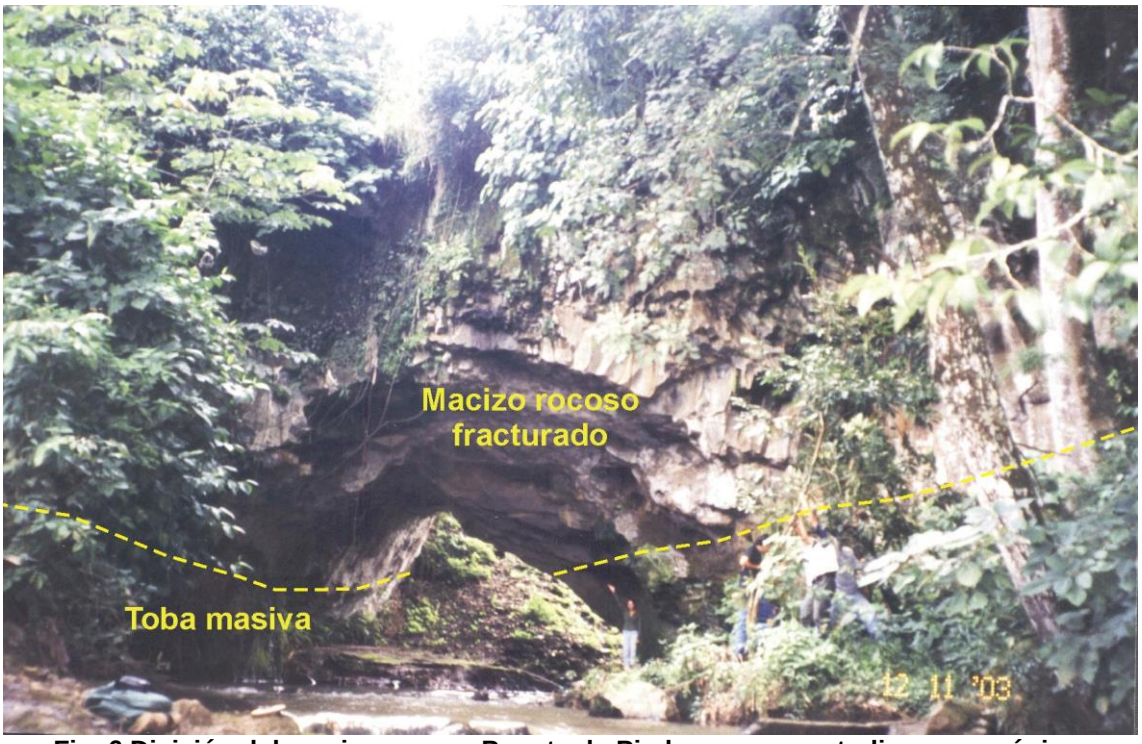

Fig. 6 División del macizo rocoso Puente de Piedra para su estudio geomecánico.

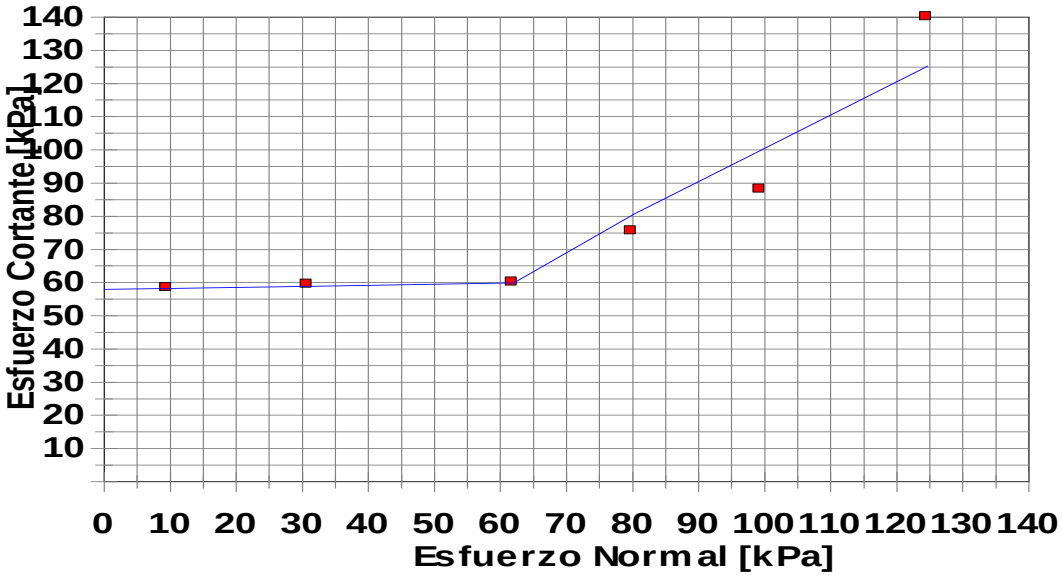

Fig. 7: Resultados de los ensayos de corte directo tipo CD, toba masiva, Puente de Piedra, Grecia.

Desde el punto de vista mecánico, el material se ha ensayado para determinar su resistencia a la compresión inconfinada y su resistencia al esfuerzo cortante, esta última se ha evaluado mediante ensayos de corte directo tipo CD. En el cuadro 2 y la figura 7 se observan los resultados obtenidos.

Cuadro 2. Parámetros de resistencia de la toba masiva, Puente de Piedra, Grecia.

Parámetro	Resultado
Resistencia a la compresión inconfinada	160-247 kPa
Cohesión no drenada	80-124 kPa
Cohesión efectiva para σ_n<65 kPa	58 kPa
Angulo de fricción efectivo para σ_n<65 kPa	2º
Cohesión efectiva para σ_n>65 kPa	0 kPa
Angulo de fricción efectivo para σ_n>65 kPa	45º

El material aparenta contar con una presión de preconsolidación de 65 kPa, sin embargo, si consideramos que se trata de un material netamente friccionante, no se debería presentar esta condición. La explicación que se brinda es que no se trata de una presión de preconsolidación, sino del efecto de soldadura de las partículas que componen la toba al depositarse en condiciones de temperatura elevada.

4.2 Caracterización del macizo rocoso fracturado.

Las propiedades físicas de las discontinuidades (fracturas, diaclasas, fallas) controlan el comportamiento de los macizos rocosos. En el caso de Puente de Piedra se han seleccionado algunos descriptores y unidades de medida, con el propósito de apoyar los sistemas de clasificación de macizos rocosos. La recopilación de información se ha realizado mediante dos conteos lineales de detalle, uno en el sector este y el otro en el oeste del macizo rocoso fracturado. Algunas características de los conteos se aprecian en el cuadro 3.

Cuadro 3: Conteos lineales de detalle de las discontinuidades.

	Sector Este	Sector Oeste
Dirección	N60ºW	N40ºE
Inclinación	Horizontal	Horizontal
Longitud	19.41 m	14.50 m
Número de observaciones	104	99
Método	Dirección de buzamiento y magnitud del buzamiento	Dirección estratigráfica y magnitud del buzamiento

Los descriptores evaluados son: continuidad de las fracturas, rugosidad, dureza de la pared, humedad, meteorización de la pared, apertura de las discontinuidades, relleno y espesor del relleno. Los datos se han procesado estadísticamente para tratar de obtener una descripción realista y confiable del macizo rocoso (Cuadro 4).

Cuadro 4: Descripción del macizo rocoso fracturado de acuerdo con los conteos lineales de detalle.

Descriptor	Característica
Continuidad	< 1 m
Rugosidad	Ondulada
Dureza de la pared	Dura
Humedad	Húmedo sin agua libre
Meteorización de la pared	Poco meteorizada
Apertura de las discontinuidades	1-3 mm
Relleno de las discontinuidades	Pátinas
Espesor del relleno	Ninguno

Posteriormente, se han seleccionado 6 sitios para la realización de la clasificación del macizo rocoso, mediante la aplicación de los sistemas de clasificación RMR y Q (Bieniawski, 1989). Los sitios seleccionados son:

- Unidad de Enfriamiento Inferior en la pared este (S1),
- Unidad de Enfriamiento Inferior en la bóveda del arco en margen izquierda (S2),
- Unidad de Enfriamiento Intermedia en la pared oeste (S3),
- Unidad de Enfriamiento Inferior en la pared oeste (S4),
- Unidad de Enfriamiento Inferior en la bóveda del arco en margen derecha (S5),
- Unidad de Enfriamiento Superior en la pared oeste (S6),

Los resultados se pueden considerar en el cuadro 5.

Cuadro 5: Clasificación del macizo rocoso fracturado.

Sitio	Sistema RMR			Sistema Q	
	Puntuación	Clase	Calidad	Valor	Calidad
S1	37	IV	Pobre	0.92	Muy pobre
S2	53	III	Media	2.36	Pobre
S3	35	IV	Pobre	0.20	Muy pobre
S4	34	IV	Pobre	0.20	Muy pobre
S5	31	IV	Pobre	0.55	Muy pobre
S6	41	III	Media	0.40	Muy pobre

De los resultados obtenidos se concluye que la calidad del macizo rocoso es pobre, de acuerdo con el sistema RMR, y muy pobre según el sistema Q.

5. CAPACIDAD DE SOPORTE DE LA BASE DEL PUENTE.

Como se ha expuesto anteriormente, la base del puente es un suelo rígido, el cual soporta un macizo rocoso fracturado (Fig. 6). Desde esa perspectiva se torna necesario conocer si la base es capaz de soportar, con la seguridad apropiada, la carga de roca impuesta por la sección superior.

El peso unitario de la ignimbrita oscila de 16.4 a 18.2 kN/m^3, con un promedio de 17.3 kN/m^3, su espesor es de 11 m, por lo tanto, el esfuerzo vertical que transmite a la toba masiva es de 190.3 kPa.

La capacidad de carga última se ha evaluado mediante los modelos de Meyerhof, Hansen y Vesic (ASCE, 1993) y con la utilización de los parámetros físicos y mecánicos expuestos en el apartado 4.1. La capacidad de carga se ha determinado para una zapata corrida infinita de 1.0 m de ancho, sin ningún desplante. Los resultados se aprecian en el cuadro 6.

Cuadro 6.: Capacidad de soporte de la base del puente, Puente de Piedra, Grecia.

Modelo	Capacidad de carga última [kPa]	Esfuerzo vertical [kPa]	Factor de seguridad
Meyerhof	656	190	3.45
Hansen	501		2.64
Vesic	678		3.57

Es claro que la condición actual, desde el punto de vista de la capacidad de carga de la toba masiva, es segura; pues el factor de seguridad se encuentra por encima de un valor de 2.5.

Por otro lado, se considera conveniente proceder a proteger la base del puente ante la erosión causada por el río Poró durante sus crecidas, mediante la utilización de estructuras diseñadas por un profesional en Ingeniería Civil.

6. RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO FRACTURADO DE PUENTE DE PIEDRA.

En este apartado se procede a estimar las propiedades de resistencia y deformación del macizo rocoso fracturado in situ, intentando que esta estimación sea, en la medida de las posibilidades, la más realista y confiable. Para entender el comportamiento de este macizo rocoso fracturado se requiere del estudio del material rocoso intacto y de las superficies de las discontinuidades (fracturas), ambos componen un sistema que presenta las siguientes características:

- Descripción: roca intensamente fracturada.
- Resistencia: razonablemente isotrópico, muy dilatante a niveles bajos de esfuerzo y con ruptura de partículas a niveles altos de esfuerzo.
- Consideraciones teóricas: comportamiento de piezas angulares entrabadas poco entendido.

Dependiendo del número, orientación y naturaleza de las discontinuidades, las piezas de roca intacta podrán trasladarse, rotar o triturarse como respuesta a los esfuerzos a que sea sometido el macizo rocoso y debido a que se puede dar un gran número de combinaciones de formas y tamaños de bloques, entonces se torna necesario encontrar alguna tendencia de comportamiento que sea común a todas estas combinaciones (Hoek, 1994).

6.1 Resistencia de la roca intacta.

El criterio de ruptura de Hoek y Brown (1980) se ha utilizado para describir el comportamiento de la roca intacta de la Subunidad Ignimbrita Columnar Puente de Piedra, pues el mismo se ajusta al tipo de falla rígida observada durante los ensayos de compresión inconfinada del material. El criterio se presenta según la siguiente expresión (Hoek y Brown, 1980):

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left[(m_i \sigma_3' / \sigma_c) + 1\right]^{1/2}$$

donde:
σ_1' es el mayor esfuerzo efectivo principal en la falla,
σ_3' el menor esfuerzo efectivo principal en la falla,
σ_c la resistencia compresiva uniaxial de la roca intacta y
m_i la constante de material para la roca intacta.

El valor de σ_c se ha determinado mediante ensayos de laboratorio y corresponde con 23 MPa. El valor de la constante m_i se ha estimado considerando que se trata de una roca piroclástica efusiva, para la cual Hoek (1994) asigna un valor de 15. El resultado para el criterio de ruptura se aprecia en la figura 8.

6.2 Resistencia del macizo rocoso fracturado.

El criterio de ruptura de Hoek (1994) utlizado es el siguiente

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left[(m_b \sigma_3' / \sigma_c) + s\right]^a$$

donde:
m_b es el valor de la constante m para el macizo rocoso,
s y a son constantes que dependen de las características del macizo rocoso,
σ_c la resistencia compresiva uniaxial de las piezas de roca intacta,
σ_1' y σ_3' los esfuerzos principales axial y confinante.

Para el cálculo de los resultados se ha utilizado el paquete RocLab de Rocscience Inc. (2003) y se han considerado las clasificaciones de macizos rocosos RMR y Q para estimar el Indice de Resistencia Geológica (GSI) (Hoek, 1994) (Cuadro 7). El factor de perturbación D, utilizado en RocLab (Rocscience Inc., 2003) se a asignado como de 0.8, pues el arco ha sido desarrollado por la acción erosiva del río Poró y la caída constante de bloques de roca, lo cual ha causado danos locales severos, que pueden extenderse hasta 3 m en el macizo rocoso.

Cuadro 7: Parámetros utilizados en la estimación de la resistencia del macizo rocoso fracturado.

Sitio	GSI	m_b	s	a
S1	42	0.5	0.0002	0.5
S2	54	1.0	0.0009	0.5
S3	40	0.4	0.0001	0.5
S4	36	0.3	0.00006	0.5
S5	40	0.4	0.0001	0.5
S6	43	0.5	0.0002	0.5

Los resultados obtenidos para cada uno de los sitios se aprecian en el cuadro 8. En el cuadro 9 se presenta la estimación de los parámetros del macizo rocoso considerando los intervalos de confiabilidad de los datos.

Cuadro 8: Resultados de la estimación de la resistencia del macizo rocoso para cada sitio.

Sitio	GSI	c [MPa]	ø [º]	σ_t [kPa]	σ_{cm} [MPa]	σ_{gs} [MPa]	E_m [MPa]
S1	42	1.0	17.0	-7.0	0.3	2.0	1815.6
S2	54	1.3	21.9	-20.0	0.7	3.0	3622.6
S2	40	0.9	16.2	-6.0	0.2	1.9	1618.1
S4	44	0.8	14.8	-4.0	0.2	1.6	1285.3
S5	40	0.9	16.2	-6.0	0.2	1.9	1618.1
S6	43	1.0	17.4	-8.0	0.3	2.0	1923.2

c : cohesión {MPa] para el ajuste de la envolvente de Mohr-Coulomb,
ø : ángulo de fricción [º] para el ajuste de la envolvente de Mohr-Coulomb,
σ_t : resistencia tensional [kPa] del macizo rocoso,
σ_{cm} : resistencia compresiva uniaxial [MPa] del macizo rocoso,
σ_{gs} : resistencia global [MPa] del macizo rocoso,
E_m : módulo de deformación [MPa] del macizo rocoso.

Cuadro 9: Parámetros del macizo rocoso fracturado considerando los intervalos de confiabilidad de los datos.

Parámetro	Media	Desviación estándar	Límite superior	Límite inferior
c [MPa]	0.98	0.17	1.18	0.79
Ø [º]	17.3	2.45	20.1	14.4
σ_t [kPa]	-8.5	-5.8	-15.0	-2.0
σ_{cm} [MPa]	0.32	0.19	0.54	0.094
σ_{gs} [MPa]	2.1	0.48	2.6	1.5
E_m [MPa]	1980.5	833.4	2938.4	1022.6

De los cuadros anteriores se confirma que el macizo rocoso fracturado de Puente de Piedra es de calidad pobre, por lo tanto se requiere la implementación de algún tipo de soporte para asegurar su estabilidad. Los resultados gráficos del análisis de la resistencia del macizo rocoso, utilizando RocLab (Rocscience Inc., 2003), se aprecian en las figuras 9 y 10.

7. REQUERIMENTOS DE SOPORTE.

Se han determinado los requerimentos de soporte del Puente de Piedra de acuerdo con las clasificaciones de macizos rocosos RMR y Q (Bieniawski, 1989).

Según el sistema RMR el macizo rocoso se puede considerar como de calidad pobre (IV), para un caso como este las sugerencias de soporte indican que se requiere instalar el siguiente tipo revestimiento (González de Vallejo et al., 2002):

- pernos sistemáticos de 4-5 m de longitud, con separaciones de 1-1.5 m en la bóveda y la pared,
- malla electrosoldada,
- concreto lanzado de 10-15 cm de espesor en la bóveda y de 10 cm de espesor en la pared.

Según el sistema Q el macizo rocoso se clasifica como muy pobre. El tipo de soporte recomendado se puede definir de acuerdo con lo propuesto por Barton et al. (1974), en donde se utilizan pernos, concreto lanzado y blindajes. También se puede utilizar la nueva versión del método (González de Vallejo et al., 2002), donde se utiliza, además de pernos, el concreto lanzado reforzado con fibras. Para establecer el tipo de revestimiento se requiere calcular la dimensión equivalente (Barton et al., 1974), la cual es de 10.5 para el caso de Puente de Piedra. Según la clasificación de Barton et al. (1974) se pueden distinguir dos tipos de revestimientos, el #27 y el # 31 (Fig. 11).

El tipo de revestimiento #27 consiste en:

- pernos sistemáticos, pasivos, cementados y con espaciamiento de 1 m,
- concreto lanzado de 5-7.5 cm de espesor, reforzado con malla electrosoldada.

Por su parte el revestimiento #31 consta de:

- arco de concreto chorreado de 20-40 cm de espesor,
- pernos sistemáticos, activos, cementados y con espaciamiento de 1 m.

Según la nueva versión del método Q, se pueden instalar dos tipos adicionales de revestimiento. El primero consta de:

- concreto lanzado reforzado con fibras, de 9-12 cm de espesor,
- pernos sistemáticos con separación de 2.1-2.3 m.

El segundo tipo está compuesto de:

- concreto lanzado reforzado con fibras, de 12-15 cm de espesor,
- pernos sistemáticos con separación de 1.7-2.1 m

Considerando todas las posibilidades de revestimiento y el comportamiento que ha presentado el macizo rocoso hasta el momento, se sugiere la instalación del siguiente tipo de soporte (Fig. 12):

- pernos sistemáticos, activos, cementados, de 4 m de longitud y 1 m de espaciamiento,
- concreto lanzado de 10 cm de espesor, reforzado con malla electrosoldada.

Es claro que un revestimiento como el sugerido no es estéticamente aceptable en una estructura natural considerada como patrimonio cultural. Por lo anterior, sería muy importante considerar otro tipo de solución para brindar estabilidad al puente, como lo es la inyección del macizo rocoso con lechada de cemento.

Si se toma en cuenta que el costo de las obras sugeridas es alto y que, desde el punto de vista de la seguridad vial, el Puente de Piedra no es una estructura apropiada para el tránsito vehicular, pues se encuentra en curva, solo cuenta con un carril y la vegetación impide la visibilidad, entonces se debe valorar la posibilidad de construir una vía alterna con su respectivo puente.

8 CONCLUSIONES.

El Puente de Piedra está compuesto por materiales de origen volcánico de tipo explosivo y caída de cenizas.

La fundación de la estructura natural se desarrollo a partir de las Brechas del Grupo Aguacate y posteriormente se depositaron flujos piroclásticos y cenizas volcánicas.

El río Poró se encargó de modelar la sección transversal del arco por el que atraviesa el macizo rocoso ignimbritico.

En realidad la naturaleza se ha encargado de construir un arco a través del cual fluye el río Poró y no se trata de un puente construido por Satán para cruzar el mismo río, como dice la leyenda. Lo anterior refleja la fascinante astucia de la cultura popular, para dar explicación a algunos procesos naturales cuando no se cuenta con explicaciones científicas.

La toba masiva que compone la base del puente presenta el efecto de soldadura de las partículas que la componen, pues las mismas se han depositado en condiciones de temperatura elevada.

La condición actual del puente, desde el punto de vista de la capacidad de carga de la toba masiva, es segura; pues el factor de seguridad se encuentra por encima de un valor de 2.5, sin embargo, se considera conveniente proceder a proteger la base del puente ante la erosión causada por el río Poró durante sus crecidas, mediante la utilización de estructuras diseñadas por un profesional en Ingeniería Civil.

La calidad del macizo rocoso fracturado es pobre, de acuerdo con el sistema RMR, y muy pobre según el sistema Q, por lo tanto se requiere la implementación de algún tipo de soporte para asegurar su estabilidad.

Se sugiere la instalación del siguiente tipo de soporte:

- pernos sistemáticos, activos, cementados, de 4 m de longitud y 1 m de espaciamiento,
- concreto lanzado de 10 cm de espesor, reforzado con malla electrosoldada.

Es claro que un revestimiento como el sugerido no es estéticamente aceptable en una estructura natural considerada como patrimonio cultural, por lo tanto, sería muy importante considerar otro tipo de solución para brindar estabilidad al puente, como lo es la inyección del macizo rocoso con lechada de cemento.

Si se toma en cuenta que el costo de las obras sugeridas es alto y que, desde el punto de vista de la seguridad vial, el Puente de Piedra no es una estructura apropiada para el tránsito vehicular, pues se encuentra en curva, solo cuenta con un carril y la vegetación impide la visibilidad, entonces se debe valorar la posibilidad de construir una vía alterna con su respectivo puente.

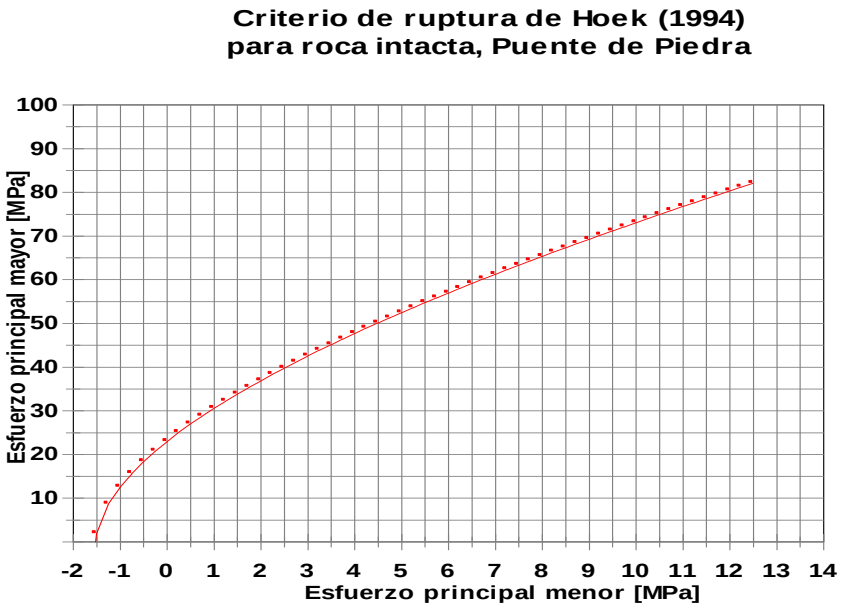

Fig. 8. Criterio de ruptura de Hoek (1994) para la roca intacta (ignimbrita) del macizo rocoso Puente de Piedra.

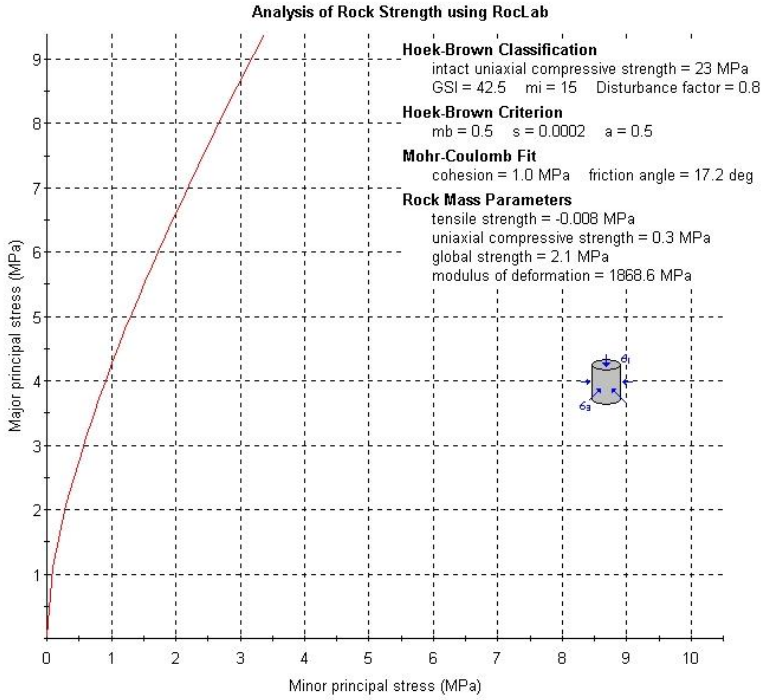

Fig. 9 Diagrama de esfuerzos principales para el criterio de ruptura de Hoek (1994), aplicado al macizo rocoso fracturado de Puente de Piedra.

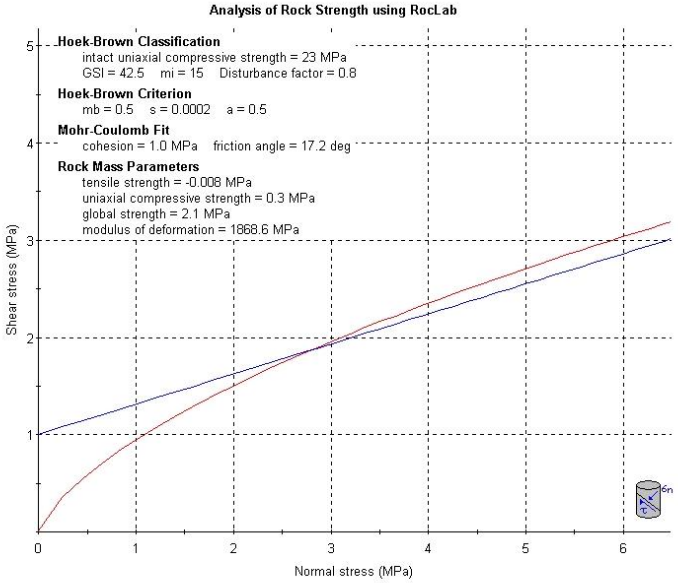

Fig. 10 Esfuerzo normal contra esfuerzo cortante y ajuste de la envolvente de Mohr-Coulomb para el macizo rocoso fracturado de Puente de Piedra.

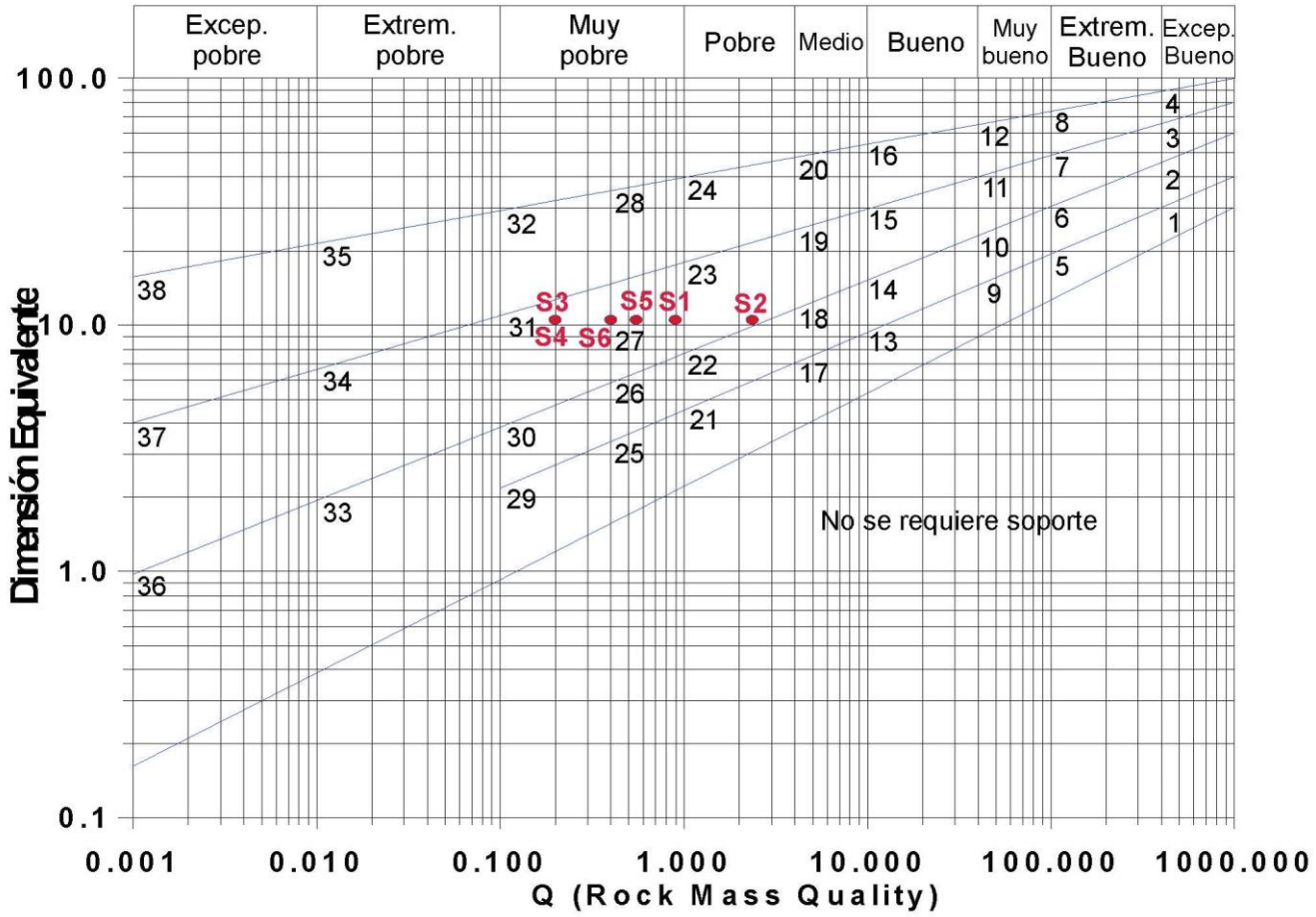

Fig. 11 Determinación del tipo de revestimiento según la clasificación de macizos rocosos de Barton et al. (1974). Macizo rocoso Puente de Piedra.

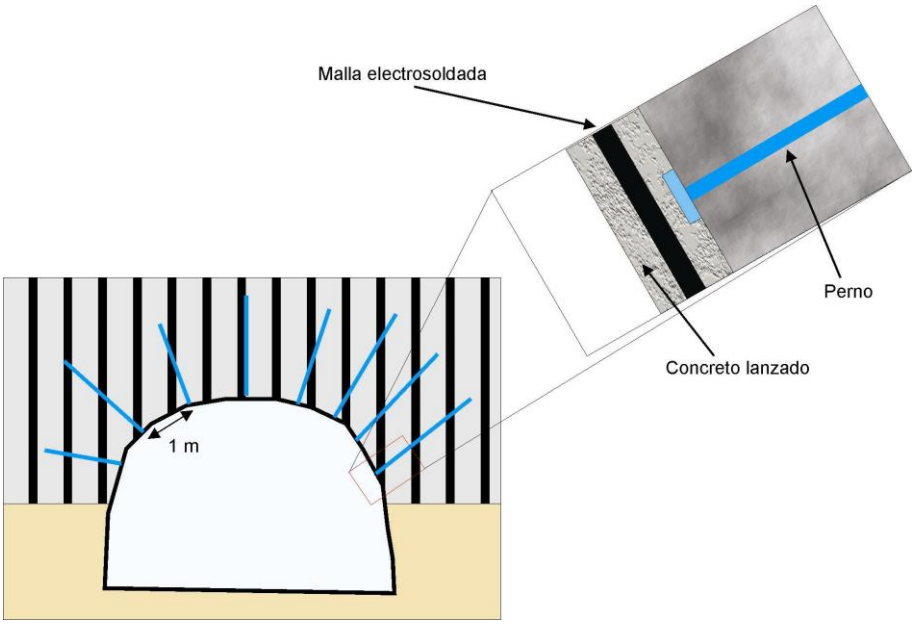

Fig. 12 Esquema del tipo de soporte requerido en Puente de Piedra.

9 BIBLIOGRAFÍA.

ASCE, 1993: Bearing Capacity of Soils. American Society of Civil Engineers Press, USA. 142 p.p.

ASTM, 1993: Annual book of ASTM standars. Soil, rock, dimension stone, geosinthetics. Volume 04.08, Section 4 Construction. Philadelphia. 1470 p.p.

BARTON, N., LIEN, R. & LUNDE, J., 1974: Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. Rock Mechanics 6, 189-236.

BIENIAWSKI, Z.T., 1989: Engineering Rock Mass Classifications. John Wiley & Sons, New York. 251 p.p.

DENYER, P., ALVARADO, G. Y AGUILAR, T., 2000: Historia Geológica. En: DENYER, P. Y KUSSMAUL, S. (Comps.), 2000: Geología de Costa Rica. 155-167. Editorial Tecnológica de Costa Rica.

GONZÁLES DE VALLEJO, L.I., FERRER, M., ORTUÑO, L. & OTEO, C., 2002: Ingeniería Geológica. Prentice Hall, Madrid. 715 p.p.

HOEK, E., 1994: Strength of Rock and Rock Masses. News Journal, International Society for Rock Mechanics. Volume 2, number 2.

HOEK, E. & BROWN, E.T., 1980: Underground excavations in rock. Institution of Mining and Metallurgy. London

JIMÉNEZ, I, 1978: El Puente que hizo el Diablo. En: ZELEDÓN. E. 1998: Sortilegios de Viejas Raíces, Leyendas.-146 págs. Editorial Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

MARSHALL, J., IDLEMAN, B., GARDNER, T. Y FISHER, D., 2003: Landscape evolution within a retreating volcanic arc, Costa Rica, Central America. Geology, 31 (5): 419-422.

PÉREZ, W., Vulcanología y petroquímica del evento ignimbrítico del Pleistoceno Medio (0,33 M.a.) del Valle Central de Costa Rica. 170 págs. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica (tesis Lic.).

ROCSCIENCE INC., 2003: RocLab. Computer software. http://www.rocscience.com/

SALAZAR, J. H., 1995: Estudio Geológico Ambiental de la Hoja Topográfica Puente de Piedra 3346-III-19 y Alrededores (escala 1:10000), Cantón de Grecia, Provincia de Alajuela, Costa Rica.-97 págs. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica (informe Campaña Geológica).