

Evaluación de la Capacidad Portante de la Cimentación Superficial sobre Macizo Rocoso

E. Maldonado

Cigeomin Consulting, Lima - Perú

RESUMEN

La cimentación de una estructura sobre macizo rocoso requiere de la evaluación exhaustiva de las características del macizo rocoso, características geomecánicas de las discontinuidades y cargas externas. El objetivo del presente estudio fue determinar una metodología de cálculo de la capacidad portante de macizo rocoso y evaluación de la estabilidad de la fundación, aspectos de vital importancia en el diseño de las cimentaciones de infraestructuras civiles y mineras.

Este trabajo presenta una evaluación de la capacidad portante de la cimentación superficial en roca caliza, que forma parte de la cimentación de una estructura de cobertura de una poza, considerando parámetros de resistencia del macizo rocoso y la influencia de las discontinuidades. Además, presenta la evaluación de la estabilidad del talud ubicado en el contorno de la cimentación y su reforzamiento de la pared con pernos de anclaje y el resultado de un ensayo *pull test* realizado como control de calidad durante su etapa de construcción.

La evaluación de la capacidad portante de la cimentación en roca se realizó aplicando cuatro métodos analíticos; y la evaluación de la estabilidad de la pared del contorno se realizó a través de análisis cinemático usando el programa UnWedge y por resistencia del macizo rocoso usando el programa de elementos finitos Phase2.

1 INTRODUCCIÓN

La capacidad de carga última de macizo rocoso es un parámetro de vital importancia en el diseño de cimentación de infraestructuras mineras, presas de concreto, caminos, puentes, edificaciones e infraestructuras de gran tamaño. Muchos problemas de cimentaciones en macizos rocosos pueden ser atribuidos a sobrecargas de gran magnitud, a la geología, a la estructura del macizo rocoso (orientación, espacio, dimensiones, rugosidad, apertura, relleno, número de familia de discontinuidades), resistencia del macizo rocoso e hidrogeología; por lo que es necesario un exhaustivo investigación de la fundación, buen diseño y una correcta construcción de la cimentación de las infraestructuras, a fin de evitar desastres por problemas de cimentación como el caso de la rotura de la presa de Malpasset (Duffaut, 2013) que se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Falla de la presa de Malpasset (1959)

El presente estudio presenta varios métodos de estimación de la capacidad portante de cimentación en roca, aplicado a una zapata que se ilustra en la Figura 2, ubicada próximo a la corona de un talud de basamento rocoso. Asimismo, se presenta la evaluación de la estabilidad del talud de la fundación, usando el criterio de análisis cinemático basado en las características de las familias de discontinuidades y un análisis de estabilidad por método equilibrio límite en base a la resistencia y calidad del macizo rocoso, usando el programa UnWedge y Phase2 de Rocscience.

De acuerdo con los resultados de la evaluación de estabilidad de la pared, se ha visto la necesidad de reforzar el talud con pernos de anclaje para asegurar la fundación de la estructura. Finalmente, los pernos de anclaje fueron sometidos a ensayos *pull test* durante la construcción como parte de aseguramiento de calidad.



Figura 2. Cimentación sobre roca.

2 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

La caracterización geotécnica del macizo rocoso ha sido realizada usando la valoración del macizo rocoso (RMR) de Bieniawski de 1989. Las valoraciones de índice de calidad de roca (RQD) y RMR han sido registradas de testigos de perforaciones geotécnicas y mapeos superficiales, y a partir de éstos valores se estimaron los valores de índice de Resistencia Geológica (GSI) de la unidad litológica Caliza de la pared de la fundación.

Asimismo, a partir de las muestras representativas de testigos de perforaciones se realizaron ensayos de laboratorio para caracterizar la masa de roca. Los principales ensayos de laboratorio para caracterizar la roca intacta han sido la resistencia a compresión uniaxial (UCS), ensayos triaxiales y ensayos de tracción para determinar el parámetro “ m_i ” necesario para la estimación de los parámetros de Hoek-Brown (Hoek et al, 2002).

El basamento rocoso está afectado por familias de discontinuidades con elementos de orientación (dirección de buzamiento/buzamiento) N264°/38°, N350°/85° y N260°/38°. Un ángulo de fricción de 35° fue asumido para representar la resistencia al corte de estas discontinuidades.

El basamento rocoso está conformado por caliza fracturada como mostrado en la Figura 3 cuyos parámetros de resistencia se presentan en la Tabla 1 y además se consideró un factor de disturbancia $D=0.3$ por el uso de martillo hidráulico en el proceso de excavación. Para propósitos de estimación de la capacidad portante por algunos métodos, la resistencia del macizo rocoso ha sido expresado en términos de criterio

de falla de Mohr Coulomb con parámetros equivalentes obtenidos a partir de la envolvente de falla de Hoek-Brown generalizado, siendo una cohesión de 500 KPa y un ángulo de fricción de 45°.



Figura 3. Muestra de caliza de la fundación

Tabla 1. Parámetros de resistencia del macizo rocoso

Roca	Peso Unitario (kN/m ³)	UCS MPa	RQD	GSI	RMR ₈₉	m_i
Caliza	26	46	70	60	65	10

3 EVALUACIÓN ANALÍTICA DE CAPACIDAD PORTANTE DE ROCA

La capacidad portante o carga última de la cimentación superficial sobre roca se determinan principalmente de acuerdo a las características geomecánicas de la masa rocosa y condiciones de las discontinuidades con respecto al ancho de la base, y para el cálculo existen diversos métodos como propuesto por Goodman (1989), U.S Army Corps of Engineers (1994), Bowles (1994), método de Serrano & Olalla y entre otros. La anisotropía y heterogeneidad originados por presencia de discontinuidades condicionan el comportamiento resistente de la cimentación. Asimismo, debido a la carga transmitida a la cimentación, se presentan diversos mecanismos de falla, así como de tipo fracturamiento, trituración, rotura en forma de cuña, punzonamiento y de corte, de acuerdo con las condiciones geológicas, estructurales y características del macizo rocoso del sitio.

3.1 Método de Goodman (1989)

De acuerdo con el criterio de Goodman (1989), la capacidad de carga última se puede determinar a partir de la resistencia a la compresión no confinada de la masa rocosa de la cimentación y el ángulo de fricción de la roca. La Figura 4 presenta la cimentación que muestra dos regiones, la región A que representa una zona de compresión triaxial confinada por esfuerzo lateral P_h , conformado por roca triturada debido a la carga máxima (q_f), y la región B representa

una zona de compresión uniaxial; ambas son descritas mediante envolventes de falla en la Figura 5.

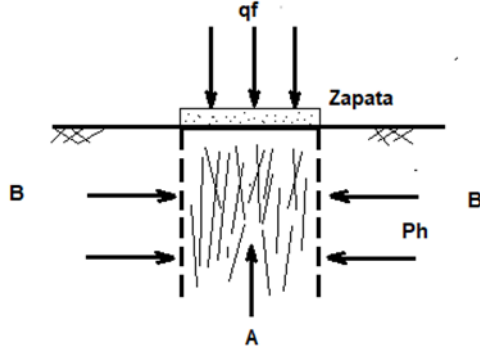


Figura 4. Cimentación apoyada sobre roca

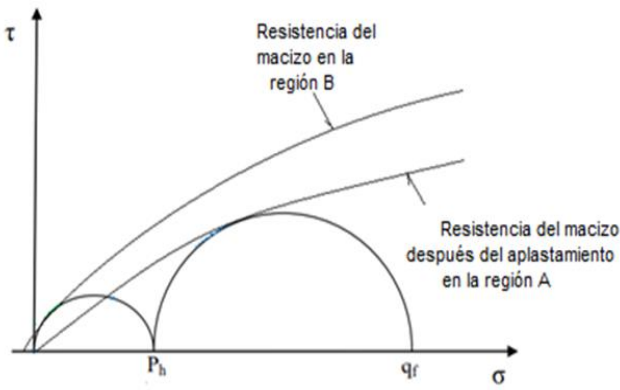


Figura 5. Análisis de capacidad de carga en roca (Goodman, 1989)

Según Goodman (1989), la capacidad de carga de un macizo rocoso homogéneo y discontinuo no puede ser inferior que la resistencia a la compresión no confinada de la masa rocosa alrededor de la base y basado en la Figura 5 propone la siguiente expresión:

$$q_f = q_u (N_\phi + 1) \quad (1)$$

$$N_\phi = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (2)$$

$$q_{adm} = \frac{q_f}{5} \quad (3)$$

3.2 Método de U.S Army Corps of Engineers (USACE, 1994)

Este método se basa en la fórmula tradicional de Terzaghi, el cual se ajusta para cada caso de acuerdo con las condiciones del macizo rocoso (roca intacta, roca diaclasada, roca estratificada y roca fracturada) asociado con las discontinuidades (fracturas abiertas, fracturas cerradas, inclinación, separación), estratificación y fracturamiento. El método considera nueve

casos, para el presente trabajo se ilustra algunos que a continuación se describen.

Para el caso de fracturas cerradas en fundación de macizo rocoso de tipo de falla de corte general se considera la siguiente ecuación:

$$q_{ult} = c N_c + 0.5B\gamma N_\gamma + \gamma D N_q \quad (4)$$

q_{ult} = Capacidad de carga última

C = cohesión del macizo rocoso

$$N_q = N_\phi^2 \quad (5)$$

$$N_\phi = \left(\tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \right)^2 \quad (6)$$

$$N_c = 2N_\phi^{\frac{1}{2}} (N_\phi + 1) \quad (7)$$

$$N_\gamma = N_\phi^{\frac{1}{2}} (N_\phi^2 - 1) \quad (8)$$

D = profundidad de desplante

γ = Peso unitario de la roca

ϕ = ángulo de fricción interna del macizo rocoso

Para el caso por corte general con potencial de falla a través de las juntas y con familia de discontinuidades con buzamiento moderado, se considera la siguiente expresión:

$$q_{ult} = 0.5B\gamma N_\gamma + \gamma D N_q \quad (9)$$

3.3 Método de Bowles (1996)

El método considera la ecuación dada por Terzaghi para obtener la capacidad portante de roca usando el ángulo de fricción interna, cohesión de la roca y factores de capacidad de carga propuestos por Stagg y Zienkiewicz(1968), como:

$$N_q = \tan^6 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (10)$$

$$N_c = 5 \tan^4 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (11)$$

$$N_\gamma = N_q + 1 \quad (12)$$

Asimismo, se pueden usar los factores de corrección (S_c , S_γ) propuestos por Sowers (1979).

$$q_{ult} = c N_c S_c + \gamma D N_q + 0.5B\gamma N_\gamma S_\gamma \quad (13)$$

Luego, q_{ult} debe ser reducido en base a RQD , siendo:

$$q'_{ult} = q_{ult} (RQD)^2 \quad (14)$$

Para determinar la carga admisible, según este criterio el factor de seguridad (FS) depende de RQD, para valores más altos de RQD (menores que aproximadamente 0.75) es común usar FS de 5 a 10, aclarando que RQD de 0.80 no requeriría un FS tan alto como para RQD de 0.40.

3.4 Método de Serrano y Olalla

Serrano y Olalla (2001) han propuesto la estimación de capacidad portante de roca usando el criterio de Hoek y Brown(2002), para medio rocoso homogéneo e isotrópico, como el grupo I, IV y V de la clasificación de Hoek y Brown mostrada en la Figura 6. De acuerdo con este método, la capacidad portante o carga última de una cimentación superficial en un macizo rocoso se puede determinar de acuerdo con la siguiente expresión:

$$q_{ult} = P_h = \beta (N_\beta - \xi) \quad (15)$$

Donde:

$$\beta = \frac{m \sigma_{ci}}{8} = \frac{m_i \sigma_{ci}}{8} \exp \frac{RMR-100}{28} \quad (16)$$

$$\xi = \frac{8s}{m^2} = \frac{8}{m_i^2} \exp \frac{RMR-100}{25,2} \quad (17)$$

siendo m, s y m_i parámetros de Hoek y Brown y σ_{ci} el valor de la resistencia a compresión simple de la matriz rocosa.

El coeficiente de carga N_β es una generalización de los valores de N_c y N_q de Prandtl, está en función de la inclinación del terreno, de la inclinación de las cargas y de la sobrecarga externa normalizada actuando alrededor de la zapata, σ_{01}^* .

$$\sigma_{01}^* = \frac{\sigma_1}{\beta} + \xi \quad (18)$$

Donde $\sigma_1 = \gamma h$, peso unitario del macizo por profundidad de la cimentación. Entonces con el valor de RMR y σ_{01}^* a través de ábaco de Serrano y Olalla (2001) se obtiene el factor N_β .

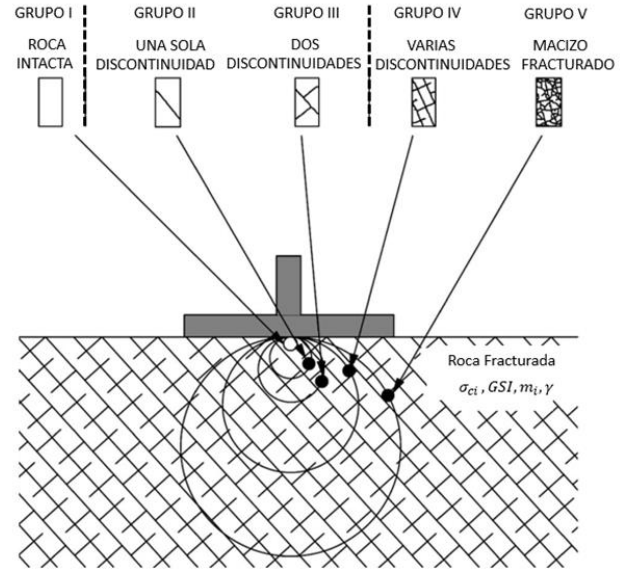


Figura 6. Aplicabilidad de criterio de Hoek-Brown para cimentaciones superficiales

Para estimar la carga admisible, el coeficiente de seguridad se expresa por el producto de dos factores:

$$F = F_p F_m \quad (19)$$

El factor F_p considera las variaciones estadísticas de los parámetros de la roca y se obtiene a través de un ábaco en función de RMR y la resistencia simple para una probabilidad de rotura de $< 10^{-4}$ (Serrano y Olalla, 1996); mientras, el factor F_m depende las incertidumbres relacionadas con el criterio plástico, si $\sigma_{ci} > 100$ MPa se adopta en torno a 5 u 8, y si $\sigma_{ci} < 12.5$ MPa no es necesario incorporar algún valor ($F_m \approx 1$). Asimismo, cuando la roca se encuentra muy fracturada y diaclasada (Grupo IV y V) se considera $F_m \approx 1$.

3.5 Estimación de la Capacidad de carga

Para la estimación de la capacidad de carga última de una zapata de 2 m de ancho y 3 m de longitud con 0.3 de profundidad de cimentación mostrado en la Figura 2, se ha utilizado cuatro métodos y los parámetros del macizo rocoso indicados en la Tabla 1. En la Tabla 2 se presenta los resultados de capacidad de carga última estimados con cada método, los cuales fueron abordados anteriormente. En concordancia con los criterios descritos anteriormente para cada método para la estimación de carga admisible, un Factor de seguridad (FS) de 10 se ha considerado para el método de Bowles y un FS de 27 para el método Serrano y Olalla.

Tabla 2. Resultados de capacidad de carga última en roca

Método	q_{ult} (kg/cm ²)	q_{adm} (kg/cm ²)
Goodman	267.4	53.48
USACE	211.44	42.29
Bowles	510.23	51.02
Serrano y Olalla	954.15	35.34

De acuerdo con los resultados de carga admisible para la cimentación en roca resumidos en la Tabla 3, se obtiene una capacidad de carga admisible de 53.48 kg/cm² con el método de Goodman a partir de 3.84 MPa de resistencia a compresión uniaxial, siendo mayor que todos los métodos aplicados. Por otra parte, con el método Serrano & Olalla se obtiene 35.34 kg/cm², menor que el resto de los métodos, un valor conservador, el cual considera propiedades del macizo rocoso como RMR, m, s del criterio de Hoek-Brown.

Los resultados de carga admisible obtenidos con los métodos de Goodman, Usace y Bowles son optimistas, sin embargo, consideran de alguna manera los parámetros de resistencia como ángulo fricción y cohesión del macizo rocoso obtenidos de manera indirecta a partir de la conversión de la envolvente de resistencia no lineal del Hoek-Brown a una envolvente de resistencia lineal equivalente usando el programa Roclab de Rocscience. Esta búsqueda del ajuste a una envolvente de Mohr Coulomb con una concordancia razonable con el criterio de Hoek-Brown debido a la no linealidad requiere un tratamiento especial porque pasa por una selección apropiada de tensión y que sea representativa al mecanismo de falla.

4 EVALUACION DE ESTABILIDAD DEL TALUD

4.1 Estabilidad Estructural

Para la evaluación de la estabilidad de la pared ubicado en el contorno de la cimentación, se llevaron a cabo dos tipos de análisis con sus respectivos modos de inestabilidad correspondiente a inestabilidad controladas cinemáticamente a lo largo de discontinuidades e inestabilidad de pared controlado por la resistencia del macizo rocoso. Como criterio de diseño se estableció un FS mínimo de 1.5 para condición estática y un FS mínimo de 1.1 para condición pseudoes-tática. El análisis cinemático de la pared de roca de

10 m de altura con talud de 75° y con discontinuidades descritas en el ítem 2 mostró un factor de seguridad estática de FS=0.93 y presencia de una falla tipo cuña en la intersección de las discontinuidades con un volumen de 66.769 m³, como se ilustra en la Figura 7.

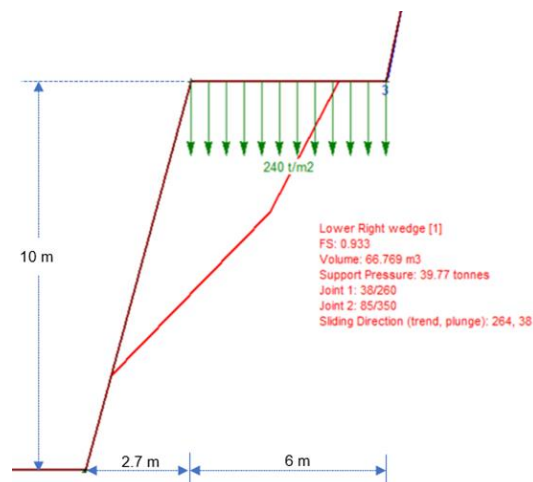


Figura 7. Resultado de análisis cinemático usando UnWedge.

Para estabilizar la cuña y satisfacer el criterio de diseño se realizó el análisis cinemático usando reforzamiento con barras de anclaje tipo helicoidal de 32 mm de diámetro de acero de grado 75 (ASTM A615), instalados con espaciamiento vertical de 0.5 m, colocados a 1 m de distancia desde el borde del talud de roca. El factor de seguridad mínimo reportado fue 1.61, lo que sugiere que la medida adoptada con pernos de anclaje fueron adecuadas, como se muestra en la Figura 8.

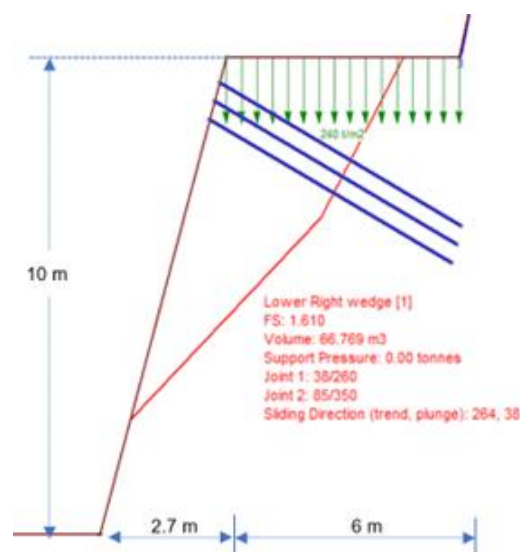


Figura 8. Resultado de análisis cinemático con reforzamiento del talud.

Las especificaciones de las barras de acero fueron una resistencia de fluencia como mínimo de 564 kN y un diámetro nominal de 32 mm, inyectados con lechada de cemento para la fijación de los anclajes.

4.2 Estabilidad por resistencia del Macizo Rocos

Como complemento de la evaluación de talud de macizo rocoso de la pared del contorno de la cimentación, se determinó el factor de seguridad del talud a través de la técnica de reducción de resistencia (Dawson y Roth,1999) y usando el método de elementos finitos con ayuda del programa Phase2 de Rocscience.

En la Figura 9 se muestra el resultado de análisis de estabilidad con Phase2, para el escenario más crítico, considerando la carga aplicada de 2354 kN/m², los refuerzos de pernos de anclaje expuestos en el análisis cinemático y los parámetros de resistencia del macizo indicados en la Tabla 1. Para una condición pseudoestático se alcanzó un FS de 1.79 mayor que 1.1 considerado como FS mínimo, lo que indica que los refuerzos propuestos son adecuados y el talud se mantendrá estable para las condiciones expuestas.

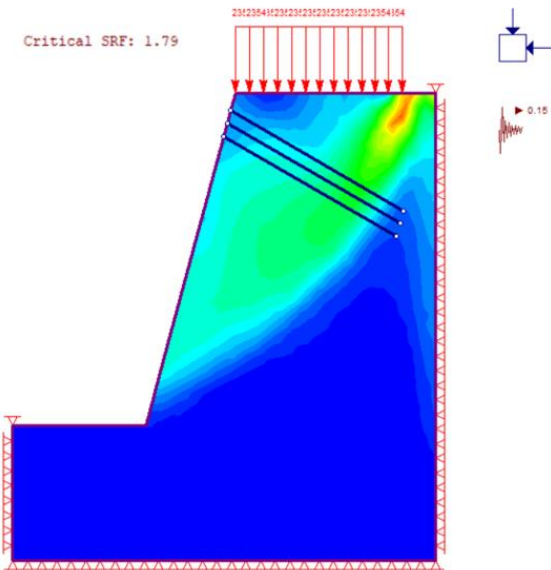


Figura 9. Análisis numérico con Phase2 para condición pseudoestática

5 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

Una zapata rectangular de concreto armado de f'c =42 MPa de 2.0 m de ancho y 3 m de largo se apoya directamente sobre roca caliza como se ilustra en la Figura 1 con una carga transmitida de 2354 kN/m². Esta zapata se ubica cerca a la cresta de una pared de roca que requiere reforzamiento para asegurar la estabilidad de la cimentación, en consecuencia,

previa una evaluación se asegura con un sistema de perno de anclaje autoperforante de 6 m completamente inyectado con lechada de cemento, anclado con 30° de inclinación con respecto a la horizontal.

La barra de acero presenta las siguientes características:

- Diámetro de 32 mm de Grado 75 según ASTM A615,
- Resistencia mínima de fluencia de 425 kN
- Resistencia a tracción de 564 kN.
- Usa centralizador PVC espaciados a cada 1 m centro a centro,
- Anclaje con placas y tuercas de acero al carbono de 120mm x120mm x19mmx 120mm.
- La capacidad del anclaje de cabeza debe desarrollar mínimo 125% de la resistencia de fluencia de la barra roscada tanto en tensión y compresión.
- El diámetro de perforación fue 75 mm para barras de anclaje

Las características de Mezcla de Lechada de cemento para pernos de anclaje son:

- Proporción de agua a cemento de (W:C) 0.35:1 + 0.5 % Superplastificante (1 Bolsa Cemento, 15 lt de agua y 405 ml de MasterGlenium SCC 3800).
- Temperatura del agua: 6° a 18° C.
- Control de Viscosidad: cono de flujo según ASTM C939 para relaciones de agua cemento menores a 0.5

En la Tabla 3 se presenta los resultados de controles de la mezcla de lechada 0.35:1 +0.5 % Superplastificante.

Tabla 3. Resultado de controles de la mezcla

Agua (L)	Cemento (kg)	Aditivo (ml)	Cono de flujo (seg)	Sedimentación %	Densidad (g/cc)	Temperatura (C°)			
						Ambiente	Agua	Cemento	Mezcla
1.4	4	9.05	65.5	1.0	1.9	14	13.8	13.7	15.6

Los ensayos de resistencia a la compresión de los testigos cúbicos (2"x2"x2") de la muestra de mezcla de cemento tomados durante la construcción alcanzó 20 MPa en 7 días y 30 MPa en 28 días y se realizó a una presión de inyección de 15 bar.

La Figura 10 muestra el ensayo Pull test realizado como parte del control de calidad de la instalación y para determinar el desplazamiento máximo por fluencia durante la carga de ensayo (35 ton).

La Figura 11 muestra el resultado de arrancamiento de perno de anclaje que alcanza 37.5 ton a 8 días de su instalación, superando la carga esperada de 35 ton.



Figura 10. Lectura del dial sobre el extremo del perno

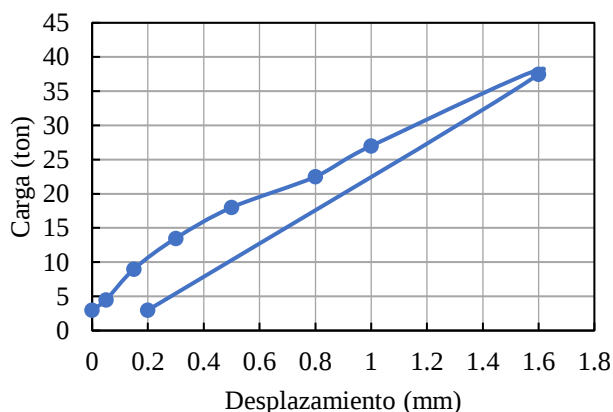


Figura 11. Resultado de carga y desplazamiento de prueba pull test.

6 CONCLUSIONES

Sobre la base de la evaluación de las características geomecánicas de la fundación de roca caliza, resultados de la capacidad portante de la cimentación superficial obtenidos con métodos analíticos, la evaluación complementaria de la estabilidad del talud del contorno de la fundación y controles de calidad de su construcción se concluye lo siguiente:

- Mayor valor de la capacidad de carga admisible se obtiene con el método de Goodman y el menor valor con el método Serrano & Olalla, ambos resultados superan a la carga transmitida, en 119% y 69%, respectivamente.
- Los resultados de carga admisible obtenidos con los métodos de Goodman, Usace y Bowles son optimistas, sin embargo, estos métodos utilizan factores relacionados con el ángulo de fricción o cohesión del macizo rocoso. Estos parámetros de resistencia de Mohr Coulomb pueden ser susceptibles a cierta desviación de resultados, por lo que se sugiere un ajuste adecuado de la envolvente de

resistencia de Mohr Coulomb con una concordancia razonable con el criterio de Hoek-Brown.

- Para el diseño de la cimentación superficial proyectado se consideró una capacidad admisible de 24.4 kg/cm² obtenido con el método Serrano & Olalla, por ser más conservador y por considerar de manera directa los parámetros de macizo rocoso de Hoek-Brown, que serían más representativa para la cimentación proyectada.
- Sobre la base de los resultados de análisis cinemático usando UnWedge y el análisis de estabilidad controlado por la resistencia del macizo rocoso de la pared de roca del contorno de la cimentación, se ha considerado el reforzamiento de la pared con pernos de anclaje para asegurar la estabilidad de la fundación.
- Los resultados de ensayos *Pull Test* en pernos de anclaje instalados durante la construcción mostraron que las tensiones alcanzadas cumplen con las tensiones previstas en el diseño.
- A pesar de los resultados altos de las capacidades portantes de las rocas, es importante un exhaustivo levantamiento de información de las discontinuidades y su evaluación estructural asociado con la cimentación, de ser necesario, se debe realizar el mejoramiento de la fundación de roca afectada por las discontinuidades y así evitar algún riesgo de rotura de las instalaciones, como el caso de la rotura de la presa de Malpasset(1959).

7 REFERENCIAS

- Dawson M., Roth W, B., Drescher A. (1999). Slope stability analysis by strength reduction, geotechnique.
- E.Hoek, C.Carranza-Torres, B.Corkum, El criterio de rotura de Hoek-Brown 2002.
- Engineering and Design Rock Foundations, U.S Army Corps of Engineers Washington, Engineer Manual, 1994.
- Goodman R.E., Introduction to Rock Mechanics, Jonh Wiley & Sons, USA,1989.
- Joseph E. Bowles, Foundation Analysis and Design, Fifth Edition, McGraw-Hill, Illinois,1996.
- Serrano,A y Olalla,C.(2001) Calculo de cimentaciones superficiales en roca. Ingeopres. No 90, Madrid.

- Luis I. González de Vallejo. Ingeniería Geológica, Madrid. 2004.
- Sowers, G.F (1979). Introductory Soil Mechanics and Foundations: Geotechnical Engineering, 4th ed., New York.
- Stagg K.G, Zienkiewicz (1968). Rock mechanics in engineering practice. London.
- Phase2 v8 (Rocscience). Finite Element Analysis for Excavations and Slopes.
- Duffaut, P (2013). The Traps Behind the Failure of Malpasset Arch Dam, France, in 1959. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.
- UnWedge (Rocscience). Underground Wedge Stability Analysis.