

Comportamiento mecánico del macizo rocoso del complejo subterráneo de Porce III

Rocky Mass' Mechanical Behavior of the Porce III's Underground Complex

Fecha de recepción: 18 de mayo de 2009
Fecha de aprobación: 4 de diciembre de 2009

Ludger Oswaldo Suárez-Burgoa*

Resumen

La estimación del comportamiento mecánico del macizo rocoso del complejo subterráneo de la central del Proyecto Hidroeléctrico Porce III, localizado en los Andes centrales, entre los municipios de Anorí, Amalfi y Gómez Plata (Antioquia, Colombia), se logró a través de un modelo de cuña y un modelo de esfuerzo-deformación en dos dimensiones, que fueron calibrados con los datos obtenidos durante el desarrollo de observaciones y las medidas en campo, laboratorio e instrumentación. Los resultados concluyeron que el macizo rocoso estudiado se comporta como un material lineal, elástico, isotrópico y homogéneo. Así mismo, cercano a las caras de las excavaciones, por la distensión de la roca y el cambio del estado de esfuerzos, se pueden desarrollar fallas de tipo cuñas por la propagación de las fracturas en los planos de discontinuidad.

Palabras clave: Macizo rocoso, Modelos numéricos, Análisis retrospectivo.

Abstract

The rock mass mechanical behavior assessment of the underground complex of the Porce III Hydroelectric Central Project, located in Colombia, was achieved through an underground wedge model and a two dimensional stress-strain model, calibrated with the data obtained during the field, laboratory and instrumentation's observations and measurements. It was concluded that the studied rock mass behaves as a linear, elastic, isotropic and homogeneous material. Also, near the excavated faces, because the distension of the rock and the change of the stress states, wedge failures may develop due to the fracture propagation through the planes of discontinuity.

Keywords: Rock mass, Numerical modeling, Back analysis.

* Ing. MSc. Universidad Nacional de Colombia – Medellín. losuarezb@unal.edu.co

I. INTRODUCCIÓN

La estimación del comportamiento mecánico del macizo rocoso en el Complejo Subterráneo de la Central de Porce III (CSCP3) se logró a través de un modelo de cuña y un modelo de esfuerzo-deformación en dos dimensiones, ambos calibrados con los datos obtenidos durante el desarrollo de observaciones y medidas en campo, laboratorio e instrumentación.

II. PROYECTO HIDROELÉCTRICO PORCE III

El Proyecto Hidroeléctrico Porce III está localizado en el norte de la cadena montañosa de los Andes centrales, entre los municipios de Anorí, Amalfi y Gómez Plata, del departamento de Antioquia, Colombia. El proyecto, propiedad de la Empresas Públicas de Medellín (EPM), consiste en la construcción de una presa con su embalse y las instalaciones de generación y transmisión. El sistema

de generación de energía tendrá una potencia instalada de 660 MW, con el objeto de dar 3 605 GWh/año, una vez que entre en operación en el año 2011.

La presa es una de enrocado con cara de concreto con una altura de 151 m, una longitud de cresta de 426 m y ocho metros de ancho. El volumen total del embalse es alrededor de $1,7 \times 10^8$ m³ de agua, y el almacenaje útil se calcula que será de $1,27 \times 10^8$ m³, con un área de 3 698 km². El vertedero de canal abierto está controlado por cuatro compuertas radiales, y localizado en el apoyo oeste, con una capacidad de 10 850 m³/s.

Los trabajos subterráneos pueden dividirse en cuatro principales grupos de sistemas: aducción (conducción), de disipación de golpes de ariete (almenara), de generación y de descarga. Estos trabajos subterráneos hacen un volumen total de excavación de $1,49 \times 10^6$ m³ (figura 1).

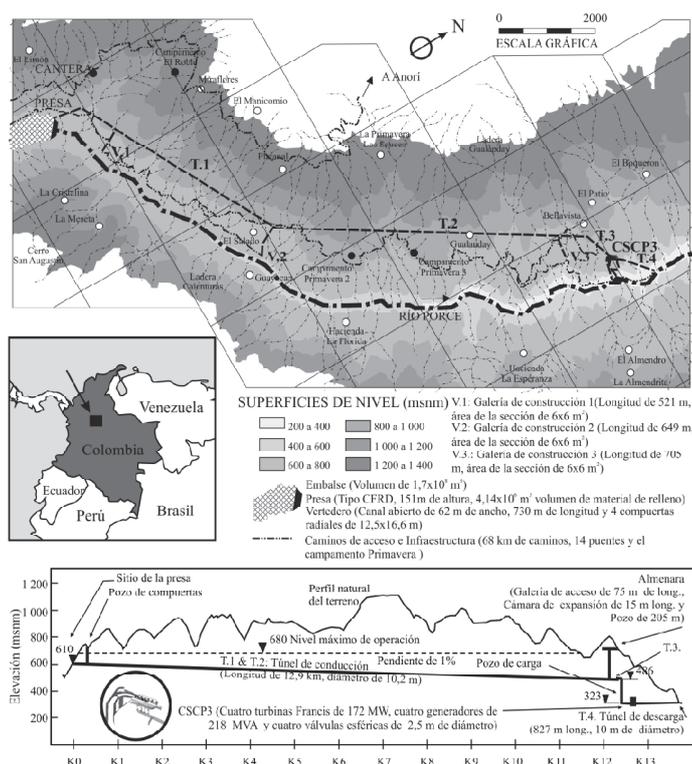


Figura 1. Localización y descripción de las obras del Proyecto Hidroeléctrico Porce III [1]

III. COMPLEJO SUBTERRÁNEO DE LA CENTRAL DE PORCE III

El Complejo Subterráneo de la Central de Porce III está compuesto por las cavernas de máquinas, transformadores y de ventilación, cuatro galerías de barras/cables, una galería de compuertas con cuatro

pozos de compuertas, cuatro ramales/galerías de fuga, un túnel de fuga (descarga), una galería de humos, galería de acceso y construcción número 1 (galería de acceso a la caverna de transformadores), y galerías de acceso y construcción números dos a cinco (figura 2).

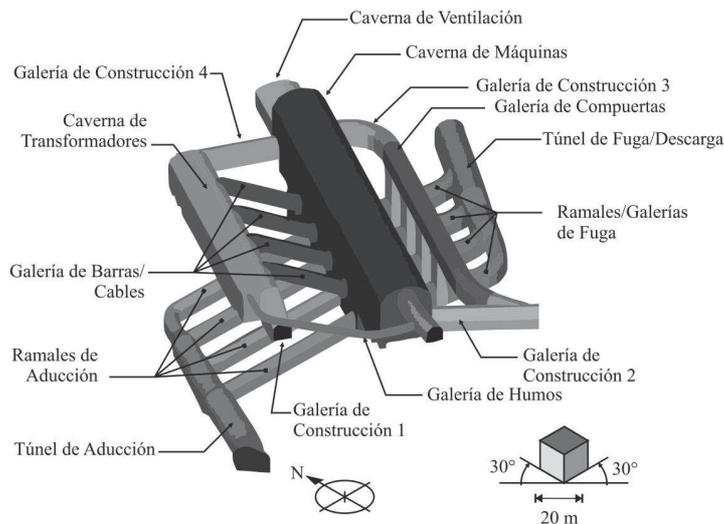


Figura 2. Vista isométrica del CSCP3

La estimación de la zona de influencia de las cavidades más importantes del CSCP3 (i. e. cavernas de transformadores y de máquinas, y galería de barras) fue determinada por la aproximación de las zonas de influencia elípticas [2]. Las mutuas interacciones al final de las excavaciones de estas se muestran en la figura 3.

En el CSCP3 se ha empleado la técnica de excavación por etapas con el método de perforación y voladura somera controlada (i. e. método convencional). Los sistemas de soporte en las cavernas del CSCP3 fueron

instaladas durante el proceso de excavación.

Se propuso un único sistema de soporte: concreto lanzado - malla - anclajes pasivos - concreto lanzado, y en función de requerimientos particulares se colocaron anclajes postensados (anclajes activos). La instrumentación consistió en puntos superficiales de desplazamiento de convergencia (SCDP), líneas superficiales de desplazamiento de convergencia (SCDL), extensómetros de hoyo de punto sencillo (SPBX) y extensómetros de hoyo de puntos múltiples (MPBX).

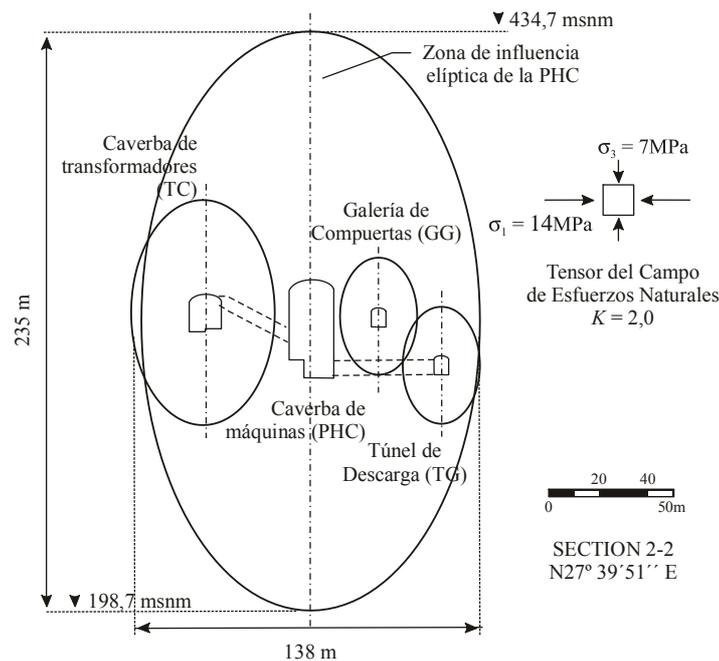


Figura 3. Interacciones mutuas al final de la excavación de las cuatro importantes cavidades del CSCP3

Los drenajes de la excavación subterránea consistieron en hoyos perforados de 76 mm de diámetro, encamisados con tubos PVC de 51 mm de diámetro y con ranuras longitudinales, envueltos con geotextil. Los drenajes fueron instalados densamente en todas las superficies de las excavaciones hasta ocho metros dentro del macizo rocoso.

IV. GEOLOGÍA DEL SITIO DE ESTUDIO

El material presente en el macizo rocoso que alberga el CSCP3 es un Neis de textura bandeaada lepidoblástica. El origen del macizo rocoso es de metamorfismo regional del Paleozoico Temprano; posteriormente sufrió una intensa descompresión, fallamientos normales, inversos y de desplazamiento desde el Cretácico tardío; convirtiéndolo en una roca de metamorfismo dinámico. La intensa presión desarrollada durante el metamorfismo dinámico

causó desplazamientos en el macizo rocoso y el realineamiento de los minerales paralelamente a la dirección del movimiento.

El macizo rocoso sufrió también la influencia tectónica e hidrotermal, debido a la intrusión del Batolito Antioqueño de 7 221 km² (cuyo borde más cercano está localizado a aproximadamente 20 km al sudoeste del CSCP3) y que tiene una datación entre 63 a 90 millones de años (i. e. Cretácico tardío) [3].

La figura 4 muestra la geología local alrededor del CSCP3, así como las estructuras anticlinales y sinclinales que tienen una orientación preferencial de SE-NW; fallas que tienen direcciones SSE-NNW y SE-NW; sistemas de fallas de corte (zonas/sistemas de cizalla) con una dirección SW-NE, y la probable falla consecuente con el río Porce con dirección SE-NW.

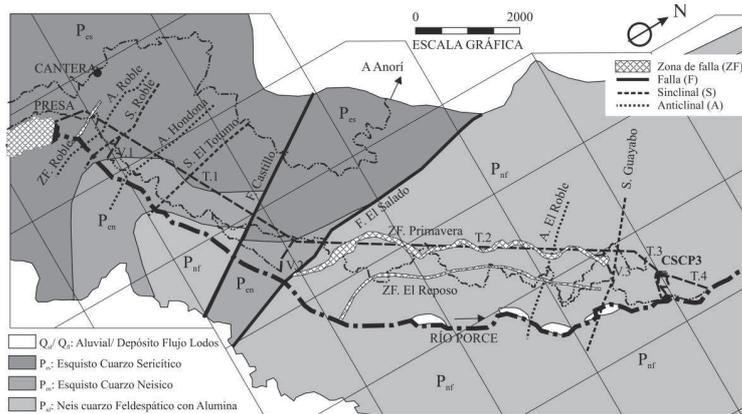


Figura 4. Geología local en el CSCP3 [1]

V. MATERIAL ROCOSO

Para los fines de esta investigación se han desarrollado algunos ensayos de laboratorio en el material rocoso: micro-petrografía, ensayos de difracción de Rx, gravedad específica, peso unitario, porosidad, velocidad sónica, ensayo de la mesa inclinada (*tilt test*), resistencia a tracción indirecta (ITS), resistencia a la compresión uniaxial (UCS) y resistencia a compresión triaxial (TCS).

Desde el punto de vista de los resultados de los ensayos, se observó que el material rocoso en el CSCP3 es un Neis masivo, compacto, anisotrópico y bandeado con foliaciones irregulares e incipientes, compuesto por bandas grises micáceas de textura lepidoblástica que

definen la incipiente foliación, y bandas blancas lechosas, compuestas especialmente por Plagioclasa, Feldespato Potásico y Cuarzo. Mecánicamente, el material rocoso es una roca elástica isotrópica transversal muy dura y frágil.

El resumen de las propiedades más importantes del material rocoso se muestra en la tabla 1. Se propone una relación esfuerzo-deformación lineal elástica perfectamente frágil a partir de los datos obtenidos de los ensayos UCS (figura 5a). Con los resultados de los ensayos TCS de las muestras se ha ajustado la envolvente del material rocoso de Drucker-Prager (figura 5b), que fue la envolvente de falla más representativa para el material ensayado [4].

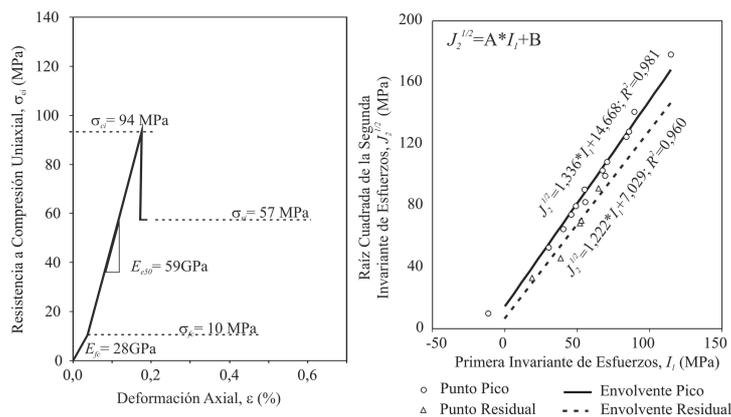


Figura 5. Comportamiento mecánico del material rocoso: a) Relación esfuerzo-deformación lineal elástica perfectamente frágil, b) Envolvente de falla Drucker-Prager [4]

Tabla 1. Propiedades principales del material rocoso

Clasificación petrográfica	Color	Resistencia	Resistencia compresiva, σ_{ci} (MPa)	Resistencia a tracción, σ_{ti} (MPa)	Clasificación de meteorización
Neis	Gris suave	Extremadamente fuerte, la muestra se resquebraja solo con golpes de martillo.	87 a 124 (94) †	-15 ‡	I, roca fresca

† Promedio de los ensayos UCS. ‡ Promedio de los ensayos de tracción indirecta

Tabla 1. Propiedades principales del material rocoso [cont.]

Contenido de agua, w (%)	Gravedad específica, G_s (-)	Peso unitario seco, γ_d (kN/m ³)	Porosidad, n (%)	Absorción, a (%)
0,0	2,8	27	0,62	0,23

Tabla 1. Propiedades principales del material rocoso [cont.]

Velocidad sónica, cond. seca, v_s (m/s)	Dureza Schmidt en la pared de la roca	Ángulo de fricción básica, ϕ_b (°)	Módulo elástico, E (GPa)	Relación de Poisson, ν (-)
3 500 a 6 900	57 a 68	31	46 a 71 † (59 a 63) ‡	0,15 a 0,25 † (0,20 a 0,21) ‡

† Rango grueso. ‡ Rango más probable

VI. MACIZO ROCOSO

El macizo rocoso en el CSCP3 fue estudiado antes y durante la construcción de las excavaciones subterráneas; se compone del ya mencionado Neis, que está intruido por venas (con espesores menores que diez centímetros) de Plagioclasa, Feldespato Potásico y Cuarzo. A una escala muy local, se pueden observar considerables variaciones de la orientación de la foliación incipiente/irregular y el bandeamiento, pero en general estas tienen una dirección de buzamiento de SE-NW a S-N con un buzamiento subhorizontal.

El ensamblaje del bandeamiento tiene un plano preferencial de debilidad, deformación y ruptura, que se ha formado especialmente debido al tectonismo posterior a su formación y a la variación de los esfuerzos presentes en el macizo rocoso. En algunos sitios, las intensas presiones desarrolladas durante el metamorfismo dinámico causaron movimientos de corte en el macizo rocoso. Se observan planos

persistentes desplazados (fallas de corte) asociados con la actividad tectónica, que tienen una dirección de buzamiento NE-SW y un buzamiento subvertical, reflejando un estado compresivo de falla inversa. Debido al cambio del estado de esfuerzos en el tiempo, se presentan fallamientos perpendiculares a los ya mencionados planos de fallas de corte. Asimismo, existe un grupo de planos de discontinuidad no-persistentes en el macizo rocoso, que pueden relacionarse a la presencia de fallas de corte o cambios del estado de esfuerzos. La tabla 2 resume las características de estas principales estructuras en el macizo rocoso del CSCP3.

Pese a que se definen seis principales discontinuidades en el macizo rocoso, se puede considerar, con ciertas restricciones, que es masivo y continuo. Para demostrar la masividad y continuidad del macizo rocoso se empleó el concepto del Índice del Macizo Rocosó RMi (*Rock Mass index*), de A. Palmström [5]; este autor sugiere que un macizo rocoso puede ser masivo si el parámetro de masividad f_σ es mayor o igual a 0,5. Para

el área de estudio en el CSCP3, el valor medio de f_{σ} se encontró igual a 0,44, lo que significa que el macizo en estudio es cercanamente masivo y continuo.

El RQD del macizo rocoso obtenido por las correlaciones RMi es igual a 96%, un valor que da

una clasificación de excelente macizo rocoso. Los otros índices de ingeniería del macizo rocoso, la resistencia a compresión uniaxial (σ_{cm}) y el módulo elástico del macizo rocoso (E_m), fueron obtenidos, en primera instancia, por correlaciones empíricas propuestas por varios autores (tabla 3).

Tabla 2. Principales estructuras y propiedades en el macizo rocoso del CSCP3: a) propiedades cuantitativas [4]

ID	Estructura	Descripción	Tipo	Orientación†
1	Foliación	Foliación/ Bandeamiento incipiente/irregular del material rocoso	Plana	291/12
2	Venas	Vena de intrusión	Lineal	-
3	Discontinuidad 1°	Plano de discontinuidad no-persistente	Plana	297/61
4	Discontinuidad 2°	Plano de discontinuidad no-persistente		053/76
5	Falla de corte	Falla de corte por desplazamiento asociada a la actividad tectónica	Plana	193/49
6	Fallamiento 1 (Discont. Asoc. a Fallas)	Planos de discontinuidades asociadas a las fallas de corte	Plana	141/87
7	Fallamiento 2	Fallamientos	Plana	103/85 (291/12)

–: no aplicable. †en dirección de buzamiento /buzamiento para planos

Tabla 2. Principales estructuras y propiedades en el macizo rocoso del CSCP3: b) propiedades cualitativas [cont.]

ID	Estructura	Longitud de la traza de discontinuidad (m)	Espaciamiento (m)	Tamaño de la abertura, a (mm)
1	Foliación	5 a 10	0,2 a 5	$a < 0,5$
2	Venas	0,5 a 20	-	< 100
3	Discontinuidad 1°	4 a 6; 15	2 a 4	$0,1 < a < 1$
4	Discontinuidad 2°	2 a 4; 4 a 6; 10	6 a 8; 12 a 14	$0,1 < a < 1$
5	Falla de corte	2 a 4	6 a 8; 4 a 6	$0,5 < a < 2$
6	Fallamiento 1 (Discont. Asoc. a Fallas)	2 a 4; 4 a 6	1 a 2	$a < 1$
7	Fallamiento 2	2 a 4; 4 a 6	< 1	$a < 0,5$

–: no aplicable

Tabla 2. Principales estructuras y propiedades en el macizo rocoso de CSCP3: b) propiedades cualitativas [cont.]

ID	Estructura	Tipo de la superficie de la discontinuidad	Condición de la superficie de discontinuidad	Naturaleza del relleno	Flujo	Ocurrencia respecto todos los datos (%)
1	Foliación	Rugoso	Fresco	-†	Húmedo	3,0 a 3,5
2	Venas	Rugoso	Fresco	Cuarzo	-	Escasas
3	Discontinuidad 1°	Rugoso ondulado	Fresco con humedad	Limpio	Húmedo	3,5 a 4,0
4	Discontinuidad 2°	Rugoso ondulado	Fresco con humedad	Limpio	Húmedo	2,5 a 3,0
5	Falla de corte	Espejo de falla escalonado	Fresco con gotas de agua y con rellenos de partículas	Cuarzo o limpio	Húmedo	3,0 a 3,5
6	Fallamiento 1 (Discont. Asoc. a Fallas)	Espejo de falla plano	Fresco con humedad	Cuarzo o limpio	Húmedo	4,5 a 5,0
7	Fallamiento 2	Espejo de falla escalonado	Fresco con gotas de agua	Cuarzo o limpio	Húmedo	4,0 a 4,5

†: no aplicable

VII. CAMPO DEL TENSOR DE ESFUERZOS NATURALES

En lo que se refiere a la estimación del campo del tensor de esfuerzos naturales en el CSCP3, existe

una escasez de información y ensayos. En todo el proyecto, solo fueron realizadas tres medidas de sobreperforación durante las exploraciones de diseño final detallado (Fase III) del Proyecto [6].

Tabla 3. Índices de ingeniería del macizo rocoso

Índice	Valor	Clasificación del Macizo rocoso	σ_{cm} (MPa)	E_m (GPa)
<i>RQD</i>	96	Excelente	-†	-†
<i>RMi</i>	42	Excelente	42	45
<i>RMR</i>	76	Clase II, Bueno	-†	47
<i>Q</i>	20	Clase B, Bueno	-†	25
<i>GSI</i>	65	Bueno	8	11

†: no se conoce correlación con σ_{cm} o E_m y el mencionado índice.

Las medidas de sobreperforación fueron ejecutadas en el ramal de la galería de exploración de la caverna de máquinas, localizados en tres nichos, uno cerca de la actual entrada a la caverna de máquinas y dos cercanos al actual fin de ésta. Los valores promedio de estas medidas del tensor y sus respectivas desviaciones estándar se muestran en (1), donde todos los valores están en unidades de Mega Pascales (MPa) y donde $[\sigma^*]$ es el tensor con los valores medios, α es un factor que define el máximo y mínimo valor del rango a partir del valor medio, y $[SD_{\sigma^*}]$ es el tensor con los valores de la desviación estándar.

$$[\sigma^*] \quad [SD_{\sigma^*}] \quad \begin{bmatrix} 6,62 & 0,81 & 0,04 \\ 0,81 & 11,32 & 3,26 \\ 0,04 & 3,26 & 8,52 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 3,06 & 0,23 & 0,02 \\ 0,23 & 5,90 & 1,68 \\ 0,02 & 1,68 & 2,65 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Se puede observar que la desviación estándar de cada componente de esfuerzos del tensor de las medias es alrededor de la mitad de sus valores medios, que refleja que las medidas del tensor de esfuerzos son dispersas. De ser así el campo de esfuerzos principales en el sitio, los esfuerzos principales de este tensor serían tal como se muestra en la tabla 4.

Infortunadamente, durante las excavaciones subterráneas en el CSCP3, la reevaluación del campo del tensor de esfuerzos naturales no fue el principal objetivo. No obstante, los estudios del campo de esfuerzos hechos por varios autores en la región,

basados en la inversión de datos de campo de elementos estructurales, son útiles referencias para la estimación del campo de tensor de esfuerzos naturales.

En la referencia [7] determinaron que el movimiento actual de la placa Caribeña (CA) contra la placa Sudamericana (SA) es N107°E. En la referencia [8] encontraron una dirección de ésta de N103. Asimismo, en [9] concluyeron que el actual régimen compresivo al norte de los Andes de Sudamérica tiene una dirección NW-SE a WNW-ESE con un promedio de N110 (tabla 5), donde σ_1 , σ_2 y σ_3 son los esfuerzos naturales principales, y θ es la razón de la diferencia de los esfuerzos principales (2).

$$\frac{1}{1} \quad \frac{2}{3} \quad (2)$$

En esta investigación, el tensor de esfuerzos fue estimado a través de un análisis similar con el programa SLICK [10] a partir de los datos de las familias de planos estructurales del CSCP3 (i. e. foliación, fallas de corte, fallamientos y discontinuidades obtenidas para la descripción del macizo rocoso) obtenidos durante el trabajo de campo. La tabla 6 resume los resultados obtenidos por este análisis.

Una segunda estimación fue hecha a través del Método del Triedro Derecho, empleando el programa RDTM [10]. Todos los planos del sistema (i. e. foliación, fallas de corte, fallamientos y discontinuidades obtenidas

para la descripción del macizo rocoso) fueron usados con este método, para la estimación de los esfuerzos para el CSCP3. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 7.

Referente a todos los análisis y compilación de datos hasta aquí mencionados, se observa que no existe una clara evidencia de la validez de ninguno de los campos

de tensor de esfuerzos naturales hasta ahora propuestos para el CSCP3. Con el objeto de ser conservador, el campo de tensor de esfuerzos naturales en el CSCP3 se asumió ortogonal y paralelo a los planos vertical y horizontal, con las direcciones y magnitudes mostradas en la tabla 8 y en la figura 6a. Se asumió que el esfuerzo mínimo es el esfuerzo vertical, debido a que el régimen de falla inversa gobierna la región.

Tabla 4. Tensor de esfuerzos naturales en el CSCP3

Esfuerzo principal	Azimut (°)	Inclinación (°)	Magnitud (MPa)
σ_1	97	33	13,5
σ_2	340	35	6,9
σ_3	217	38	6,0

Tabla 5. Parámetros del tensor de esfuerzos actuales, modificado de [9]

Región	σ_1		σ_2		σ_3		θ
	Azimut	Inclinación	Azimut	Inclinación	Azimut	Inclinación	
C_{com}	097	09	006	07	238	79	0,26

Tabla 6. Tensor de esfuerzos en el CSCP3 obtenido a través del análisis de desplazamiento de fallas [4]

Datos de origen	Esfuerzo principal	Dirección (°)	Buzamiento (°)	θ (-)	Desviación promedio (°)
Fallas de corte, fallamientos 1 y 2, discontinuidades 1° y 2°	σ_1	271	42	1,0	27
	σ_2	037	34		
	σ_3	150	30		

Tabla 7. Tensor de esfuerzos obtenido en el CSCP3 a través del Método del Triedro Derecho [4]

Datos de origen	Esfuerzo principal	Azimut (°)	Inclinación (°)
Fallas de corte, fallamientos 1 y 2, discontinuidades 1° y 2°	σ_1	053	49
	σ_2	-†	-†
	σ_3	179	84

†: no obtenido

Tabla 8. Tensor de esfuerzos finalmente asumido para los posteriores análisis

Esfuerzo principal	Azimut (°)	Inclinación (°)	Magnitud (MPa)
$\sigma_1 = \sigma_H$	097	00	14,0
$\sigma_2 = \sigma_h$	007	00	12,2
$\sigma_3 = \sigma_v$	277	90	7,0

Para un análisis en dos dimensiones (2D), dos principales hipótesis tuvieron que ser asumidas para definir el tensor de esfuerzos naturales: que existe un estado plano de deformaciones en la dirección del eje del CSCP3 y que los esfuerzos de corte $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$, $\sigma_{xz} = \sigma_{zx}$ son despreciables. El tensor 2D propuesto para el CSCP3 es uno donde el esfuerzo

principal mayor actúa en una dirección horizontal con una magnitud compresiva de 14 MPa; el esfuerzo principal menor (σ_3) actúa en una dirección vertical con una magnitud compresiva de 7 MPa, y el esfuerzo principal intermedio (σ_2) actúa en una dirección coincidente con el eje longitudinal del CSCP3 con una magnitud también de 7 MPa (figura 6b).

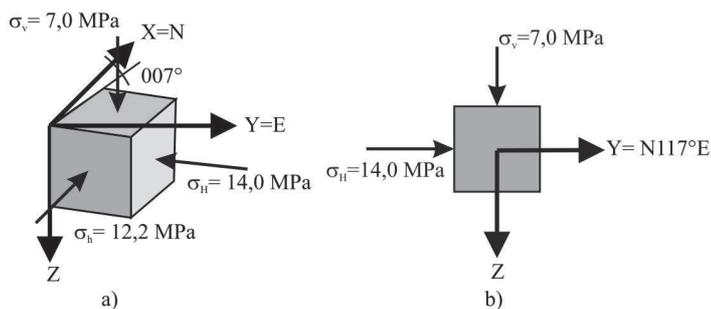


Figura 6. Componentes del tensor de esfuerzos naturales propuestos, a) para un análisis 3D, b) para un análisis 2D

VIII. ESTIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO

La estimación del comportamiento mecánico del macizo rocoso, en esta investigación, consistió en un proceso de observación, en un análisis de cuñas subterráneas y en el uso de un modelo numérico analítico en 2D.

A. Proceso observacional

El proceso de observación en campo consistió en explorar y registrar las fallas especiales expuestas en las superficies excavadas, y en analizar las medidas de instrumentación para un determinado tiempo.

Observaciones de las fallas

En el CSCP3 se observaron eventos de fallas de cuñas inestables. En estas observaciones se midieron los

planos que componen la cuña, su localización y su orientación, y se describió la posible causa de la ocurrencia. En general, todas estas fallas están controladas por esfuerzos, desarrolladas bajo tres planos y relacionadas con la dirección del plano de la excavación. De todas las fallas reportadas y medidas, el 65% se desarrollaron sin la influencia de la foliación, y el 35%, con la influencia de ésta. En este sentido, fueron identificados cuatro principales grupos de falla (GP) de similar comportamiento (que comprenden el 75% de todas las fallas reportadas) y se identificaron otros casos aislados (que comprenden el otro 25%); mucha atención se prestó a estos cuatro GP, debido a que representan un comportamiento general del macizo rocoso del CSCP3, mientras que las fallas aisladas pueden ser un caso especial del sitio donde se ha desarrollado. La tabla 9 muestra las principales características de los cuatro grupos de falla.

Tabla 9. Principales grupos de fallas en el CSCP3

ID del GP	Porcentaje de todas las fallas reportadas	Dirección del plano de corte 1	Dirección del plano de corte 2	Dirección del plano de corte 3 (igual a la dirección del plano de foliación)	Dirección del plano de la excavación
2	30	223/59	037/59	-†	037/82
4	25	094/87	330/89	-†	115/88
6	10	063/80	324/71	176/54	200/83
7	10	312/66	054/60	196/20	253/83

† no tiene influencia de la foliación

Se observó que en el CSCP3 se han desarrollado dos tipos importantes de falla, que pueden diferenciarse si involucran o no la presencia del plano de foliación: un tipo referido como falla de fracturamiento por los planos de foliación y microfracturas, inducida por los esfuerzos de corte de las discontinuidades (GP 6 y GP 7), y otro de corte de fracturamiento inducido por las discontinuidades únicamente (GP 2 y GP 4). En cada uno de estos grupos pueden estar presentes algunas variaciones solo por la orientación de los planos de discontinuidad y de foliación, relacionados con la orientación de la excavación.

Medidas de desplazamientos y deformaciones

Para el análisis de desplazamientos y deformaciones fueron empleados los datos de las medidas de los MPBX y SPCD para un determinado periodo (desde el 15 de abril de 2007 hasta el 15 de mayo de 2007 [un mes]); estos datos fueron empleados para determinar la exactitud del modelo analítico en dos dimensiones.

B. Análisis de cuñas subterráneas

El objetivo de este análisis fue determinar el factor de seguridad de las cuñas formadas alrededor de las cavidades subterráneas del CSCP3. La modelación de las cuñas fue hecha con la Teoría de Bloques, descrita en [11], usando el programa UNWEDGE y considerando las orientaciones de los planos definidos en los GP analizados anteriormente. Se estableció también una correspondencia de estos planos de falla con los planos de discontinuidad definidos en la descripción del macizo rocoso (tabla 10).

De este análisis se concluyó que el plano de foliación no es una causa importante para las fallas de cuñas, si se compara con los grupos de falla mencionados en la tabla 10. Los fallamientos, las discontinuidades 1° y 2° y las fallas de corte son los principales factores para el desarrollo de las fallas de cuña en las principales cavidades del CSCP3.

Tabla 10. Correspondencia de los planos de falla con las discontinuidades

Plano	GP 6	Correspondencia con la discontinuidad	GP 7	Correspondencia con la discontinuidad
1	063/80	Fallamiento 2	312/66	Discontinuidad 1°
2	324/71	Discontinuidad 1°	054/60	Discontinuidad 2°
3	176/54	Falla de corte	196/20	Falla de corte

C. Modelo numérico analítico en 2D

Para excavaciones lineales-rectas, como las cavernas de máquinas y de transformadores y la galería de compuertas del CSCP3, se usó un análisis 2D, asumiendo que existe una condición de deformación plana. Para este fin se usaron las medidas e interpretaciones de los MPBX y SCDP, con el objeto de conocer la exactitud del modelo.

Estudio de la sección transversal

El modelo numérico en 2D fue hecho para la sección dos (K0+039,32, respecto al sistema de referencia local de la caverna de máquinas) en un tiempo antes del inicio de las excavaciones de las bancas de la caverna de máquinas (i. e. hasta que la banca de transición fue finalizada) (figura 11).

Parámetros de entrada

Para el macizo rocoso del CSCP3 es posible considerar un comportamiento lineal elástico debido al hecho de que los esfuerzos que actúan en el macizo rocoso están muy alejados de la condición de rotura. En lo que respecta a la relación de Poisson del macizo

rocoso del CSCP3, se usó el mismo valor de la relación de Poisson del material rocoso.

El rango incierto del módulo elástico del macizo rocoso conduce a definir en primera instancia, a partir de las correlaciones con los índices de ingeniería, un rango entre 11 y 47 GPa (tabla 3). No obstante, para abarcar rangos superiores se han analizado cuatro casos: para módulos elásticos iguales a 17 GPa, 37 GPa, 56 GPa y 71 GPa; para el estudio de la sección transversal 2. La tabla 11 muestra los parámetros usados para el modelo 2D lineal elástico. En este modelo se consideró el tensor no rotado vertical/horizontal de esfuerzos naturales 2D.

Construcción del modelo

El espacio de cálculo fue definido basado en la zona de influencia obtenida para el CSCP3, como se mostró en la figura 3 (i. e. un rectángulo de 235 m de altura y 160 m de ancho [este último un poco más ancho que la zona de influencia]). El programa del Método de Elementos Finitos (FEM), usado para este análisis, fue el SIGMA/W, que es un módulo del paquete GeoStudio. Los elementos usados fueron triangulares y rectangulares, ambos isoparamétricos, y sin nodos secundarios.

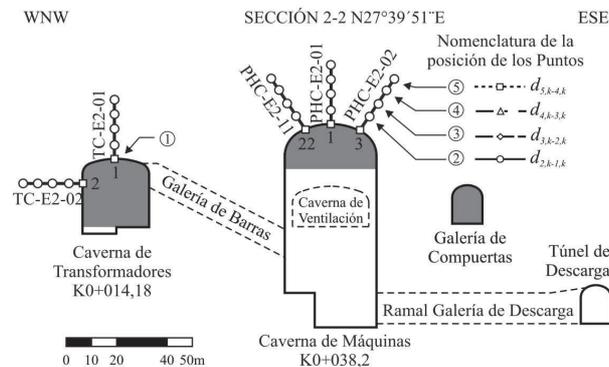


Figura 7. Estado de las excavaciones de la sección 2 antes de la excavación de las bancas de la caverna de máquinas

Tabla 11. Parámetros lineales elásticos del macizo rocoso para el análisis 2D

Parámetro	Valor
Módulo elástico del macizo rocoso, E_m (GPa)	17 a 71
Relación de Poisson, ν (-)	0,21

Resultados del modelo

La figura 8 muestra los contornos de las deformaciones horizontales, verticales y de corte de parte de la región analizada de la sección 2, para el módulo elástico más probable del macizo rocoso del CSCP3. Este módulo fue definido después de comparar los resultados modelados con los resultados de instrumentación (figura 9).

Si se compara el valor de 37 GPa, anteriormente elegido, obtenido del análisis numérico, con el valor obtenido del índice RMi , igual a 45 GPa, se observa que también existe cierta proximidad; de este modo se puede considerar que el posible rango del módulo elástico del macizo rocoso está entre 37 y 45 GPa. Adicionalmente, si se emplea (3), según [15], que

relaciona E_m con σ_m , se obtiene un nuevo valor de la resistencia a compresión uniaxial del macizo rocoso (σ_m) igual a 28 MPa para el valor de E_m igual a 37 GPa. Sabiendo que el valor de σ_m obtenido a partir del RMi es igual a 42 MPa, es también razonable asumir que el posible rango de σ_m está entre 28 y 42 MPa.

$$E_m = 7 \sigma_m^{0,5} \quad (3)$$

La tabla 12 muestra las propiedades mecánicas finales propuestas para el macizo rocoso del CSCP3. Se observa que el valor de la relación de Poisson para el macizo rocoso se mantuvo igual al del material rocoso e igual al del valor empleado para el modelo de esfuerzo deformación.

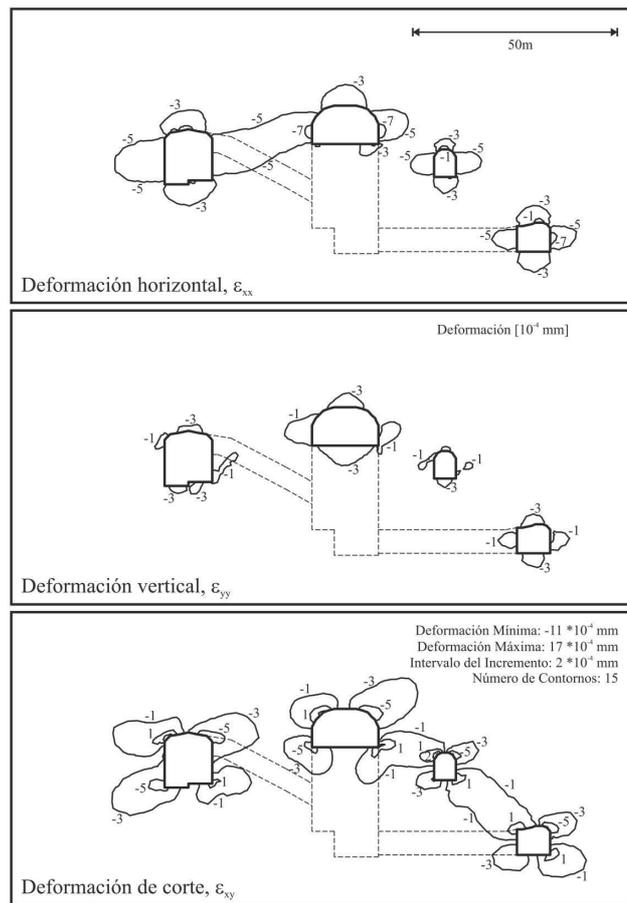


Figura 8. Resultados de la sección modelada con el módulo elástico más probable ($E_m = 37$ MPa):
a) contornos de deformaciones horizontales, b) de deformaciones verticales y c) de deformaciones de corte.

Tabla 12. Parámetros lineales elásticos y de rotura propuestos para el macizo rocoso

Parámetro	Rango
Resistencia a compresión uniaxial del macizo rocoso, σ_m (MPa)	28 a 42
Módulo elástico del macizo rocoso, E_m (GPa)	37 a 45
Relación de Poisson, ν (-)	0,21

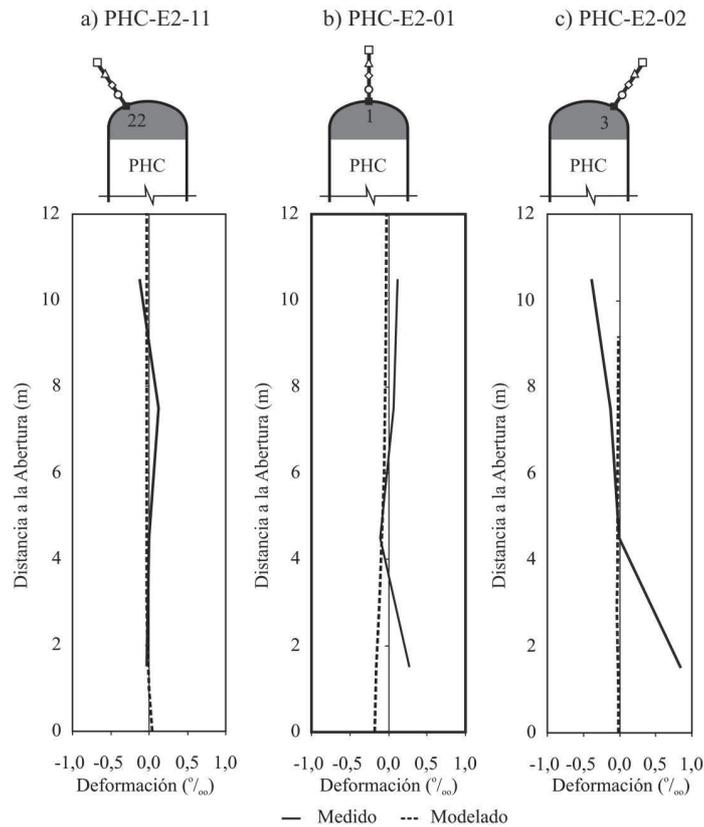


Figura 9. Comparación de las deformaciones medidas y modeladas en la sección 2 de la caverna de máquinas (PHC)

IX. CONCLUSIONES

El método observacional, que consistió en registrar las fallas expuestas en las superficies excavadas, fue una herramienta para definir los planos por donde se desarrollan fallas de forma de cuñas, debido a la propagación de las fracturas a razón del cambio del estado de esfuerzos.

Cercano a las caras de las excavaciones, por la distensión de la roca, la propagación de las fracturas

se desarrolla más por los planos de fallamiento, los planos de la discontinuidad 1°, los planos de discontinuidad 2° y los planos de las fallas de corte; mientras que por los planos de foliación esta propagación de fallas es menos frecuente.

Asimismo, el método observacional que consistió en el análisis de las medidas de instrumentación para un determinado tiempo, auxiliado por un modelo analítico numérico de dos dimensiones de comportamiento mecánico, fue una herramienta

para estimar los parámetros mecánicos del macizo rocoso.

Al ser el macizo rocoso del CSCP3 cercanamente masivo y continuo, se pudo considerar que se comporta como un material lineal, elástico, isotrópico y homogéneo (CHILE), con un módulo elástico (E_m) en un rango de 37 a 45 GPa, una relación de Poisson (ν) de 0,21 y resistencia a compresión uniaxial del macizo rocoso (σ_m) en el rango de 28 a 42 MPa.

AGRADECIMIENTOS

El autor está muy agradecido con Álvaro Castro Caicedo, director de esta investigación; con las Empresas Públicas de Medellín (E.P.M. E.S.P.); con Consultores Ingetec S.A.; con el Consorcio Triple-C del Proyecto Hidroeléctrico Porce III; con el Curso de Maestría en Ciencias, de la Universidad de Brasilia –Brasil–, *Furnas Centrais Elétricas, Departamento de Apoio e Controle Técnico* (DCT-C) en Aparecida da Goiania –Brasil–; con la Dirección Nacional de Investigación (DINAIN) de la Universidad Nacional de Colombia; con el Instituto de Estudios de Infraestructura (IEI); con el Curso de Maestría en Ingeniería Geotécnica de la Universidad Nacional de Colombia en Medellín, y con la Cooperación Técnica Belga en Bolivia.

REFERENCIAS

- [1] EPM. *Construcción de la conducción, central subterránea y obras asociadas, información de geología y geotecnia*. Empresas Públicas de Medellín, Vol. 5 (1-2), Medellín, Colombia, 2005.
- [2] J. W. Bray, “Some Applications of Elastic Theory”. In: E. T. Brown (Ed.), *Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics*. London: Allen & Unwin, pp. 32–94, 1987.
- [3] J. J. Restrepo, J. F. Toussaint, H. González, U.

Cordani, K. Kawashita, E. Linares and C. Parila, “Precisiones geocronológicas sobre el occidente colombiano”. En: *Simposio sobre magmatismo andino y su marco tectónico*, Memorias (Manizales), pp. 1–22, 1991.

- [4] L. O. Suárez-Burgoa, *Rock Mass Mechanical Behavior Assessment at the Porce III Underground Hydropower Central, Colombia –South America–*. Master’s Degree Thesis. Universidad Nacional de Colombia, 2008.
- [5] A. Palmström, “Recientes desarrollos en la estimación del sostenimiento en roca mediante el RMI”, *DYNA*, Nro.140, pp. 23-43, 2003.
- [6] Ingetec S.A. & Klohn Crippen S.A., *Memorando de diseño geotécnico de la central subterránea y galerías*. Lote de trabajo 6.1. Empresas Públicas de Medellín, Vol. 1(1), 2002.
- [7] M. Cortés, J. Angelier and B. Colletta, “Paleostress Evolution of the Northern Andes (Eastern Cordillera of Colombia): Implications on Plate Kinematics of the South Caribbean Region”. *Tectonics*, Vol. 24, TC1008, p. 27, doi:10.1029/2003TC001551, 2005.
- [8] R. Thenkamp, J. N. Kellogg, J. T. Freymueller and H. P. Mora, “Wide Plate Deformation, Southern Central America and Northwestern South America. CASA GPS observations”. *J. South Am. Earth Sci.*, Vol. 15, pp. 157-171, 2002.
- [9] M. Cortés and J. Angelier, “Current States of Stress in the Northern Andes as Indicated by Focal Mechanisms of Earthquakes”. *Tectonophysics*, Vol. 403(1-4), pp. 29–58, 2005.
- [10] J. G. Ramsay and R. J. Lisle, *The Techniques of Modern Structural Geology. Volume 3: Applications of continuum mechanics in structural geology*. Amsterdam, The Nederland: Elsevier Academic Press, 2000.

[11] R. E. Goodman and G. Shi, *Block Theory and Its Application to Rock Engineering*. London, UK: Prentice-Hall, 1985.

[12] A. Palmström and R. Singh, “The Deformation Modulus of Rock Masses: Comparisons Between in Situ Tests and Indirect Estimates”, *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 16(3), pp. 115-131, 2001.