

Método de evaluación geotécnica durante la construcción de obras subterráneas de la Central Hidroeléctrica Curibamba - Junín

Geomechanical assessment method during the construction of underground by the Hydroelectric Curibamba - Junin

Leoncio Carlos C.¹

RECIBIDO: 31/08/2016 - APROBADO: 28/09/2016

RESUMEN

Desarrollo de investigación de la galería de prospección para C.H. Curibamba, interpretación y evaluación de los resultados de una longitud de 674.00 metros, que comprende: mapeo geológico, evaluación geotécnica y ensayos *in situ*, en la caverna de máquinas del proyecto. El desarrollo de los trabajos involucra en su primera fase, estudio geológico - geotécnico detallado en los tramos de excavación de la galería de prospección: El primer tramo, que comprende desde la progresiva 0+019.20 hasta 0+580.00, comprende acceso hacia la caverna de máquinas. El segundo tramo comprende desde la progresiva 0+580.00 hasta 0+674.37, que constituye la caverna de máquinas. En los tramos indicados se han realizado: evaluación geológica-geotécnica, hidrogeología y geología estructural. Estas son las diferentes alternativas de estudios preliminares efectuadas para la construcción posterior de la Central Hidroeléctrica Curibamba. El mapeo geológico - geotécnico ha determinado, a lo largo de toda la galería de excavación identificada litológicamente roca sienogranito, que presenta ocho sistemas de discontinuidades principales, tres sistemas de fallas, tres sistemas de discontinuidades con filtración de agua y otros sistemas de discontinuidades aleatorias esporádicamente con presencia de agua. Durante la excavación, se ha atravesado zonas de rocas craqueladas y descostramiento debido a presiones de confinamiento. Se ha efectuado la evaluación de la calidad del macizo rocoso empleando las clasificaciones geomecánicas de RMR de Bieniawski y Q de Barton, con la finalidad de aplicar el tipo de roca y sostenimiento en esta etapa de estudio, que es parte del expediente técnico. Durante la excavación de la galería de prospección, se ha atravesado roca de clase II, III, IV y V, siendo la más predominante la roca de clase III. En esta primera fase, se realizaron los ensayos, durante la excavación de la galería de prospección, de Resistencia *in situ*, mediante la toma de datos con el martillo de Schmidt, Ensayo de carga puntual y toma de muestras de roca de la excavación, con la finalidad de evaluar el comportamiento a la intemperie, efectuado en el laboratorio de obra, realizadas en todas las muestras extraídas de la galería de prospección, que comprende desde la progresiva 0+019.20 hasta 0+580.00 (acceso a la caverna) y desde la progresiva 0+580.00 hasta 0+674.37 (caverna de máquinas). En el ítem de conclusiones y recomendaciones se resaltan los aspectos geotécnicos más importantes, importancia de los ensayos *in situ* realizados dentro de la galería de prospección del Proyecto Central Hidroeléctrica Curibamba y su influencia de estudio geológico - geotécnico preliminar.

Palabras clave: Curibamba, hidrogeología.

ABSTRACT

Fact-finding development of the gallery of prospection for C.H. Curibamba, interpretation and evaluation of the results of a 674,00-meter length, that he understands: Geological mapping, Evaluation geotechnical and Essays in situ, in the cavern of machines of the Project. The development of the works involves in its first phase, geological study - geotechnical detailed in the stretches of excavation of the gallery of prospection: The first stretch that comprises from the progressive 0 +019.20 to 0 +580.00, comprises outburst toward the cavern of machines. The second stretch that comprises from the progressive 0 +580.00 to 0 +674.37, that constitutes the cavern of machines. In the indicated stretches they have come true: Geological evaluation geotechnical, hydrogeology and structural geology. These are the different alternatives of education preliminaries made for the

¹ Maestría - Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. E-mail: rigeo.2010@gmail.com

posterior construcción de la Central Hidroeléctrica Curibamba. The geological mapping – geotechnical, has determined through the whole gallery of identified excavation litológica old sieno granite, they show eight systems of main discontinuities, three systems of faults, three systems of discontinuities with leak of water and other systems of aleatory discontinuities occasionally with presence of water. During the excavation he has crossed over zones of rocks cracking and descostramiento due to pressures of confinement. It has taken effect the evaluation of the quality of the rocky mountain mass using classifications RMR's geomecánicas of Bieniawski and Barton's Q with the aim of applying the type of rock and support in this stage of study that is a part of the technical file. During the excavation of the gallery of prospección the rock of class has crossed over II, IAII, IV and V. Being the more predominate the rock of class III. In this first phase came true the essays during the excavation of the gallery of prospección of: Resistance in situ, by means of the photo of data with the hammer of Schmidt, Essay of punctual load and sample taking of rock of the excavation with the aim of evaluating the behavior exposed to wind and weather, made in the laboratory of work, accomplished in all the samples extracted of the gallery of prospección that comprises from the progressive 0 +019.20 to 0 +580.00 (outburst to the cavern) and from the progressive 0 +580.00 to 0 +674.37, (cavern of machines). In the item of findings and recommendations bulges out aspects most important geotechnical, importance of the essays in situ sold off inside the gallery of prospección of the Project Central Hidroeléctrica Curibamba and your influence of geological study – preliminary geotechnical.

Keywords: Curibamba, Hydrogeology.

I. INTRODUCCIÓN

La galería consiste en la excavación de roca de aproximadamente 674.00 metros de largo y se inicia en la ribera derecha del río Uchubamba. Esta galería es parte de los estudios previos y necesarios para la ejecución del Proyecto de la Central Hidroeléctrica Curibamba.

La galería de prospección de la Central Hidroeléctrica Curibamba es una estructura de gran complejidad, que está construida litológicamente de roca sienogranito, a la que se tenía poco o ningún acceso antes de la construcción. Es por eso que las investigaciones son una cuestión indiscutible, ya que es el único medio que nos proporciona información de aquellos aspectos geológicos y geotécnicos que podrían afectar la obra.

El debilitamiento que se produce en la roca adyacente a la excavación puede llevar a la inestabilidad de esta, manifestándose en la convergencia gradual de la excavación, derrumbes del techo, desprendimiento de rocas y, en casos extremos, como estallidos de roca, que se pueden presentar cuando una roca competente sobrepasa su límite de elasticidad (Gonzales *et al*, 2002), (Torres, 2004).

Los objetivos de un método de evaluación geotécnica no solo buscan obtener un conocimiento de las condiciones geológico – ingenieriles del lugar, sino también la interpretación de estas, para su aplicación en el diseño y la construcción del túnel. En otras palabras, deberá pronosticarse un modelo geológico (Bieniawsky, 1989), (Gonzales del Vallejo, 2003).

I.1. Área de estudio

El proyecto C.H. Curibamba se localiza en la cuenca del río Tulumayo, en el departamento de Junín, provincia de Jauja, distritos de Monobamba, Apata y Molinos (Figura N° 1). Posee dos captaciones independientes en los ríos Comas y Uchubamba, desde donde se obtendrán los recursos hídricos para la central. Las captaciones se ubican aproximadamente 10 km aguas arriba de existente C.H. Chimay. La ubicación del proyecto se justifica por la presencia de recursos hídricos y la topografía favorable para este tipo de obras.

A la zona del proyecto C.H. Curibamba se accede a través de la vía asfaltada Lima-San Ramón, así como la carretera afirmada San Ramón-Uchubamba (Ver Figura N° 1).

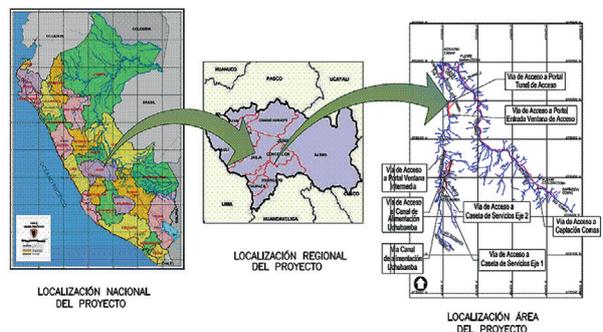


Figura N° 1. Ubicación del Proyecto Curibamba.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Geología

El área del proyecto se encuentra en la cabecera de la cuenca del río Tulumayo, constituida por las subcuencas de los ríos Comas y Uchubamba. Estos territorios constituyen la parte inferior de las estribaciones orientales de la cordillera oriental, en el cual se hallan las subunidades geomorfológicas de los valles subandinos de los ríos Comas y Uchubamba.

Las condiciones litoestratigráficas y presencia de rocas ígneas en el mapa están determinadas por la presencia predominante, en casi toda su extensión, de las rocas intrusivas del batolito de La Merced. Esta unidad está constituida por rocas intrusivas, de la serie granitos, que se encuentran en gran parte de las subcuencas de los ríos Uchubamba y Comas.

En las partes altas, se encuentran unidades correspondientes a:

Permiano inferior – Grupo Copacabana (Pi-c)

La roca sedimentaria que aflora en el mapa corresponde al Grupo Copacabana y está compuesto por pizarras. La roca

está moderadamente meteorizada, ligeramente oxidada, así como rugosa pulida, moderadamente fracturada, diaclasada, textura fanerítica, una estructura moderadamente compacta, de color gris. Finalmente, su edad geológica fue asignada al Permiano inferior.

Permiano inferior – Grupo Mitu (Pi-m)

Las rocas sedimentarias que afloran en el mapa pertenecen al Grupo Mitu. En los cuadrángulos de La Merced y Tarma, este grupo se compone de areniscas. La roca está meteorizada, ligeramente oxidada, rugosa, moderadamente fracturada, diaclasada, de textura fanerítica, estructura compacta y de color rojo. Su edad geológica fue asignada al Permiano inferior.

Grupo Pucará, constituida por las siguientes formaciones:

Triásico superior – Formación Chambará (Tr-ch)

Las rocas sedimentarias que afloran en el mapa corresponden a la Formación Chambará. En el cuadrángulo de La Merced, este grupo está compuesto de calizas micríticas.

La roca está moderadamente meteorizada, ligeramente oxidada, rugosa, moderadamente fracturada, diaclasada, textura fanerítica, de estructura compacta y de color gris. Finalmente, su edad geológica fue asignada al Triásico superior.

Jurásico inferior - Formación Aramachay (Ji-a)

Las rocas sedimentarias que afloran en el mapa corresponden a la Formación Aramachay con afloramiento en poca extensión, extendiéndose más hacia el cuadrángulo de La Oroya. Esta formación está compuesta de calizas con nódulos calcáreos. La roca está moderadamente meteorizada, ligeramente oxidada, rugosa, fracturada, diaclasada, textura fanerítica, estructura moderadamente compacta, de color gris. Su edad geológica fue asignada al Jurásico inferior.

Jurásico inferior – Formación Condorsinga (Ji-c)

Las rocas sedimentarias que afloran en el mapa corresponden a la formación Condorsinga con afloramiento en poca extensión, extendiéndose más hacia el cuadrángulo de La Oroya. Esta formación está compuesta de calizas con intercalaciones de venillas de calcita. La roca está moderadamente meteorizada, ligeramente oxidada, rugosa, fracturada, diaclasada, textura fanerítica, estructura moderadamente compacta, de color gris. Su edad geológica fue asignada al Jurásico inferior.

Cretáceo inferior – Formación Condorsinga (Ki-c)

Las rocas sedimentarias que afloran en el mapa corresponden a la Formación Condorsinga, con afloramiento en poca extensión, extendiéndose más hacia el cuadrángulo de La Oroya. Esta formación está compuesta de calizas con intercalaciones de venillas de calcita. La roca está moderadamente meteorizada, ligeramente oxidada, rugosa, fracturada, diaclasada, textura fanerítica, estructura moderadamente compacta, de color gris. Su edad geológica ha sido asignada al Jurásico inferior.

Permiano superior Triásico – Monzogranito Sienogranito San Ramón (PsTr-mzg/sg- sr)

Está representada por el batolito de San Ramón que aflora en una parte del mapa.

Facies Granito Rojo, su afloramiento continuo tiene una orientación que va de sureste a noroeste, su exposición en el área de estudio presenta una topografía accidentada, los cerros poseen pendientes pronunciadas a muy pronunciadas (45°-75°), así mismo, el afloramiento del macizo de granito rojo en el área de interés se encuentra bisectada por los ríos Uchubamba y Monobamba entre los principales. La roca está moderadamente meteorizada, ligeramente oxidada, rugosa, moderadamente fracturada, diaclasada, textura fanerítica, de una estructura compacta, de color rojo. Su edad geológica fue asignada al Permiano superior Triásico.

Estas unidades están cubiertas por los depósitos cuaternarios de origen deluvial, coluviodeluvial, fluvial, aluvial y aluvional.

2.2. Marco estructural

En el área de estudio, los rasgos estructurales guardan estrecha relación con la naturaleza de las rocas expuestas. Las rocas de facies ígnea intrusiva que afloran en el sector de Curibamba poseen pendientes fuertes; los cerros muestran un tectonismo fuerte. Por otro lado, las rocas metamórficas tienen moderadas ondulaciones y fallamientos locales, mientras que las rocas metamórficas de esquistos micáceos están fuertemente foliadas y diaclasadas.

Los rasgos estructurales forman parte del cuadro morfotectónico de la sierra y el borde occidental andino; habiendo sido afectado por varias fases tectónicas durante la orogenia andina, desde el neoproterozoico hasta el cuaternario.

- Zonas estructurales

En la zona de estudio fueron reconocidas dos zonas estructurales:

- Zona de bloques

Corresponde a macizos estructurales que han influido en el modelo y deformación de la cordillera occidental y oriental.

- Bloque Maraynioc

Forma parte del núcleo de la Cordillera Oriental y abarca la parte Occidental del cuadrángulo de La Merced; corresponde, a su vez, a un bloque metamórfico levantado individualizado por fallamientos regionales con desplazamiento vertical e intrusiones de plutonitas permotriásicas. Además, dentro del bloque aflora un anticlinorio con rumbo NO- SE, encontrándose constituido por el complejo de Maraynioc.

- Bloque Chanchamayo – Marancocha

Se describe como un macizo plutónico conformado por el sienogranito de San Ramón, la monzodiorita y granodiorita de Carrizal; así mismo, se caracteriza por ser un

alto estructural afectado por fallas normales con rumbo NO-SE, y que, similarmente al bloque de Paucartambo, ha controlado la sedimentación a inicios del Mesozoico, formando paleohorst, y ha servido como parte del sustrato de cuenca desde San Ramón hacia el Putumayo.

Las fases de la tectónica andina que dio lugar a deformaciones de las masas rocosas, ubicadas en el área directa, son:

2.2.1. Plegamientos

En zonas alejadas al área, se observaron exposiciones de estas estructuras en rocas mesozoicas y cenozoicas. Contrariamente, las rocas paleozoicas presentan una mayor deformación, formando pliegues incompletos poco definidos y truncados. El Grupo Pucará presenta pliegues moderados a apretados, variando de monoclinales (San Vicente) a sinclinales, echados en la zona del pueblo de Vitoc. La deformación es del tipo disarmónico, observándose dentro de la macroestructura de replegamientos locales.

2.2.2. Fallas

Estructura geológica originada por las fuertes deformaciones del macizo rocoso, causada por la orogénesis andina de fines del Cretáceo y los fenómenos subsiguientes de emplazamiento del batolito de Tarma; así mismo, por el movimiento epirogénico, en general, de los Andes. Las rocas en el área de interés han sido deformadas por fallamientos y fracturas; algunas de las trazas de las fallas son resaltantes y la mayoría de estos alineamientos están registrados como probables fallas. Así mismo, las rocas se hallan fracturadas y estas no guardan una orientación preferencial.

2.2.3. Fracturas y diaclasas

Estructuras geológicas menores fueron mapeadas en todas las áreas. Las rocas (sedimentarias, metamórficas e intrusivas) presentan tres sistemas principales de fracturamiento, el grado de intemperización, meteorización y oxidación es moderada, la persistencia en mayor proporción va entre 0.80 m y 1.20 m, y el rumbo y buzamiento en general es regular. Por tanto, estas estructuras no tendrán influencia en la estabilidad física de la obra.

Por otra parte, las rocas intrusivas tienen moderado fracturamiento y disyunción esferoidal, formando bloques a fragmentos que están cubiertos en superficie, en otros casos redondeados, formados por disyunción. Así mismo, estas rocas intrusivas están intruidas por diques de composición diorítica a gabrodiorítica, orientadas con el sistema andino NO-SE.

Las manifestaciones de geodinámica externa están condicionadas por la configuración morfológica del área. Las subcuencas de los ríos Comas y Uchubamba contienen

territorios que muestran un conjunto de indicios morfológicos y líticos de la ocurrencia de diversos procesos de geodinámica externa, que operan en forma casi periódica, modificando la morfología, la estructura y que hacen del paisaje observado, en algunos lugares, relieves en constante cambio.

III. INTERPRETACIONES Y EVALUACIONES DE LOS RESULTADOS

3.1. Resultados del uso de televisores ópticos

A partir de la interpretación de los registros de televisor acústico de pozo (HTAP) se obtiene una base de datos de las estructuras aparentes. Estas se logran al interpretar las imágenes del interior del pozo, que se encuentran orientadas al norte magnético. En esta etapa, la imagen se interpreta como si fuese un pozo vertical. Posteriormente y una vez que se ha realizado la interpretación de estructuras, se utiliza un algoritmo certificado, el cual utiliza la trayectoria del sondaje (inclinación y azimut), para llevar estas estructuras a su posición real.

Con esta base de datos (reales), se realizan diagramas estructurales básicos, mediante el programa Dips, para definir las familias de estructuras existentes y las direcciones preferenciales en cuanto a rumbo y dirección de manto. Adicionalmente, se realizan diagramas estructurales en profundidad.

a) Pozo DDH-CHC-PP4

Del análisis de la base de datos de las estructuras reales, mediante gráficas estructurales se deduce que:

Las estructuras presentan una orientación donde se puede observar un rumbo principal NNO y una dirección de manto principal ENE y un sistema secundario NNE con manto al ESE. Ver Figuras N° 2, 3, 5 y 6.

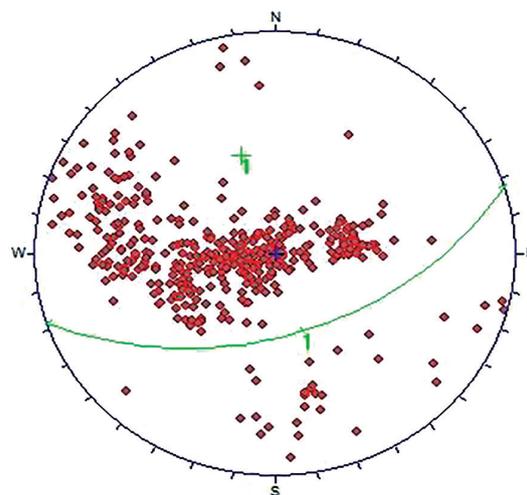


Figura N° 2. Diagrama de polos en donde se observa la zona de sombra.

En el diagrama general de distribución de polos, es posible observar la zona de sombra que se utiliza como chequeo de calidad de la rotación de estructuras aparentes a reales. Dicha zona está representada mediante un plano.

Las estructuras interpretadas a lo largo del pozo son (Ver Tabla N° 1):

Tabla N° 1. Clasificación de estructuras.

Clasificación de estructuras	Cantidad de estructuras	Rank
Estructuras discontinuas (azules)	282	1
Estructuras continuas (verdes)	116	2
Fallas y fracturas menores (Naranjas) menores a 5 cm	9	3
Fallas (rojas) mayores a 5 cm	23	4
Total de Estructuras	430	

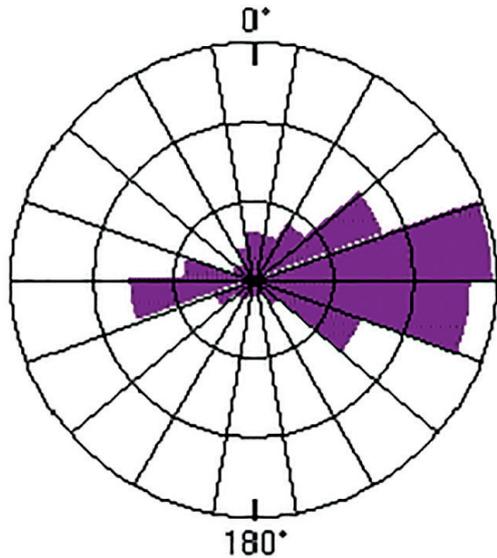


Figura N° 3. Diagrama de Rosas de Manteo.

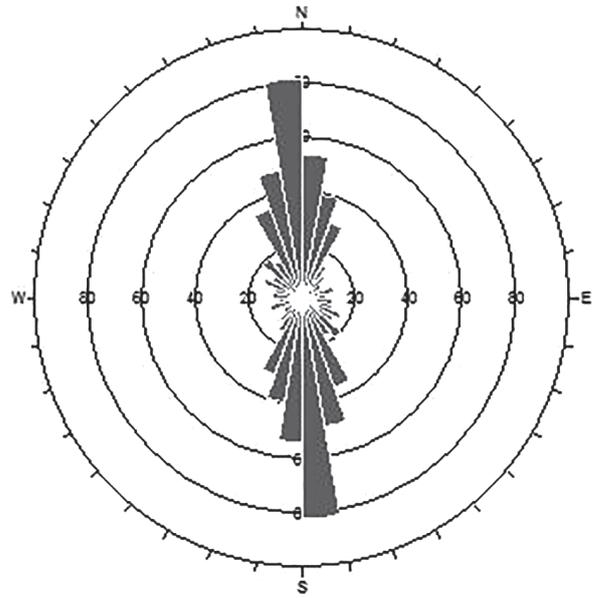


Figura N° 4. Diagrama de Rosa de Rumbo.

En los diagramas anteriores se puede observar un sistema principal de estructuras con un rumbo principal norte – sur y un manteo principal al este.

b) Diagramas estructurales para el pozo completo

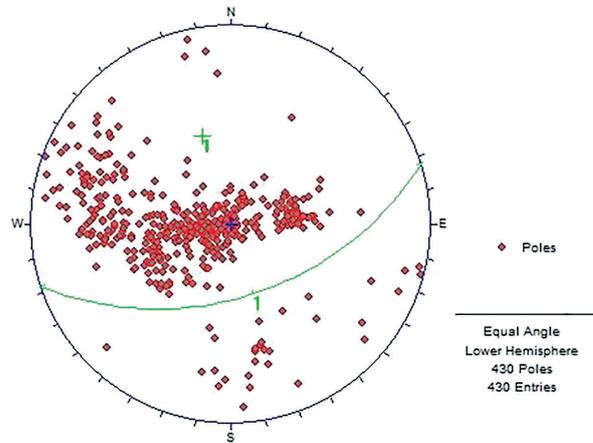


Figura N° 5. Diagrama de polos.

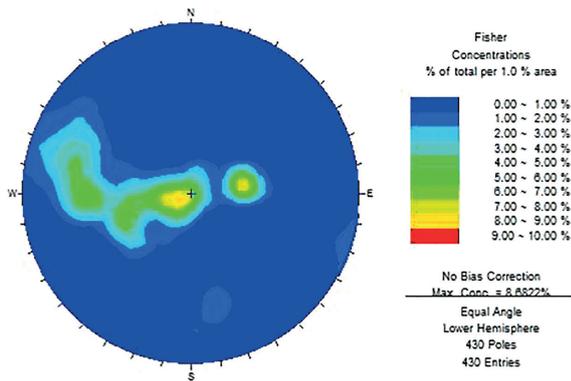


Figura N° 6. Diagrama de densidad de polos.

3.2. Evaluación geotécnica

La evaluación geotécnica se determinó mediante la clasificación RMR de Bieniawski (1989) e índice de calidad “Q” de Barton, realizada en la galería excavada. El mapeo geológico de la galería es el sustento de la representación gráfica del tipo de soporte a colocar en la labor excavada y los factores influyentes que actúan sobre la sección excavada, tales como la abertura de las discontinuidades geológicas, presencia de agua, influencia de esfuerzos, orientación de fracturas y la voladura.

El mapeo se realizó conforme avanzaba la excavación. Se tomó información de la dirección y la inclinación de las discontinuidades, el tipo de roca en hastial derecho, bóveda y hastial izquierdo.

El principal objetivo de esta evaluación es la determinación del soporte adecuado y su colocación en el momento oportuno, lo cual evitará los accidentes e incidentes por desprendimiento de roca.

La presencia de los principales sistemas de discontinuidades, formadores de cuñas y bloques potenciales al deslizamiento conforma una condición de orientación media para el desarrollo de la excavación.

En los cuadros se calcula la valorización de la roca mediante los parámetros del Q de Barton. Estos cálculos se realizaron por tramos en las progresivas tomadas a lo largo de la galería de excavación.

Los parámetros utilizados para la valorización geotécnica son los siguientes:

- RQD: Designación de la calidad de roca.
- Jn: Número de sistemas de juntas.
- Jr: Número de rugosidad de juntas.
- Ja: Número de alteración de juntas.
- Jw: Factor de reducción de agua en las juntas.
- SRF: Factor de reducción de los esfuerzos.

Fórmula para calcular el Q de Barton.

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) \times \left(\frac{J_r}{J_a}\right) \times \left(\frac{J_w}{SRF}\right)$$

Fórmula para cálculo del RMR.

$$RMR=44+9Ln(Q)$$

3.3. Cuadro de resumen del tipo roca

Observamos del cuadro que se tiene a lo largo de todo el tramo de la galería excavada los siguientes tipos de roca II, III, IV, V. Se tiene roca de tipo III predominantemente en la galería. El sostenimiento para el tipo de roca se realizó según el expediente técnico aprobado anteriormente para la galería de prospección y está impreso como procedimiento de trabajo. Ver Tabla N° 2, 3 y 4.

Tabla N° 2. Tipo de roca.

PROGRESIVA (Km)		LONGITUD (m)	CLASE DE ROCA
De	A		
0+019,20	0+034,20	15,00	V
0+034,20	0+074,50	40,30	III
0+074,50	0+077,70	3,20	II
0+077,70	0+098,65	20,95	III
0+098,65	0+109,20	10,55	II
0+109,20	0+138,90	29,70	III
0+138,90	0+160,50	21,60	II
0+160,50	0+211,50	51,00	III
0+211,50	0+227,00	15,50	IV
0+227,00	0+303,00	76,00	III
0+303,00	0+322,00	19,00	IV
0+322,00	0+454,00	132,00	III
0+454,00	0+460,00	6,00	IV
0+460,00	0+527,70	67,70	III
0+527,70	0+533,60	5,90	II
0+533,60	0+674,37	140,77	III

Longitud Total (m)	655,17
---------------------------	---------------

Como podemos observar en el cuadro anterior la longitud total del túnel excavado es 655,17 m.

3.4. Carga puntual in situ

Se realizó el ensayo de carga puntual mediante dos métodos: el primero es por el método cilíndrico de roca (ensayo axial o diametral) y el segundo por el método de pedazos irregulares (ensayos de pedazos irregulares). Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 3. Resultados del ensayo de carga puntual por métodos de testigos cilíndricos de roca (Ensayo axial o diametral)

PROGRESIVA	ENSAYO	DIAMETRO (mm)	LEC. MAN. (KN)	CALCULOS				RESISTENCIA (MPa)	
0+080,00	E1	69,5	15	3373,5	1533,408	0,3175	3269	1,038	86,58
0+160,00	E2	6,95	21	4722,9	2146,773	44,444	1,16	51,54	106,22
		6,95	15,8	3533,4	1615,191	33,439	1,16	38,78	
0+217,25	E3	6,94	19	4273	1942,3	40,33	1,16	46,7	97,78
		6,94	14,8	3329	1513	31,41	1,16	36,4	
0+280,00	E4	6,36	17	3823	1737,9	42,96	1,11	47,9	112,61
0+340	E5	6,36	17	3823	1737,9	42,96	1,11	47,9	114,26
		6,36	17,5	3936	1789	44,23	1,11	49,3	
0+400	E6	6,36	17	3823	1737,9	42,96	1,11	47,9	114,15
		6,36	17,5	3936	1789	44,23	1,11	49,3	
		6,36	17,2	3868	1758,3	43,47	1,11	48,4	

Se presentan los resultados de los ensayos tomados por el método de testigos cilíndricos en los hastiales de la galería, los cuales nos indican valores de 86.59 MPa (mínimo) y 114.26 MPa (máximo).

Cabe mencionar que los ensayos de resistencia obtenidos mediante el método de ensayo de testigos cilíndricos y el índice de carga puntual (ensayos de pedazos irregulares) son métodos indirectos de obtener la resistencia compresiva de la roca, de acuerdo al ISRM (International Society Rock Mechanics). Los rangos de error que se obtienen por estos métodos son para el ensayo de testigos cilíndricos del orden del 15 % y para el índice de carga puntual del orden del 20 %; todos ellos referidos al ensayo de resistencia de compresión uniaxial no confinado.

Cabe mencionar que las muestras ensayadas con el equipo de carga puntual fueron muestras irregulares y ello eleva aún más el nivel de error.

También a continuación se presentan los resultados de los ensayos tomados por el método de pedazos irregulares,

los cuales nos proporcionan los siguientes valores 54.1 MPa (mínimo) y 94.9 MPa (máximo).

- Progresiva 0+081.10, el rango de error está dentro de lo esperado.
- Progresiva 0+140.00, la diferencia se debe a que el testigo se rompió siguiendo la dirección del diaclasamiento y no perpendicular al eje del testigo.
- Progresiva 0+217.25, el rango de error está dentro de lo esperado.
- Progresiva 0+280.00, la diferencia se debe a que el testigo se rompió siguiendo la dirección de diaclasamiento y no perpendicular al eje del testigo.
- Progresiva 0+340.00, el rango de error está dentro de lo esperado.
- Progresiva 0+400.00, el rango de error está dentro de lo esperado.

Tabla N° 4. Resultados del ensayo de carga puntual x métodos de pedazos irregulares (Ensayo de pedazos irregulares).

Ensayo	Progresiva	W1	W2	W (mm)	D (mm)	De2	D+ (mm)	Carga (N)	I _s	F	I _{cs} (MPa)	Resistencia a la Compresión (MPa)
E1	0+080,00	130	140	130	80	13241,69	115,07	32000	2,42	1,46	3,52	84,4
		230	130	180	90	20626,48	143,62	32500	1,58	1,61	2,54	61,0
		125	85	105	85	11363,66	106,60	14000	1,23	1,41	1,73	41,6
		160	140	150	90	17188,73	131,11	26000	1,51	1,54	2,33	56,0
		160	120	140	80	14260,28	119,42	29000	2,03	1,48	3,01	72,2
										Promedio	65,0	
E2	0+140,00	180	100	140	70	12477,75	111,70	20400	1,63	1,44	2,35	56,3
		140	100	120	70	10695,21	103,42	16000	1,50	1,39	2,07	49,8
		150	90	120	70	10695,21	103,42	15000	1,78	1,39	2,46	59,1
		150	65	97,5	50	6307,04	78,78	11400	1,84	1,23	2,25	54,1
		200	110	155	70	13814,65	117,94	20000	1,45	1,47	2,13	51,0
										Promedio	56,1	
E3	0+220,00	215	90	152,5	50	9708,45	98,53	23000	2,37	1,36	3,21	77,2
		280	110	195	45	11172,68	105,70	27000	2,42	1,40	3,38	81,2
		180	155	167,5	60	12796,06	113,12	33000	2,58	1,44	3,72	89,4
		170	100	195	60	10913,24	101,95	28000	2,71	1,38	3,73	89,6
		160	85	92,5	65	7655,35	87,49	22000	2,95	1,29	3,30	81,1
										Promedio	85,7	
E4	0+280,00	120	80	100	65	8276,06	90,97	17000	2,05	1,31	2,69	64,5
		100	100	100	70	8912,68	94,41	24000	2,69	1,33	3,58	86,0
		120	80	100	80	10185,92	100,99	20000	1,98	1,37	2,72	65,3
		120	90	105	70	9358,31	96,74	22000	2,35	1,35	3,16	75,9
		140	100	120	80	12223,10	110,98	27000	2,21	1,43	3,36	75,8
										Promedio	73,5	
E5	0+340,00	280	100	195	60	14896,90	122,05	38000	2,55	1,49	3,81	91,5
		180	60	120	60	9167,32	95,75	24400	2,66	1,34	3,57	85,6
		120	70	95	60	7257,47	85,19	21000	2,89	1,27	3,68	88,3
		180	100	140	70	12477,75	111,70	36000	2,89	1,44	4,14	99,4
		170	120	145	50	9230,99	96,08	25400	2,75	1,34	3,69	88,6
										Promedio	88,67	
E6	0+400,00	120	80	100	50	6366,20	79,79	20000	3,14	1,23	3,38	83,0
		140	70	105	50	6084,51	81,76	18000	2,69	1,25	3,36	80,6
		130	70	100	60	7639,44	87,40	22000	2,88	1,29	3,70	88,9
		100	90	95	60	7257,47	85,19	23000	3,17	1,27	4,03	96,7
		170	120	145	50	9230,99	96,08	25000	2,71	1,34	3,63	87,3
										Promedio	89,28	
E7	0+460,00	160	70	115	55	8093,24	89,74	17000	2,11	1,30	2,75	67,3
		160	95	127,5	60	9740,28	98,69	23200	2,38	1,36	3,23	79,2
		160	95	127,5	60	9740,28	98,69	21000	2,16	1,36	2,93	71,7
		190	90	140	80	14260,28	119,42	29000	2,03	1,48	3,01	75,7
		100	95	97,5	60	7448,45	86,30	18200	2,44	1,28	3,12	76,5
										Promedio	73,7	
E8	0+520,00	70	60	65	45	9724,23	61,03	13000	3,49	1,09	3,82	95,5
		70	60	65	60	4565,63	70,47	16000	3,38	1,17	3,95	96,7
		120	100	110	45	6302,54	79,99	21000	3,33	1,23	4,10	100,5
		75	85	80	55	5602,25	74,85	16000	2,96	1,20	3,55	87,0
		190	90	120	60	9167,32	95,75	27000	2,95	1,34	3,95	96,7
										Promedio	94,9	
E9	0+550,00	120	90	105	70	9358,31	96,74	24000	2,56	1,35	3,45	82,8
		55	45	50	25	1591,55	39,89	6000	3,77	0,90	3,41	81,7
		120	110	115	50	7321,13	85,56	18000	2,46	1,27	3,13	75,1
		120	100	110	60	8403,38	91,67	21000	2,50	1,31	3,28	78,8
		120	80	100	65	8276,06	90,97	23000	2,78	1,31	3,64	87,3
										Promedio	81,2	
E10	0+580,00	100	75	87,5	30	3942,25	57,81	12000	3,59	1,07	3,33	82,0
		130	80	105	50	6084,51	81,76	21000	3,14	1,25	3,92	94,1
		127	90	108,5	40	5525,36	74,34	20000	3,62	1,20	4,33	103,8
		180	120	150	70	13369,02	115,62	30000	2,69	1,46	3,93	94,2
		120	90	105	60	8021,41	89,56	27000	3,37	1,30	4,38	105,0
										Promedio	97,8	

IV. CONCLUSIONES

1. Según las evaluaciones geotécnicas y la clasificación de tipo de rocas, realizadas durante la excavación en la galería de prospección, se ha determinado la siguiente secuencia de tipos de rocas, adjuntamos un cuadro resumen. Desde la progresiva 0+0.19.20 hasta 0+674.37
2. Durante la excavación de la galería de prospección, el sostenimiento para el tipo de roca se realizó según el expediente técnico aprobado anteriormente y está aprobado como procedimiento de trabajo.
3. El macizo rocoso es una roca intrusiva sienogranito, que se presentó ligeramente alterada, muy resistente, levemente fracturada, lo cual nos indica una roca muy competente por la naturaleza de su origen.
4. Todo el tramo de excavación de la galería de prospección presentó 08 sistemas de discontinuidades geológicas (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8). Los sistemas S1, S2 están en casi todo el tramo de recorrido de la galería, desde el inicio en la progresiva 0+019.20 hasta el final en la progresiva 0+674.37, determinándose así que son los sistemas de discontinuidades principales más importantes y representativas de la galería. El segundo sistema de discontinuidades importante es S7, el cual aparece por tramos de la galería de excavación y, finalmente, los sistemas de discontinuidades S3, S4, S5, S6, S8 aparecen en algunas zona de la galería.
5. Durante la excavación solo se presentó ligero goteo de agua por el sistema de discontinuidades de S1, S2, S7, en diferentes puntos a lo largo de la galería, siendo los principales sistemas donde hay filtración de agua. Observamos que la filtración de agua está en zonas puntuales, ya que las fracturas del sistema de discontinuidades S1, S2, S7 son muy cerradas, presentan ligeras manchas de óxidos de Fe en las juntas y son rugosas, debido a ello el agua es factor influyente no determinante para la excavación de la galería.
6. El componente mineralógico de la roca sienogranito está constituido por ortosa, cuarzo y minerales fierromagnesianos, lo cual indica el grado de dureza de la roca. La ortosa y el cuarzo tienen una dureza de 6 y 7, respectivamente, según la escala de Mohr, lo cual originó mayores gastos en aceros de perforación y uso de explosivos, por lo que deben tener en consideración la etapa constructiva de la C.H. Curibamba.
7. Por las características geológicas, estructurales, calidad del macizo rocoso, según la excavación de la galería de prospección, el macizo rocoso es muy favorable para la construcción de la Central Hidroeléctrica Curibamba.
8. La realización del mapeo geológico-geotécnico nos da una idea de cómo están orientadas las discontinuidades y permite tener una visión macro del com-

portamiento geológico de cada una de estas; también observamos el comportamiento del sistema de discontinuidades que presentan a lo largo de la galería, la variación de la dirección y buzamiento del sistema de discontinuidades. Ver anexos de planos.

9. El mapeo del plano en planta, con sus respectivas secciones geológicas, realizado en la zona de la caverna de máquinas (tramos: 0+580.00 a 0+674.37). Se tiene dos sistemas de familias principales, que son S1 y S7, las cuales dominan todo este tramo de la caverna de máquinas y también un sistema de discontinuidades secundarias S2 que aparece en algunas zonas de la galería de excavación.
10. Se concluye, con los datos tomados en el túnel con el martillo de Schmidt, que la roca al inicio es muy resistente y luego varía su resistencia a medida que se avanzaba en la galería excavación, como podemos observar en las gráficas mostradas.
11. Se realizaron los diez ensayos de carga puntual, dándonos un margen de error aceptable en los rangos de los cálculos esperados. Obtenemos valores similares al martillo de Schmidt dentro del margen de error y en otros casos en el límite.
12. Se realizó 10 ensayos de muestreo de roca para evaluar el comportamiento a la intemperie del material excavado de la galería, en la cual no se observa ningún cambio significativo durante el tiempo de prueba.
13. Se concluye de los datos tomados en la galería del Dips/Dips Dir. En la cual se tiene un ángulo de fricción residual de 30°.

V. AGRADECIMIENTOS

Al gerente general del Proyecto de la Central Hidroeléctrica de Curibamba, por la confianza y apoyo que me brindó en el desarrollo de la presente tesis. De igual forma agradezco a los profesionales que laboran en la Construcción del Proyecto de la Central Hidroeléctrica de Curibamba, por su apoyo incondicional. A los docentes de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera Metalúrgica y Geográfica, especialmente de la Escuela de Post grado, por sus sabias enseñanzas que incidieron en mi formación profesional de la maestría.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

- [1] Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico Curibamba – EDEGEL SAA.
- [2] Sociedad Nacional de Minería (2004). Aplicación de la Geomecánica en la Minería Subterránea . Lima: p.10.
- [3] Estudios geológicos realizados por el INGEMMET, boletines núm. 78 y 69), cuadrángulos de La Merced (hoja 23-m), Tarma (23-I) y Oroya (24-I).

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- [1] Bieniawski, Z.T. (1989). Engineering Rock Mass Classifications .Wiley. New York, Vol 1.
- [2] González de Vallejo, L.(2003). *Ingeniería Geológica*, Madrid: Pearson Educacion S.A. – Prentice Hall.
- [3] Gonzales, Ferrer, Ortuño y Oteo (2002) *Ingeniería Geológica*. Madrid: Edit. Pearson Educación S.A.
- [4] Torres Yupanqui, L.(2004). Determinación de las propiedades físico-mecánicas de las rocas y monitoreo de la masa rocosa.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- [1] http://www.ftc.uni.edu.ni/.../Sistema_Unificado_de_Clasificacion_de_suelos.pdf
- [2] http://es.wikipedia.org/wiki/Ensayo_Proctor
- [3] <http://www.buenastareas.com/ensayos/Ensayo-Mecanica-De-Rocas-Carga-puntual/.html>

