Comisión Federal de Electricidad

Dirección Corporativa de Ingeniería y Proyectos de Infraestructura
Subdirección de Ingeniería y Administración de la Construcción
Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil

PROYECTO DE RESCATE EN PASTA DE CONCHOS, COAHUILA, MÉXICO.

Caracterización y diseño geotécnico de las excavaciones de los tiros verticales 1 y 2

SGM-DMR-K1330-I-013/2021

Por:
Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil, CFE

Junio 2021

"Sus Datos Personales en posesión de la Dirección Corporativa de Ingeniería y Proyectos de Infraestructura (DCIPI) y las áreas que la conforman, como sujeto obligado, están protegidos, en cumplimiento a la Ley General de Protección de Datos Personales en Posesión de Sujetos Obligados (LGPDPPSO). Lo invitamos a consultar nuestro aviso de privacidad en https://dcipi.cfemex.com"

Documento	Caracterización y diseño geotécnico de las excavaciones de los tiros verticales 1 y 2
Identificación GEIC	SGM-DMR-K1330-I-013/2021

Rev.	Fecha	Modificación	Numeral /Página	Autor	Aprobó
00	11/06/2021	Emisión original.	-	EGM, HNCR, JIIQ	VCP

VCP Valentín Castellanos Pedroza
JIIQ José I. Ibarra Quintero
EGM Efraín Gallegos Moreno
HNCR Héctor Noé Caballero Ramos

Contenido

1 Resumen ejecutivo 1
2 Antecedentes 2
3 Objetivo 2
4 Información de referencia 2
4.1 Sondeos y pruebas de campo 2
4.2 Pruebas de laboratorio 3
5 Criterios de caracterización geotécnica 4
5.1 Suelos 5
5.2 Propiedades índice de la roca intacta 5
5.3 Propiedades mecánicas y dinámicas 6
5.4 Clasificación de macizos rocosos 7
5.4.1 Clasificación a partir de afloramientos 7
5.4.2 Clasificación a partir de información de barrenos 8
5.5 Propiedades de macizos rocosos 9
5.5.1 Resistencia del macizo rocoso 9
5.5.2 Deformabilidad a partir de pruebas de campo 10
5.5.3 Deformabilidad a partir de clasificaciones geomecánicas 10
5.6 Unidades Geotécnicas 11
6 Caracterización geotécnica 11
6.1 Suelos 11
6.1.1 Propiedades de la matriz 11
6.2 Macizos rocosos 13
6.2.1 Propiedades índice de la roca intacta 13
6.2.2 Propiedades mecánicas y dinámicas de la roca 15
6.3 Descripción de discontinuidades 18
6.4 Clasificación Geomecánica de los materiales 20
7 Resumen de resultados 24
8 Referencias 25

Anexo 1. Base de ensayes de datos de laboratorio
Anexo 2. Resumen de propiedades geomecánicas
Anexo 3. Modelo Geotécnico de tiro vertical 1 Anexo
4. Modelo Geotécnico de tiro vertical 2 Anexo 5.
Sección de tratamientos en tiro vertical 1 Anexo 6.
Sección de tratamientos en tiro vertical 1

Caracterización y diseño geotécnico de las excavaciones de los tiros verticales 1 y 2

Nueva Rosita, Coahuila a 11 de junio de 2021

1 Resumen ejecutivo

A partir de la minuta firmada entre el gobierno federal y familiares de los mineros fallecidos en Pasta de Conchos en mayo de 2020, se determinó iniciar de inmediato el rescate de los restos a través de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

En septiembre de 2020, la Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS) y el Servicio Geológico Mexicano (SGM) realizaron la entrega a la CFE toda la documentación y los estudios técnicos relacionados con la mina Pasta de Conchos, para atender la instrucción del diseño y ejecución del proyecto de rescate en la mina Pasta de Conchos.

En atención a la instrucción del Gobierno Federal, la CFE ha realizado la revisión documental, los estudios multidisciplinarios en campo que han permitido realizar un modelo geotécnico e identificación de riesgos de los trabajos de los procesos de excavación, concluyendo en el diseño especifico de las geometrías y sistemas de soporte de la excavación de los tiros 1 y 2 del proyecto.

2 Antecedentes

A partir de la información proporcionada por la Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS), a través del Servicio Geológico Mexicano (SGM), se proyectó y ejecutó un programa de exploración complementario y multidisciplinario con el objeto de contar con la integración de un modelo geotécnico e identificar los riesgos geotécnicos asociados al proyecto de rescate de Pasta de Conchos, así como para el diseño geotécnico de las geometrías de excavación, tratamientos, secuencias y consideraciones particulares en los procesos de excavación.

De forma gradual se incorporó la información topográfica, geológica, geofísica, hidrológica y geotécnica concluyendo en los modelos geotécnicos particulares de cada uno de los tiros.

Figura 1. Localización de mina Pasta de Conchos, Coahuila.

3 Objetivo

Generar el modelo geotécnico y realizar el diseño de las excavaciones y sistemas de tratamientos a la roca de tiros verticales 1 y 2.

4 Información de referencia

4.1 Sondeos y pruebas de campo

Los trabajos de campo que fueron integrados para la evaluación del proyecto incluyeron: sondeos de investigación, levantamientos geomecánicos de sondeos y afloramientos y selección de muestras para la ejecución de pruebas índice y mecánicas en laboratorio de la roca intacta.

La Tabla 1 muestra un resumen de las actividades de campo, los sitios de ejecución de pruebas o muestreo, así como las cantidades ejecutadas por cada actividad.

Tabla 1. Resumen de trabajos de campo.

Actividad/Prueba	Sitio/Barreno	Cantidad
Levantamiento geomecánico de sondeos	PC-10, PC-12, PC-13B, PC-15, PC-1a´, PC-2, PC-20, PC-5, PC-8A, PC-9, PCT-1, PCT-2	12 Barrenos
Levantamiento de afloramientos	Afloramientos en taludes en tajos cercanos al proyecto.	12 levantamientos

4.2 Pruebas de laboratorio

Se integraron los resultados de pruebas de laboratorio para definir las propiedades índice y mecánicas de suelos y roca intacta, los cuales se extrapolaron posteriormente a la escala del proyecto. Por otro lado, se contó con valores puntuales de resistencia al corte de suelos y matriz de los materiales mixtos, a partir de muestras extraídas de algunos sondeos.

En las Tablas 2 y 3 se muestran el número de pruebas índice y mecánicas respectivamente, realizadas en cada sondeo.

Tabla 2. Cantidad y ubicación de pruebas índice de laboratorio.

Prueba	Sondeo	Cantidad
Contenido de agua	PC-1a´, PC-5, PC-10, PC-20, PC-13B, PC-15, PC-12, PCT-1, PC-9 y PC-8A	439
Peso volumétrico	PC1a´, PC-5, PC-10, PC-20, PC-13B, PC-15, PC-12, PCT-1, PC-9 y PC-8A	437
Granulometrías	PC-1a´	2
Límites de consistencia	PC-1a´	2

Tabla 3. Cantidad y ubicación de pruebas mecánicas de laboratorio.

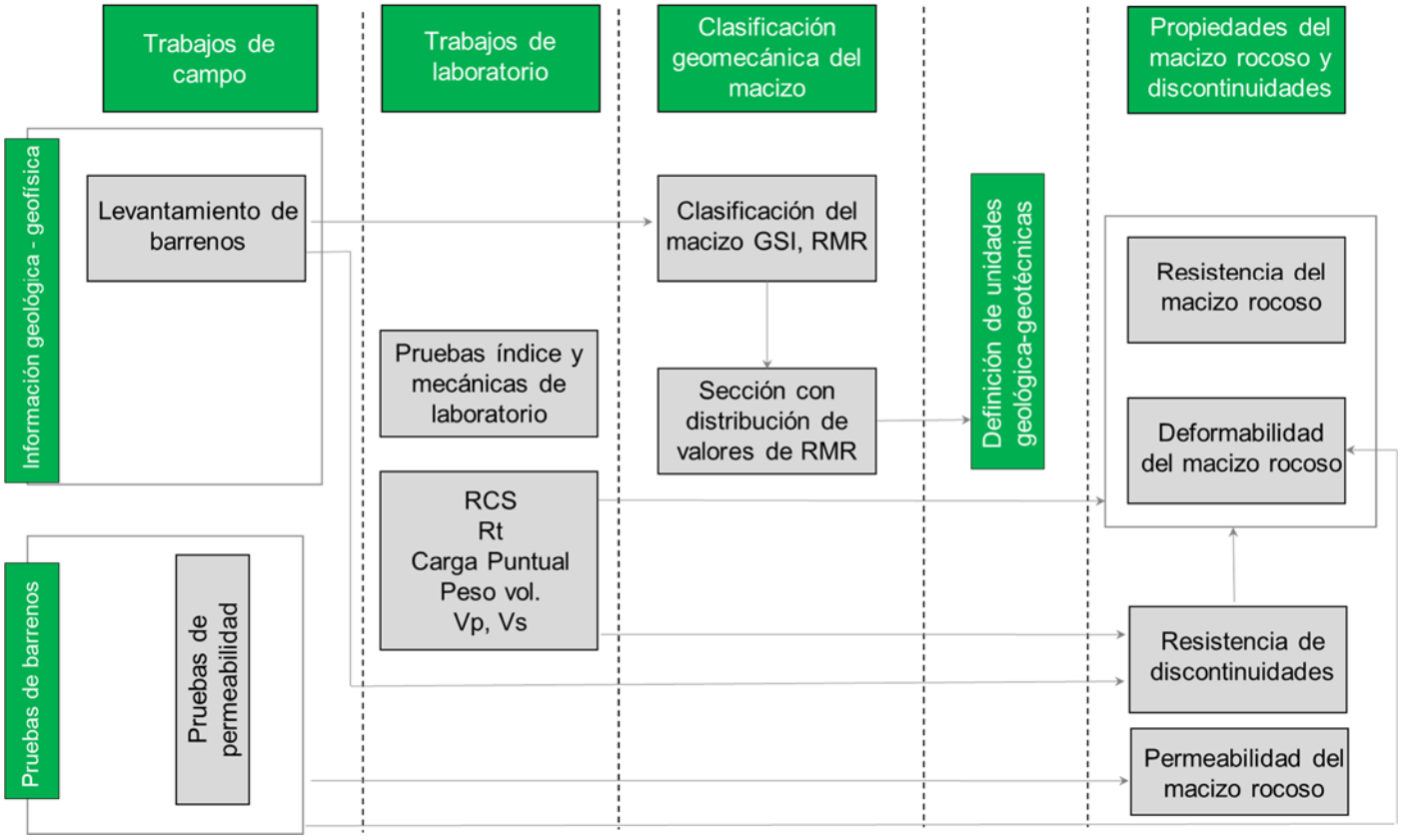
Prueba	Sondeo	Cantidad
Resistencia a la compresión simple en rocas.	PC1a´, PC-2, PC-10, PC-20, PC-13B, PC-15, PC-12, PCT-1, PC-9 y PC-8A	169
Resistencia a la tensión indirecta en rocas	PC1a´, PC-2, PC-5, PC-20, PC-13B, PC-15, PC-12,	186
Carga puntual en rocas	PC1a´, PC-2, PC-5, PC-10, PC-20, PC-13B, PC-12	60

5 Criterios de caracterización geotécnica

En esta sección se presentan los criterios empleados para caracterizar geotécnicamente los materiales que serán excavados en el proyecto, en función de sus propiedades índices y mecánicas, así como a partir de clasificaciones geomecánicas cualitativas y cuantitativas. Finalmente se indican las consideraciones empleadas para establecer los parámetros de resistencia y deformabilidad de los geo materiales a una escala representativa del proyecto.

En la Figura 2 se indica un diagrama sintético del proceso de asignación de parámetros geomecánicos del macizo rocoso.

Figura 2 Diagrama sintético del proceso de asignación de parámetros geomecánicos del macizo rocoso.



5.1 Suelos

Los suelos identificados en el proyecto fueron caracterizados en función de los criterios indicados en la Tabla 4. Estos materiales se presentaron en zonas superficiales con un espesor variable; en forma de intercalaciones o lentes debido a la alteración avanzada de la roca; o bien, como parte de la matriz en brechas de diferente composición. Estos materiales fueron caracterizados en zanjas de excavación y muestras de sondeos.

Tabla 4. Criterios para determinar propiedades índice y mecánicas de suelos

Parámetro	Norma/Procedimiento/Criterios
Peso volumétrico	ASTM-D854, ASTM-C127
Clasificación	ASTM-D2487
Granulometría	NMX-C-077, NMX-C-084, NMX-C-170, NMX-C-416, ASTM-C117, ASTM-C136, ASTM-C702, ASTM-D422
Límites de consistencia	ASTM-D4318
Resistencia al corte en término de esfuerzos efectivos (c', ϕ')	a) Experiencias con materiales similares y límites establecidos para materiales de naturaleza similar (ROM 0.5-05, Loehr et al. 2016).

5.2 Propiedades índice de la roca intacta

Los ensayes realizados para definir las propiedades índices de la roca intacta y bloques de roca incluyeron: peso volumétrico ambiente (γ_{amb}) y contenido de agua (w), Estas pruebas se ejecutaron de acuerdo con las normas o procedimientos indicados en la Tabla 5.

Tabla 5. Normas y procedimientos de referencia para la obtención de propiedades índice de la roca

Prueba	Norma o procedimiento de referencia
Peso volumétrico	NMX-C-164-ONNCCE-2002
Contenido de agua en rocas	ASTM D 2216

5.3 Propiedades mecánicas y dinámicas

Para evaluar las propiedades mecánicas de la roca intacta, se realizaron ensayes de resistencia a la compresión simple (σci); módulo de elasticidad tangente al 50% de la resistencia a la compresión (Et50); resistencia a la tensión indirecta; resistencia a la compresión triaxial; y pruebas dinámicas para la determinación de la velocidad de propagación de ondas de compresión y corte. Estas pruebas se ejecutaron de acuerdo con las normas o procedimientos indicados en la Tabla 6.

Tabla 6. Normas de referencia y procedimientos para la obtención de propiedades mecánicas de la roca intacta.

Prueba	Norma o procedimiento de referencia
Obtención y preparación de muestras cilíndricas	ASTM D 4543
Resistencia a la compresión simple con determinación del módulo de elasticidad, Et50	ASTM D 3148
Resistencia a la compresión Triaxial no drenada.	ASTM D 2664
Resistencia a la tensión Indirecta “brasileña”.	ASTM D 3967
Determinación de las Velocidades y las constantes Elásticas por Pulso Ultrasónico en Roca.	ASTM D 2845

Para definir la constante “mi” de la roca intacta en el criterio de falla de Hoek-Brown (2002), se emplearon los resultados de resistencia a la compresión simple y tensión indirecta a partir de la relación entre la resistencia a la compresión simple y la resistencia a la tensión de la roca intacta, cuya validez es detallada en Cai (2010). Los rangos de variación para estos casos, se definieron con la distribución sintética de valores de “mi” obtenidos de los histogramas de resistencia a la compresión y tensión disponibles.

5.4 Clasificación de macizos rocosos

Para evaluar la calidad del macizo rocoso, se empleó la metodología GSI (Geological Strength Index), RMR (Bieniawski, 1989) y Q (Barton, 2002), a partir de la información obtenida de afloramientos de roca y el levantamiento de núcleos recuperados de barrenos.

5.4.1 Clasificación a partir de afloramientos

La información levantada de afloramientos incluyó los parámetros indicados en las Tablas 19 y 20. En la Tabla 7 se indica la información empleada para clasificar el macizo rocoso de acuerdo con cada metodología.

Tabla 7. Normas de referencia y procedimientos para la obtención de propiedades mecánicas de la roca intacta.

Información	Criterios para su determinación y clasificación	GSI	RMR	Q
Tipo de roca		X	X	X
Resistencia a la compresión simple de la roca	Bieniawski (1989)		X	X
Rock Quality Designation (RQD)	ISRM (1978)		X	X
Tamaño de bloque	ISRM (1978)	X		
Índice de fracturamiento. (Jn)	Barton (2002)			X
Espaciamiento entre fracturas	ISRM (1978)		X	
Rugosidad a pequeña escala. (js)	Bieniawski (1989), Palmstrom (1995)	X	X	X
Rugosidad a gran escala. (jw)	Palmstrom (1995)			X
Alteración. (jA)	Bieniawski (1989), Barton (2002)	X	X	X
Relleno	Bieniawski (1989)	X	X	
Persistencia. (jL)	Bieniawski (1989), Barton (2002)		X	
Abertura	Bieniawski (1989)		X	
Factor de presencia de agua. (Jw)	Bieniawski (1989) Barton (2002)		X	X
Factor de estado de esfuerzos. (SRF)	Barton (2002)			X

5.4.2 Clasificación a partir de información de barrenos

El levantamiento de los barrenos se realizó en tramos de longitud variable de acuerdo con la litología y calidad identificada, los datos empleados para la caracterización se indican en la Tabla 8; adicionalmente se incluyó la información obtenida de levantamientos en taludes de tajos cercanos, para completar los requerimientos de los criterios de clasificación. La base de datos para generar la clasificación del macizo rocoso a partir de información de barrenos se ubica en el Anexo 5 de este documento.

Para la determinación del GSI con la información de barrenos, se empleó la ecuación propuesta por Hoek et al. (2013):

$$GSI = \frac{52\, jR/jA}{(1+jR/jA)} + RQD/2$$

Donde jR es el índice de rugosidad (jR= js·jw) y jA el índice de alteración de las juntas.

Tabla 8. Información recabada para la evaluación del macizo rocoso desde barrenos.

Fuente	Información	Criterios para su determinación y clasificación
Barrenos	Tipo de roca	--
	Profundidad	--
	Ángulo de intersección de la discontinuidad con el barreno	ISRM (1978)
	Número de fracturas	ISRM (1978)
	Rock Quality Designation (RQD)	ISRM (1978)
	Alteración. (jA)	Barton (2002); Palmstrom (1995)
	Rugosidad a pequeña escala. (js)	Palmstrom (1995)
	Índice de fracturamiento. (Jn)	Barton (2002)
	Factor de presencia de agua. (Jw)	Barton (2002)
	Factor de estado de esfuerzos. (SRF)	Barton (2002)
Afloramientos de roca	Abertura	Bieniawski (1989)
	Relleno	Bieniawski (1989)
	Rugosidad a gran escala. (jw)	Palmstrom (1995)
	Persistencia. (jL)	Palmstrom (1995)

5.5 Propiedades de macizos rocosos

5.5.1 Resistencia del macizo rocoso

La resistencia del macizo rocoso se determinó en función de los criterios de falla de Hoek-Brown (2002) y Mohr-Coulomb, para ello se emplearon las propiedades mecánicas de la roca intacta y los levantamientos geomecánicos para escalar estas propiedades.

En el criterio de falla de Hoek-Brown (2002), se emplean como punto de partida los parámetros de resistencia de la roca intacta para posteriormente reducirlos de acuerdo con las características estructurales del macizo rocoso y las condiciones de las discontinuidades mediante el valor de GSI.

El criterio generalizado de Hoek-Brown se basa en la expresión:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci}\left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^a$$

Donde "mb" es un valor reducido de la constante “mi” y está dado por:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)$$

Los valores de ***s*** y ***a*** son constantes de la masa de roca dadas por las relaciones siguientes:

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}\right)$$

El factor D depende del grado de perturbación al cual la roca ha sido sujeta debido a daños por voladura o relajación de esfuerzos; éste varía de 0 para inalterado a 1 para macizos rocosos muy alterados.

Los valores de resistencia a la compresión simple (σc) y a la tensión (σt) del macizo rocoso fueron determinadas a partir de las expresiones propuestas por Hoek et al. (2002):

Con la finalidad de contar con parámetros de resistencia basados en el criterio de falla Mohr-Coulomb, se empleó la información anterior para definir los ángulos de fricción equivalentes y la cohesión para diferentes estados de esfuerzo en el macizo rocoso, a partir de la metodología de ajuste propuesta por Hoek et al. (2002).

Debido a que el criterio Mohr-Coulomb representa una envolvente lineal, los parámetros de resistencia deben ajustarse para cada condición de esfuerzo esperado. Las expresiones empleadas para linealizar el criterio de falla de Hoek-Brown fueron:

$$\emptyset' = \sin^{-1}\left[\frac{6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}\right]$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}\,[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}](s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{(1+(6am_b\,(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}))/((1+a)(2+a))}}$$

Donde, $\sigma_{3n} = \sigma_{3max}/\sigma_{ci}$

5.5.2 Deformabilidad a partir de pruebas de campo

Para evaluar la deformabilidad del macizo rocoso se emplearon los resultados de las pruebas con Gato Goodman, las cuales se ejecutaron de acuerdo con las normas indicadas en la Tabla 9.

Tabla 9. Normas de referencia y procedimientos para la determinación de la deformabilidad del terreno.

Prueba	Norma o procedimiento de referencia
Gato Goodman	ASTM D 4971

5.5.3 Deformabilidad a partir de clasificaciones geomecánicas

Para evaluar la deformabilidad del macizo rocoso se empleó la información disponible de los levantamientos geomecánicos de barrenos y el criterio de Hoek y Diederichs (2006), el cual se basa en la siguiente expresión:

$$E_m = E_i\left(0{,}02 + \frac{1-D/2}{1+e^{((60+15D-GSI)/11)}}\right)$$

Donde Ei es el módulo de la roca intacta, equivalente al Et50 y D es el factor de perturbación (valores de 0 para macizos rocosos inalterados y hasta 1 para macizos muy alterados).

La relación de Poisson para el macizo rocoso se definió de forma aproximada a partir del criterio propuesto por Vasarhelyi (2008), el cual emplea la ecuación siguiente:

$$\nu_m = -0{,}002GSI - 0{,}003mi + 0{,}457$$

5.6 Unidades Geotécnicas

Las unidades geotécnicas se definieron tomando en consideración el modelo geológico de referencia, así como el grado de alteración y comportamiento mecánico de los materiales en cada litología. La tabla 10 muestra las unidades geotécnicas para el sector en estudio.

Tabla 10. Unidades Geotécnicas de Mina Pasta de Conchos.

Formación Geológica	Unidad Geológica	Unidad Geotécnica
Fm Escondida	Suelos y Depósitos de Talud (Qsr)	**UG-1**
Fm Olmos	Carbón (C)	**UG-2**
	Lutita Carbonosa (LuC - C)	**UG-3**
	Lutita (Lu)	
	Lutita - Limolita (Lu - Lm)	
	Limolita - Lutita (Lm - Lu)	
	Lutita – Arenisca (Lu – Ar)	**UG-4**
	Limolita – Arenisca (Lm – Ar)	
	Arenisca – Lutita (Ar – Lu)	**UG-5**
	Arenisca – Limolita (Ar – Lm)	
Fm Olmos y San Miguel	Arenisca (Ar)	**UG-6**

6 Caracterización geotécnica

6.1 Suelos

Los materiales de textura fina identificados en el proyecto fueron caracterizados en función de los resultados obtenidos durante los levantamientos de materiales superficiales en sitio a base de calas de excavación y sondeos de exploración. Estos materiales se presentaron en zonas superficiales con un espesor variable y en forma de intercalaciones o lentes debido a la alteración avanzada de la roca. Estos materiales fueron caracterizados e integrados en dos unidades, donde, los materiales de textura arcillosa conformaron la unidad geotécnica UG-1 mientras que la unidad geotécnica UG-3 se encuentra representada por roca Lutita en condiciones alteradas (de grado IV a V de meteorización).

6.1.1 Propiedades de la matriz

Los valores de resistencia a la compresión simple, cohesión y fricción de la matriz, se determinaron a partir de resultados de laboratorio y campo, así como con pruebas ejecutadas con herramientas manuales como es el penetrómetro y torcómetro de bolsillo en sitio. En algunos casos, los límites de resistencia se determinaron a partir de experiencias con materiales similares. En las tablas 11 y 12 se indican las propiedades índice y mecánicas de la matriz.

Tabla 11. Propiedades índices de la matriz de los materiales mixtos y suelos

Muestra	Profundidad	%G	%S	%F	Identificación visual y al tacto	SUCS	SUCS ASTM	NOMBRE
M-1	0.30 – 0.60	0.00	12.00	88.00	Arcilla gris con pocas raíces y grumos poco cementados	CH	CH	Arcilla de alta compresibilidad
M-2	2.40 – 2.70	2.97	37.21	59.82	Arcilla café amarillento con grumos grises y blandos pocos cementados	CL	CL	Arcilla ligeramente arenosa

Tabla 12. Propiedades mecánicas de la matriz de materiales superficiales.

		UG-1		UG - 3a
		Qsr		*Ksm Lu*
		Arcilla de alta compresibilidad	*Arcilla ligeramente arenosa*	*Lutita alterada*
Resistencia a la compresión simple de la matriz, RCS_m (MPa)	**f**	**0.5**	***0.5***	***20***
	Rango	*0.3 – 1.00*	*0.3 - 1.00*	*7 - 38*
Ángulo de fricción de la matriz, ϕ_m (grados)	**f**	**27**	**28**	**37**
	Rango	*25 – 28*	*25 - 30*	*35 - 40*
Cohesión de la matriz, C_m (MPa)	**f**	**0.04**	**0.04**	**0.07**
	Rango	*< 0.10*	*< 0.10*	*< 0.10*

6.2 Macizos rocosos

Para evaluar la calidad del macizo rocoso y estimar sus propiedades mecánicas, se realizó una clasificación de materiales, obteniendo una integración de cinco unidades geotécnicas (UG-2, UG-3, UG-4, UG-5 y UG-6), ante esto, se realizó una campaña de laboratorio con el objetivo de conocer las propiedades físicas y mecánicas de la roca. A continuación, se muestran los resultados obtenidos durante la presente campaña de estudio en el proyecto de Mina Pasta de Conchos.

6.2.1 Propiedades índice de la roca intacta

El valor más frecuente y los rangos probables de las propiedades índices para cada tipo de roca se presentan en la Tabla 13. Los resultados que se presentan corresponden a los obtenidos en la presente campaña de estudio en el proyecto de Mina Pasta de Conchos.

Tabla 13. Resumen de propiedades índice de la roca intacta (valores más frecuentes y rangos máximo y mínimo).

Propiedad		UG-2 (Carbón)	UG-3a (Lutita Alterada)	UG-3 (Lutita - Limolita)	UG-4 (Lutita, Limolita - Arenisca)	UG-5 (Arenisca – Lutita, Limolita)	UG6a (Arenisca Alterada)	UG6 (Arenisca)
Peso volumétrico ambiente, γ amb (kN/m^3)	f	**13.5**	**23.50**	**23.50**	**24.60**	**24.90**	**23.80**	**25.00**
	Rango	*12.16 – 18.21*	*22.80 – 24.80*	*21.70 – 24.90*	*24.03 – 25.11*	*24.41 – 25.30*	*23.40 – 24.20*	*24.34 – 25.62*
Contenido de agua, w (%)	f	**1.76**	**6.06**	**4.82**	**3.45**	**3.30**	**2.16**	**1.57**
	Rango	*0.62 – 5.50*	*5.10 – 6.67*	*2.35 – 6.56*	*1.33 – 5.66*	*1.05 – 5.72*	*1.86 – 2.33*	*0.73 – 2.66*

f: valor más frecuente.

Tabla 14.Intervalo de confianza del 90% del peso volumétrico ambiente de la roca intacta.

Litología	γ_{amb}, kN/m3 (10.00 – 28.00)	γ_{amb} (media)	n (valores)
Carbón (UG-2)	12.16 – 18.21	13.50	14
Lutita Alterada (UG-3a)	22.80 – 24.80	23.50	7
Lutita - Limolita (UG-3)	21.70 – 24.90	23.50	130
Lutita, Limolita - Arenisca (UG-4)	24.03 – 25.11	24.60	44
Arenisca - Lutita, Limolita (UG-5)	24.41 – 25.30	24.90	56
Arenisca (UG-6a)	23.40 – 24.20	23.80	43
Arenisca (UG-6)	24.34 – 25.62	25.00	10

f: valor más frecuente, N.D.: Valor no disponible debido al limitado número de pruebas, media: valor promedio

6.2.2 Propiedades mecánicas y dinámicas de la roca

En la Tabla 15 se indican los valores frecuentes y los rangos probables para las propiedades mecánicas y dinámicas para cada tipo de roca.

Tabla 15. Propiedades mecánicas y dinámicas de la roca intacta.

Propiedad		UG-2 (Carbón)	UG-3a (Lutita Alterada)	UG-3 (Lutita, Limolita)	UG-4 (Lutita, Limolita - Arenisca)	UG-5 (Arenisca – Lutita, Limolita)	UG-6a (Arenisca Alterada)	UG-6 (Arenisca)
Propiedades Mecánicas								
Resistencia a la compresión simple, RCS (MPa)	f	8.0	20.0	33.0	46.0	78.0	45.0	120.0
	Rango	*3 – 13*	*7 – 36*	*10 – 56*	*19 - 65*	*60 - 100*	*16 - 67*	*75 - 185*
Resistencia a la tensión, Rt (MPa)	m	1.3	1.9	2.0	4.7	5.3	5.0	12.5
	Rango	*0.10 - 2.90*	*0.8 - 4.1*	*0.3 - 4.2*	*2.1 - 8.4*	*2.1 - 9.3*	*2.0 - 7.0*	*7.5 - 18.9*
Módulo de deformabilidad de Roca Intacta (MPa)	m	N.D	N.D	6442	12464	21428	N.D	24606
	Rango	N.D	N.D	*3328 - 8880*	*5308 - 36772*	*7580 - 67893*	N.D	*15473 - 47170*
Constante mi (Hoek-Brown, 2002)	f	4.0	5.0	8.5	11.0	13.5	8.0	16.0
	Rango	*3 – 5*	*3.5 – 8*	*5.5 – 11*	*7 - 14*	*9.5 - 17*	*6 - 10*	*12 - 20*
Relación de Poisson	f	0.39	0.35	0.34	0.33	0.30	0.34	0.28
Módulo de deformabilidad Gato Goodman (MPa)	m	N.D	N.D	2032	4915	7993	N.D	8709
Propiedades Dinámicas								
Velocidad primaria Vp (m/s)	f	N.D	N.D	2791	3107	3494	N.D	5310
Velocidad secundaria Vs (m/s)	f	N.D	N.D	1260	1444	1681	N.D	2624
Módulo de deformabilidad dinámico roca intacta (MPa)	f	N.D	N.D	10797	14511	20749	N.D	47889
Relación de Poisson	f	N.D	N.D	0.36	0.35	0.32	N.D	0.31

f: valor más frecuente, N.D.: Valor no disponible debido al limitado número de pruebas, m: valor promedio

La Tabla 16 indica los intervalos de confianza del 90% de la resistencia a la compresión simple de la roca intacta

Tabla 16. Intervalo de confianza del 90% de la resistencia a la compresión simple de la roca intacta.

Litología	RCS (MPa)	RCS (frecuente)	n (valores)
Carbón (UG-2)	3.00 13.00	8.0	17
Lutita alterada (UG-3a)	7.00 36.00	20.0	N.D
Lutita, Limolita (UG-3)	10.00 65.00	33.0	31
Lutita, Limolita - Arenisca (UG-4)	19.00 65.00	46.0	37
Arenisca - Lutita, Limolita (UG-5)	60.00 100.00	78.0	29
Arenisca alterada (UG-6a)	16.00 67.00	45.0	N.D
Arenisca (UG-6)	75.00 185.00	120.0	33

f: valor más frecuente, N.D.: Valor no disponible debido al limitado número de pruebas.

La Tabla 17 indica los intervalos de confianza del 90% de la resistencia a la tensión simple de la roca intacta

Tabla 17. Intervalo de confianza del 90% de la resistencia a la tensión de la roca intacta.

Litología	Rt (MPa)	Rt (frecuente)	n (valores)
Carbón (UG-2)	0.12 2.93	1.3	15
Lutita alterada (UG-3a)	0.83 4.12	1.9	N.D
Lutita, Limolita (UG-3)	0.29 4.22	2.0	47
Lutita, Limolita - Arenisca (UG-4)	2.18 8.39	4.7	29
Arenisca - Lutita, Limolita (UG-5)	2.10 9.32	5.3	36
Arenisca alterada (UG-6a)	2.00 7.00	5.0	N.D
Arenisca (UG-6)	7.50 18.90	12.5	27

f: valor más frecuente, N.D.: Valor no disponible debido al limitado número de pruebas

El parámetro “mi” se determinó con base en materiales de naturaleza similar (Marinos y Hoek 2000), y en función de la relación qu/rt (resistencia a la compresión simple/resistencia a la tensión de la roca intacta) de acuerdo con Cai (2010) y Zuo y Shen (2020). En la tabla 18 se indican los valores frecuentes y rangos probables.

Tabla 18. Intervalo de confianza del 90% del parámetro de “mi”.

Litología	mi	mi (frecuente)
Carbón (UG-2)	3.00 – 5.00	4.0
Lutita alterada (UG-3a)	3.50 – 8.00	5.0
Lutita, Limolita (UG-3)	5.50 – 11.00	8.5
Lutita, Limolita - Arenisca (UG-4)	7.00 – 14.00	11.0
Arenisca - Lutita, Limolita (UG-5)	9.50 – 17.00	13.5
Arenisca alterada (UG-6a)	6.00 – 10.00	8.0
Arenisca (UG-6)	12.00 – 20.00	16.0

f: valor más frecuente, N.D.: Valor no disponible debido al limitado número de pruebas

6.3 Descripción de discontinuidades

A partir de la integración de levantamientos de discontinuidades en afloramientos y barrenos, en las Tablas 19 y 20 se presenta un resumen de las características de los sistemas de discontinuidades por litología y tipo de fracturamiento. Esta información fue empleada posteriormente para la definición de clasificaciones geomecánicas de la masa de roca.

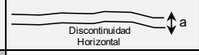
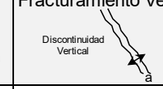
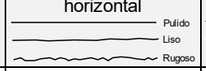
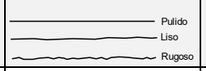
Tabla 19. Caracterización de espaciamiento y continuidad de los sistemas de discontinuidad del Macizo Rocoso.

Litología	Unidad Geológica	Unidad geotécnica	Espaciamiento entre fracturas[1] (m)		Continuidad[2] (m)	
			Fracturamiento horizontal	Fracturamiento Vertical	Fracturamiento horizontal	Fracturamiento Vertical
Carbón	Ksm C	UG-2	(< 0.06), (0.06 - 0.20)	(< 0.06), (0.06 - 0.20)	(< 1.00)	(< 1.00)
Lutita Carbonosa	Ksm Lu C	UG-3	(< 0.06), (0.06 - 0.20)	(< 0.06), (0.06 - 0.20)	(1.00 - 3.00)	(< 1.00)
Lutita	Ksm Lu		(< 0.06), (0.06 - 0.20)	(< 0.06), (0.06 - 0.20)	(1.00 - 3.00)	(< 1.00)
Lutita - Limolita	Ksm Lu - Lm		(< 0.06), (0.06 - 0.20)	(0.06 - 0.20)	(1.00 - 3.00)	(< 1.00), (1.00 - 3.00)
Limolita - Lutita	Ksm Lm - Lu		(0.06 - 0.20)	(0.06 - 0.20), (0.20 - 0.60)	(1.00 - 3.00)	(< 1.00), (1.00 - 3.00)
Limolita	Ksm Lm		(0.06 - 0.20)	(0.06 - 0.20), (0.20 - 0.60)	(1.00 - 3.00)	(< 1.00), (1.00 - 3.00)
Lutita Alterada	Ksm Lu	UG-3a	(< 0.06), (0.06 - 0.20)	(< 0.06), (0.06 - 0.20)	(1.00 - 3.00)	(< 1.00)
Lutita - Arenisca	Ksm Lu - Ar	UG-4	0.06 - 0.20	0.06 - 0.20	(1.00 - 3.00)	(< 1.00), (1.00 - 3.00)
Limolita - Arenisca	Ksm Lm - Ar		0.06 - 0.20	0.20 - 0.60	(1.00 - 3.00)	(< 1.00), (1.00 - 3.00)
Arenisca - Lutita	Ksm Ar - Lu	UG-5	(0.20 - 0.60)	(0.20 - 0.60), (0.60 - 2.00)	(1.00 - 3.00), (3.00 - 10.00)	(1.00 - 3.00)
Arenisca - Limolita	Ksm Ar - Lm		(0.20 - 0.60)	(0.20 - 0.60), (0.60 - 2.00)	(1.00 - 3.00), (3.00 - 10.00)	(1.00 - 3.00)
Arenisca	Ksm Ar	UG-6	(0.20 - 0.60), (0.60 - 2.00)	(0.60 - 2.00)	(1.00 - 3.00), (3.00 - 10.00)	(1.00 - 3.00)
Arenisca Alterada		UG-6a	0.06 - 0.20	0.06 - 0.20	(1.00 - 3.00)	(< 1.00), (1.00 - 3.00)

[1] Obtenido de levantamiento en barrenos y afloramientos

[2] Obtenido de levantamiento de afloramientos

Tabla 20. Caracterización de abertura, relleno y rugosidad a pequeña y gran escala de sistemas de discontinuidad del Macizo Rocoso.

Litología	Unidad Geológica	Unidad geotécnica	Abertura [1 y 2] (mm)		Relleno [1 y 2] (mm)		Rugosidad a pequeña escala[1]		Ondulación del plano[2]		Alteración[1 y 2]	
			Fracturamiento horizontal 	Fracturamiento Vertical 	Fracturamiento horizontal	Fracturamiento Vertical	Fracturamiento horizontal 	Fracturamiento Vertical 	Fracturamiento horizontal	Fracturamiento Vertical	Fracturamiento horizontal	Fracturamiento Vertical
Carbón	Ksm C	UG-2	Cerrada a Moderadamente Abierta	Cerrada a Moderadamente Abierta	Sin relleno	Sin relleno	Ligeramente Rugoso	Ligeramente Rugoso	Moderadamente Ondulada	Moderadamente Ondulada	Ligeramente Alterada	Ligeramente Alterada
Lutita Carbonosa	Ksm Lu C	UG-3	Cerrada a Moderadamente Abierta	Cerrada a Moderadamente Abierta	Sin relleno	Sin relleno	Liso	Ligeramente Rugoso	Moderadamente Ondulada	Moderadamente Ondulada	Ligeramente Alterada	Ligeramente Alterada
Lutita	Ksm Lu		Cerrada a Moderadamente Abierta	Cerrada a Moderadamente Abierta	Sin relleno, Materiales friccionantes < 5mm	Sin relleno, Materiales friccionantes < 5mm	Liso	Ligeramente Rugoso	Moderadamente Ondulada	Moderadamente Ondulada	Ligeramente Alterada	Ligeramente Alterada
Lutita - Limolita	Ksm Lu - Lm		Cerrada a Moderadamente Abierta	Cerrada a Moderadamente Abierta	Sin relleno, Materiales friccionantes < 5mm	Sin relleno, Materiales friccionantes < 5mm	Liso	Ligeramente Rugoso	Fuertemente Ondulada	Fuertemente Ondulada	Ligeramente Alterada	Ligeramente Alterada
Limolita - Lutita	Ksm Lm - Lu		Cerrada a Moderadamente Abierta	Cerrada a Moderadamente Abierta	Sin relleno, Materiales friccionantes < 5mm	Sin relleno, Materiales friccionantes < 5mm	Ligeramente Rugoso	Ligeramente Rugoso	Fuertemente Ondulada	Fuertemente Ondulada	Ligeramente Alterada	Ligeramente Alterada
Limolita	Ksm Lm		Cerrada a Moderadamente Abierta	Cerrada a Moderadamente Abierta	Sin relleno, Materiales friccionantes < 5mm	Sin relleno, Materiales friccionantes < 5mm	Ligeramente Rugoso	Ligeramente Rugoso	Moderadamente Ondulad	Moderadamente Ondulad	Ligeramente Alterada	Ligeramente Alterada
Lutita Alterada	Ksm Lu	UG-3a	Cerrada a Moderadamente Abierta	Cerrada a Moderadamente Abierta	Sin relleno, Materiales friccionantes < 5mm	Sin relleno, Materiales friccionantes < 5mm	Liso	Ligeramente Rugoso	Moderadamente Ondulada	Moderadamente Ondulada	Ligeramente Alterada	Ligeramente Alterada
Lutita - Arenisca	Ksm Lu - Ar	UG-4	Cerrada a Moderadamente Abierta	Cerrada a Moderadamente Abierta	Sin relleno	Sin relleno	Ligeramente Rugoso	Ligeramente Rugoso	Moderadamente Ondulada	Moderadamente Ondulada	Ligeramente Alterada	Ligeramente Alterada
Limolita - Arenisca	Ksm Lm - Ar		Cerrada a Moderadamente Abierta	Cerrada a Moderadamente Abierta	Sin relleno	Sin relleno	Ligeramente Rugoso	Ligeramente Rugoso	Moderadamente Ondulada	Moderadamente Ondulada	Moderadamente Alterada	Moderadamente Alterada
Arenisca - Lutita	Ksm Ar - Lu	UG-5	Muy Cerrada a Cerrada	Muy Cerrada a Cerrada	Sin relleno	Sin relleno	Ligeramente Rugoso a Rugoso	Ligeramente Rugoso a Rugoso	Moderadamente a Fuertemente Ondulada	Moderadamente a Fuertemente Ondulada	Moderadamente Alterada	Moderadamente Alterada
Arenisca - Limolita	Ksm Ar - Lm		Muy Cerrada a Cerrada	Muy Cerrada a Cerrada	Sin relleno	Sin relleno	Ligeramente Rugoso a Rugoso	Ligeramente Rugoso a Rugoso	Moderadamente a Fuertemente Ondulada	Moderadamente a Fuertemente Ondulada	Moderadamente Alterada	Moderadamente Alterada
Arenisca	Ksm Ar	UG-6	Muy Cerrada a Cerrada	Muy Cerrada a Cerrada	Sin relleno	Sin relleno	Ligeramente Rugoso a Rugoso	Ligeramente Rugoso a Rugoso	Moderadamente a Fuertemente Ondulada	Moderadamente a Fuertemente Ondulada	Moderadamente Alterada	Moderadamente Alterada
Arenisca Alterada		UG-6a	Cerrada a Moderadamente Abierta	Cerrada a Moderadamente Abierta	Sin relleno	Sin relleno	Ligeramente Rugoso	Ligeramente Rugoso	Moderadamente Ondulada	Moderadamente Ondulada	Moderadamente Alterada	Moderadamente Alterada

[1] Obtenido de levantamiento en barrenos y afloramientos

[2] Obtenido de levantamiento de afloramientos

6.4 Clasificación Geomecánica de los materiales

Las clasificaciones geomecánicas, se definieron mediante la metodología RMR (Rock Mass Raiting) y GSI (Geological Strength Index), para este análisis se tomaron en cuenta los valores de la resistencia a la compresión simple de la roca intacta, porcentaje de RQD, grado de meteorización de la roca y características de los sistemas de discontinuidad del macizo rocoso, (separación, continuidad, abertura, rugosidad, relleno y alteración), dicha información, se recabo a partir de los levantamientos de barrenos y afloramientos de roca, así como de los resultados de laboratorio obtenidos durante ensayes de la roca intacta y ensayes de gato Goodman ejecutados en campo; así mismo, se tomó en cuenta la condición heterogénea y la estratificación del macizo rocoso.

En las Tablas 21 y 22 se indican los valores frecuentes y los rangos de los valores de RMR y GSI por unidad geotécnica.

Tabla 21. Valor frecuente y rangos de valores de RMR.

Litología	RMR	RMR (frecuente)
Lutita Carbonosa (UG-3)	48 57	52
Lutita (UG-3)	39 55	46
Limolita (UG-3)	47 61	53
Lutita - Arenisca (UG-4)	46 63	54
Limolita - Arenisca (UG-4)	44 54	49
Arenisca - Lutita (UG-5)	55 70	61
Arenisca - Limolita (UG-5)	59 69	64
Arenisca (UG-6)	65 82	73

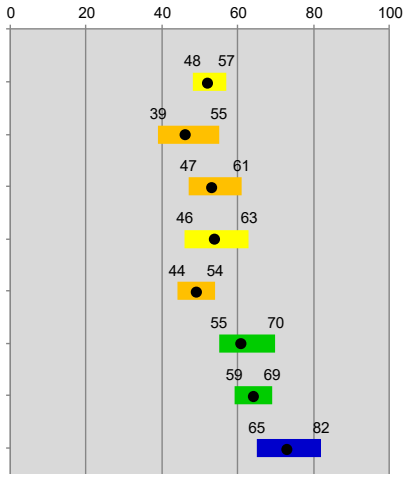
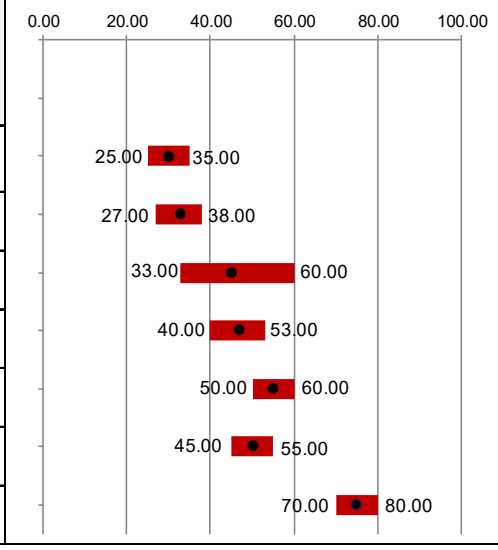


Tabla 22. Valor frecuente y rangos de valores de GSI.

Litología	GSI (MPa)	GSI (frecuente)
Carbón (UG-2)	25.00 – 35.00	30.0
Lutita alterada (UG-3a)	27.00 – 38.00	33.0
Lutita, Limolita (UG-3)	33.00 – 60.00	45.0
Lutita, Limolita - Arenisca (UG-4)	40.00 – 53.00	47.0
Arenisca - Lutita, Limolita (UG-5)	50.00 – 60.00	55.0
Arenisca alterada (UG-6a)	45.00 – 55.00	50.0
Arenisca (UG-6)	70.00 – 80.00	75.0



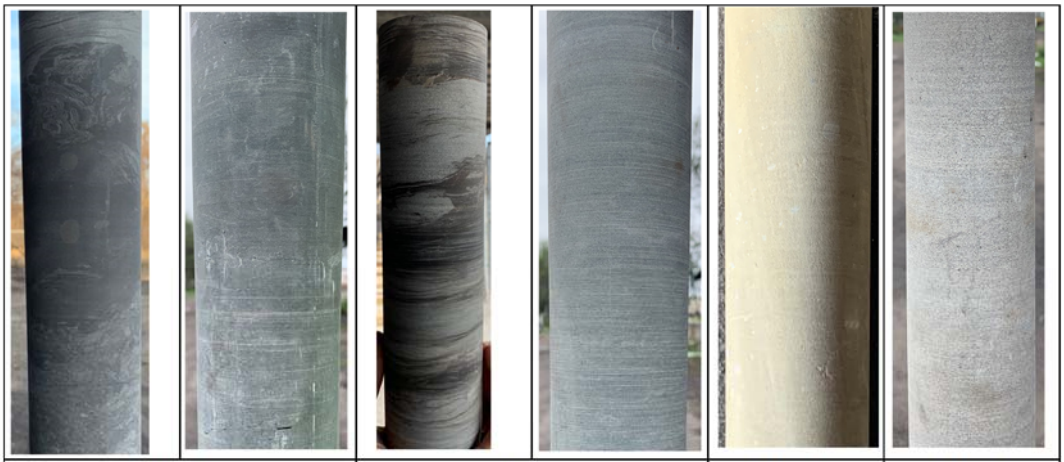
En la Tabla 23 se presentan las propiedades mecánicas representativas para las unidades geotécnicas UG-2 y UG-3.

Tabla 23. Propiedades mecánicas de las unidades geotécnicas UG-2 y UG-3.

		UG-2	**UG-3**				
		Ksm C	*Ksm Lu C*	*Ksm Lu*	*Ksm Lu - Lm*	*Ksm Lm - Lu*	*Ksm Lm*
		Carbón	*Lutita Carbonosa*	*Lutita*	*Lutita - Limolita*	*Limolita - Lutita*	*Limolita*
Resistencia a la compresión simple de la matriz, RCS_m (MPa)	**f**	**8**	***33***				
	Rango	*3 – 13*	*10 - 56*				
Ángulo de fricción de la matriz, ϕ_m (grados)	**f**	**22**	**40**				
	Rango	*18 – 26*	*35 - 44*				
Cohesión de la matriz, C_m (MPa)	**f**	**0.12**	**0.45**				
	Rango	*0.10 – 0.15*	*0.35 - 0.60*				

En la Tabla 24 se presentan las propiedades mecánicas representativas para las unidades geotécnicas UG-4, UG-5, UG-6a y UG-6.

Tabla 24. Propiedades mecánicas de las unidades geotécnicas UG-4, UG-5, UG-6a y UG-6.



		UG-4		UG-5		UG-6a	UG-6
		Ksm Lu - Ar	*Ksm Lm - Ar*	*Ksm Ar - Lu*	*Ksm Ar - Lm*	*Ksm Ar*	
		Lutita - Arenisca	*Limolita - Arenisca*	*Arenisca - Lutita*	*Arenisca - Limolita*	*Arenisca Alterada*	*Arenisca*
Resistencia a la compresión simple de la matriz, RCS_m (MPa)	**f**	**46**		***78***		***45***	***120***
	Rango	*19 – 65*		*60 - 100*		*16 - 67*	*75 - 185*
Ángulo de fricción de la matriz, ϕ_m (grados)	**f**	**41**		**44**		**38**	**47**
	Rango	*37 – 45*		*40 – 47*		*35 – 42*	*42 – 49*
Cohesión de la matriz, C_m (MPa)	**f**	**0.5**		**0.85**		**0.4**	**1.2**
	Rango	*0.35 – 0.70*		*0.70 – 1.00*		*0.35 – 0.50*	*0.75 – 2.10*

7 Resumen de resultados

En el presente apartado se muestra la base de datos de los ensayes obtenidos en el laboratorio y el resumen de los análisis de resultados de las propiedades geomecánicas asociadas a las unidades geotécnicas para el diseño de las obras (Ver Anexos 1 y 2), por lo tanto, se tiene el nivel de información adecuado para la ejecución de los diseños de las obras correspondientes.
En los Anexos 2 y 3 se muestran los modelos geotécnicos de los tiros verticales 1 y 2 y en los Anexos 4 y 5 se muestra la información correspondiente a las secciones de tratamientos de los tiros verticales 1 y 2.

8 Referencias

Ameratunga, J., Sivakugan, N., & Das, B. M. (2016). Correlations of soil and rock properties in geotechnical engineering. New Delhi: Springer India.

ASTM D2488 (2017) Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedures)

ASTM D5731 (2016) Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications

ASTM D7012 (2014) Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures

Cai, M. (2010). Practical estimates of tensile strength and Hoek–Brown strength parameter mi of brittle rocks. Rock Mechanics and Rock Engineering, 43(2), 167-184.

Caterpillar Tractor Company. (2000). Handbook of Ripping. Caterpillar Tractor Company.

CFE (agosto 2020). Informe geológico del nuevo canal de desvío, Presa de Jales Guásimas, Peña Colorada, Minatitlán, Colima. I-K1535-GEOL-06-0720.

Day, R. (2012) Geotechnical Earthquake Engineering Handbook: With the 2012 International Building Code, Second Edition.

Hatch (Enero 29, 2020) Seismic Hazard Evaluation Report. H361314-00000-200-066-0001

Hoek, E., & Brown, E. T. (2019). The Hoek–Brown failure criterion and GSI–2018 edition. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 11(3), 445-463.

Hoek, E., Carter, T. G., & Diederichs, M. S. (2013). Quantification of the geological strength index chart. In 47th US rock mechanics/geomechanics symposium. American Rock Mechanics Association.

ISRM (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. ISRM, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15(6).

Kalender, A., Sonmez, H., Medley, E., Tunusluoglu, C., & Kasapoglu, K. E. (2014). An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrocks and bimsoils. Engineering Geology, 183, 65-79.

Liao, S. S., & Whitman, R. V. (1986). Overburden correction factors for SPT in sand. Journal of geotechnical engineering, 112(3), 373-377.

Loehr, J. E., Lutenegger, A., Rosenblad, B. L., Boeckmann, A., & Brinckerhoff, P. (2016). Geotechnical Site Characterization Geotechnical Engineering Circular No. 5 (No. FHWA-NHI-16-072). National Highway Institute (US).

Look, B. G. (2014). Handbook of geotechnical investigation and design tables. CRC Press.

Marinos, P., & Hoek, E. (2000). GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In ISRM international symposium. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

Mesri, G., & Shahien, M. (2003). Residual shear strength mobilized in first-time slope failures. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 129(1), 12-31.

Peck, R. B., Hanson, W. E., & Thornburn, T. H. (1974). Foundation engineering (Vol. 10). New York: Wiley.

Pettifer, G. S., & Fookes, P. G. (1994). A revision of the graphical method for assessing the excavatability of rock. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 27(2), 145-164.

Read, J., & Stacey, P. (2009). Guidelines for open pit slope design. CSIRO PUBLISHING.

ROM 0.5-05 (2005). Recomendaciones geotécnicas para el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias. Ministerio de Fomento. Madrid.

RVO (Agosto 2020). Informe de interpretación y procesamiento de resultados de pruebas de geofísica. Depósito de jales Guásimas: Nuevo canal de desvío. GNE-141-IN-10-01.

Stark, T. D., & Hussain, M. (2013). Empirical correlations: drained shear strength for slope stability analyses. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 139(6), 853-862.

Zuo, J., & Shen, J. (2020). The Hoek-Brown Failure Criterion--From Theory to Application. Springer.

ELABORADO POR :

Efraín Gallegos Moreno

Héctor Noé Caballero Ramos

José I. Ibarra Quintero

REVISADO POR:

Valentín Castellanos Pedroza

Jefe de Departamento de Mecánica de Rocas

Anexo 1

Resumen de las propiedades geomecánicas

Anexo 1

Base de datos de resultados de ensayes de laboratorio

Anexo 2

Resumen de propiedades geomecánicas

Anexo 3

Modelo Geotécnico de tiro vertical 1

Anexo 4

Modelo geotécnico de tiro vertical 2

Anexo 5

Sección de tratamientos en tiro vertical 1

Anexo 6

Sección de tratamientos en tiro vertical 2