



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
DIVISION DE INGENIERIAS
CAMPUS GUANAJUATO



DEPARTAMENTO DE INGENIERIA EN MINAS, METALURGIA Y GEOLOGIA

TITULO

“EVALUACION DE LAS CONDICIONES GEOLOGICAS Y ANALISIS DE ESTABILIDAD DEL TAJO DE LA
UNIDAD MINERA NAOPA, ESTADO DE HIDALGO, MEXICO”

Tesis para obtener el título de

INGENIERO GEÓLOGO

Presenta

C. César Albino Arroyo Sánchez

Guanajuato, Guanajuato, enero 2022

Guanajuato, Gto., enero 2022

**Asunto: Aprobación de Trabajo
de Titulación**

**DR. GILBERTO CARREÑO AGUILERA
DIRECTOR DE DIVISION DE INGENIERIAS
CAMPUS GUANAJUATO
PRESENTE**

Los que suscriben, revisores del trabajo, que como requisito para obtención de Título Profesional, fue presentado a revisión por:

C. Cesar Albino Arroyo Sánchez

Pasante del Programa Educativo de **Ingeniero Geólogo** de la División de Ingenierías del Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología de la Universidad de Guanajuato, en la Modalidad de **Trabajo de Tesis**, con el Título:

**“Evaluación de las Condiciones Geológicas y Análisis de Estabilidad del Tajo
De la Unidad Minera, Naopa, Estado de Hidalgo, México”**

Una vez leído, analizado y revisado el trabajo, ha sido aprobado para que continúe con los trámites requeridos para solicitar fecha y sustente examen.

Sin más por el momento reciba un cordial saludo.

**Atentamente
“La Verdad Os Hará Libres”**

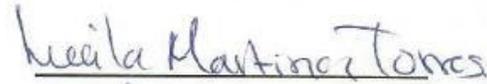
Dr. Raúl Miranda Avilés
Director del Trabajo



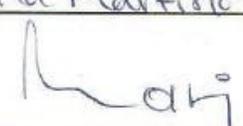
M.I.E. Elia Mónica Morales Zarate
Sinodal del Trabajo



Ing. Lucila Martínez Torres
Sinodal del Trabajo



M.C. Juan José Martínez Reyes
Sinodal del Trabajo



Índice

1. Dedicatoria	6
2. Agradecimientos	7
3. Resumen.....	8
4. Introducción	10
4.1 Historia	10
4.2 Recursos minerales	10
4.3 Reservas	11
4.4 Método de minado.....	12
4.5 Planta.....	13
4.6 Recuperación.....	13
4.7 Programa de producción	14
5. Objetivo General	16
5.1 Objetivos particulares	16
6. Justificación	17
7. Localización del proyecto	18
8. Infraestructura del proyecto	19
9. Marco Geológico	20
9.1 Geología Regional.....	20
9.1.1 Tectónica	21
9.1.2 Geología Estructural	25
9.1.3 Estratigrafía	27
9.1.3.1 Precámbrico	28
9.1.3.2 Pérmico.....	28
Formación Tuzancoa	28
9.1.3.3 Mesozoico	30
9.1.3.3.1 Triásico - Jurásico	30
Formación Huizachal	30
9.1.3.3.2 Jurásico Inferior.....	30
Formación Huayacocotla.....	30
9.1.3.3.3 Jurásico Medio	32
Formación Cahuwasas.....	32

Formación Tepexic	32
9.1.3.3.4 Jurásico Superior	34
Formación Santiago.....	34
Formación Chipoco.....	35
Formación Pimienta	37
9.1.3.4 Terciario.....	38
Formación Tlanchinol	38
Formación Atotonilco El Grande	39
Rocas Ígneas Intrusivas	39
Rocas Máficas.....	39
Rocas Félsicas.....	39
9.2 Geología Local	41
Formación Huayacocotla (JiH).....	41
Formación Tepexic (JmT).....	41
Formación Santiago (JsS).....	41
Formación Chipoco (JsCh)	42
Formación Atotonilco.....	42
10. Marco Teórico	45
10.1 Geological Strenght Index (GSI).....	45
10.2 Pruebas de laboratorio.....	47
10.2.1 Ensaye Uniaxial.....	48
10.2.2 Ensaye Triaxial	49
10.2.3 Ensayo de Tracción Indirecta	51
10.3 Elementos finitos.....	52
10.3.1 Método de Reducción de la Resistencia al Corte	53
10.3.2 Método de Incremento de los Esfuerzos	54
10.3.3 Método Límite Mejorado	54
10.4 Factor de Seguridad	56
10.5 FLAC 3D	57
11. Metodología	59
11.1 Determinación de propiedades geotécnicas de la roca intacta.....	59
11.2 Determinación de propiedades geotécnicas del macizo rocos.....	60
11.3 Parámetros de diseño del Tajo.....	62

11.4	Modelización 3D.....	62
11.5	Desarrollo topográfico 3D	63
11.6	Incorporación de discontinuidades explícitas (fallas geológicas)	64
11.7	Incorporación de las UGT's y zona de daño	66
11.8	Mecanismos de falla encontrados en el Pit	69
11.9	Falla de talud en materiales de mala calidad	71
12.	Resultados	72
13.	Conclusiones.....	77
14.	Recomendaciones	78
15.	Referencias Bibliográficas	79
16.	Anexos.....	81

1. Dedicatoria

A Dios por la vida, salud y bendiciones que me ha otorgado, por ayudarme a salir delante de las batallas que hemos enfrentado juntos.

A mis padres Antonio Arroyo Trejo y Luz del Carmen Sánchez Meza por todo el amor, cariño, dedicación y esfuerzo que pusieron en mi persona para formar al ser humano y profesionalista que soy hoy día, gracias por guiarme todos los días y juntos logramos una meta más en nuestras vidas. ASNF.

A mis hijas Renata Alexandra Arroyo y Romina Aida Arroyo por ser mi motor día a día para salir a luchar para lograr mis objetivos, para ser un mejor ser humano y para siempre dar lo mejor de mí.

A mi hermano Guillermo Navarrete Hernández por todo lo que hemos vivido juntos, lo cual me ha ayudado a nunca rendirme y siempre salir adelante luchando.

A mis pequeños angelitos Ricardo Antonio y Alelí que desde el cielo todos los días me han dado fuerza para salir adelante, me guían y protegen.

A mis Abuelos Albino Arroyo Medina (†) y Eloísa Trejo Martínez (†) por todo el amor de padres que me dieron durante su estancia en este mundo, por los bonitos recuerdos y por todas las enseñanzas.

A mi Abuelo Raúl Sánchez Madrigal (†), gracias abuelo por toda la guía que tuviste hacia mí, por tus sabias palabras, por ser el ejemplo de un hombre trabajador y por enseñarme que siempre es bueno mirar atrás y recordar nuestras raíces.

A Estela Pelayo Sánchez (†) por todo el amor que me diste y, mostrarme que no es necesario un lazo de sangre para dar el amor de una madre.

A mis padrinos Juan Hernández (†) y Eloísa Arroyo (†) por todo el amor que me brindaron durante su paso en este mundo, por ser grandes guías y grandes ejemplos de seres humanos.

A mi tío el Ingeniero Cecilio Puga Rodríguez (†) gran ejemplo como ingeniero y sobre todo como ser humano, gracias por siempre ser mi inspiración para dedicarme a esta bonita profesión, por todo el apoyo y los conocimientos que me transmitiste, pero sobre todo gracias por ser siempre ese gran ser humano que día a día me procuró y me aconsejó para poder superarme.

2. Agradecimientos

Al Ingeniero Vioel Espino Ruiz por ser no solo mi mentor en la mecánica de rocas, sino por ser un gran amigo y sobre todo un gran guía en el ámbito profesional y en la vida.

Al Ingeniero Atanacio Ibarra Serrano por ser mi mentor en la geología, por siempre confiar en mí, guiarme y motivarme a siempre seguirme superando.

A mi compañera y amiga Lorena Samperio Márquez gracias por esa amistad que me has brindado, por ayudarme a creer en mí y levantarme para salir adelante y nunca rendirme, gracias por todo ese apoyo que me das porque por todo esto he crecido como persona y profesionalista.

A mi maestra y amiga Martha Daniela Martínez Alfaro por apoyarme e inculcarme ese amor por la geología, por llenarme de enseñanzas en esos primeros años de universidad, y por la gran amistad que siempre me has brindado.

A mi Tía y primos María Esther Arroyo, Cecilia y Cecilio Puga Arroyo porque sin todo el apoyo que me brindaron nada de esto sería posible, gracias por ser parte de todos estos logros.

A mi hermana y sobrino, Carmen Alicia Arroyo Sánchez y Sebastián Chávez Arroyo por todo el apoyo y amor que me han brindado para crecer.

A mi colega y amigo Gerardo Villegas Argote por esa amistad entrañable que forjamos dentro de esta bendita escuela, y que al día de hoy conservamos.

A compañía Minera Autlan por darme toda la confianza para permitir desarrollarme profesionalmente.

A mi tutor y director de tesis, Dr. Raúl Miranda Avilés por todas las enseñanzas en el aula de estudios, por haberme guiado como tutor y por el apoyo para la realización de este trabajo.

A mis sinodales Ing. Lucila Martínez, M.I.E. Mónica Morales, M.C. Juan José Martínez, por todo el aprendizaje que tuve de ustedes en las diferentes disciplinas geológicas, por sus consejos y guía para crecer como profesionalista.

3. Resumen

La Unidad Minera Naopa está ubicada en el Estado de Hidalgo, Estados Unidos Mexicanos. La mina se encuentra aproximadamente a 85km al norte de la capital del estado, 4.6km al noroeste de la cabecera municipal de Lolotla y 8.3km al norte de la cabecera municipal de Molango de Escamilla.

El distrito minero de Molango se encuentra en el núcleo del Anticlinorio Huayacocotla, en este afloran rocas metamórficas anteriores al Cámbrico, sedimentos del Paleozoico y rocas del Mesozoico Inferior, en los flancos están las capas del Jurásico Superior y Cretácico. Los estratos del centro muestran un plegamiento intenso y diferente al de los sedimentos triásicos más jóvenes. En el tajo Naopa se observa la secuencia estratigráfica de las Formaciones Jurásicas, Huayacocotla, Tepexic, Santiago y Chipoco. Estas formaciones se encuentran intrusionadas por cuerpos intrusivos de composición riolítica del Terciario. Además, estas rocas están cubiertas en algunas zonas por las Formaciones Atotonilco y Tlanchinol del Terciario.

En el presente trabajo se realizó la evaluación de las condiciones geológicas y el análisis de estabilidad del tajo de la Unidad Minera Naopa. Para el análisis de la determinación de las propiedades geotécnicas de la roca se emplearon pruebas de laboratorio, se realizaron pruebas de resistencia uniaxial, resistencia triaxial y resistencia a la tensión indirecta; se obtuvieron las propiedades geotécnicas del macizo rocoso realizando la clasificación con la metodología del GSI marino, con estas características se realizaron las UGT con las unidades geológicas que afloran en el tajo. Con los resultados obtenidos se pudo realizar un modelo tridimensional en FLAC 3D con las condiciones actuales del tajo, y un modelo con las condiciones finales de acuerdo con la secuencia de explotación, a estos modelos se le integraron las condiciones estructurales del tajo, corriendo así los modelos para determinar las zonas de daño y los factores de seguridad del tajo.

Autlán es el mayor productor de Mn de Centro y Norteamérica, y el único productor mundial de nódulos de Mn. La unidad de negocio de Mn se divide en minería de Mn y producción de ferroaleaciones de Mn. La mayoría de los productos abastecen al sector del acero y una pequeña proporción alimenta a la industria de las baterías. La empresa fue fundada en 1953 como la primera empresa minera en México administrada por mexicanos, para explotar la mina San Francisco Mn ubicada en el municipio de Autlán, en el estado de Jalisco, México.

La mina Naopa Mn inició sus actividades en 2012 y ha producido un total aproximado de 3,24 Mt de mineral de carbonato de Mn (MnCO_3) y nódulos de Mn enviados directamente. En 2019, Naopa produjo ~ 400 Kt de MnCO_3 y nódulos.

4. Introducción

4.1 Historia

En 1960, Autlán inició la exploración en el distrito de Molango abriendo una oficina de exploración. Dos años más tarde se habían identificado dos afloramientos que se encuentran en el actual depósito de Naopa, llamados Teopixca y Tetlilco (respectivamente 250 m y 650 m de longitud). En 1976, tres perforaciones confirmaron la continuidad entre las zonas mineralizadas orientadas NE-SO de Teopixca y Tetlilco.

Entre 1976 y 1979, Autlán perforó 46 pozos (7,225 m) de diámetro NQ, cortó seis zanjas en la zona NE agregando 85m de afloramientos; además, se desarrollaron dos pequeños pozos con fines de exploración en ambas zonas.

La mina Naopa Mn inició sus actividades en 2012. Desde 2012, ha producido un total de ~ 3,24 millones de toneladas (Mt) de mineral de carbonato de manganeso (MnCO_3) enviado directamente y calcina (nódulos de Mn). En 2019, la mina Naopa produjo ~ 400 Kt de MnCO_3 y nódulos.

Autlán estimó un total de recursos de 8,33 Mt de MnCO_3 en 2003. En 2006 se completó una actualización de la estimación de recursos utilizando técnicas de modelado bidimensional, donde los Recursos y Reservas de mineral de MnCO_3 se estimaron en aproximadamente 10 Mt.

Desde 2011, Autlán ha perforado anualmente el depósito de la mina Naopa Mn para actualizar los Recursos y Reservas. Con la campaña de perforación de 2011, la Mina Naopa inició actividades con 8.22 Mt de Reserva de MnCO_3 .

4.2 Recursos minerales

Autlán declaró los recursos con base en las cantidades medidas, indicadas e inferidas. La perspectiva razonable para la extracción económica de los bloques Naopa Medidos, Indicados e Inferidos, según los estándares del Instituto de Minería

Canadiense (CIM, por sus siglas en inglés), se logró con un *pit shell* basado en un precio del metal Mn de \$6.50/unidad de tonelada métrica seca (dmtu), costo de extracción de \$2.45/tonelada, y con una ley de corte (CoG) de 21% Mn. El *pit shell* de recursos se obtuvo con el algoritmo de Lerchs-Grossman y se limitó por la carretera comunitaria.

El 21% de CoG es más alto que el económico porque el proceso metalúrgico requiere mantener una ley de alimentación promedio de 25% Mn. La Tabla 1, muestra los recursos de la mina Naopa con *cutoff* del 21% Mn a fines de 2019 (Resource and Reserve Audit Report of the Naopa Manganese Mine).

Class	Mt	Mn (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	S (%)	PXC (%)	Mn/Fe	Calcine (%)
Measured	1.88	26.5	6.32	7.87	1.40	3.96	5.70	0.55	34.0	4.2	40.2
Indicated	2.07	26.5	6.36	7.87	1.30	4.14	5.01	0.55	34.6	4.2	40.5
M&I	3.96	26.5	6.34	7.87	1.35	4.06	5.34	0.55	34.3	4.2	40.3
Inferred	2.47	26.7	6.45	7.59	1.15	3.76	4.51	0.50	35.5	4.2	41.1
Total	6.43	26.6	6.38	7.76	1.27	3.94	5.02	0.53	34.7	4.1	40.9

Tabla 1 Recursos de la Mina Naopa al corte 21% Mn.

4.3 Reservas

La Reserva Mineral declarada es el resultado del plan de vida de la mina generado en un software NPV Scheduler utilizando diez diseños de fase de mina. El plan de la mina asegura que está programada una ley de alimentación mínima promedio de no menos del 25% de Mn; esto es necesario para producir un grado mínimo de calcinación de 37,3% Mn, un requisito para el mercado. La Tabla 2 Reserva Mineral de Naopa muestra la Reserva Mineral declarada en la Mina a Tajo Abierto de Naopa a fines de 2019 (Resource and Reserve Audit Report of the Naopa Manganese Mine).

Classification	Tonnage (M)	Mn (%)	Fe (%)	Mn/Fe	Calcine (%)
Proven	1.63	26.07	6.28	4.15	38.33
Probable	1.47	25.65	6.36	4.03	38.32
Total	3.09	25.87	6.32	4.09	38.32

Tabla 2 Reserva Mineral de Naopa.

4.4 Método de minado

La mina Naopa ha operado con éxito como una mina a cielo abierto durante más de siete años. El yacimiento está controlado estructuralmente con un ancho de mineral de aproximadamente 10 m de espesor. La relación de descapote para el LOM es 5.25. El tepetate y el mineral se perforan y explotan, el mineral generalmente se carga con excavadoras pequeñas para permitir una mejor selectividad y el tepetate se carga con cargadores frontales donde la selectividad es menor. El material se transporta utilizando camiones de acarreo todoterreno a un área de almacenamiento en el caso del mineral, y a una de las dos tepetateras en el caso del tepetate. El mineral almacenado se carga en camiones de volteo y se transporta por carretera a la planta a 40 km de distancia.

El mineral a cielo abierto para la planta tiene como objetivo 360 Ktpa y la tasa de extracción general alcanza un pico en 2020 en 4.986 Ktpa y promedia en 2.417 Ktpa sobre el LOM. El movimiento total de residuos muestra una disminución gradual desde 2020 hasta el final de la vida útil de la mina en 2027.

El tajo se divide en 10 fases mineras que van desde aproximadamente 100 Kt hasta 1,5 Mt. El diseño de la mina avanzará aproximadamente 70 m más profundo que la topografía actual. Las diferentes fases incluyen varios retrocesos en los taludes sur y noroeste. Los diseños del tajo incluyen una rampa de 15 m de ancho con una pendiente del 10% o menos. Estos parámetros son aceptables para los equipos de la mina que operan actualmente en el sitio. El diseño respeta el ancho mínimo de extracción de 15 m (Resource and Reserve Audit Report of the Naopa Manganese Mine).

4.5 Planta

El mineral se recibe de dos fuentes: de la mina Naopa y de las minas subterráneas. El contenido de Mn del mineral de ambas fuentes es el mismo: aproximadamente un 25% de Mn. Sin embargo, la relación Mn/Fe de las dos fuentes es diferente: el mineral de la mina Naopa tiene una relación ligeramente más baja que el mineral de las minas subterráneas y ambos minerales de las dos fuentes deben mezclarse para mantener la relación Mn/Fe requerida en el producto.

La mayor parte del mineral se calcina para aumentar el contenido de Mn, lo que da como resultado la descarga de dióxido de carbono junto con dióxido de azufre menor. La calcinación da como resultado una aglomeración parcial del producto.

El sistema de procesamiento de minerales ha estado en funcionamiento durante décadas y no hay planes para modificar el mineral o la planta que requieran pruebas metalúrgicas (Resource and Reserve Audit Report of the Naopa Manganese Mine).

4.6 Recuperación

El procesamiento del mineral de Mn consiste en triturar a menos 4.45 centímetros seguido de calcinación a 1.500°C para eliminar el dióxido de carbono y aumentar la ley del 25% Mn al 38% Mn. Se requiere que la calidad del producto se mantenga por encima del 37.3% Mn. El mineral se tritura en una planta de trituración convencional de tres etapas y se calcina en un horno rotatorio de gas natural. El producto del horno se enfría en un enfriador de rejilla recíproca, se coloca en pilas y luego se carga en camiones para su envío a los consumidores. En la calcinación del mineral, el 58-60% de la alimentación es el producto calcinado, el 30% se descarga como gas a la atmósfera y el 8-10% constituye polvo, que se recoge y se coloca en una pila contigua a la planta de calcinación. La planta procesa aproximadamente 800 Kt de mineral al año y genera aproximadamente 450 Kt de nódulos al año.

Una pequeña cantidad de mineral, que asciende a aproximadamente 35 Kt por año, solo se tritura y tamiza y no se calcina (Resource and Reserve Audit Report of the Naopa Manganese Mine).

4.7 Programa de producción

El Programa de Producción LOM de la Mina Naopa Mn comienza el 1 de enero de 2020 en línea con las Reservas Minerales declaradas a la misma fecha. El plan de la mina mantendrá la alimentación de mineral a cielo abierto a la planta en aproximadamente 360 Ktpa. El plan máximo de minado es de 4.986 Ktpa en el año 2020 y disminuye gradualmente hasta el final de la vida útil de la mina en 2027.

La operación extraerá de un máximo de cinco fases a la vez, pero los frentes de minería abiertos promedio serán de tres fases sobre el LOM. Los grados de Mn y Fe son relativamente consistentes a través del LOM. La relación total de extracción (tepetate/mineral) es de 5.25, sin embargo, es tan alta como 8.34 en 2020 y disminuye a 2.01 en 2027. La Tabla 3 Programa de producción anual de LOM de Naopa muestra la producción de LOM anualmente.

Period	Ore Feed Tonnes	Mn (%)	Fe (%)	Mn/Fe	Calcine (%)	HG Tonnes Mined to SP	MG Tonnes Mined to SP	LG Tonnes Mined to SP	Waste Tonnes Mined	Total Tonnes Mined
2020	534,184	25.73	6.28	4.09	38.74	64,121	95,755	101,548	4,191,074	4,986,682
2021	478,098	25.69	6.59	3.90	37.98	35,357	138,218	167,633	3,240,414	4,059,720
2022	357,769	26.62	6.63	4.02	38.81	19,323	36,642	71,258	2,509,827	2,994,819
2023	359,417	25.97	6.43	4.04	38.36	65,379	80,990	60,776	1,833,449	2,400,374
2024	359,994	24.69	6.09	4.05	37.30	112,461	71,277	34,762	1,445,230	2,024,088
2025	359,997	25.69	6.07	4.23	38.00	42,475	39,497	10,211	493,761	946,305
2026	359,749	26.04	6.02	4.32	38.29	15,209	34,299	20,627	640,347	1,070,598
2027	284,652	26.82	6.38	4.20	39.35	27,670	64,464	47,926	431,817	856,896
Total LOM	3,093,861	25.87	6.32	4.09	38.32	381,994	561,142	514,741	14,785,920	19,339,483

Tabla 3 Programa de producción anual de LOM de Naopa

La producción minera anual se muestra en la Figura 1 Programa de producción anual de Naopa LOM. Un grado alto (HG), grado medio (MG) y las existencias de bajo grado (LG) se mantienen a través del LOM. Ninguno de los stocks de mineral de grado medio está planeado para ser procesado durante el LOM y no

está incluido en las Reservas Minerales declaradas. Todas las calidades de los stocks de grado medio están por debajo del nivel actual requerido en la planta para producir la calidad deseada de Mn calcinado para que sea comercializable y, por lo tanto, no están planificadas para procesamiento o uso beneficioso. Estas reservas se mantienen en caso de que las condiciones del mercado cambien en el futuro (Resource and Reserve Audit Report of the Naopa Manganese Mine).

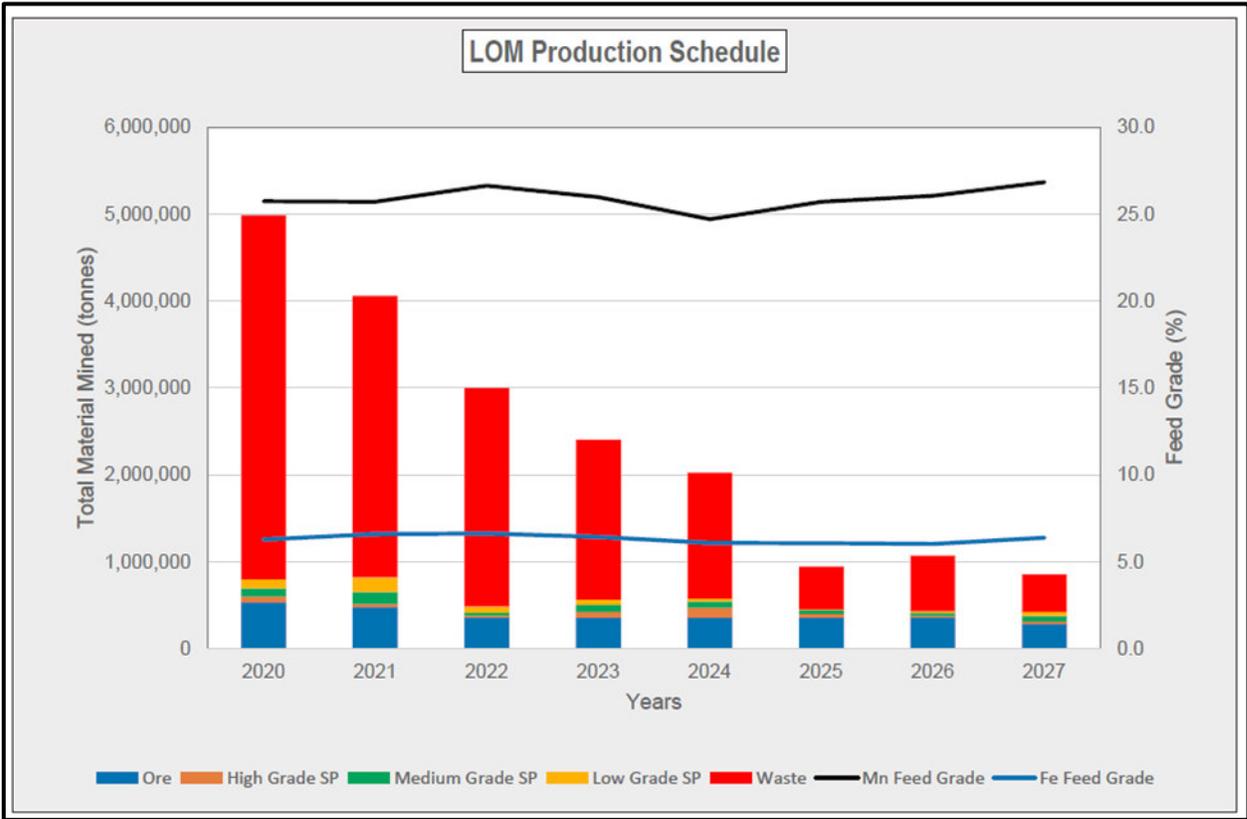


Figura 1 Programa de producción anual de Naopa LOM

5. Objetivo General

Evaluar las condiciones geológicas, y las propiedades mecánicas de las unidades geológicas, para realizar el análisis de estabilidad global del tajo de la Unidad Naopa, valorando las condiciones actuales y la condición al terminar la explotación del tajo.

5.1 Objetivos particulares

- Generar un modelo numérico 3D del tajo de la Unidad Naopa en la condición actual. Este modelo deberá de contar con las fallas geológicas explícitas, así como las unidades geotécnicas; el modelo deberá de incorporar el daño por voladura estimado.
- Generar un modelo numérico 3D del tajo de la Unidad Naopa en la condición de Pit Final. Este modelo deberá de contar con las fallas geológicas explícitas, así como las unidades geotécnicas; el modelo deberá de incorporar el daño por voladura estimado.
- Evaluar el factor de seguridad en ambos modelos
- Describir los mecanismos de falla vistos y su origen (rotura del macizo rocoso o dominancia estructural)
- Emitir conclusiones y recomendaciones basadas en los resultados de los análisis orientadas a apoyar en el proceso de extracción, así como garantizar la seguridad del personal.

6. Justificación

Autlan siendo una empresa de clase mundial líder en la producción de manganeso busca el aprovechamiento total de sus recursos y reservas minerales. Acorde a la política integral, Autlan es una empresa comprometida a generar valor en sus unidades Operativas de Energía, Minería, Ferroaleaciones, así como a las partes interesadas, cumplir la legislación aplicable, satisfacer los requerimientos de los clientes y asegurar la integridad de sus colaboradores.

De acuerdo al LOM del Tajo Naopa se le asigna la tarea al departamento de exploración y geología realizar un análisis geotécnico que asegure la continuidad de las operaciones proyectadas para que este se realice de una forma productiva y se asegure la integridad de todos los colaboradores hasta el final de la explotación del tajo.

Se evaluarán los factores de seguridad y se detectarán los mecanismos de falla para poder llevar a cabo las acciones necesarias para un minado seguro y productivo.

7. Localización del proyecto

La Mina Naopa Mn está ubicada en el Estado de Hidalgo, Estados Unidos Mexicanos. La mina se encuentra aproximadamente a 85km al norte de la capital del estado de Pachuca, 4.6km al noroeste de la cabecera municipal de Lolotla y 8.3km al norte de la cabecera municipal de Molango de Escamilla dentro de las coordenadas 524,212 E - 2'308,468 N y 526,438 E-2. 305.603 N.

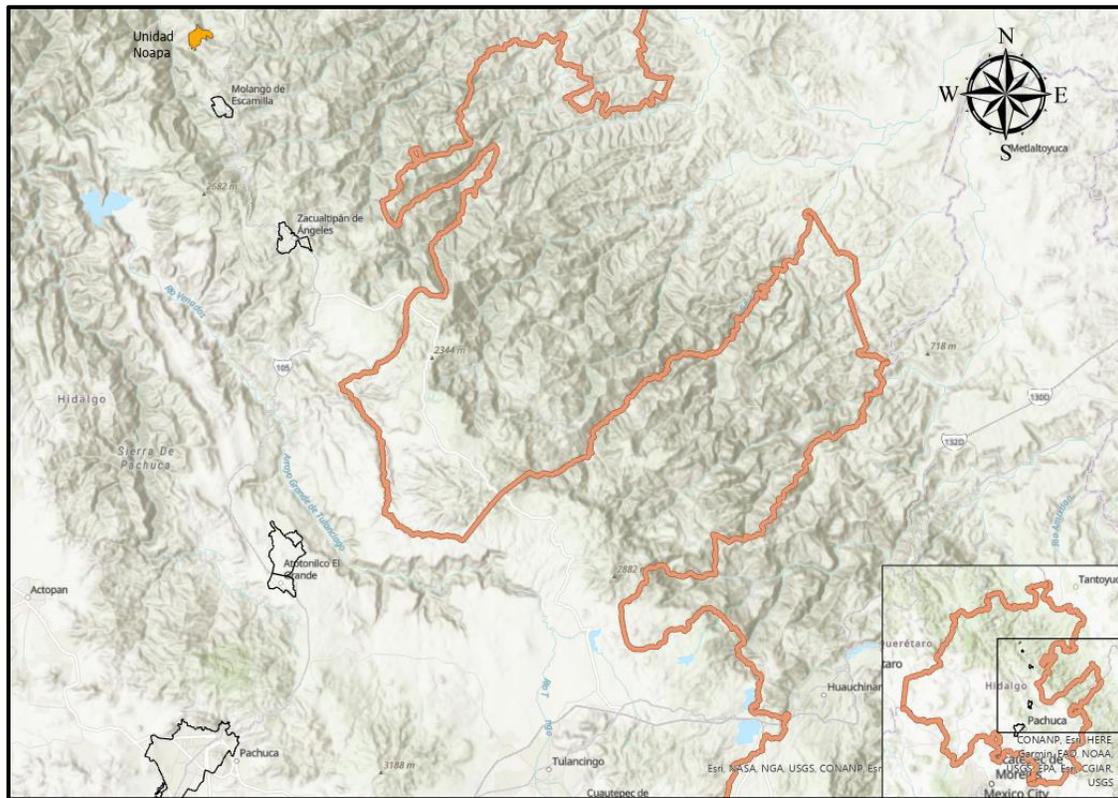


Figura 2 Localización Unidad Minera Naopa.

8. Infraestructura del proyecto

La operación de la mina Naopa es remota y, en consecuencia, la infraestructura es más extensa que la de la mayoría de las minas. El acceso por carretera es bueno, con las instalaciones de procesamiento de minerales adyacentes a una carretera gubernamental pavimentada, los únicos caminos internos de importancia son los caminos a las minas. La principal materia prima es el gas natural canalizado, que se utiliza para la generación de energía y para calentar el horno de procesamiento de mineral. Los requisitos de agua son mínimos ya que el sistema de procesamiento está completamente seco. La instalación tiene un complejo de edificios auxiliares que incluyen oficinas, laboratorio, almacenes y talleres, las instalaciones de servicio incluyen los sistemas habituales de comunicación, emergencia y seguridad. El empleo total es de aproximadamente 300 personas, se proporciona un campamento con capacidad para aproximadamente 100 empleados y sus familias; los empleados restantes viven en las comunidades vecinas.

9. Marco Geológico

9.1 Geología Regional

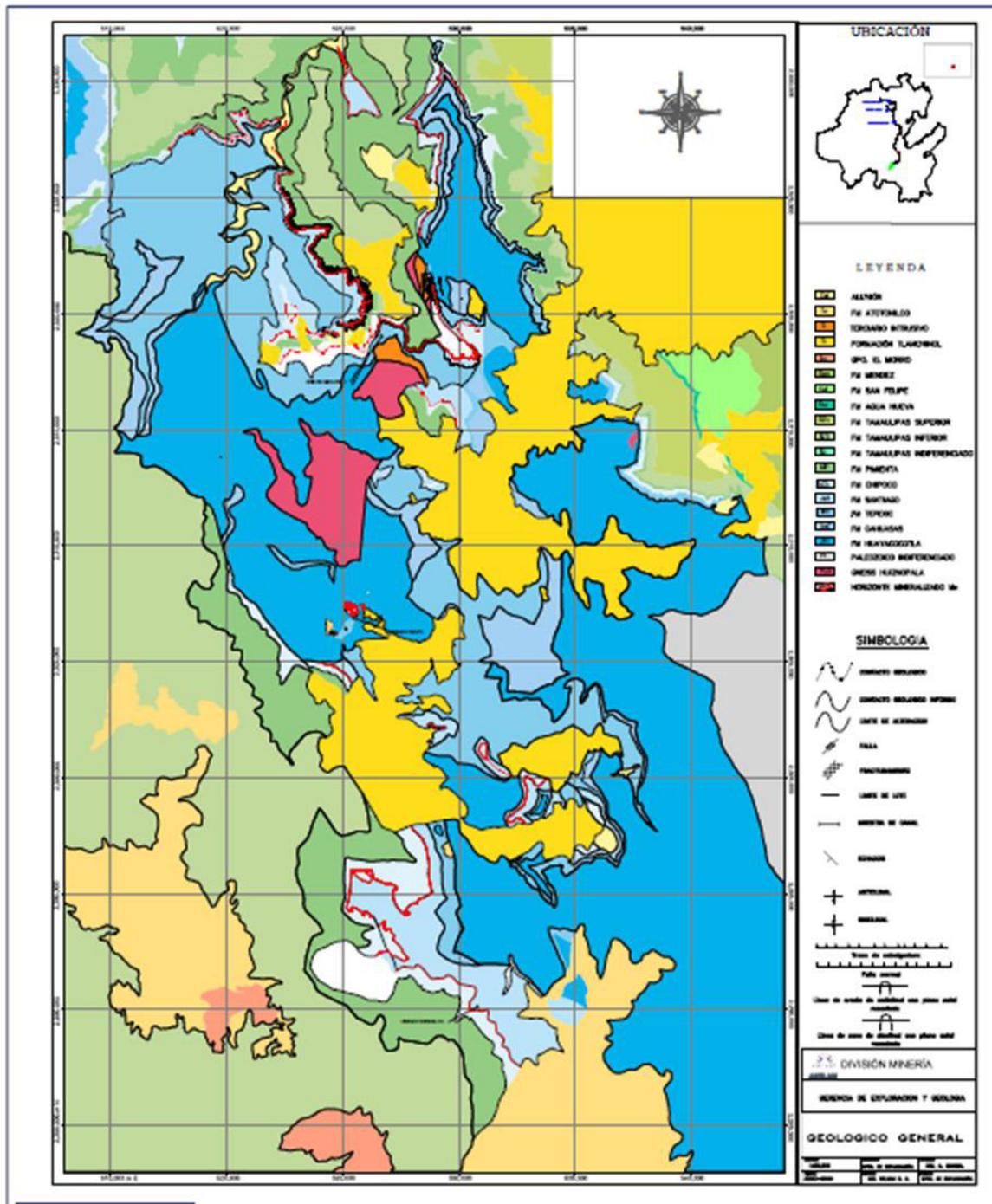


Figura 3 Geología distrito manganesífero Molango.

9.1.1 Tectónica

Se observan tres eventos tectónicos en la región:

Fase de extensión.

Provocó la formación de pilares y fosas tectónicas delimitados por fallas normales NW-SE y N-S.

Durante el Triásico Tardío, debido a la separación del súper continente Pangea, producto de un evento de Rifting continental causado por una pluma de manto (May, 1971), dio lugar a la formación de grandes bloques y fosas tectónicas debido a los esfuerzos tensionales; estas cuencas posteriormente fueron rellenas inicialmente por depósitos fluviales de origen continental (Formación Huizachal), y algunas otras sirvieron como comunicación a mares y canales someros (López Ramos, 1981).

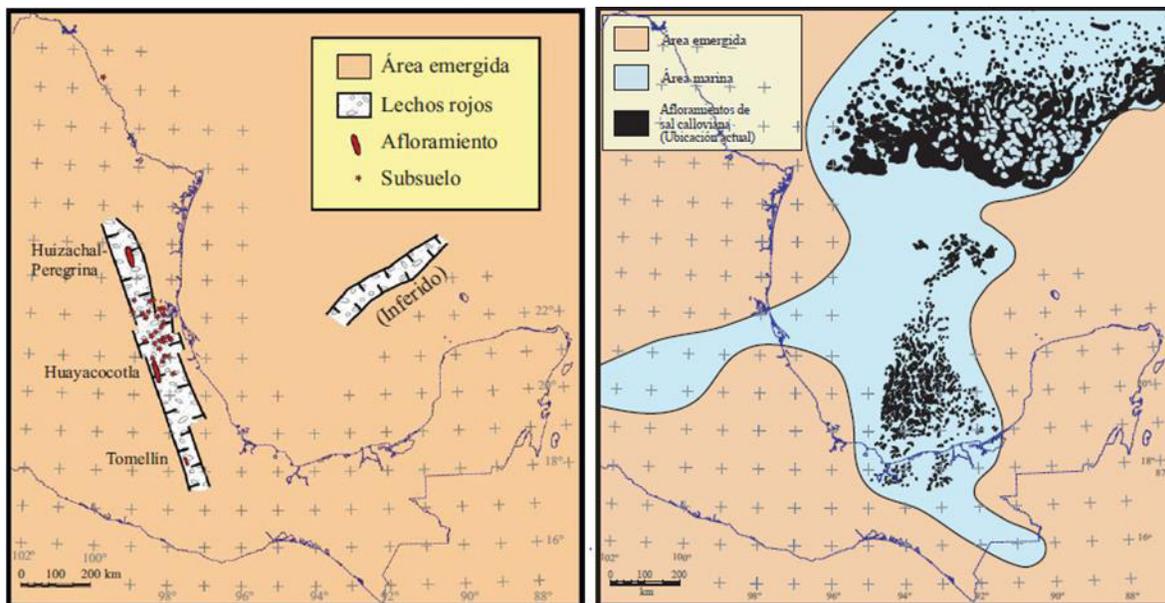


Figura 4 Paleogeografía del Triásico Superior en el área del Golfo de México y paleogeografía del Jurásico Medio. Tomada de Padilla y Sánchez (2007).

Para el Jurásico Temprano en la parte este del Estado de Hidalgo ocurre un pequeño movimiento orogénico que como consecuencia dio origen a movimientos ascendentes y descendentes que originaron la depositación rítmica de lutitas negras

bandeadas y apizarradas y areniscas de grano fino de la Formación Huayacocotla (Imlay, 1948). Todas las fallas que se originaron en esta época delimitan los afloramientos del basamento.

Durante el Jurásico Medio prosiguió el levantamiento y erosión, dando lugar a un sistema de fosas donde se depositó una secuencia de sedimentos de origen continental constituidos por areniscas, conglomerados y limolitas de color rojo, representados por la Formación Cahuassas (López Rubio, 1966) (Ochoa-Camarillo, 1998). Queda registrada por franjas de caliza arenosa masiva, entre unidades más pelíticas de la Formación Tepexic, indicando un ambiente litoral somero. Sobre esta formación se tiene el depósito de un delgado paquete de limolita y lutita calcárea color negro perteneciente a la Formación Santiago, lo que indica que la transgresión continuó para tener un ambiente marino nerítico de baja energía y con condiciones reductoras. El cambio abrupto en el contenido de manganeso de la Formación Chipoco sugiere un cambio en las condiciones fisicoquímicas de la fosa de depósito debido a la comunicación entre la fosa Huayacocotla y el Golfo de México, permitiendo también la comunicación entre los océanos Pacífico y Atlántico (Ochoa-Camarillo, 1998). A finales del Jurásico Tardío, desde el Kimmeridgiano Inferior al Tithoniano se tiene la mayor transgresión, que quedó representado por facies de caliza negra con intercalaciones rítmicas de lutita negra, presenta nódulos, bandas y lentes de pedernal negro y gris de la Formación Pimienta.

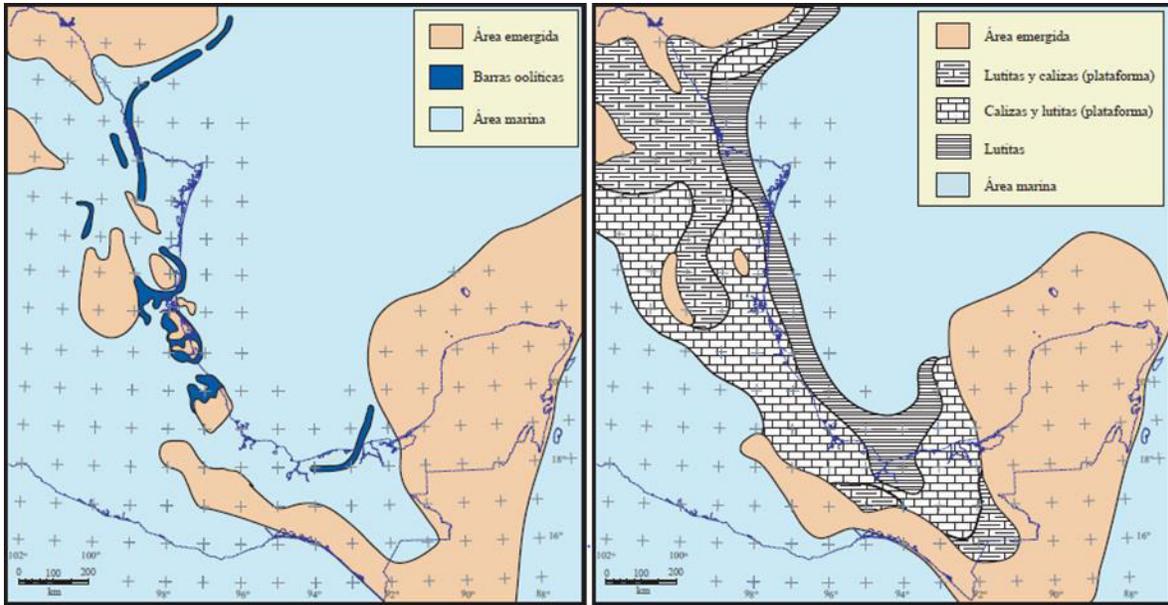


Figura 5 Paleogeografía del Kimmeridgiano temprano y paleogeografía del Tithoniano tardío. Tomado de Padilla y Sánchez (2007).

Fase Compresión

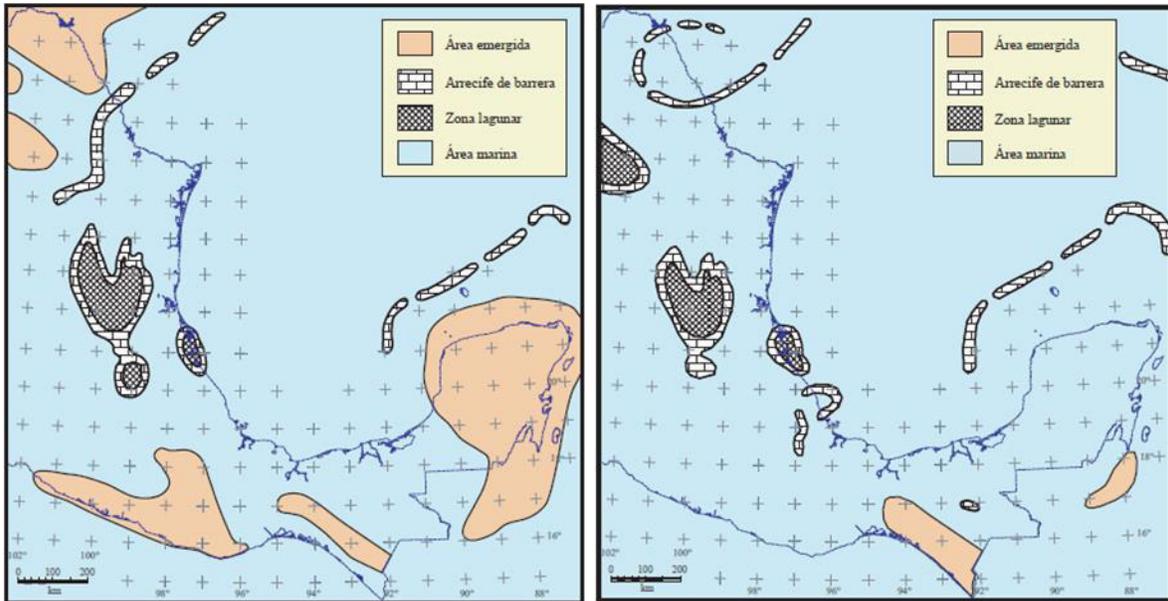


Figura 6 Paleogeografía del Barremiano (derecha) y paleogeografía del Albiano-Cenomaniano (izquierda). Tomado de Padilla y Sánchez (2007).

Durante el Cretácico Tardío y el Eoceno Tardío la Orogenia Laramide plegó las rocas sedimentarias jurásicas y cretácicas, lo que dio origen a un complejo de cabalgaduras y pliegues (Anticlinorio de Huayacocotla). Esto reactivó las fallas normales jurásicas como fallas inversas debido a la compresión (Ochoa-Camarillo, 1998).

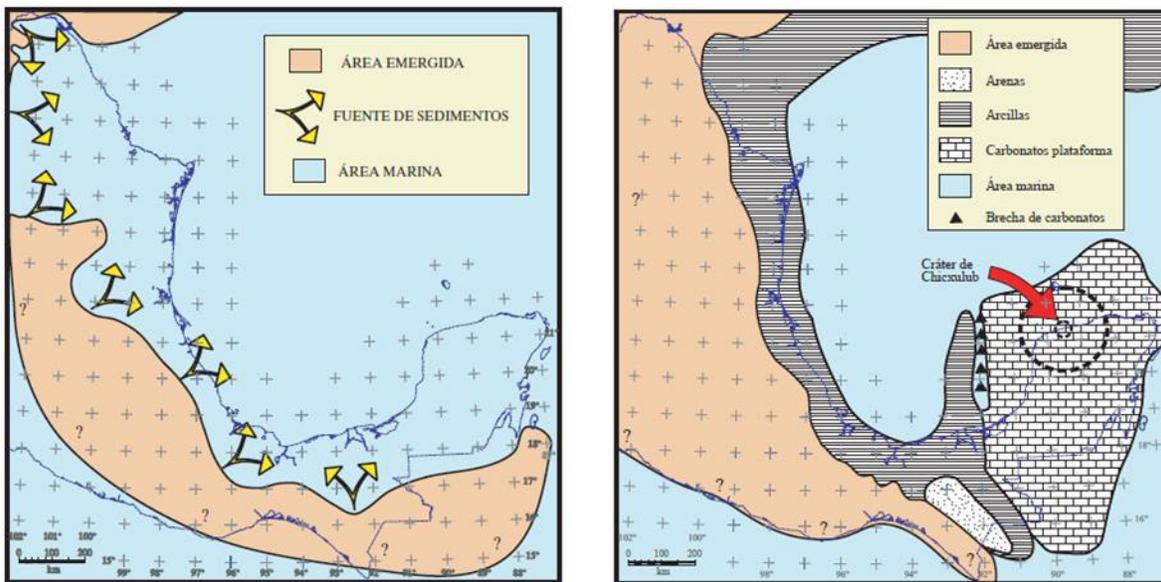


Figura 7 Paleogeografía del Turoniano-Maestrichtiano (izquierda) y a inicios del Paleoceno, cuando se ha propuesto el impacto de un meteorito en el área de Chicxulub (derecha). Tomado de Padilla y Sánchez (2007).

Fase Extensión

Se observan fallas normales NW-SE posteriores al Plioceno, las cuales limitan al graben de Molango (Ochoa-Camarillo, 1998).

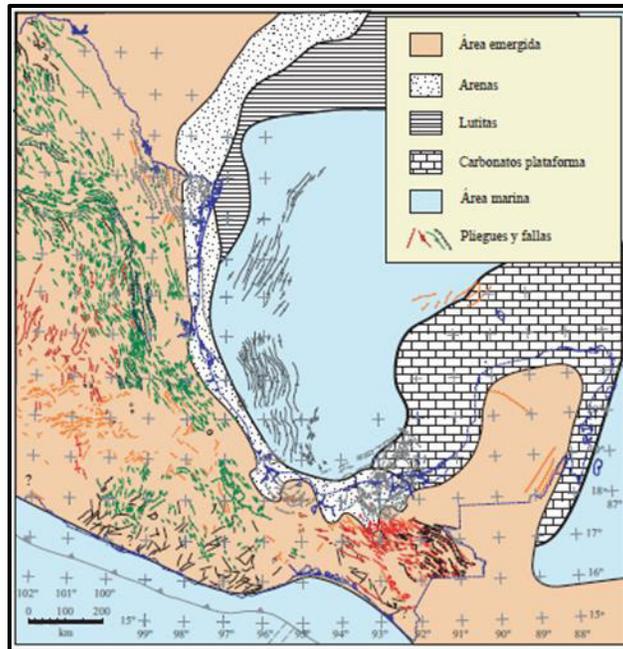


Figura 8 Paleogeografía del Pleistoceno Tardío. Tomado de Padilla y Sánchez (2007).

9.1.2 Geología Estructural

El Anticlinorio de Huayacocotla, cuenta con más de 150 Km de longitud y una orientación NW45°SE, alineado al N con el alto del basamento Victoria-Sierra del Abra, al S con el Macizo de Teziutlán y al E delimitado por la Antefosa de Chicontepec, en San Luis Potosí, Puebla y Veracruz. El eje pasa el E de Molango, Zacualtipán y Carpinteros, Hidalgo. En el núcleo del anticlinorio afloran rocas metamórficas anteriores al Cámbrico, sedimentos del Paleozoico y rocas del Mesozoico Inferior y en los flancos están las capas del Jurásico Superior y Cretácico. Los estratos del centro muestran un plegamiento intenso y diferente al de los sedimentos triásicos más jóvenes. Se observa su deformación en el sistema de cabalgaduras Tamazunchale-Naopa-Pochutla, con un acortamiento de 6 Km (Ochoa-Camarillo, 1998) (Carrillo-Bravo, 1965).

Los sedimentos del Paleozoico y las rocas metamórficas antiguas están falladas por un sistema que no corta a los estratos del Mesozoico (Carrillo-Bravo, 1965). Estas fallas se encuentran reactivadas como fallas inversas, delimitando al horst de

Huiznopala. El plegamiento de los estratos del Mesozoico Superior es intenso y se manifiesta por anticlinales y sinclinales angostos y alargados, con frecuencia asimétricos y a veces recumbentes. La rama nororiental se encuentra fuertemente plegada pero no como el flanco suroccidental (Carrillo-Bravo, 1965). En la Formación Huayacocotla se encuentran estructuras laramídicas. En las formaciones mecánicamente incompetentes, como Santiago y Pimienta, se observan pliegues y flats de cabalgaduras (Ochoa-Camarillo, 1998).

Las fallas normales que cortan a las formaciones depositadas previas a la Formación Tepexic, evidencian que el periodo de extensión terminó con el depósito de las Formación Cahuwasas. Entre las descritas por Ochoa-Camarillo (1996), se encuentran:

- Falla Ixtlapala: Con extensión desde el sur de Ixtlapala hasta el área de la mina Tetzintla. Esta falla es casi vertical (70 a 85°) y se inclina ligeramente hacia el occidente, orientación predominante N-S. El salto es aproximadamente de 1600m. Esta falla pone en contacto el basamento con la Formación Chipoco. Se sugiere fue reactivada como falla inversa durante la Orogenia Laramide.
- Falla Huiznopala: Se encuentra en la parte meridional de Huiznopala. Delimita junto con la falla Ixtlapala a la fosa Quimixtla. Orientación N-S. Pone en contacto a las formaciones Huiznopala y Huayacocotla. El salto mínimo es de 300m.
- Falla Chachala: Esta expuesta en el arroyo Cuate, pone en contacto a las Formaciones Tepexic y Huayacocotla, con lo que se estima un salto mínimo de 400m. Orientación N-S. Continúa hasta la comunidad de Chipoco, donde sobresale morfológicamente, y se observa en contacto a las Formaciones Chipoco y Tepexic, con un salto de aproximadamente 220m. También se sugiere una reactivación de esta falla durante la Orogenia Laramide como falla lateral derecha.
- Falla Contzintla: Ubicada al norte de la comunidad Otlamalacatla. Con un rumbo N20W, y reactivada posteriormente como falla inversa. Pone en contacto el basamento con rocas del Paleozoico.

9.1.3 Estratigrafía

La columna estratigráfica de la región de Molango en el estado de Hidalgo se puede separar en cuatro paquetes generales: 1) basamento Precámbrico, 2) secuencia marina del Pérmico, 3) rocas marinas y no marinas del Mesozoico y 4) rocas ígneas del Cenozoico Figura 9 (Okita, 1992).

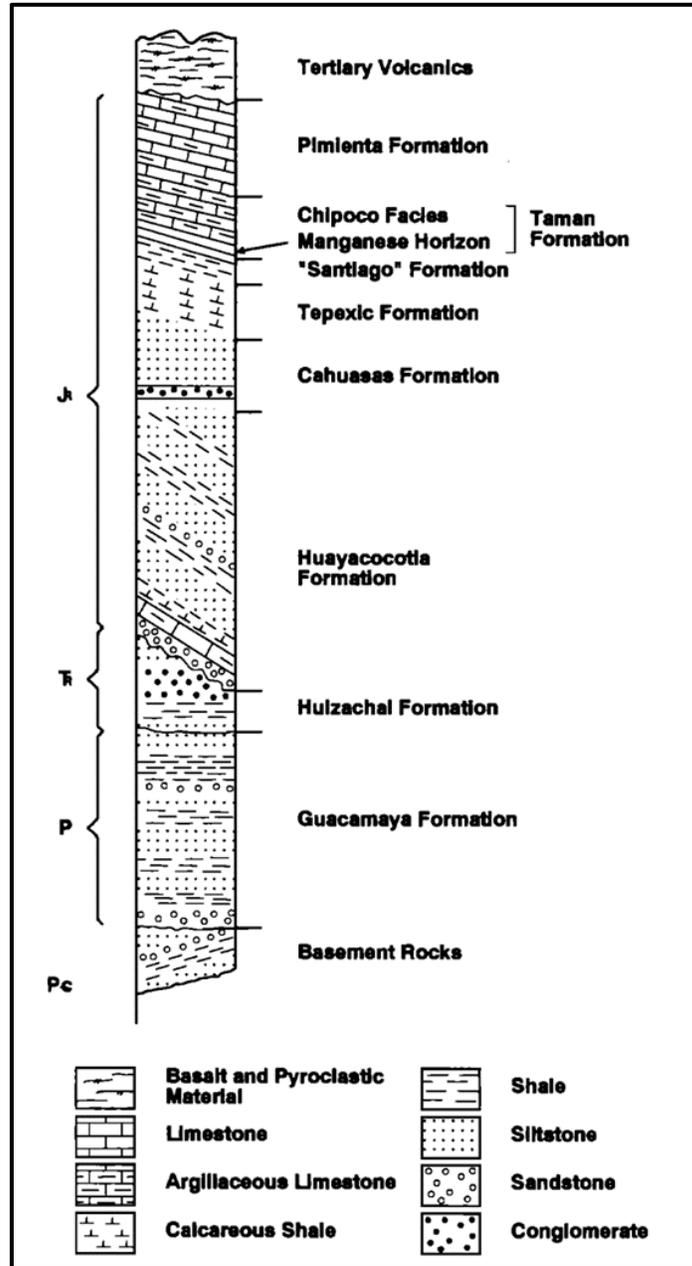


Figura 9 Columna estratigráfica distrito Molango (Okita 1992)

9.1.3.1 Precámbrico

Consiste en rocas metamórficas, gneis de cuarzo-feldespato-biotita, esquistos y meta conglomerados. Todas las rocas de la región se llegan a observar en algún punto en contacto directo con el basamento (Okita, 1992). En los ríos Tlahualompa y Chinameca, esta formación está en contacto por falla con calcarenitas del Jurásico Superior. Entre los ríos Claro y Chipoco subyace en discordancia a la Formación Huizachal y en otras zonas a la Formación Huayacocotla y la Formación Santiago (Carrillo-Bravo, 1965).

En el río de Chinameca se observan gneises de color gris a verde con cristales de granates. En el arroyo Chipoco se han observado de color gris verdoso con cristales de hornblenda, petrográficamente se han clasificado como gneises de feldespato.

9.1.3.2 Pérmico

Formación Tuzancoa

Originalmente fue definida por Carrillo-Bravo (1961) en el Anticlinorio Huayacocotla, con localidad tipo en la cercanía de Ciudad Victoria, Tamaulipas, como la extensión sur de la Formación Guacamaya (Buitrón-Sánchez, et al., 2017). En la sección tipo la Formación Guacamaya consiste en una sucesión rítmica marina de lutitas oscuras con intercalaciones de arenisca y conglomerado (Rosales-Lagarde, 2010)

En 1996, Ochoa-Camarillo propone el nombre Formación Tuzancoa y en 2002 fue redefinida por Rosales-Lagarde et al. Quien describe 5 litofacies en la sección tipo, la cual se encuentra a lo largo del río Tlacolula.

1. Facie volcánica: flujos de lava de composición andesítica a basáltica y brechas. Además, intercalaciones de capas de lutitas volcanogénicas.
2. Intercalaciones de lutita, arenisca y arenisca conglomerática. Esta facie no contiene flujos de lava, sin embargo, se tienen clastos volcánicos en la arenisca.

3. Facie volcanoclástica: Es la facie más común de la formación. Son intercalaciones de lutitas, calizas y areniscas. Con estructuras sedimentarias típicas de turbiditas. Tienen escasos fósiles en la base de la sucesión.
4. Flujos de derrubios calcáreos que contienen fragmentos fósiles. La litología varía desde wackestone hasta lutitas calcáreas, calcarenitas y brechas calcáreas.
5. Consiste en cuerpos lenticulares de conglomerados y areniscas de grano grueso.

Aflora en la porción central del Anticlinorio de Huayacocotla, en el arroyo Chipoco, por 300 Km² desde el sur del camino Ixtlahuaco-Tlanchinol hasta el río Chinameca y en el río Tlahualompa. Buitrón-Sánchez (2017), en el río Chinameca describe más de 2000 m de lutita de color negro, con intercalaciones de arenisca. Algunos de estos horizontes contienen abundantes fragmentos de calizas con fusulínidos y crinoides. Están en contacto por falla con el Gneis Huiznopala y en discordancia angular subyace a la Formación Huizachal. En la región de Calnali y el arroyo de Jalpa se observa una secuencia rítmica de más de 200 m de lutita, arenisca y algunos conglomerados de color negro. Su ambiente de depósito se infiere como batial de aguas poco profundas, con facies tipo flysh. Con base a su alto contenido fosilífero se le asigna una edad Wolfcampiana, es correlacionable con la Formación Guacamaya, ambas presentan características similares en cuanto a litología, y se diferencian entre sí debido a la influencia de vulcanismo básico intercalado en la Formación Tuzancoa, este vulcanismo está asociado a vulcanismo de arco el cual se explica cómo emplazamiento de magma en corteza por extensión (Rosales-Lagarde et al, 2006).

9.1.3.3 Mesozoico

Las rocas Mesozoicas están agrupadas en las Formaciones Huizachal, Huayacocotla, Cahuasas, Tepexic, Santiago, Chipoco y Pimienta.

9.1.3.3.1 Triásico - Jurásico

Formación Huizachal

Se encuentra entre el Triásico Superior y el Jurásico Inferior y consiste en una serie de estratos rojos a pardos de lutita calcárea, lutita arenosa, arenisca cuarcítica, limolita y conglomerado de origen continental. Además, en esta formación afloran rocas de coloración rojiza con apariencia de limolita (Imlay, 1948). La localidad tipo se sitúa al suroeste del Valle de Huizachal a aproximadamente a 20 Km al suroeste de Ciudad Victoria, Tamaulipas. (Okita, 1992, Eguia, 1979; SGM, 2006).

9.1.3.3.2 Jurásico Inferior

Formación Huayacocotla

Aflora al norte de Veracruz, Puebla y al este de Hidalgo en la región de la Huasteca. La sección tipo propuesta se encuentra en afloramientos a lo largo del Río Vinasco al sur de Huayacocotla. Esta unidad consiste de lutitas y limolitas oscuras con intercalaciones de arenisca y conglomerado y escasos lentes de caliza. Algunos estratos presentan micas y pirita. Los fósiles son de limos y algunos de pirita, se encuentran amonites a lo largo de toda la formación, en la parte basal se encuentran asociados con helechos, mientras que hacia la cima carecen. Se determinó una edad Sinemuriano con base en amonites, en particular *Vermiceras, sp.* (Imlay et al., 1948). Subyace discordantemente a la Formación Cahuasas y suprayace de igual manera a la Formación Huizachal.

Se distinguen tres miembros (Ochoa-Camarillo et al. 1998), los cuales son: (1) el miembro inferior formado por conglomerado, arenisca, limolita lutita con exoclastos que contienen fósiles re TRABAJADOS y se caracteriza por la ausencia de fósiles

autóctonos, (2) el miembro intermedio constituido por conglomerado, arenisca, limonita y lutita, (3) el miembro superior está conformado por arenisca, limolita, lutita y conglomerado y se caracteriza por la presencia de plantas continentales. Los tres miembros reconocidos en esta formación indican diferentes ambientes de depósito. La litología del miembro inferior indica que las rocas de este intervalo son depósitos de abanicos aluviales que están indicando el inicio del relleno de los grabens. Además, presenta algunos intervalos de arenisca roja, que sugieren un ambiente continental. El miembro intermedio puede interpretarse como un ambiente marino poco profundo próximo a la costa. El miembro superior sugiere un ambiente fluvial. En la región de Molango se señaló una composición siliciclástica con ausencia de carbonato. En el área de Otongo, la formación está constituida por arenisca de grano grueso y limolita verde con helechos fósiles. En Ixtlahuaco - Calnali aflora como una alternancia de arenisca y lutita gris con impresiones de helechos y coníferas (Ochoa-Camarillo et al. 1998).



Figura 10 Formación Huayacocotla.

9.1.3.3.3 Jurásico Medio

Formación Cahuwasas

Fue definida por Carrillo–Bravo (1965) como una secuencia de más de 1,000 m de espesor de arenisca, conglomerado y limolita de color rojo de origen continental que contienen laminillas de mica blanca; las areniscas y conglomerados presentan con frecuencia estratificación cruzada. La localidad tipo se encuentra en el Rancho Cahuwasas, Hidalgo, sobre el Río Amajac, al sureste de Chapulhuacán, Hidalgo (Carrillo-Bravo, 1965). Sobreyace en discordancia angular a la Formación Huayacocotla, contacto observable en el tramo Ixtlahuaco-Calnali; de la misma forma se observa cubierta concordantemente por la Formación Tepexic en la intersección del arroyo Chipoco y el camino a San Simón-Ixcuicula (Ochoa-Camarillo et al. 1998).

En la Formación Cahuwasas no se encuentran indicadores paleontológicos por lo que su edad se estima por posición estratigráfica entre el Aaleniano y el Batoniano (Ochoa-Camarillo et al. 1998).

Formación Tepexic

Descrita formalmente por Erben (1956) como “Calcarenita Tepexic” con localidad tipo en río Necaxa al norte del Estado de Puebla. De manera regional se localiza entre los poblados de Acayuca-Cuxhuacán, Acoxcatlán-Tepehuacan y Acuímantla (Ochoa-Camarillo et al. 1998).

Está compuesta en su base por calcarenitas de color gris y gris oscuro, con intercalaciones de capas delgadas de lutitas calcáreas de color gris oscuro. Descansa de manera concordante y abrupta sobre la Formación Cahuwasas y, en otras áreas donde no aflora esta unidad, yace en discordancia angular sobre la Formación Huayacocotla. En la parte superior está cubierta en forma concordante, abrupta o transicional por la Formación Santiago, o bien en contacto abrupto o concordante con la Formación Chipoco.

La Formación Tepexic se depositó en un ambiente de plataforma muy somero, cercano a la costa. Estos sedimentos indican el inicio de la sedimentación de carbonatos debido al hundimiento de la región y el inicio de la transgresión marina relacionada a la apertura del Golfo de México.

Se le asigna una edad del Caloviano con base en fósiles (Ochoa-Camarillo, 1998).

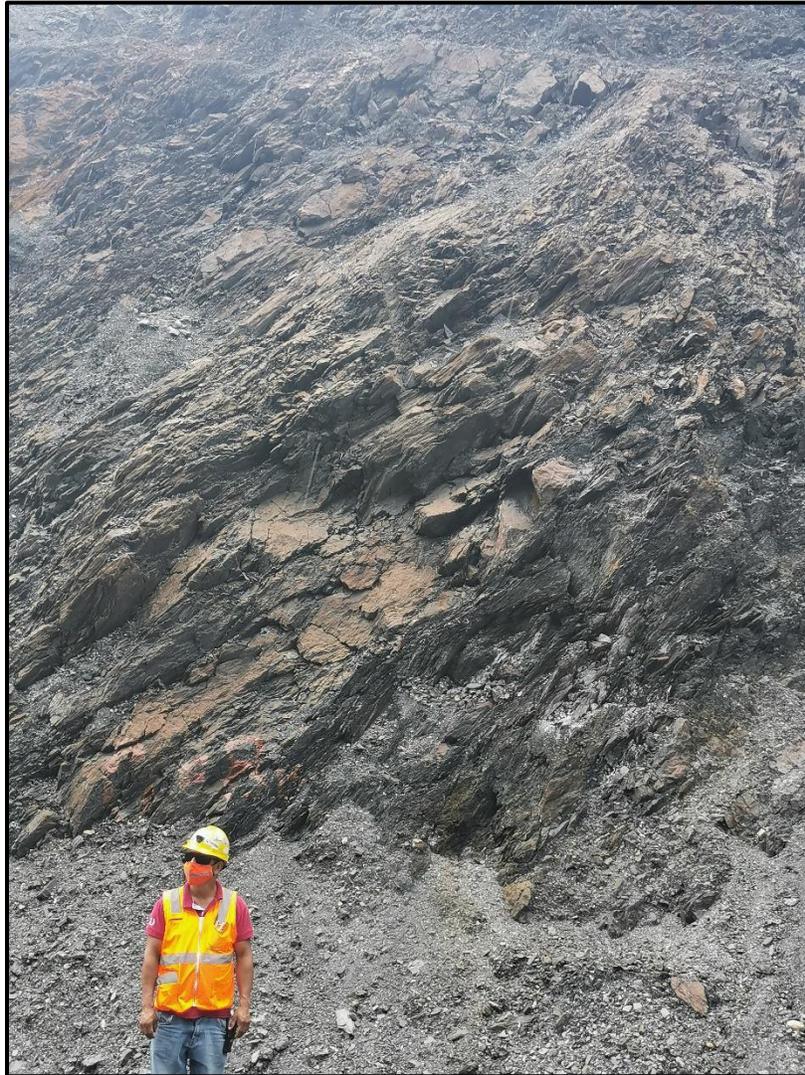


Figura 11 Formación Tepexic.

9.1.3.3.4 Jurásico Superior

Formación Santiago

Esta unidad fue definida por Cantú-Chapa (1971); su localidad tipo se encuentra en el Arroyo Santiago que desemboca en el río Moctezuma en Tamán, S.L.P. Donde consiste en lutitas calcáreas de color gris oscuro hasta de 40 cm de espesor, intemperiza a café pardo o café rojizo, presentan un clivaje diagonal a los planos de estratificación que a veces dan lugar a apreciaciones erróneas en la medición de los datos estructurales, además poseen nódulos calcáreos intercalados. Se le asigna una edad del Caloviano-Oxfordiano en base a los amonites estudiados por Cantú-Chapa (1971).

En la región se observa que la formación consiste en un paquete de limolita negra calcárea, ocasionalmente caliza negra. Hacia la parte superior se observan concreciones negras calcáreas con presencia de amonites, ocasionalmente hay estratos de caliza arcillosa de color negro. En la parte intermedia no se observan fósiles, la inferior presenta amonites y ostreidos (Ochoa-Camarillo, 1998).

Descansa concordantemente encima de la Formación Tepexic y subyace a la Formación Chipoco en contacto concordante y abrupto. En el área de Huiznopala descansa sobre el Gneis Huiznopala. (Ochoa-Camarillo, 1998).

Se le asigna una edad Caloviano-Oxfordiano Tardío basada en amonites, estudiados por Cantú-Chapa (1971). La ausencia de fósiles en la parte media indica depósito en condiciones marinas tranquilas reductoras en facies de cuenca.



Figura 12 Formación Santiago.

Formación Chipoco

Definida por Hermoso de la Torre y Martínez - Pérez (1972), como una alternancia de caliza y lutita calcárea. La localidad tipo se encuentra en el tajo Tetzintla, cerca de la comunidad de Chipoco.

Se describen cuatro unidades litológicas:

Miembro 1: Caliza manganesífera con intercalaciones de lutita calcárea.

Miembro 2: Arenisca calcárea con intercalaciones de lutita calcárea arenosa.

Miembro 3: Limolita y lutita calcárea con intercalaciones de caliza arcillosa.

Miembro 4: Secuencia de caliza interestratificada en forma rítmica con lutita negra.

A la base de la Formación Chipoco se encuentra la zona mineralizada, la cual se diferencia por su dureza en contraste al contacto con la Formación Santiago. Chipoco Inferior incluye una zona basal dura, con vetilleo de pirita, calcita y rodocrosita conocida con el nombre de Capa A. Esta es de aproximadamente 0.5m la cual llega a efervescer moderadamente con HCl. Sobre la Capa A se encuentra la zona mineralizada, que contiene valores por encima del 30% de Mn, el cual se encuentra en capas de rodocrosita que alternan en intervalos de lutitas limosas y óxidos de Fe. Las rocas en esta zona son gris oscuro a negro, laminadas y ligeramente arcillosas. (Okita, 1992). El contenido de manganeso decrece gradualmente hacia la cima de la sección, donde la mineralización cambia una mezcla de rodocrosita, kutnohorita y manganocalcita.

En la región de Huitepec descansa aparentemente sin discordancia erosional sobre la Formación Tepexic. Como contacto superior transicional la Formación Pimienta. Se le asigna una edad Kimeridgiano temprano – Titoniano temprano basado en amonites. Ochoa-Camarillo (1996) relaciona la presencia del horizonte manganesífero con los cambios en las características físico – químicas del agua, relacionado con la comunicación de la fosa de Huayacocotla y el proto – golfo de México en un ambiente de cuenca.



Figura 13 Formación Chipoco.

Formación Pimienta

Definida por Heim (1926) como una serie de caliza de estratificación delgada con capas de pedernal negro, en el pueblo Pimienta, San Luis Potosí. En la región se presenta como estratos de caliza negra con intercalaciones rítmicas de lutita negra, se observan nódulos y lentes de pedernal negro y gris además, son característicos sus pliegues tipo chevron. Descansa sobre la Formación Chipoco, con excepción de Ixtapala, donde está directamente sobre el basamento. Como contacto superior está la Formación Tamaulipas Inferior en contacto transicional. Se le asigna una edad Titonia por lo amonites presentes y un ambiente de depósito pelágico (Ochoa – Camarillo, 1998).



Figura 14 Pliegues tipo chevron Formación Pimienta.

9.1.3.4 Terciario

Formación Tlanchinol

Robin y Bobier (1975) describen derrames volcánicos que afloran en la región del pueblo de Tlanchinol. Se refiere a una secuencia de derrames basálticos que descansan subhorizontalmente sobre sedimentos marinos jurásicos y cretácicos, y sobre rocas precámbricas en la región Huiznopala. Estos basaltos son porfíricos de olivino y piroxeno, con fenocristales de plagioclasa de 3 a 4 mm de longitud de un

magmatismo subsaturado en sílice, en intercalación con horizontes piroclásticos, tobas de caída aérea y derrames andesíticos. Se interpreta que los basaltos salieron por fisuras (Ochoa – Camarillo, 1996).

Esta formación sobreyace a rocas precámbricas en la región de Huiznopala y en discordancia angular y erosional a sedimentos jurásicos y cretácicos. Entre Tlanchinol y Quetzalongo se estima un espesor mayor a los 750 m, la cual se encuentra muy erosionada.

Formación Atotonilco El Grande

Definida por Geyne, et al. (1963) como capas de textura variable desde fangolita hasta conglomerado usando como localidad tipo la periferia del poblado del mismo nombre. La litología de la región consiste en basaltos intercalados con derrames piroclásticos de brecha o toba de composición dacítica a riolítica, descansan sobre rocas anteriores al Terciario con discordancia erosional y angular fuerte. Tienen una edad del Plioceno, más jóvenes a la Formación Tlanchinol, con lo que se sugiere una migración de vulcanismo de norte a sur (Ochoa-Camarillo, 1996).

Rocas Ígneas Intrusivas

Rocas Máficas

Representados como diques, sills y cuerpos irregulares de gabros y doleritas. Al oriente de Quetzalongo aflora un dique basáltico con orientación NW-SE con espesor de 8 a 10m. Ochoa-Camarillo (1996), sugiere que este dique alimentó a los basaltos alcalinos de la Formación Tlanchinol.

Rocas Félsicas

Ochoa-Camarillo (1996) describe al oriente de Eloxochitlán, un intrusivo con forma de ovoide de 2 a 4 Km en su diámetro de mínimo a máximo, el cual es un pórfido de composición riolítica, de color blanco, da nombre al lugar donde aflora como

Cerro Blanco. Su aureola de contacto da origen a zonas de caliza marmolizada de 1.0 a 2.0 m de espesor y de 10.0 a 20.0 m de longitud. Una de las teorías es que este intrusivo forma parte del arco magmático laramídico, como el intrusivo del Cerro del Águila, la otra teoría consiste en que se trata de un domo subvolcánico del Grupo Pachuca (Ochoa-Camarillo, 1996).



Figura 15 Intrusivo félsico.

9.2 Geología Local

En esta unidad la secuencia estratigráfica no se observa de manera “ordenada” debido a la Cabalgadura de Naopa.

En el tajo Naopa se observa la secuencia estratigráfica de las Formaciones Jurásicas, Huayacocotla, Tepexic, Santiago y Chipoco. Estas formaciones se encuentran intrusionadas por cuerpos de composición riolítica del Terciario. Además, estas rocas están cubiertas en algunas zonas por las Formaciones Atotonilco y Tlanchinol del Terciario.

Formación Huayacocotla (JiH)

Rodea el tajo Naopa, consiste en lutitas de color gris oscuro interestratificada con arenisca. Se observa fuerte fracturamiento, a veces relleno de cuarzo. La formación se encuentra bastante plegada.

Formación Tepexic (JmT)

Los afloramientos en el tajo muestran calcarenitas de color gris a gris oscuro interestratificadas con lutitas calcáreas, las cuales intemperizan a color amarillo – ocre, y algunas limolitas en la cima de la secuencia. Se llega a observar también calizas con vetilleo de yeso, además de cantidades importantes de fósiles, como bivalvos y conchas. En esta formación se llegan a presentar porcentajes altos de manganeso, asociados a vetilleos de rodocrosita.

Formación Santiago (JsS)

Se llega a observar en la parte central y al SE del tajo. Está representada por limolitas de color gris oscuro a negro, a veces llega a intemperizar a color rojo, presenta pirita diseminada, vetilleo de calcita con brecha en los bordes con clastos de lutitas.

Formación Chipoco (JsCh)

Aflora en la parte central del tajo, y al SE. La parte basal corresponde a la parte de interés económico. La secuencia tiene tres zonas principales, inferior, medio y superior. La secuencia está constituida por una laminación de color gris oscuro de calizas manganesíferas que contiene materia orgánica. De acuerdo al contenido de manganeso se han clasificado estas rocas por rangos, de baja, media y alta ley.

Baja ley: Caliza y lutitas calcáreas interestratificadas, de color gris oscuro. Se observan pátinas y pirita diseminada, lo que nos indica altas concentraciones de hierro. Fracturamiento paralelo a estratificación. Reacción al HCl al 10%.

Media ley: Calizas manganesíferas de color gris oscuro fuertemente plegadas, escasa pirita, fuerte fracturamiento, vetilleo de cuarzo lechoso.

Alta ley: Caliza manganesífera de color gris oscuro a negro, escaso a nulo vetilleo de calcita. Vetilleo de calcita y rodocrosita. La roca no efervesce al HCl al 10%.

Formación Atotonilco

Se observa en afloramientos al SW del tajo Naopa, consisten en basalto y riolitas.

Las Formaciones Huayacocotla, Tepexic, Santiago y Chipoco son intrusionadas por intrusivos riolíticos faneríticos y afaníticos de color blanco, que cambia su color a café debido al intemperismo.

El arreglo mineralógico consiste en manganocalcita, rodocrosita, kutnohorita, pirita, marcasita, hematita, goetita, calcopirita, esfalerita, birnessita, barita. El vetilleo tardío incluye mangano calcita, rodocrosita, aragonito, dolomita, cuarzo, kutnohorita y rodonita.

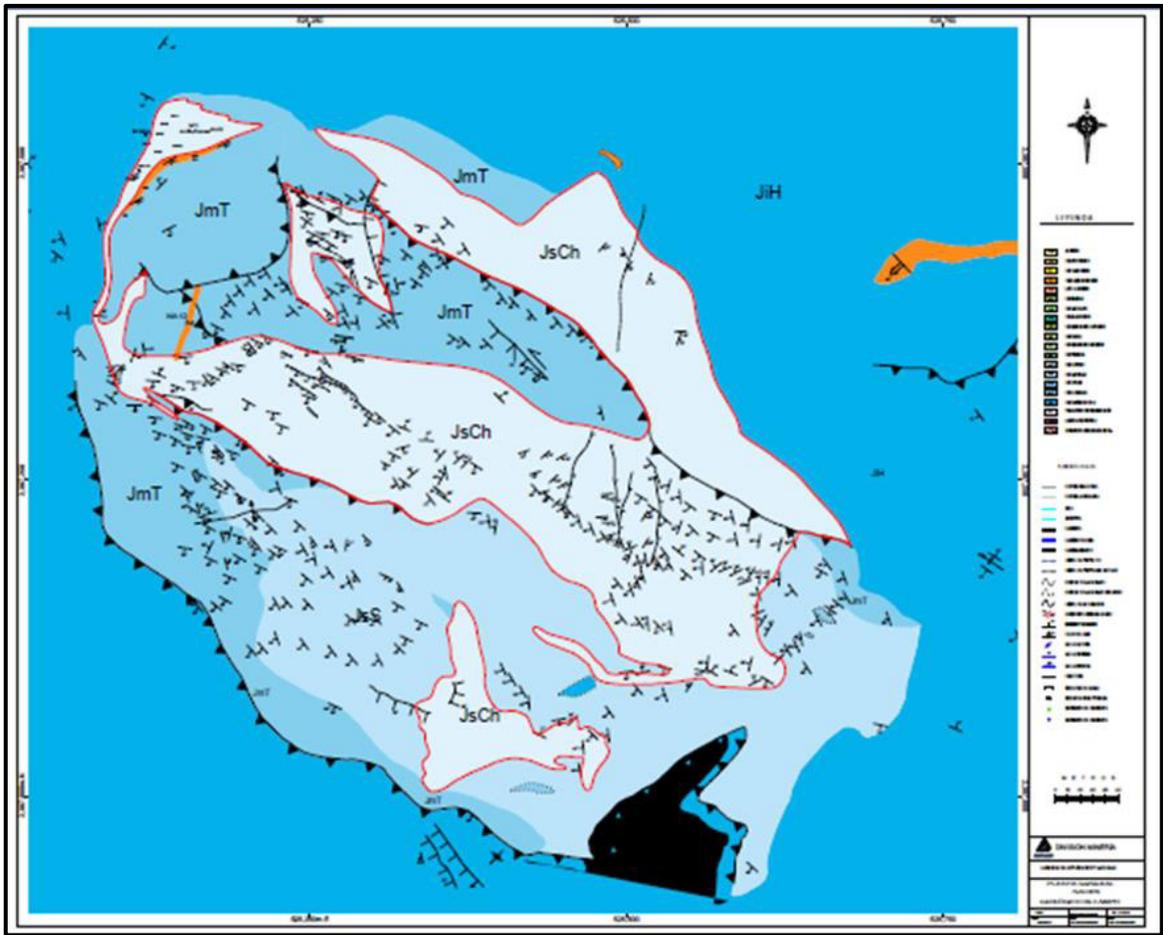


Figura 16 Plano geológico tajo Naopa.

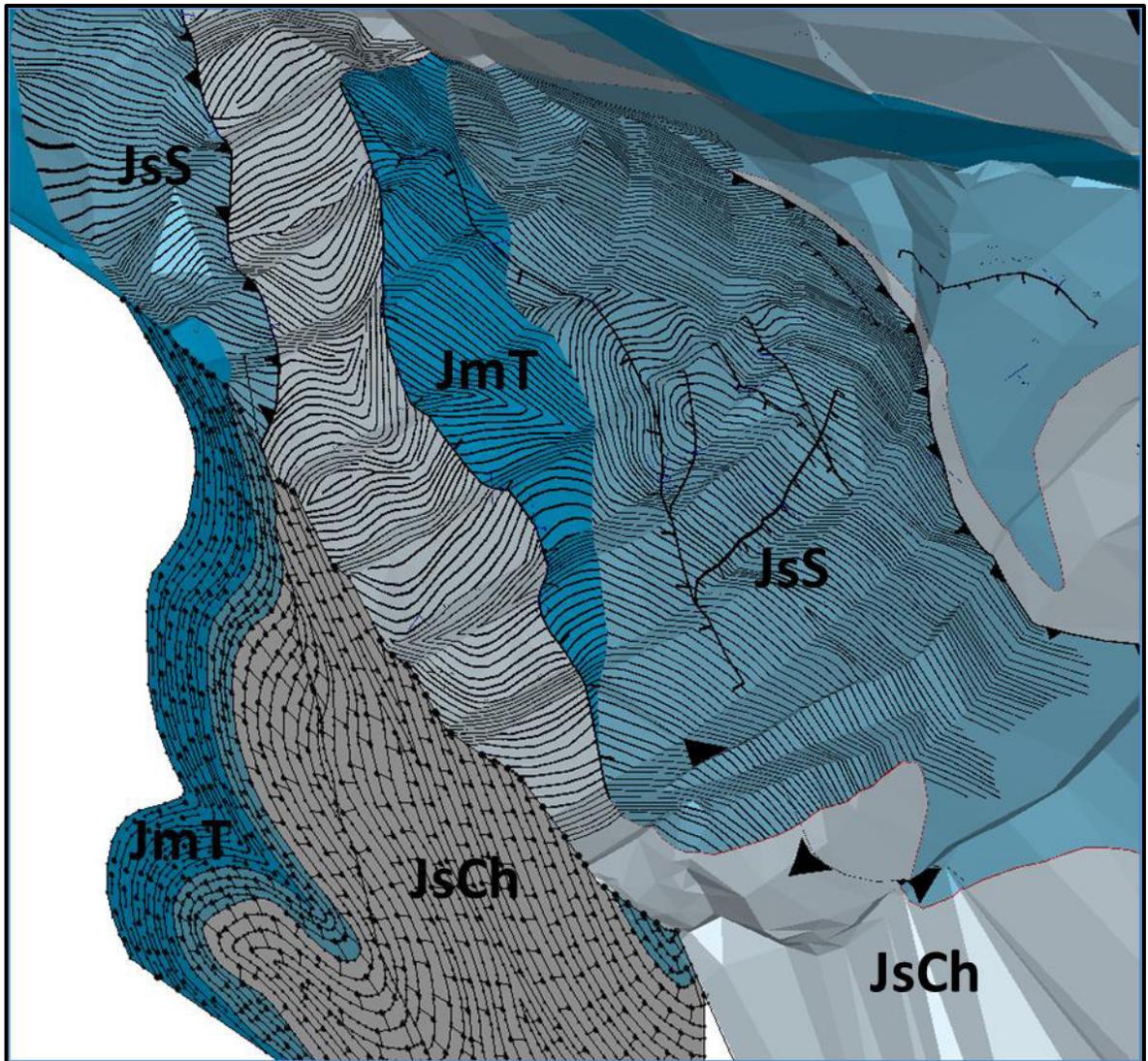


Figura 17 Isométrico secuencia geológica en taludes del tajo.

10.Marco Teórico

Uno de los mayores problemas para el diseño en mecánica de rocas es el estimar las propiedades de resistencia y deformación en el macizo rocoso in-situ, las cuales se pueden obtener mediante los siguientes métodos:

- Pruebas de laboratorio
- Pruebas in-situ
- Clasificaciones del macizo rocoso
- Análisis de respaldo

Sin embargo, si las muestras no son representativas de alteración, discontinuidades y la heterogeneidad de la mayoría de las formaciones los datos pueden no ser precisos. Además, las pruebas in-situ no arrojan información fehaciente para realizar un soporte. Donde no se puedan realizar análisis de respaldo, no hay otra opción más que confiar en el uso de esquemas de clasificación del macizo rocoso donde se correlaciona la información con los parámetros básicos del diseño.

10.1 Geological Strenght Index (GSI)

El diseño de obras en rocas de calidad pobre como lo son las secuencias tipo flysh, presentan un gran desafío para los geólogos debido a la complejidad estructural de estos materiales, no se pueden clasificar de manera sencilla en términos de sistemas de clasificación (Marinos, 2014).

Hoek y Brown (1994) han propuesto un método (*GSI: Geological Strenght Index*) para estimar la resistencia de las fracturas en el macizo rocoso, basado en una evaluación de los bloques de roca y las condiciones de la superficie entre estos. Este método ha sido modificado a lo largo del tiempo para considerar necesidades de los usuarios que en un principio no se tomaron en cuenta. Se actualizó por Marinos y Hoek (2000), el cual es el que se estará utilizando en este trabajo y por Hoek, Marinos y Marinos (2004).

Las entradas básicas en el criterio inicial de Hoek y Brown (1994) son el esfuerzo uniaxial (σ_{ci}) y el material constante (m_i). La constante m_i de Hoek-Brown solo se puede determinar por pruebas de esfuerzo triaxial en muestras de núcleo o se estima de manera cualitativa en la descripción de la roca. La constante m_i depende de las características de fricción en los componentes minerales de la muestra de roca intacta y tiene una influencia significativa en la resistencia de la roca. Cuando esas pruebas no son confiables se toman valores estándar para cada tipo de litología de la literatura. El índice GSI se puede estimar directamente desde los gráficos establecidos. El gráfico para macizos rocosos heterogéneos tipo flysch se muestra en la figura 18.

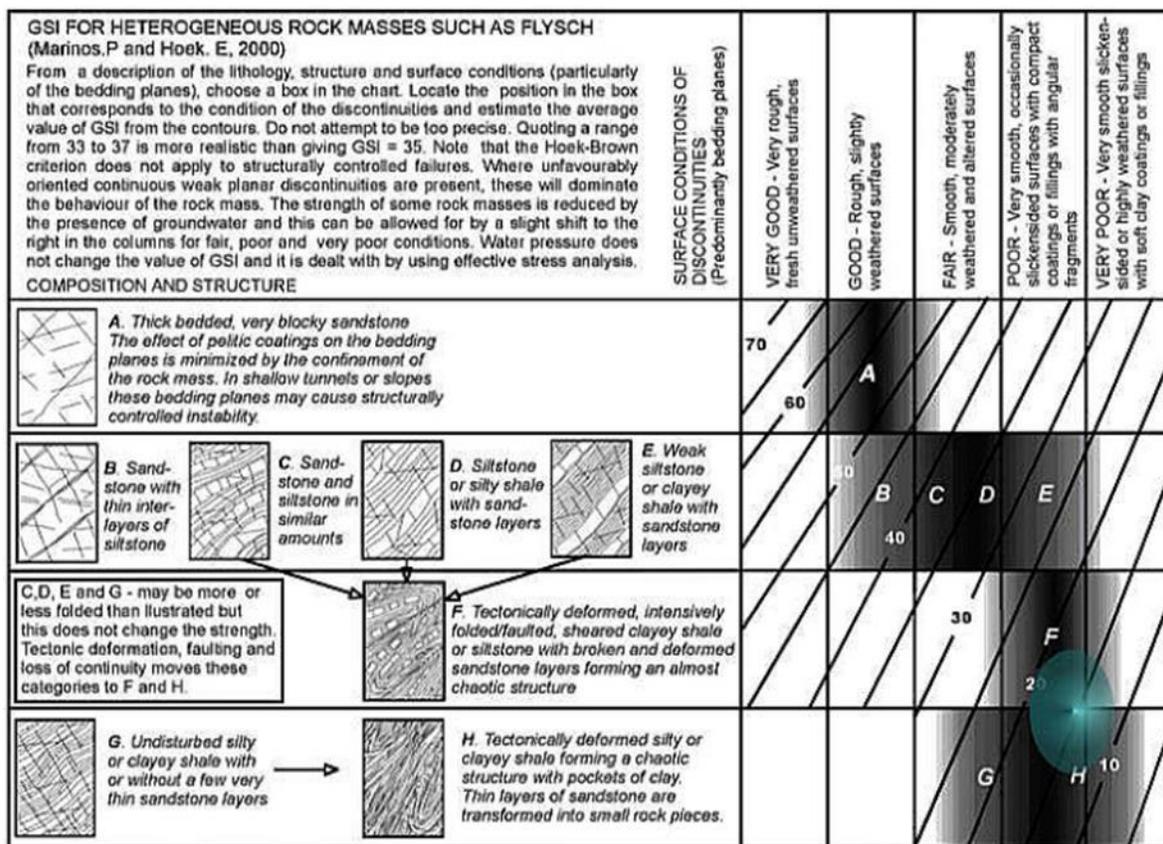


Figura 18 GSI para macizos rocosos heterogéneos tipo flysch. (modificado de Marinos, et al., 2007)

Aparte de los valores para el GSI de la figura 18 es necesario considerar las propiedades σ_{ci} , y m_i , para macizos rocosos heterogéneos tipo flysch. Los estratos

de areniscas generalmente están separados entre ellos por capas débiles de limolitas o lutitas. Por lo tanto, los afloramientos no permiten muestreos de alta calidad con lo que el trabajo del laboratorio será más limitado. Así que se propone utilizar un promedio de la resistencia para las capas de las rocas más fuertes y uno de las capas más débiles. Una de las formas de hacer esto es hacer análisis de cargas puntuales en muestras donde la carga se puede aplicar normal en estratificación o foliación.

10.2 Pruebas de laboratorio

Parte del estudio de mecánica de rocas es determinar las propiedades mecánicas de las rocas hasta el punto de falla al conocer los conceptos de esfuerzo y deformación.

El esfuerzo (σ) es la fuerza aplicada (carga) a la roca que tiende a cambiar de dimensión.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Las tres condiciones básicas son tensión, compresión y esfuerzo cortante.

La deformación (ϵ) es el efecto producido por la aplicación de una carga, como el cambio relativo en la forma o tamaño de la roca.

Deformación plástica: Cuando se aplica un esfuerzo por un tiempo prolongado sobre un objeto permitiendo que la deformación incremente, esta deformación es proporcional al esfuerzo aplicado. Cuando se retira la carga el material regresa a su estado inicial (cero).

Las pruebas mecánicas se realizan en probetas de rocas, estas se preparan con base en la norma ASTM D4543-08. Para las pruebas de esfuerzo uniaxial y triaxial se requiere que las muestras se preparen conservando cierta proporción

entre longitud y diámetro (2:1), al variarla se induce a errores en las propiedades medidas (Gamwell, 2015). Para este caso se realizaron los cortes perpendiculares al eje axial de la carga. Con estos criterios cumplieron 46 muestras para esfuerzo uniaxial, 35 para tensión indirecta y 53 para compresión triaxial.

10.2.1 Ensaye Uniaxial

Prueba de esfuerzo uniaxial: Si la presión radial (confinamiento) es cero sólo se aplica compresión.

Hay algunos problemas al medir la compresión uniaxial obtenida de pruebas de laboratorio.

1. Es muy difícil recuperar el núcleo completamente intacto y los elementos representativos sobre la heterogeneidad y tectónica.
2. Incluso si las muestras son preparadas y analizadas de manera exitosa, la naturaleza de los materiales significa que habrá una gran dispersión de los valores de resistencia uniaxial determinados a partir de estas pruebas.

La mayoría de las pruebas de compresión uniaxial en una muestra típica de laboratorio contendrá elementos del macizo rocoso y no será representativo de la muestra intacta. Así que las pruebas sobre núcleos serán más representativas del macizo rocoso que de los componentes de la roca intacta. Al usar estos resultados en criterios como el Hoek-Brown le pondrá doble penalidad sobre la resistencia y arrojará valores bajos e irreales. Por otro lado, cuando las muestras se pueden preparar generalmente son de aquellas con alta resistencia con lo que no se tiene representatividad de aquellas con baja resistencia.

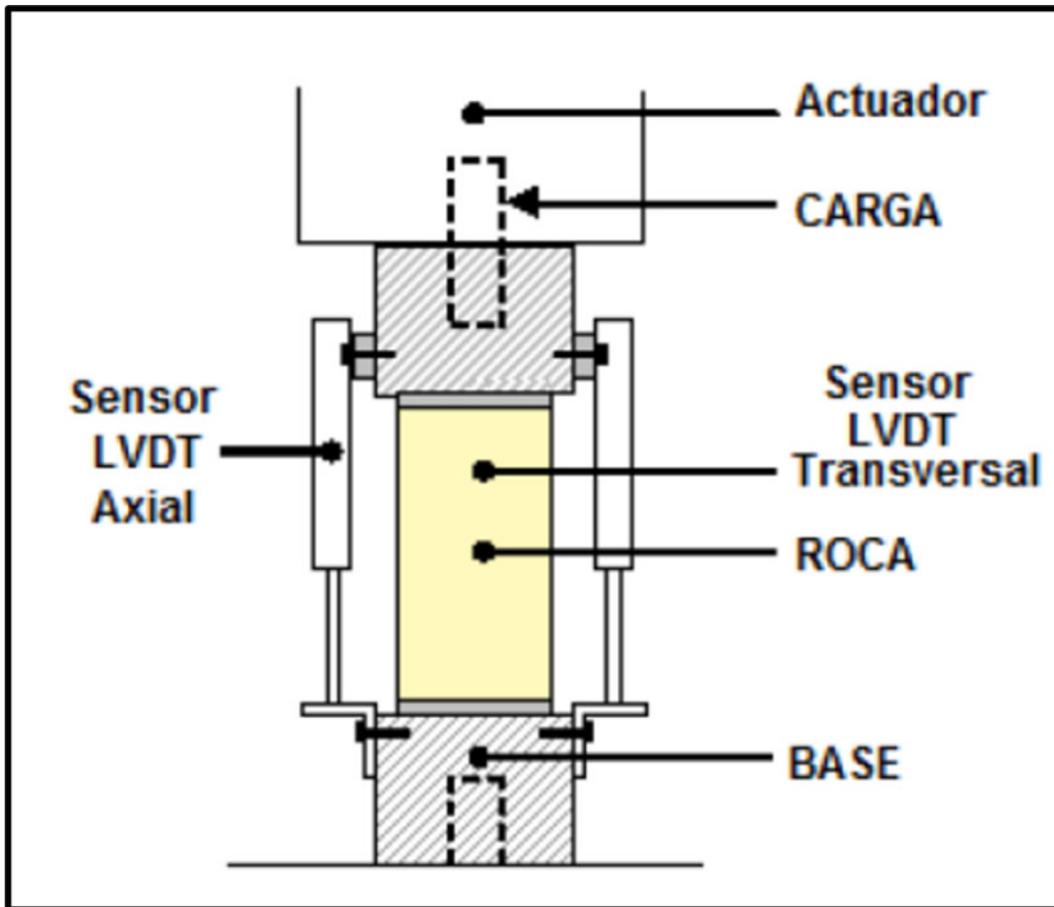


Figura 19 Arreglo de ensayo Uniaxial.

10.2.2 Ensayo Triaxial

Prueba de esfuerzo triaxial: Si la presión de confinamiento es distinta de cero y se le aplica compresión a una presión determinada. Generalmente se van incrementando estas dos variables hasta que se alcance el nivel de esfuerzo hidrostático. La carga axial se aplica hasta que se llegue a ruptura o deformación de la muestra.

Este método es el más completo porque simula el comportamiento de la roca de manera más real sometida a presiones litoestáticas de confinamiento. Sin embargo, es un método con complejidad técnica y elevado costo económico (Buelga,1996).

Las pruebas de esfuerzo uniaxial de la roca intacta se pueden estimar con un razonable nivel de precisión al multiplicar el índice de carga puntual (I_{50}) por 13; Para valores I_{50} arriba de 2MPa donde I_{50} se determina de acuerdo a ISRM. Celda triaxial, también conocido como celda de Hoek, fue desarrollado especialmente para pruebas de compresión triaxial en rocas estratificadas, como limolitas y lutitas, las cuales son sensibles a la desecación. Cuando las pruebas de laboratorio no son posibles, las pruebas de carga puntuales deberán realizarse lo antes posible una vez recuperado el núcleo, para acercarse lo más posible a los valores de condiciones in situ.

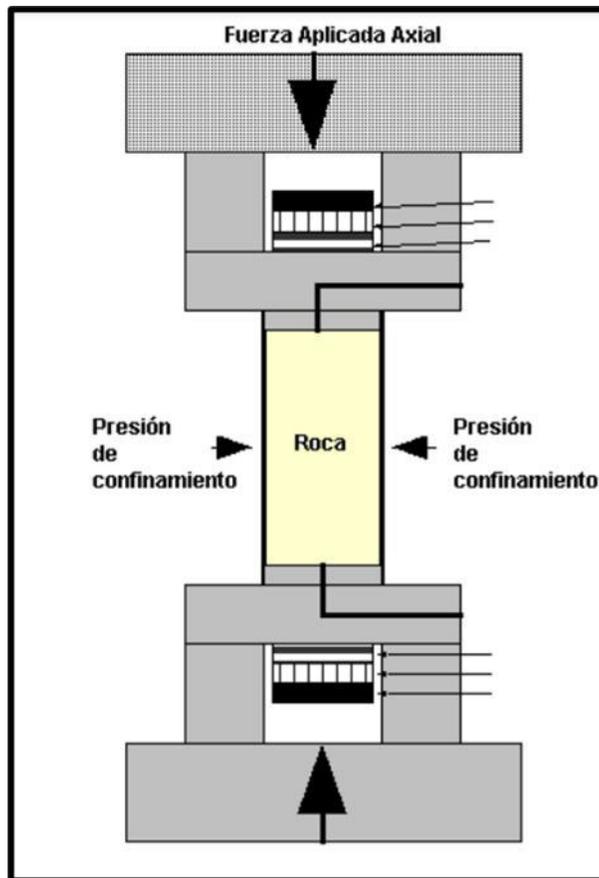


Figura 20 Arreglo de ensayo Triaxial

10.2.3 Ensayo de Tracción Indirecta

La prueba brasileña es un método de prueba indirecto simple para obtener la resistencia a la tracción de material quebradizo como hormigón, roca y materiales similares a las rocas. En la figura 21 se muestran cuatro configuraciones de carga típicas.

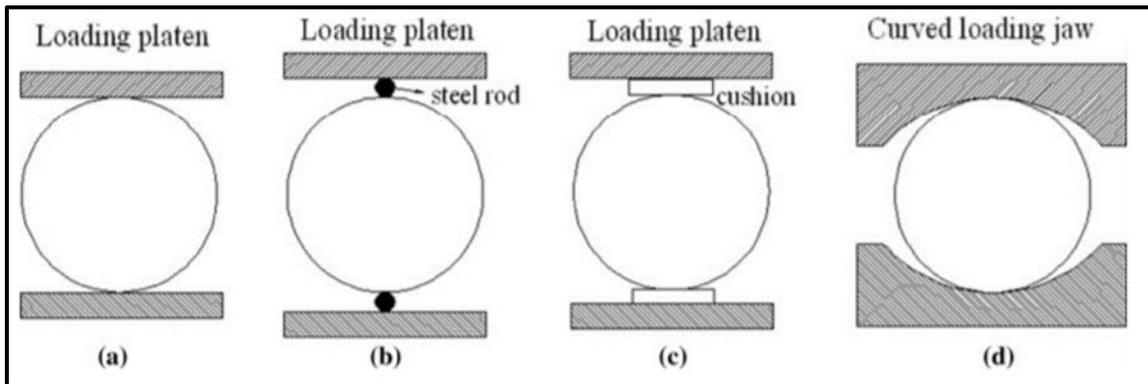


Figura 21 Configuraciones típicas de carga de prueba de tracción brasileña: a) platos de carga planos, b) platos de carga planos con dos varillas de acero de diámetro pequeño, c) platos de carga planos con cojín y d) mordazas de carga curvas.

La compresión induce tensiones de tracción normales al diámetro vertical, que son esencialmente constantes en una región alrededor del centro. La resistencia a la tracción indirecta se calcula típicamente basándose en el supuesto de que la falla ocurre en el punto de máxima tensión de tracción, es decir, en el centro del disco. La fórmula sugerida para calcular la resistencia a la tracción por división σ_t (MPa) basada en la prueba brasileña es (ASTM 2008; ISRM 1978).

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi Dt} = 0.636 \frac{P}{Dt}$$

Donde P es la carga de falla (N), D es el diámetro de la muestra de prueba (mm) y t es el espesor de la muestra de prueba medido en el centro (mm). Desde que Carneiro y Akazawa la introdujeron de forma independiente en 1943 (Carneiro

1943; Akazawa 1943; Fairbairn y Ulm 2002), la prueba de tracción brasileña ha recibido una atención considerable incluso hasta la actualidad (Erarslan y Williams 2012) (Diyuan Li • Louis Ngai Yuen Wong The Brazilian Disc Test for Rock Mechanics Applications: Review and New Insights)

10.3 Elementos finitos

Para determinar el factor de seguridad o la carga última, el método de los elementos finitos (FEM) puede ser empleado a través de dos procedimientos (Naylor, 1982): Directo y Límite Mejorado. En el directo, el análisis de la estabilidad de pendientes es realizado, o bien, disminuyendo sistemáticamente la resistencia cortante del suelo (Método de reducción de la resistencia al corte) o en su defecto, incrementando las cargas superficiales o másicas aplicadas.

En el procedimiento límite mejorado, el campo de esfuerzos, determinado mediante un análisis de elementos finitos, es empleado conjuntamente con los conceptos de equilibrio límite para determinar la estabilidad. Un ejemplo de la discretización del dominio geométrico, mediante elementos finitos, se presenta en la figura 22.

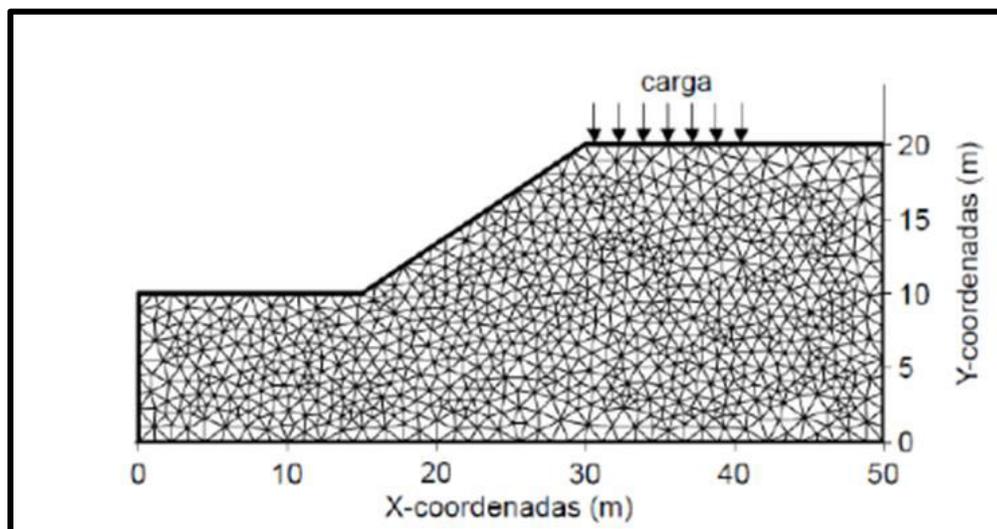


Figura 22 Geometría de la pendiente discretizada en elementos triangulares.

10.3.1 Método de Reducción de la Resistencia al Corte

Es importante mencionar que el método directo ofrece algunos beneficios comparados con los métodos tradicionales de análisis de la estabilidad de pendientes. Las siguientes ventajas pueden ser mencionadas (Matsui y San, 1992; Potts, 2003; Zheng, 2005):

- No es necesario hacer supuestos, ni en la forma, ni en la ubicación de la superficie de falla. El mecanismo de falla se encuentra a través de las zonas donde la masa de suelo es incapaz de resistir los esfuerzos aplicados. Es así que la superficie de falla se desarrolla de manera automática, sin forzar ni su ubicación, ni su forma.
- La masa de suelo no se divide en dovelas, por lo que no es necesario las suposiciones en cuanto a las fuerzas interdovelas.
- Si se emplean parámetros elasto-plásticos reales en la modelización, la solución encontrada por este método proporciona información de desplazamientos y deformaciones a esfuerzos reales de trabajo. El FEM se puede emplear para determinar las deformaciones desarrolladas por diferentes combinaciones de carga y por diferentes procesos constructivos.
- El método es idóneo para modelar la falla progresiva desde el inicio hasta la culminación de la misma.
- Casos complejos, por ejemplo, estratigrafía compleja, pueden ser modelados con facilidad.
- La interacción suelo-estructura puede ser considerada, por ejemplo, en pendientes donde es necesario el empleo de estructuras de refuerzo.
- Características del comportamiento en tres-dimensiones pueden ser fácilmente acopladas.

Se debe mencionar que los resultados obtenidos por el FEM tanto en los valores del factor de seguridad, como, en la ubicación y forma de la superficie de falla, son similares con aquellos resultados obtenidos por los métodos tradicionales (Griffiths y Lane, 1999; Bojorque y et al., 2008), corroborando de esta manera la

aplicabilidad del método para el análisis de la estabilidad de pendientes y manteniendo todas sus ventajas.

10.3.2 Método de Incremento de los Esfuerzos

Otra técnica para determinar la carga última y/o el factor de seguridad es incrementando los esfuerzos aplicados a la pendiente. Generalmente, se incrementa sistemáticamente las fuerzas másicas de gravedad en todos los elementos, produciendo de esta manera, que el sistema no converja y se determina el fallo de la pendiente en este instante. Para los casos de ejemplos simples en suelos homogéneos, los resultados encontrados para el método de incremento de esfuerzos y para el de reducción de la resistencia son coincidentes (Swan y Seo, 1999). El empleo de uno u otro método dependerá de los factores que influyen en la estabilidad, por ejemplo, un decremento de la resistencia del suelo o un incremento de las fuerzas másicas. Por ello, el método del incremento de esfuerzos se emplea, generalmente, como variante del método pseudo-estático para determinar el coeficiente sísmico crítico (Loukidis y et al., 2005; Bojorque y et al., 2007; Shukha y Baker, 2008). El coeficiente sísmico indica el valor máximo al que se podría incrementar la fuerza horizontal hasta que la pendiente colapse.

10.3.3 Método Límite Mejorado

En el método límite mejorado los resultados obtenidos en un análisis de esfuerzos por medio de elementos finitos son utilizados para aplicar las ecuaciones de equilibrio en un análisis de equilibrio límite (Farias y Naylor, 1998; Fredlund y et al., 1999; Krahn, 2003). Los pasos básicos que se siguen en el presente método son: (i) realizar un análisis de esfuerzos por medio de elementos finitos usando características de un material elástico-lineal o elasto-plástico; (ii) suponer una superficie de falla; (iii) dividir la masa sobre la superficie de falla en dovelas; (iv) calcular los esfuerzos normales y de corte a lo largo de la superficie de falla; (v) emplear los esfuerzos normales y parámetros de

resistencia para calcular la resistencia al cortante a lo largo de la superficie de falla; y (vi) determinar el factor de seguridad global. En la figura 23 se presenta el esquema descrito anteriormente.

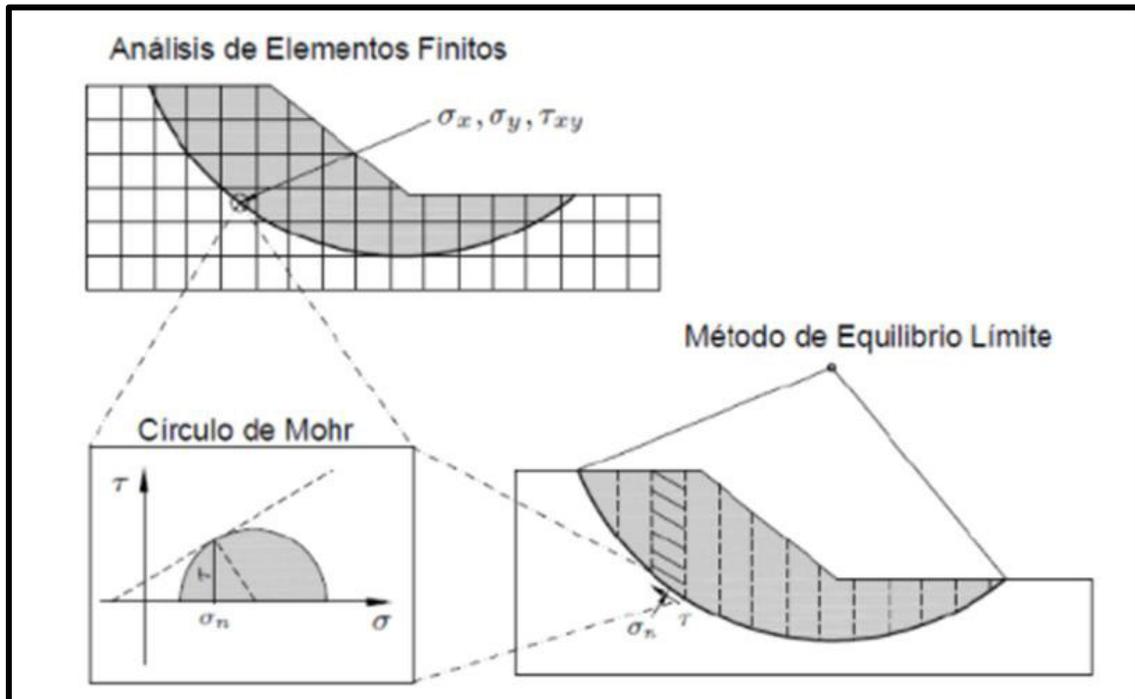


Figura 23 Esquema del Método Límite Mejorado (modificado de Fredlund y Scoular, 1999).

El factor de seguridad se determina como la integral de la resistencia actual del material (τ_i) sobre la integral de la resistencia al fallo (τ_{fi}). Al emplear las dovelas, la integral es sustituida por la sumatoria de cada dovela:

$$F_S = \frac{\int \tau_i * dL}{\int \tau_{fi} * dL} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i * L_i}{\sum_{i=1}^n \tau_{fi} * L_f}$$

donde, n es el número total de dovelas e i representa la dovela analizada.

Del análisis por elementos finitos se determinan los esfuerzos horizontales, verticales y de corte, σ_x , σ_y , y σ_{xy} , por lo que es necesario transformarlos a

esfuerzos normales (σ_n) y cortantes (τ) actuando a lo largo de la potencial superficie de falla.

$$\sigma_n = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos(2\alpha_i) - \tau_{xy} \sin(2\alpha_i)$$

$$\tau = \tau_{xy} \cos(2\alpha_i) - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin(2\alpha_i)$$

donde, α_i es el ángulo de la base de la dovela con respecto al eje x, este ángulo es tomado desde el centro de cada dovela. Al igual que en los métodos de equilibrio límite, la superficie de falla crítica se determina imponiéndose una nueva superficie potencial y repitiendo los pasos anteriores hasta determinar la superficie que dé el menor factor de seguridad.

10.4 Factor de Seguridad

El Factor de seguridad (FOS, por sus siglas en inglés) se utiliza para determinar el nivel de amenaza de una pendiente expuesta y considera su comportamiento en condiciones desfavorables. El FOS se define de varias formas, la mayoría de ellas se basan en el estudio del equilibrio de un elemento y las fuerzas que actúan sobre él. Asimismo, se define como la relación entre la resistencia cortante de los materiales existentes en el talud y los esfuerzos críticos producidos por una potencial superficie de falla.

$$FOS = \frac{\text{Total Stress Strength}}{\text{Required Shear Strength}}$$

Cuando se trata de superficies circulares en las que intervienen momentos de resistencia y de actuación, la ecuación anterior toma la siguiente forma:

$$\text{FOS} = \frac{\text{Resisting moment}}{\text{Overturning moment}}$$

La mayoría de los métodos de análisis de FOS se basan en el criterio de falla de Coulomb, donde se satisface un equilibrio a lo largo de una superficie de falla dada. Esta superficie se puede analizar como un bloque o se puede dividir en rodajas, en cuyo caso se analiza la ecuación para cada una de las partes divididas. Como resultado, la ecuación de FOS se puede expresar como:

$$\text{FOS} = \frac{\sum \text{Resisting force}}{\sum \text{Mobilized force}}$$

Para valores de FOS inferiores a uno, existe la posibilidad de que la pendiente colapse. Por este motivo, se recomienda adoptar márgenes de seguridad que proporcionen una inclinación de la pendiente definida por un FOS mayor que uno.

10.5 FLAC 3D

FLAC3D (Análisis Lagrangiano Rápido de Continua en 3 Dimensiones) es un software de modelado numérico para análisis geotécnicos de suelo, roca, agua subterránea, construcciones y soporte del suelo. Dichos análisis incluyen diseño de ingeniería, factor de predicción de seguridad, investigación y pruebas, y análisis retrospectivo de fallas.

FLAC3D utiliza una formulación explícita de volumen finito que captura los comportamientos complejos de los modelos que constan de varias etapas, muestran grandes desplazamientos y deformaciones, exhiben un comportamiento de material no lineal o son inestables (incluidos casos de rendimiento / falla en áreas grandes o colapso total).

El análisis continuo se puede aplicar al diseño de ingeniería de excavaciones civiles, mineras y geotécnicas (por ejemplo, pendientes, túneles, cavernas, rebajes, etc.) y construcciones (presas, cimientos, zapatas, muros, etc.) en suelo, roca intacta, y macizos rocosos (es decir, rocas muy articuladas). Mediante el uso de interfaces, FLAC3D también puede simular discontinuidades como fallas, juntas, planos de cama y límites diseñados a lo largo de las construcciones. Considere 3DEC para simulaciones en terreno en bloques o si hay muchas más de 20 fallas discretas, uniones o planos de estratificación en su modelo numérico.

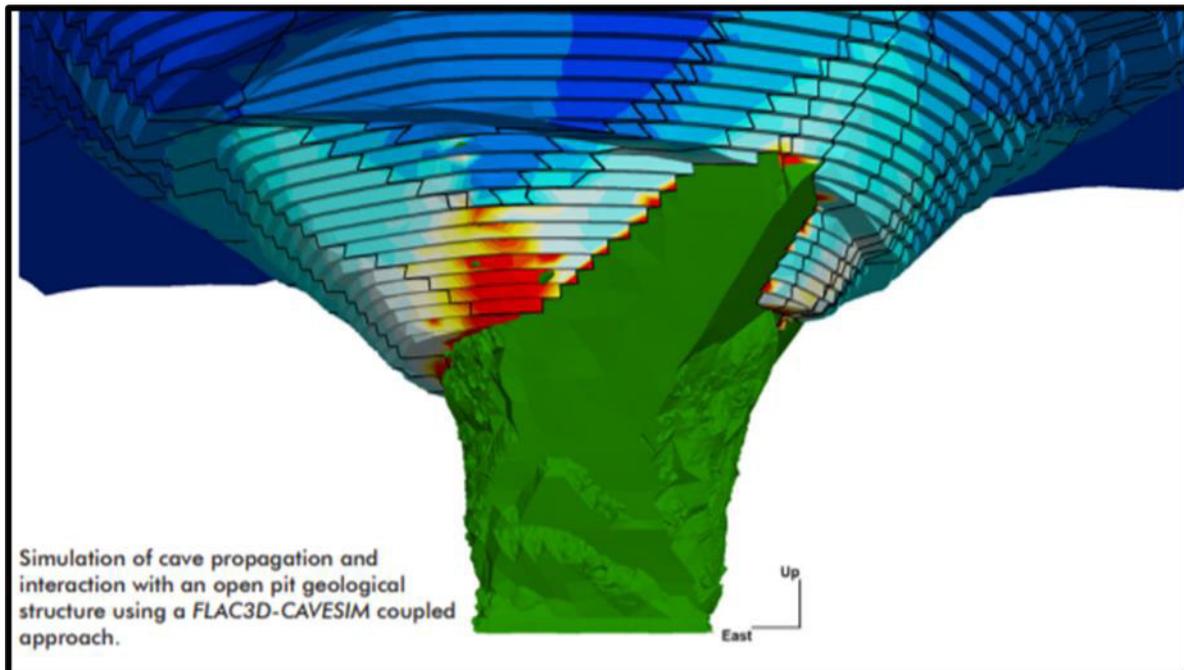


Figura 24 Simulación de la propagación e interacción de una cueva con una estructura geológica a cielo abierto utilizando un enfoque acoplado *FLAC3D-CAVESIM*.

11. Metodología

11.1 Determinación de propiedades geotécnicas de la roca intacta

Se determinaron las propiedades geotécnicas de la roca intacta mediante la realización de ensayos de laboratorio que ejecutó la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil (GEIC) en las probetas de roca. Los ensayos se enuncian a continuación:

- Resistencia a la compresión uniaxial con obtención del módulo tangente al 50% de la resistencia a la compresión uniaxial.
- Resistencia a la compresión triaxial no drenada con obtención del módulo tangente al 50% de la resistencia a la compresión triaxial.
- Resistencia a la tensión indirecta (ensaye brasileño).

Roca	Formacion	Tipo de prueba.		
		RCU	RTI	RCT
CALIZA	Tepexic	2	1	3
ARENISCA	Huayacocotla	4	2	6
INTRUSIVO	Terciario intrusivo	7	5	5
CZ_MN	Chipoco	14	10	14
LIMOLITA	Tepexic	9	7	8
	Huayacocotla	8	3	6
	Santiago	10	7	11

Tabla 4 Número de muestras de roca enviadas al laboratorio de mecánica de rocas de la GEIC.

Con los resultados del estudio que se agrega como anexo, “Reporte de ensayos de laboratorio de mecánica de rocas para la compañía Minera Autlán S.A. de C.V.”, se realizó la evaluación de propiedades para las UGT.

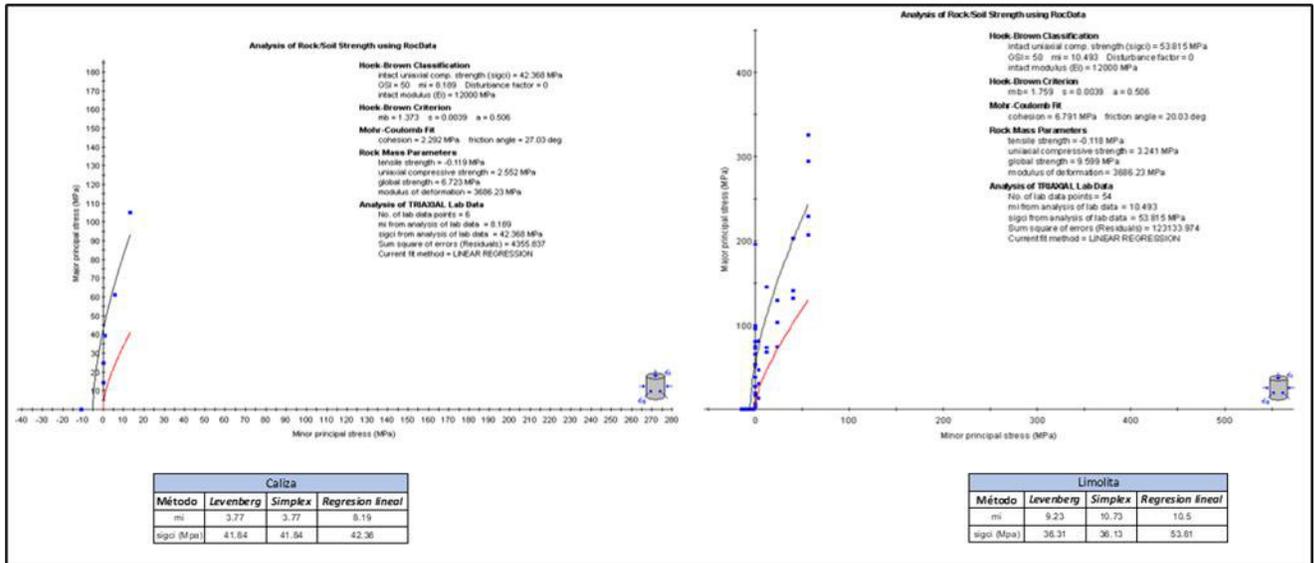


Figura 25. Resultados evaluación de propiedades.

11.2 Determinación de propiedades geotécnicas del macizo rocoso

En general el macizo presenta las siguientes condiciones: se observa una separación de las fracturas de 0.5 m a 1.20 m abiertos, con una continuidad mayor de 10 m, las paredes de las discontinuidades son rugosas y secas.

Con base al levantamiento se realizó una clasificación del macizo rocoso con el método: Geotechnical Strength Index (GSI).

UGT		Propiedades			
		Densidad (ton/m ³)	UCS (Mpa)	mi	GSI
1	JmT	2.65	65.00	15.00	30
2	JiH	2.70	64.96	8.00	45
3	Ti	2.00	52.30	8.31	60
4	JsCh	3.15	102.14	11.00	40
5	JsS	2.65	50.77	6.42	35

Tabla 5 Propiedades estimadas para la UGT'S del modelo en 3D.

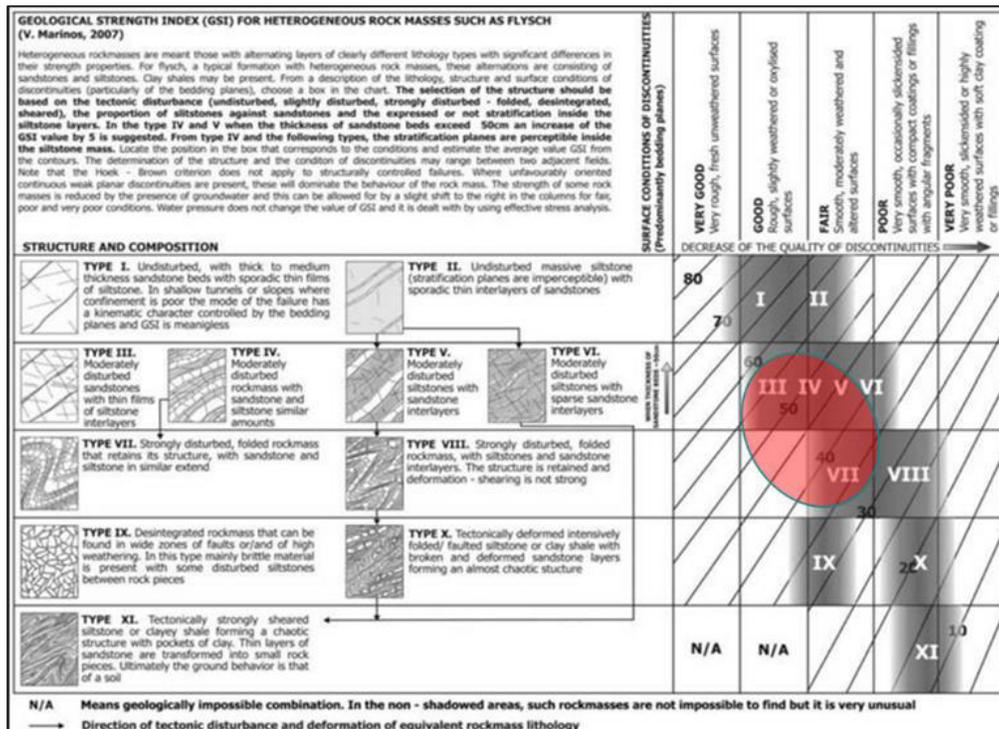


Figura 26. Propiedades estimadas con el criterio GSI marino 2002, debido a las características estratificadas de los modelos

11.3 Parámetros de diseño del Tajo

Los parámetros generales de diseño de taludes para el diseño del tajo de la mina Naopa 2019 son:

- Altura del banco: 10 m
- Ángulo de la cara del banco (BFA): 70 °
- Ancho de berma entre bancos: 4 m
- Ángulo medio entre rampas (IRA): 52 °
- Berma de seguridad: 8 metros cada 6 bancos
- Pendiente rampas: 10%
- Ancho de rampa: 15 metros

11.4 Modelización 3D

Para llevar a cabo los análisis numéricos se recurrió a la modelización del tajo vía diferencias finitas, con modelos de más de 250,000 elementos tipo “Cuadrilateral”, e interfaces físicas (explicit joints) para el caso de las fallas geológicas.

Los modelos consideraron las topografías del Pit actual y final, el software utilizado para este análisis es el FLAC3D de la firma Itasca®.

11.5 Desarrollo topográfico 3D

La malla generada, se basó en la topografía de la Unidad Naopa (Figura 27), el nivel de detalle de la malla se observa en la Figura 28.

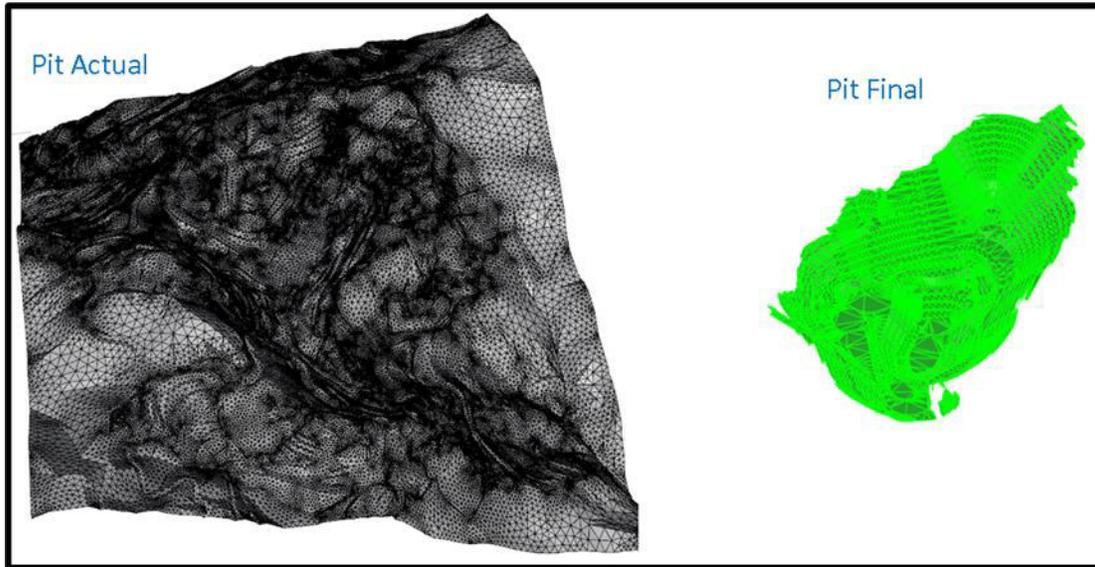


Figura 27. Topografías del Pit actual y final

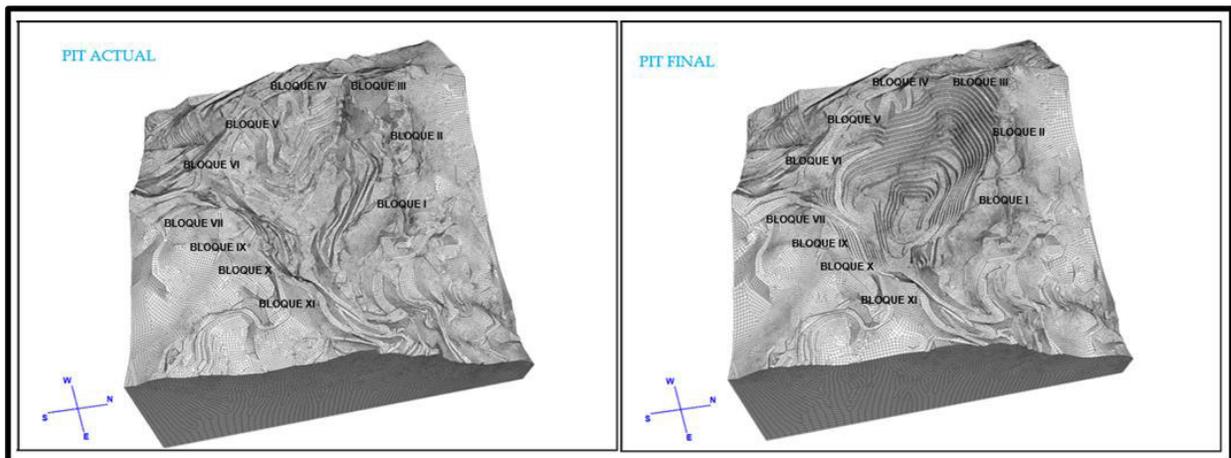


Figura 28. Mallado del Open Pit

11.6 Incorporación de discontinuidades explícitas (fallas geológicas)

Las fallas geológicas muestran formas sinusoidales, distintas a las discontinuidades típicas, esto debido a las condiciones del sitio y los plegamientos propios de las UGT. Las características de estas fallas se muestran en la figura 29.

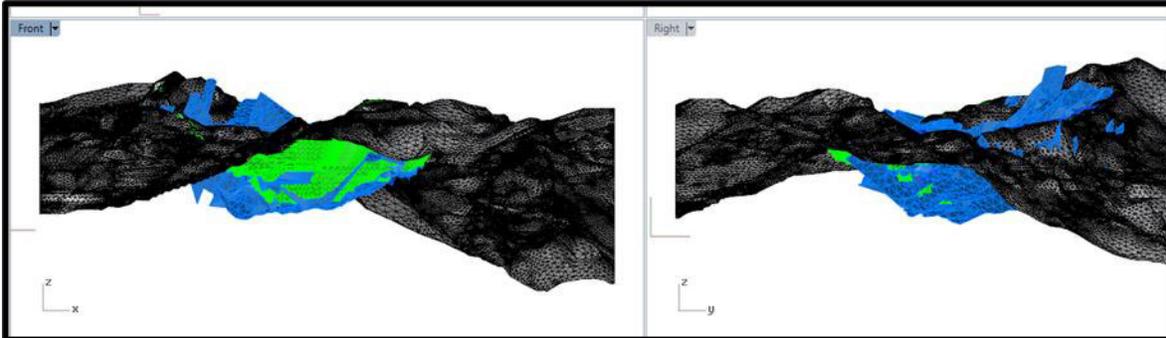


Figura 29. Formas de las discontinuidades Tajo Naopa

Para poder modelar este tipo de discontinuidades, se recurrió a un mallador, el cual permite representar íntegramente las características morfológicas de las discontinuidades. Las fallas modeladas se muestran en la figura 30.

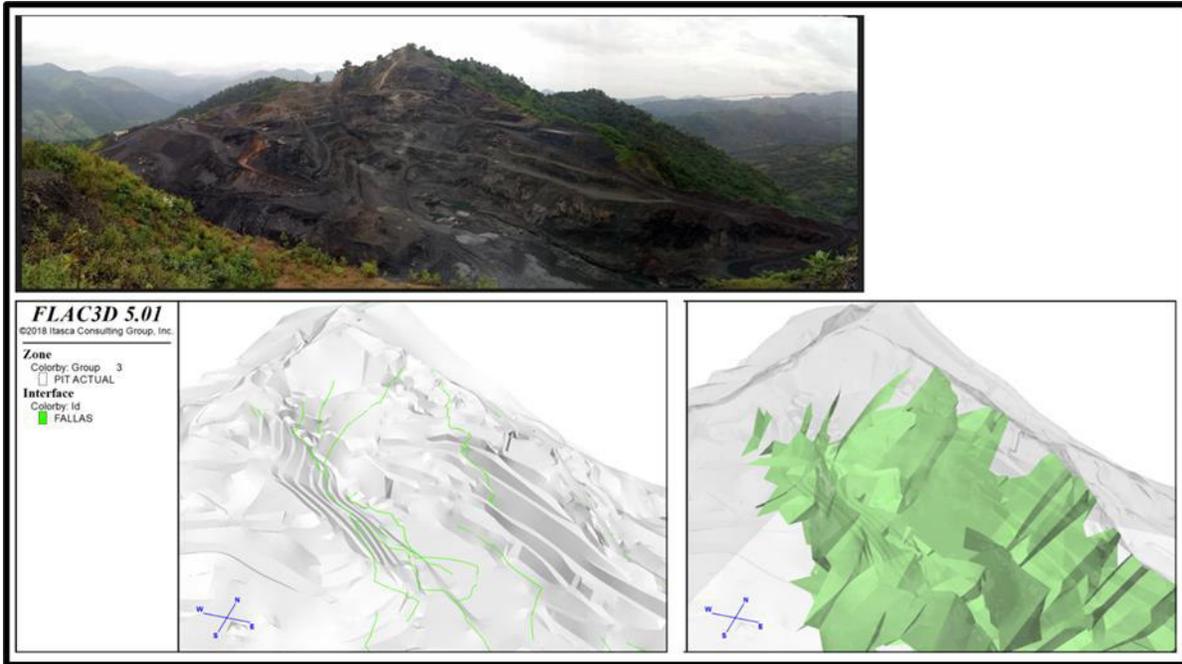


Figura 30. Ejemplo de las discontinuidades integradas al modelo 3D

En las figuras 31 y 32 se muestran los modelos del Pit Actual y Final con las discontinuidades incorporadas.

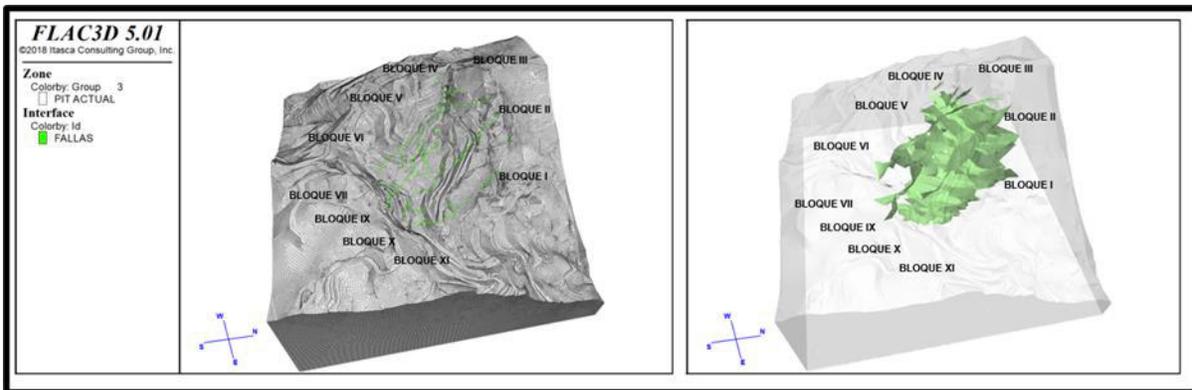


Figura 31. Discontinuidades integradas al modelo 3D en Pit Actual

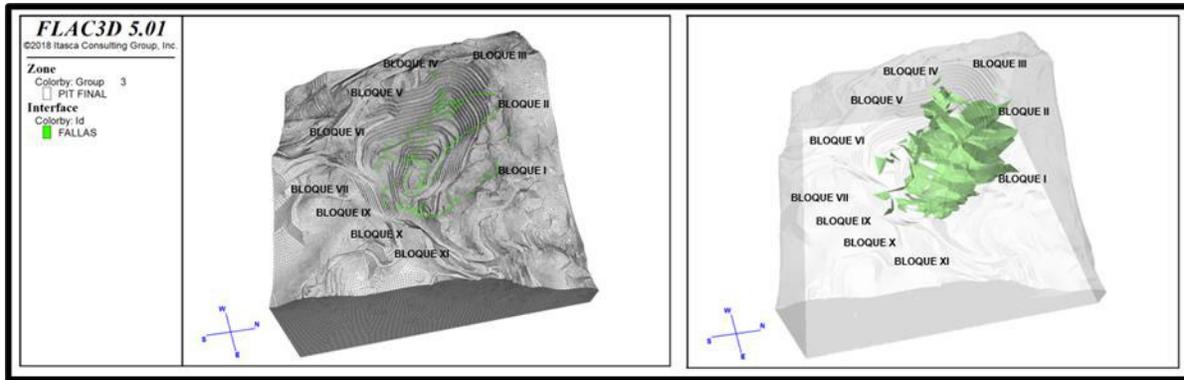


Figura 32. Discontinuidades integradas al modelo 3D en Pit Final

11.7 Incorporación de las UGT's y zona de daño

Con base en el modelo litológico del Tajo Naopa se incorporaron las UGT's al modelo numérico 3D, de acuerdo con las condiciones del sitio los plegamientos de cada unidad muestran una geometría SINUSOIDAL.

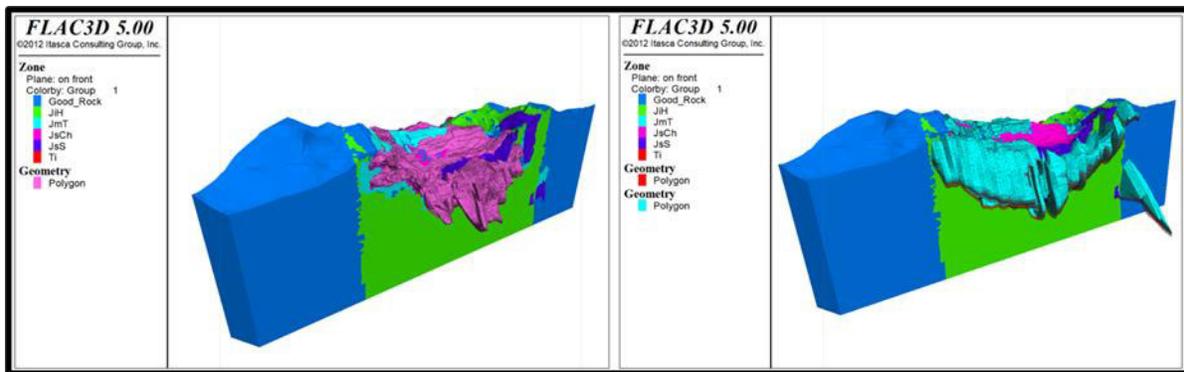


Figura 33. Polígonos de definición de UGT's, detalle volumétrico, nótese la geometría SINUSOIDAL de las formas Plegadas de cada Unidad

Las propiedades resistentes de las unidades geotécnicas utilizadas en estas modelizaciones se muestran en la Tabla 5.

Para incorporar los efectos de daño por voladura se ha recurrido a las recomendaciones propuestas por Hoek & Karzulovic (2000) en el documento “Blast Damage Factor D” considerando una altura de banco (H) de 10 metros y voladuras de gran producción con poco o nulo control y cara libre, dando como resultado una profundidad de zona de daño de 20 metros, como se observa en la figura 34.

Debido a la calidad de la roca y el tipo de voladura, el factor de daño por voladura a considerar será de $D=0.7$ dentro de la franja de daño calculada con anterioridad.

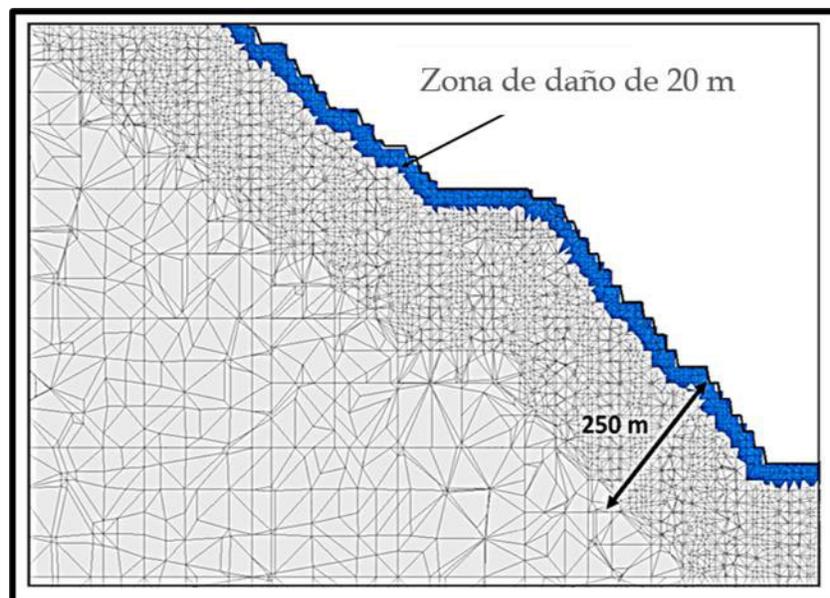


Figura 34. Perfil de ancho de zona de daño por tronadura y de la zona de mayor densificación

La consideración del nivel de daño provocado por voladura reducirá aproximadamente un 50% de la resistencia del macizo rocoso, considerando que la calidad de roca presenta aproximadamente un 21% a 25% de la resistencia uniaxial de la roca intacta (figura 35).

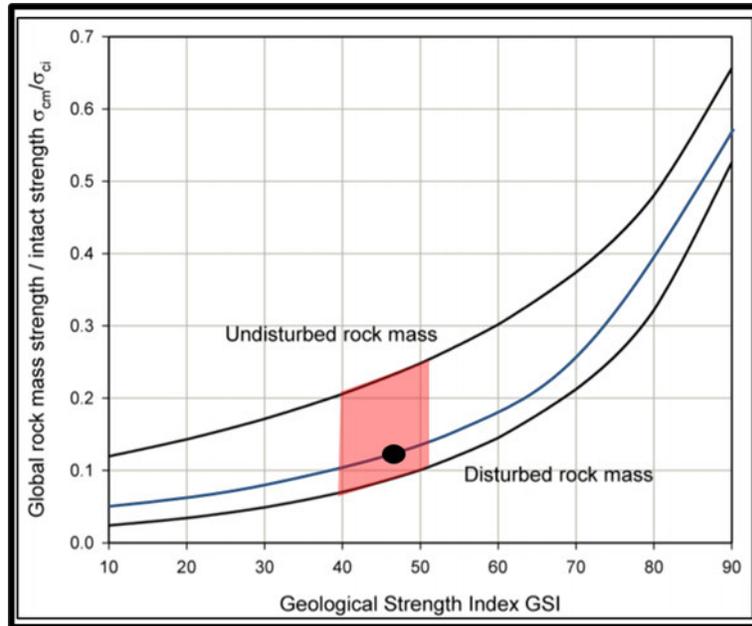


Figura 35. Estimación efecto daño en resistencia del macizo rocoso, Hoek, E. (2012).

En la figura 36 se muestran 2 vistas isométricas del Pit inicial considerando la distribución de UGT y las zonas de Daño.

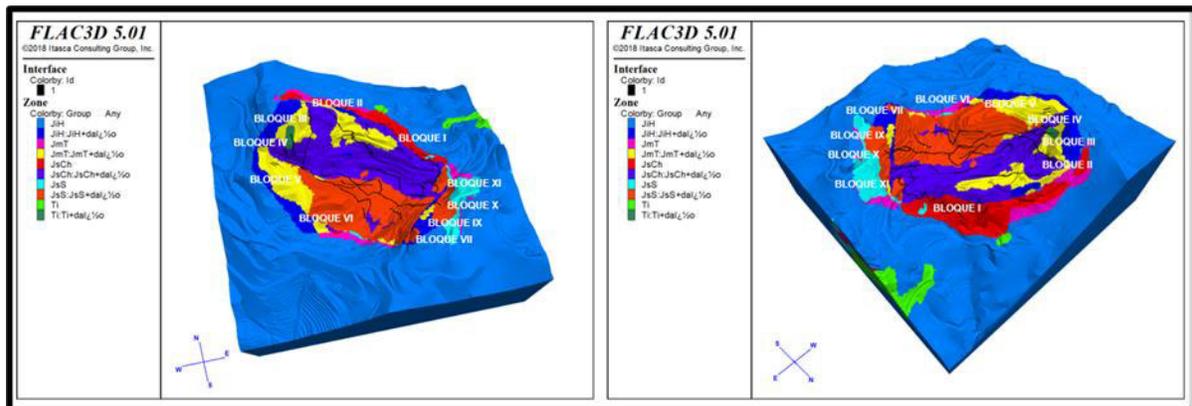


Figura 36. Distribución de UGT en Pit Actual

En la figura 37 se muestran 2 vistas isométricas del Pit final considerando la distribución de UGT y las zonas de Daño.

En la figura 40 se muestra una posible interpretación para este mecanismo de inestabilidad, así como en el modelo numérico la localización de la inestabilidad es puntual respecto al conjunto de bancos.

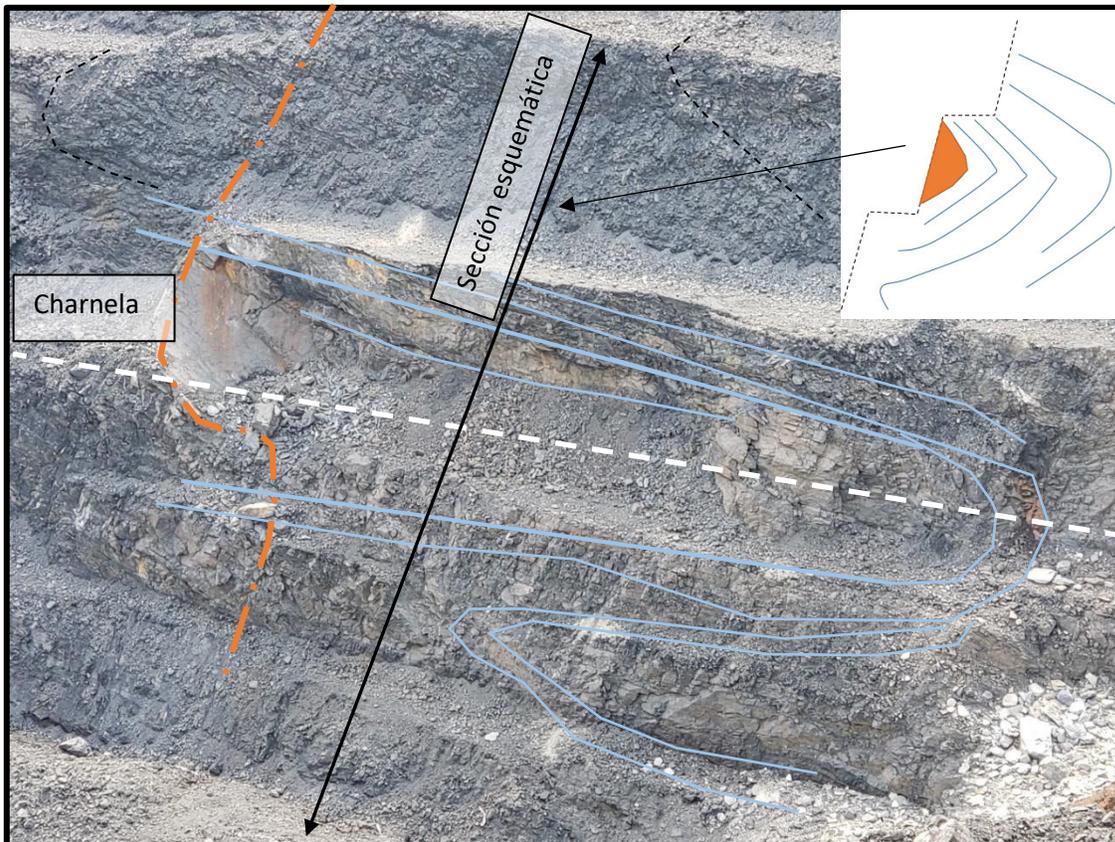


Figura 40. Detalle de la interpretación de posible inestabilidad.

Este mecanismo de falla fue el único que se encontró en los taludes que actualmente están terminados, no se observa incremento en el tamaño de esta inestabilidad aun cuando los bancos inferiores han seguido avanzando dejando a un lado las lluvias estacionales en sitio y los efectos asociados a la tronadura.

11.9 Falla de talud en materiales de mala calidad

En la zona norte se desarrolló una vez avanzada la excavación una inestabilidad, la cual se encuentra contenida por materiales de muy mala calidad. En la figura 41, se observa un detalle de esta zona.

En este caso se reconoce que estos taludes son producto de una mala ejecución de minado, al no respetar la geometría planeada, además, de un mal trabajo de voladura.



Figura 41. Falla del talud en material de mala calidad

12. Resultados

En la figura 42 y 43 se muestran los factores de seguridad en escala de 1 a 1.3 en la izquierda y escala de 1 a 3 a la derecha correspondientes al Pit actual, se puede ver que no existen zonas inestables menores a uno siendo congruente con la condición actual del Pit y justificando las propiedades determinadas en la clasificación geomecánica. En la figura 44 se muestra un perfil en la zona donde se detecta el menor factor de seguridad correspondiente a 1.45.

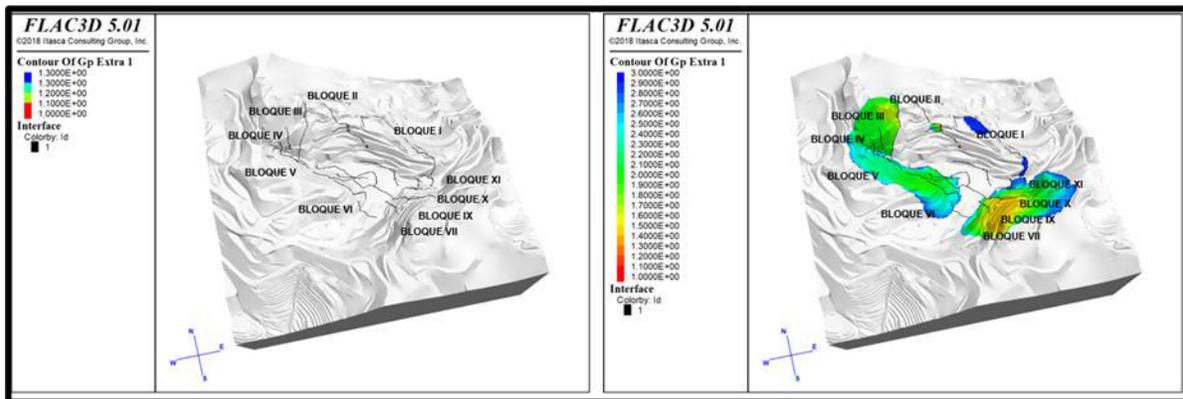


Figura 42. Factor de seguridad Pit actual; Derecha escala 1 a 1.3, Izquierda escala 1 a 3.

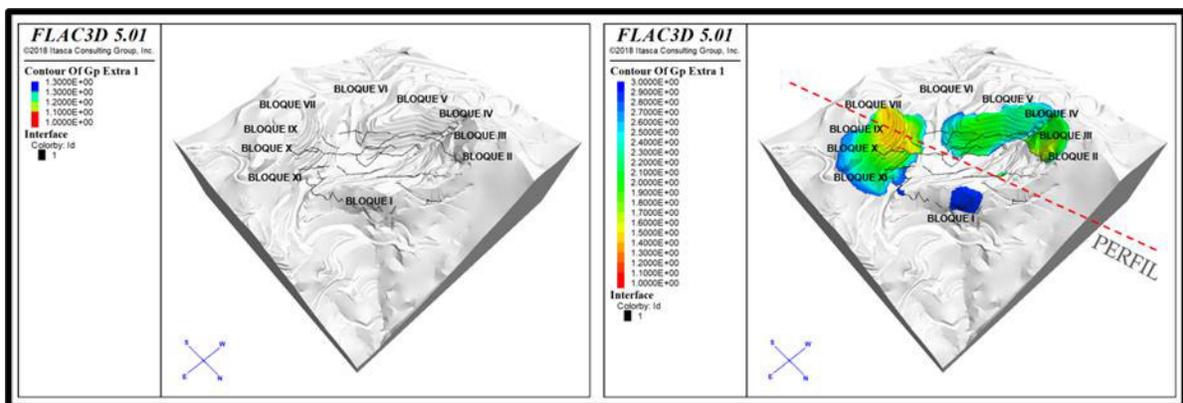


Figura 43. Factor de seguridad Pit Actual; Derecha escala 1 a 1.3, Izquierda escala 1 a 3.

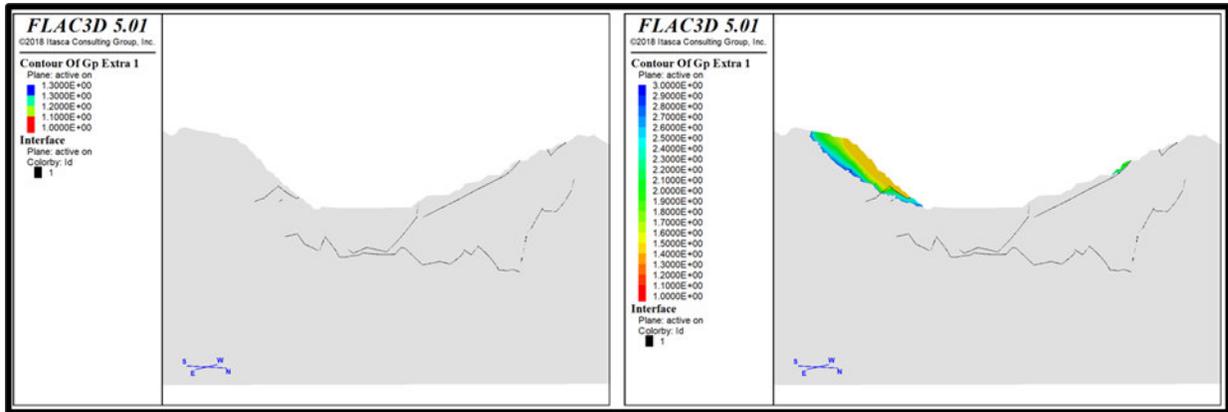


Figura 44. Factor de seguridad Pit Actual; Derecha escala 1 a 1.3, Izquierda escala 1 a 3.

En la figura 45 se puede observar el menor factor de seguridad está asociado a la zona de daño.

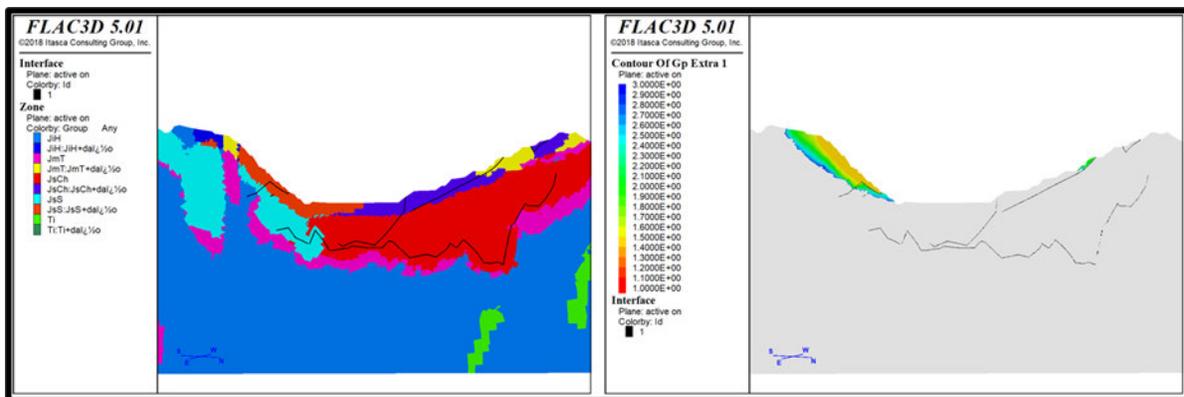


Figura 45. Factor de seguridad Pit Actual; Derecha UGT, Izquierda escala 1 a 3.

Respecto al Pit final en la figura 46 se encontraron cuatro zonas con factores de seguridad menores a 1.3. Este factor de acuerdo con los estudios elaborados en sitio se determinó como mínimo aceptable por parte de la consultora. En la figura 47 se detalla una inestabilidad en el sector Noreste la cual se asocia a la presencia de fallas geológicas en el pie del talud y a la ruptura de matriz de la unidad JsCh cuando esta es afectada por voladura Figura 48.

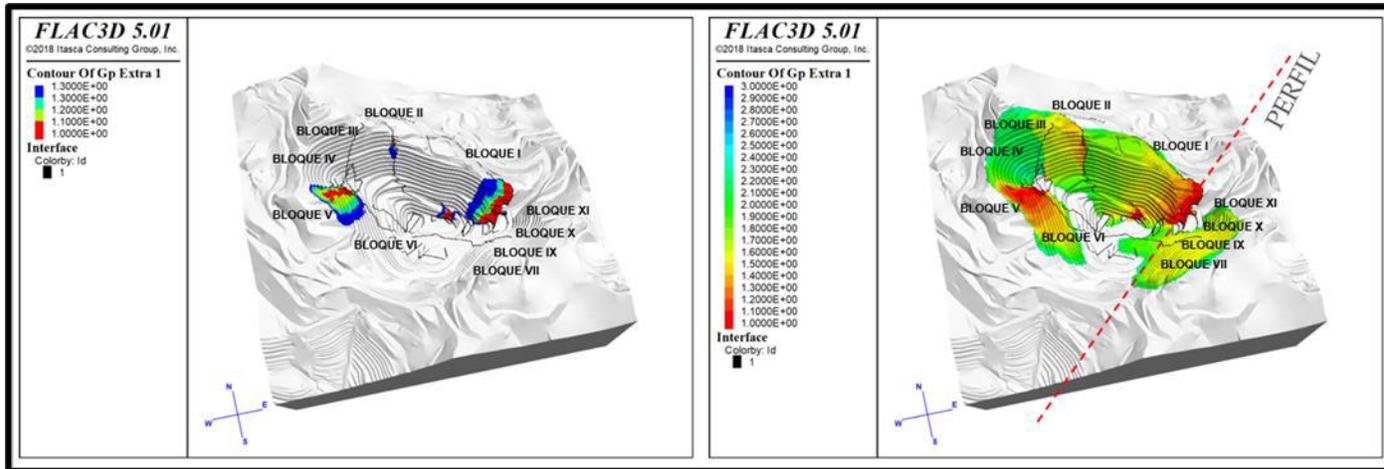


Figura 46. Factor de seguridad Pit Final; Derecha escala 1 a 1.3, Izquierda escala 1 a 3.

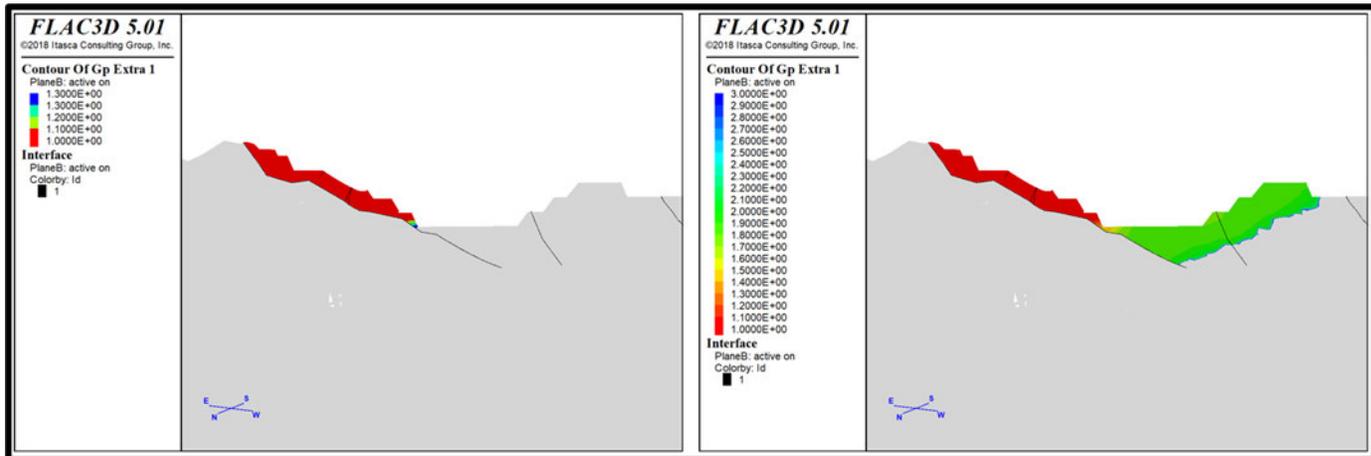


Figura 47. Factor de seguridad Pit Final; Derecha escala 1 a 1.3, Izquierda escala 1 a 3.

La inestabilidad de mayor tamaño se detectó en el sector Noroeste con factor de seguridad menor a 1.1 (Figura 48). Esta inestabilidad se asocia a la presencia de fallas geológicas en el pie del talud y a la ruptura de matriz de las unidades JsS y JmT cuando estas están afectadas por voladura figura 49 y 50.

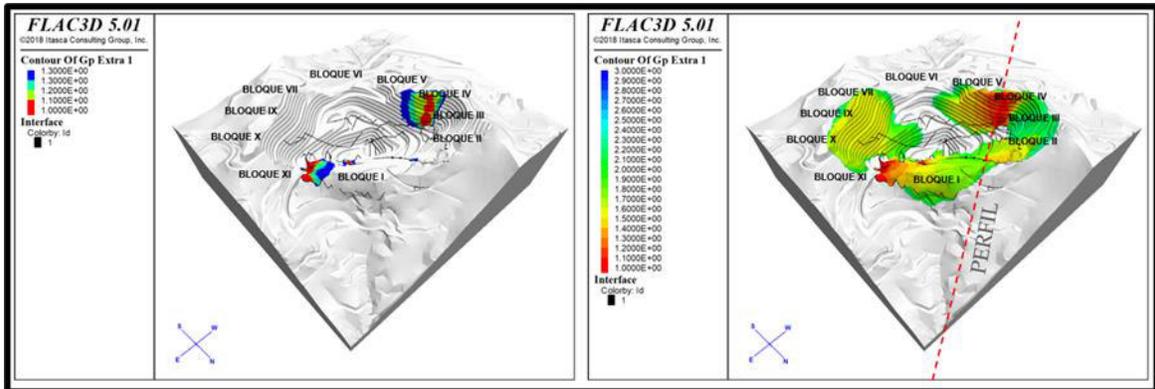


Figura 48. Factor de seguridad Pit Final; Derecha escala 1 a 1.3, Izquierda escala 1 a 3.

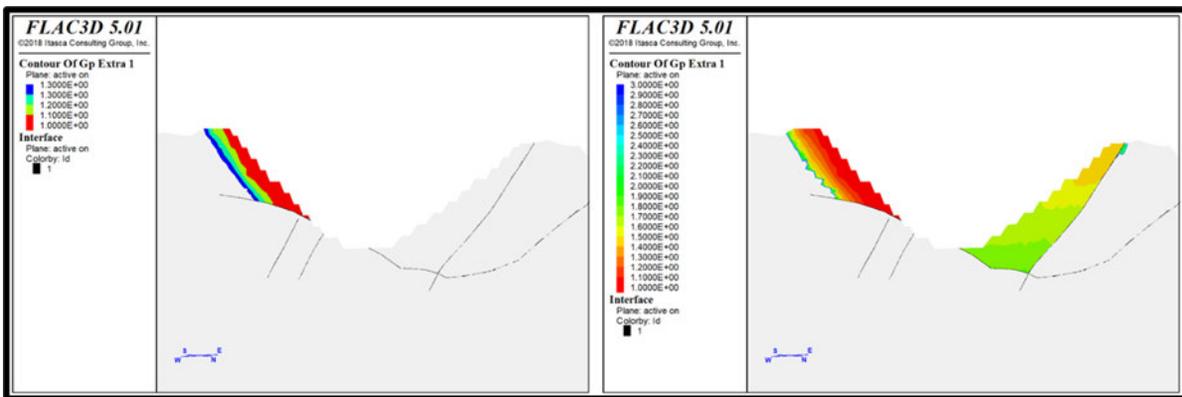


Figura 49. Factor de seguridad Pit Final; Derecha escala 1 a 1.3, Izquierda escala 1 a 3.

13. Conclusiones

Los resultados de los análisis actuales; refleja que con las propiedades estimadas se logra un nivel de estabilidad aceptable (FS min = 1.45) para este escenario, las prácticas y geometrías actuales (70° talud por banco y 45° talud general) resultan satisfactorias e inclusive se podría optimizar buscado un FS = 1.3.

El resultado del Pit Final muestra que el mapeo de las discontinuidades actuales, desarrollan cuatro inestabilidades de 3, 7 y hasta 9 bancos, en combinación con la rotura del macizo rocoso; este nivel de inestabilidades, no aceptable para las actividades de explotación, pudiendo generar problemáticas en etapas previas al Pit final.

A partir de la información mostrada se concluye que la condición geológica geotécnica que queda expuesta en la mina no complica el desarrollo de los bancos, esto queda evidenciado en las pocas inestabilidades a nivel de banco encontradas, la importancia secundaria de la anisotropía (influencia estructural) y calidad roca.

Se reconoce que las metodologías existentes en las guías para diseño de taludes en minas consideran de forma escasa situaciones geológicas, como en la mina Naopa, por lo que, a la luz de mejorar los criterios de análisis y diseño, se planteará y aplicará una metodología dirigida a Open Pits con las características del Tajo Naopa.

En cuanto al proceso de excavación, actualmente en desarrollo y con la finalidad de mejorar las prácticas de tronadura, se recomienda que la excavación se desarrolle paralela a la dirección preferencial de las charnelas (NW), esto permitirá abatir los pliegues en la dirección más favorable para la estabilidad de la excavación.

14.Recomendaciones

Las recomendaciones son las siguientes:

- a) Evaluar la influencia del daño por voladura por métodos numéricos y en caso de aplicar, disminuir por medio de pre-corte el daño de la roca por voladura en el Pit.
- b) Monitorear las zonas detectadas en esta modelización en el avance del Pit, en términos de desplazamientos.
- c) Mantener un mapeo geológico y barrenación conforme exista avance de la excavación a fin de validar la geología estructural a escala de Pit.
- d) Desarrollar modelos con los resultados del monitoreo (Desplazamientos y variaciones geológicas) con fines de evaluación preventiva.
- e) Realizar pruebas de corte en las distintas estratificaciones para generar un modelo anisótropo y en dicho modelo, evaluar su estabilidad.
- f) Proponer geometrías distintas de avance de Pit con distintos ángulos interrampa, a fin de determinar una mejor geometría de explotación reduciendo las zonas inestables.

15. Referencias Bibliográficas

- Bojorque-Iñiguez, J. (2011). Métodos par el análisis de la estabilidad de pendientes. *MASKANA*, 1-16.
- Buelga-Gonzalez, M., Gutiérrez-Claverol, M., Rodríguez-Bouzo, L., & Torres-Alonso, M. (1996). Comportamiento geomecánico de materiales paleozoicos bajo compresión triaxial (Zona Cantábrica, Macizo Ibérico). *GEOGACETA*, 1328-1330.
- Buitrón-Sánchez, B., López-Lara, O., Vachard, D., & Hernández-Barroso, A. (2017). Algunos crinoides (Echinodermata-Crinoidea) del Pérmico de la región. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 21-34.
- Cantú-Chapa, A. (1971). La Serie Huasteca (Jurásico Medio-Superio) del Centro-Este de México. *Revista del Insituto Mexicano del Petróleo*, 17-40.
- Carrillo-Bravo, J. (1965). Estudio Geológico de una parte del Anticlinorio de Huayacocotla. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, XVII(5-7), 73-96.
- Geyne, A., Fries, C., Segestrom, L., Black, R., & Wilson, J. (1963). Geology and mineral deposits of the Pachuca-Real del Monte district, State of Hidalgo, Mexico. *Consejo de Recursos Naturales no Renovables*, 203p.
- Gurruchaga R., D., & Viscarra A., F. (2020). Slope stability analysis by finite elements: A case study in La Paz-Bolivia. *Inv. y Des.*, 99-111.
- Heim, A. (1926). Notes on the Jurassic of Tamazunchale (Sierra Madre Oriental, México). *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 20(1), 84-87.
- Hermoso de la Torre, C., & Martínez-Pérez, J. (1972). Medición detallada de formaciones del Jurásico Superior en el frente de la Sierra Madre Oriental. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 24(1-3), 45-63.
- Imlay, R., Cepeda, E., Álvarez, M., & Díaz, T. (1948). Stratigraphic relations of certain Jurassic Formations in Eastern Mexico. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 1750-1761.
- Itasca. (2021). *Flac3D*. Obtenido de <https://www.itasca.cl/software/flac3d>
- Li, D., & Wong, L. (2013). The Brazilian Disc Test for Rock Mechanics Applications: Review and New Insights. *Rock Mech Rock Eng*, 269-287.
- López Ramos, E. (1981). Paleografía y tectónica del Mesozoico de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 158-177.

- López-Rubio, J. (1956). Generalidades sobre la geología del Oriente del México. *XX Congreso Geológico Internacional*, 13-26.
- Marinos, P., Marinos, V., & Hoek, E. (2007). The Geological Strength Index (GSI): A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses. *Underground works under special conditions*, 13-21.
- Marinos, V., Fortsakis, P., & Prountzopoulos, G. (2006). Estimation of rock mass properties of heavily sheared flysch using data from tunnelling construction. *The Geological Society of London*, 1-12.
- Ochoa-Camarillo, H. (1996). Geología del Anticlinorio de Huayacocotla en la región de Molango, Estado de Hidalgo. *Tesis de Maestría en Ciencias (Geología)*, 91p. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, División de Estudios de Posgrado.
- Ochoa-Camarillo, H., Buitrón, B., & Silva-Pineda, A. (1998). Contribución al conocimiento de la bioestratigrafía, paleoecología y tectónica del Jurásico (Anticlinorio de Huayacocotla) en la región de Molango, Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 57-63.
- Ochoa-Quesada, A., Cartaya-Pires, M., & Blanco-Blázquez, J. (2020). Clasificación geomecánica óptima para evaluar el macizo rocoso en el frente de arranque del Tramo IV del túnel Levisa-Mayari. *Minería y Geología*, 50-64.
- Okita, P. (1992). Manganese Carbonate Mineralization in the Molango District, Mexico. *Economic Geology*, 1345-1366.
- Padilla y Sánchez, R. (2007). Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 19-42.
- Rivas-Cruz, F., & Contreras-López, E. (s.f.). Sistema de Adquisición de Datos Automatizado para Pruebas Mecánicas Uniaxial y Triaxial. *VII Semana Nacional de Ingeniería Electrónica*, (págs. 218-227).
- Robin, C., & Bobier, C. (1975). Las fases del vulcanismo en la región de Tlanchinol (Hidalgo, México), según datos paleomagnéticos y geoquímicos. *Boletín del Instituto de Geología*, 49-85.
- Rosales-Lagarde, L., Centeno-García, E., Dostal, J., Sour-Tovar, F., Ochoa-Camarillo, H., & Quiroz-Barroso, S. (2010). The Tuzancoa Formation: Evidence of an Early Permian Submarine Continental Arc in East-Central Mexico. *International Geology Review*, 901-919.

ANEXO 1

TABLAS RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYES MECÁNICOS

ROCA	CODIGO DE MUESTRA	PROFUNDIDAD EN m	FORMACIÓN	PROYECTO	Diámetro en cm	Peso volumétrico en kN/m ³	Contenido de agua en %	Modo de falla	Resistencia a la compresión uniaxial (RCU) en MPa	Módulo tangente al 50% de la RCU en MPa	Resistencia a la tensión indirecta en MPa	Resistencia a la compresión triaxial (RCT) en MPa	Esfuerzo confinante en prueba de la RCT en MPa	Esfuerzo principal mayor en MPa	Módulo tangente al 50% de la RCT en MPa
CALIZA	NACS-19	68.46 A 68.65	TEPEKIC	NAOPA	4.75	26.32	0.41	Matriz	14.40	15501	-	-	-	-	-
CALIZA	NATH-06	51.40 A 51.50	TEPEKIC	NAOPA	4.75	26.21	0.15	Matriz	-	-	10.82	-	-	-	-
CALIZA	NAT-23	67.60 A 67.65	TEPEKIC	NAOPA	4.77	26.34	0.14	Matriz	-	-	-	0.95	39.40	8.187	-
CALIZA	NAT-22	67.87 A 68.00	TEPEKIC	NAOPA	4.75	26.24	0.36	Matriz	-	-	-	-	5.70	61.10	11.758
CALIZA	NAT-20	115.65 A 115.77	TEPEKIC	NAOPA	4.75	26.91	0.15	Matriz	-	-	-	13.30	105.20	14.969	-
CALIZA	NACS-20	76.08 A 76.25	TEPEKIC	NAOPA	4.75	26.78	0.08	Fisura	24.90	32293	-	-	-	-	-
ARENISCA	NACS-40	147.15 A 147.27	HUIYACOCOTLA	NAOPA	4.75	26.54	0.68	Matriz	32.70	11398	-	-	-	-	-
ARENISCA	NACS-42	141.10 A 141.23	HUIYACOCOTLA	NAOPA	4.75	28.19	0.36	Matriz	59.80	31001	-	-	-	-	-
ARENISCA	NACS-41	131.42 A 131.55	HUIYACOCOTLA	NAOPA	4.75	26.49	0.28	Matriz	104.60	39906	-	-	-	-	-
ARENISCA	NATH-24	98.95 A 99.10	HUIYACOCOTLA	NAOPA	4.74	25.75	0.31	Matriz	-	-	9.68	-	-	-	-
ARENISCA	NATH-21	161.09 A 161.22	HUIYACOCOTLA	NAOPA	4.75	26.90	0.43	Matriz	-	-	11.57	-	-	-	-
ARENISCA	NAT-44	158.40 A 158.65	HUIYACOCOTLA	NAOPA	4.76	26.46	0.33	Matriz	-	-	-	19.50	184.90	18.596	-
ARENISCA	NAT-38	200.05 A 200.20	HUIYACOCOTLA	NAOPA	4.76	27.53	0.41	Matriz	-	-	-	32.50	195.10	21.590	-
ARENISCA	NAT-42	167.27 A 167.40	HUIYACOCOTLA	NAOPA	4.75	27.13	0.61	Matriz	-	-	-	45.50	233.20	18.447	-
ARENISCA	NACS-44	179.22 A 179.35	HUIYACOCOTLA	NAOPA	4.75	27.29	0.33	Fisura	34.30	15501	-	-	-	-	-
ARENISCA	NAT-37	91.47 A 91.60	HUIYACOCOTLA	NAOPA	4.75	26.04	0.36	Fisura	-	-	-	3.30	74.70	14.850	-
ARENISCA	NAT-36	118.60 A 118.74	HUIYACOCOTLA	NAOPA	4.76	26.06	0.32	Fisura	-	-	-	9.80	115.00	12.701	-
INTRUSIVO	NACS-26	97.75 A 97.95	TERCARIO INTRUSIVO	SAN FRANCISCO	4.72	18.22	0.64	Matriz	16.00	4602	-	-	-	-	-
INTRUSIVO	NACS-25	92.55 A 92.75	TERCARIO INTRUSIVO	SAN FRANCISCO	4.75	20.29	3.29	Matriz	17.30	3287	-	-	-	-	-
INTRUSIVO	NACS-28	155.30 A 155.60	TERCARIO INTRUSIVO	SAN FRANCISCO	4.73	20.61	1.27	Matriz	44.70	13898	-	-	-	-	-
INTRUSIVO	NACS-27	101.97 A 102.15	TERCARIO INTRUSIVO	SAN FRANCISCO	4.73	20.74	0.37	Matriz	50.80	14671	-	-	-	-	-
INTRUSIVO	NCS-50	158.25 A 158.37	TERCARIO INTRUSIVO	SAN FRANCISCO	4.74	21.68	0.84	Matriz	85.90	20270	-	-	-	-	-
INTRUSIVO	NATH-13	141.90 A 142.00	TERCARIO INTRUSIVO	SAN FRANCISCO	4.74	17.93	0.94	Matriz	-	-	2.21	-	-	-	-
INTRUSIVO	NATH-12	57.09 A 57.20	TERCARIO INTRUSIVO	SAN FRANCISCO	4.74	19.10	1.29	Matriz	-	-	4.94	-	-	-	-
INTRUSIVO	NATH-15	151.75 A 151.85	TERCARIO INTRUSIVO	SAN FRANCISCO	4.75	20.13	0.80	Matriz	-	-	6.80	-	-	-	-
INTRUSIVO	NATH-11	114.35 A 114.43	TERCARIO INTRUSIVO	SAN FRANCISCO	4.74	21.60	0.61	Matriz	-	-	7.80	-	-	-	-
INTRUSIVO	NATH-14	44.50 A 44.65	TERCARIO INTRUSIVO	SAN FRANCISCO	4.75	18.86	0.51	Matriz	-	-	10.43	-	-	-	-
INTRUSIVO	NAT-19	89.35 A 89.50	TERCARIO INTRUSIVO	SAN FRANCISCO	4.70	20.54	2.29	Matriz	-	-	-	9.60	82.30	9.226	-
INTRUSIVO	NAT-15	91.12 A 92.95	TERCARIO INTRUSIVO	SAN FRANCISCO	4.71	19.75	0.42	Matriz	-	-	-	16.00	97.10	10.172	-
INTRUSIVO	NAT-18	143.00 A 143.15	TERCARIO INTRUSIVO	SAN FRANCISCO	4.74	21.41	1.16	Matriz	-	-	-	22.40	149.70	11.608	-
INTRUSIVO	NACS-23	94.22 A 94.35	TERCARIO INTRUSIVO	SAN FRANCISCO	4.75	21.00	0.42	Fisura	52.90	20396	-	-	-	-	-
INTRUSIVO	NAT-16	90.35 A 90.59	TERCARIO INTRUSIVO	SAN FRANCISCO	4.74	20.39	1.06	Fisura	-	-	-	1.60	72.50	7.968	-
INTRUSIVO	NAT-17	50.00 A 50.25	TERCARIO INTRUSIVO	SAN FRANCISCO	4.76	18.43	0.51	Fisura	-	-	-	4.80	73.20	6.347	-



Resumen de resultados de los ensayos de laboratorio realizados para la Minera Autlán

Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil
Subgerencia de Geotecnia y Materiales
Departamento de Mecánica de Rocas e Inyecciones

ROCA	CODIGO DE MUESTRA	PROFUNDIDAD EN m	FORMACIÓN	PROYECTO	Diámetro en cm	Peso volumétrico en kNm ³	Contenido de agua en %	Modo de falla	Resistencia a la compresión uniaxial (RCU) en MPa	Módulo tangente al 50% de la RCU en MPa	Resistencia a la tensión indirecta en MPa	Resistencia a la compresión triaxial (RCT)		
												Esfuerzo confinante en prueba de la RCT en MPa	Esfuerzo principal mayor en MPa	Módulo tangente al 50% de la RCT en MPa
Cz_MN	NACS-09	61.43 A 61.60	CHPOCO	NADPA	4.75	32.80	0.16	Matriz	62.00	86115	-	-	-	-
Cz_MN	NACS-03	68.20 A 68.40	CHPOCO	NADPA	4.74	31.86	0.09	Matriz	67.30	21959	-	-	-	-
Cz_MN	NACS-07	54.90 A 55.10	CHPOCO	NADPA	4.75	31.82	0.34	Matriz	96.30	73813	-	-	-	-
Cz_MN	NACS-04	65.88 A 66.03	CHPOCO	NADPA	4.75	32.21	0.21	Matriz	106.30	61872	-	-	-	-
Cz_MN	NACS-05	42.23 A 42.39	CHPOCO	NADPA	4.75	33.01	0.09	Matriz	121.20	80910	-	-	-	-
Cz_MN	NACS-12	39.90 A 40.10	CHPOCO	NADPA	4.75	32.31	0.14	Matriz	130.60	35229	-	-	-	-
Cz_MN	NACS-01	48.15 A 48.30	CHPOCO	NADPA	4.75	32.12	0.24	Matriz	190.40	50087	-	-	-	-
Cz_MN	NACS-11	62.10 A 62.25	CHPOCO	NADPA	4.75	33.47	0.09	Matriz	194.30	81582	-	-	-	-
Cz_MN	NACS-10	59.83 A 60.00	CHPOCO	NADPA	4.75	33.56	0.08	Matriz	271.30	46502	-	-	-	-
Cz_MN	NATI-03	29.15 A 29.20	CHPOCO	NADPA	4.75	29.74	0.36	Matriz	-	-	3.73	-	-	-
Cz_MN	NATI-04	25.92 A 26.00	CHPOCO	NADPA	4.70	29.41	0.20	Matriz	-	-	9.55	-	-	-
Cz_MN	NATI-26	49.35 A 49.45	CHPOCO	NADPA	4.75	32.24	0.43	Matriz	-	-	9.62	-	-	-
Cz_MN	NATI-27	63.40 A 63.70	CHPOCO	NADPA	4.75	33.33	0.13	Matriz	-	-	10.15	-	-	-
Cz_MN	NATI-05	73.00 A 73.10	CHPOCO	NADPA	4.75	28.78	0.16	Matriz	-	-	10.53	-	-	-
Cz_MN	NAT-03	72.55 A 72.75	CHPOCO	NADPA	4.74	30.64	0.12	Matriz	-	-	-	41.70	308.50	30 132
Cz_MN	NAT-13	19.50 A 19.70	CHPOCO	NADPA	4.70	29.91	0.18	Matriz	-	-	-	54.00	291.50	29 502
Cz_MN	NACS-02	27.80 A 28.00	CHPOCO	NADPA	4.74	28.66	0.60	Fisura	67.80	29279	-	-	-	-
Cz_MN	NACS-13	45.65 A 45.85	CHPOCO	NADPA	4.75	33.85	0.17	Fisura	93.60	73813	-	-	-	-
Cz_MN	NATI-28	58.95 A 59.05	CHPOCO	NADPA	4.75	31.77	0.34	Fisura	-	-	5.82	-	-	-
Cz_MN	NATI-02	73.60 A 73.67	CHPOCO	NADPA	4.75	30.24	0.24	Fisura	-	-	10.07	-	-	-
Cz_MN	NAT-09	63.40 A 63.70	CHPOCO	NADPA	4.78	27.89	1.25	Fisura	-	-	-	6.95	61.60	8 653
Cz_MN	NAT-08	20.85 A 21.00	CHPOCO	NADPA	4.67	30.62	0.15	Fisura	-	-	-	6.95	94.60	35 673
Cz_MN	NAT-02	18.86 A 19.00	CHPOCO	NADPA	4.74	30.00	0.10	Fisura	-	-	-	20.85	179.30	24 660
Cz_MN	NAT-14	69.72 A 69.90	CHPOCO	NADPA	4.75	29.93	0.12	Fisura	-	-	-	41.70	253.20	25 813
Cz_MN	NACS-08	44.28 A 44.50	CHPOCO	NADPA	4.75	30.86	0.20	Estratificación	2.80	-	-	-	-	-
Cz_MN	NACS-14	29.70 A 29.94	CHPOCO	NADPA	4.75	30.37	0.32	Estratificación	13.30	29064	-	-	-	-
Cz_MN	NACS-06	52.59 A 52.78	CHPOCO	NADPA	4.75	32.13	0.33	Estratificación	48.70	55359	-	-	-	-
Cz_MN	NATI-30	31.65 A 31.85	CHPOCO	NADPA	4.75	30.13	0.20	Estratificación	-	-	2.43	-	-	-
Cz_MN	NATI-29	46.90 A 47.00	CHPOCO	NADPA	4.75	31.81	0.31	Estratificación	-	-	4.61	-	-	-
Cz_MN	NATI-01	37.50 A 37.65	CHPOCO	NADPA	4.75	31.08	0.18	Estratificación	-	-	7.95	-	-	-
Cz_MN	NAT-05	51.11 A 51.29	CHPOCO	NADPA	4.74	32.06	0.16	Estratificación	-	-	-	6.95	84.80	14 166
Cz_MN	NAT-12	55.80 A 56.00	CHPOCO	NADPA	4.75	29.96	1.09	Estratificación	-	-	-	20.85	86.20	13 102
Cz_MN	NAT-01	35.65 A 36.00	CHPOCO	NADPA	4.74	30.79	0.18	Estratificación	-	-	-	20.85	89.20	26 160
Cz_MN	NAT-07	33.36 A 33.57	CHPOCO	NADPA	4.75	31.21	0.36	Estratificación	-	-	-	20.85	281.00	28 084
Cz_MN	NAT-10	49.80 A 49.95	CHPOCO	NADPA	4.74	32.59	0.12	Estratificación	-	-	-	41.70	155.70	30 185
Cz_MN	NAT-11	40.80 A 41.00	CHPOCO	NADPA	4.74	32.27	0.13	Estratificación	-	-	-	41.70	309.70	47 088
Cz_MN	NAT-04	61.00 A 61.20	CHPOCO	NADPA	4.75	33.00	0.14	Estratificación	-	-	-	54.00	341.90	29 977
Cz_MN	NAT-06	58.15 A 58.27	CHPOCO	NADPA	4.74	32.25	0.24	Estratificación	-	-	-	54.00	387.60	54 124

Elaborado por el Departamento de Mecánica de Rocas e Inyecciones.

Derechos reservados en propiedad intelectual, 2019

2 de 4

CFE										Resumen de resultados de los ensayos de laboratorio realizados para la Minera Autlán										<small> Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil Subgerencia de Geotecnia y Materiales Departamento de Mecánica de Rocas e Inyecciones </small>		
ROCA	CODIGO DE MUESTRA	PROFUNDIDAD EN m	FORMACIÓN	PROYECTO	Diámetro en cm	Peso volumétrico en kN/m ³	Contenido de agua en %	Modo de falla	Resistencia a la compresión uniaxial (RCU) en MPa	Módulo tangente al 50% de la RCU en MPa	Resistencia a la tensión indirecta en MPa	Resistencia a la compresión triaxial (RCT)										
												Esfuerzo confinante en prueba de la RCT en MPa	Esfuerzo principal mayor en MPa	Módulo tangente al 50% de la RCT en MPa								
LIMOLITA	NACS-43	181.55 A 181.68	HUAYACOCOTLA	NADPA	4.75	26.07	0.57	Matriz	18.50	8611	-	-	-	-								
LIMOLITA	NACS-51	60.96 A 61.1	SANTIAGO	NADPA	4.78	25.78	0.28	Matriz	27.10	21776	-	-	-	-								
LIMOLITA	NACS-33	37.50 A 37.36	SANTIAGO	NADPA	4.72	26.08	0.63	Matriz	65.30	-	-	-	-	-								
LIMOLITA	NACS-21	145.00 A 145.20	TEPEXIC	SAN FRANCISCO	4.75	27.79	0.08	Matriz	72.80	22795	-	-	-	-								
LIMOLITA	NACS-34	18.75 A 19.05	SANTIAGO	NADPA	4.74	26.50	0.28	Matriz	75.30	6596	-	-	-	-								
LIMOLITA	NACS-47	73.4 A 73.53	TEPEXIC	NADPA	4.74	26.37	0.10	Matriz	80.20	32974	-	-	-	-								
LIMOLITA	NACS-39	151.60 A 151.75	HUAYACOCOTLA	NADPA	4.74	27.52	0.40	Matriz	96.20	34591	-	-	-	-								
LIMOLITA	NACS-30	20.03 A 33	SANTIAGO	NADPA	4.75	26.18	0.33	Matriz	99.10	14214	-	-	-	-								
LIMOLITA	NACS-48	25.5 A 25.63	TEPEXIC	NADPA	4.80	28.25	0.07	Matriz	196.10	49617	-	-	-	-								
LIMOLITA	NATI-19	143.00 A 143.15	SANTIAGO	SAN FRANCISCO	4.75	25.79	0.42	Matriz	-	-	5.92	-	-	-								
LIMOLITA	NATI-25	79.10 A 79.25	HUAYACOCOTLA	NADPA	4.75	26.71	0.29	Matriz	-	-	10.97	-	-	-								
LIMOLITA	NATI-32	111.18 A 111.30	TEPEXIC	NADPA	4.75	26.67	0.13	Matriz	-	-	11.77	-	-	-								
LIMOLITA	NATI-31	91.90 A 92.03	TEPEXIC	NADPA	4.74	26.76	0.19	Matriz	-	-	12.39	-	-	-								
LIMOLITA	NATI-23	83.55 A 83.75	HUAYACOCOTLA	NADPA	4.75	26.06	0.23	Matriz	-	-	14.91	-	-	-								
LIMOLITA	NAT-43	90.68 A 90.83	HUAYACOCOTLA	SAN FRANCISCO	4.74	25.79	0.60	Matriz	-	-	-	4.05	12.90	1 992								
LIMOLITA	NAT-52	140.77 A 140.99	HUAYACOCOTLA	NADPA	4.74	26.67	0.46	Matriz	-	-	-	4.05	46.90	11 533								
LIMOLITA	NAT-53	59.27 A 59.10	SANTIAGO	NADPA	4.74	26.03	0.47	Matriz	-	-	-	40.50	203.40	16 283								
LIMOLITA	NAT-40	191.87 A 191.98	HUAYACOCOTLA	NADPA	4.74	23.60	0.43	Matriz	-	-	-	56.70	206.80	17 027								
LIMOLITA	NAT-35	48.30 A 48.40	SANTIAGO	NADPA	4.74	27.50	0.47	Matriz	-	-	-	56.70	229.00	17 656								
LIMOLITA	NAT-46	24.67 A 24.80	TEPEXIC	NADPA	4.76	27.65	0.10	Matriz	-	-	-	56.70	294.80	33 076								
LIMOLITA	NACS-45	41.5 A 41.65	HUAYACOCOTLA	SAN FRANCISCO	4.78	26.35	0.62	Fisura	4.90	10933	-	-	-	-								
LIMOLITA	NACS-36	19.56 A 19.81	SANTIAGO	NADPA	4.75	26.24	0.33	Fisura	5.50	12917	-	-	-	-								
LIMOLITA	NACS-52	61.01 A 61.15	SANTIAGO	NADPA	4.78	25.58	0.69	Fisura	7.10	8504	-	-	-	-								
LIMOLITA	NACS-15	114.48 A 114.65	TEPEXIC	NADPA	4.75	26.82	0.35	Fisura	16.60	10000	-	-	-	-								
LIMOLITA	NAT-47	209.88 A 210.00	TEPEXIC	NADPA	4.72	26.89	0.13	Fisura	-	-	-	4.06	80.90	13 918								
LIMOLITA	NAT-51	75.41 A 75.55	HUAYACOCOTLA	NADPA	4.75	26.23	0.52	Fisura	-	-	-	12.15	145.00	18 680								
LIMOLITA	NAT-48	26.62 A 26.75	TEPEXIC	NADPA	4.77	28.11	0.79	Fisura	-	-	-	56.70	325.70	33 024								
LIMOLITA	NACS-31	26.15 A 26.30	SANTIAGO	NADPA	4.74	25.98	0.53	Estratificación	1.70	-	-	-	-	-								
LIMOLITA	NACS-49	143.97 A 144.11	TEPEXIC	NADPA	4.75	26.18	0.60	Estratificación	1.70	-	-	-	-	-								
LIMOLITA	NACS-32	28.65 A 28.95	SANTIAGO	NADPA	4.74	25.87	0.65	Estratificación	3.60	4324	-	-	-	-								
LIMOLITA	NACS-54	209.88 A 210	HUAYACOCOTLA	NADPA	4.77	26.48	0.53	Estratificación	19.80	182299	-	-	-	-								
LIMOLITA	NACS-53	132.97 A 133.1	HUAYACOCOTLA	NADPA	4.77	26.36	0.54	Estratificación	27.40	19706	-	-	-	-								
LIMOLITA	NACS-17	65.10 A 65.32	TEPEXIC	NADPA	4.54	26.20	0.31	Estratificación	38.20	12120	-	-	-	-								
LIMOLITA	NACS-38	156.20 A 156.32	HUAYACOCOTLA	NADPA	4.75	26.14	0.53	Estratificación	53.40	18453	-	-	-	-								
LIMOLITA	NATI-10	132.23 A 132.35	TEPEXIC	SAN FRANCISCO	4.75	26.13	0.28	Estratificación	-	-	1.58	-	-	-								
LIMOLITA	NATI-07	108.35 A 108.50	TEPEXIC	NADPA	4.75	26.14	0.38	Estratificación	-	-	1.76	-	-	-								

Elaborado por el Departamento de Mecánica de Rocas e Inyecciones.

Derechos reservados en propiedad intelectual, 2019

3 de 4



Resumen de resultados de los ensayos de laboratorio realizados para la Minera Autlán

Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil
Subgerencia de Geotecnia y Materiales
Departamento de Mecánica de Rocas e Inyecciones

ROCA	CODIGO DE MUESTRA	PROFUNDIDAD EN m	FORMACIÓN	PROYECTO	Diámetro en cm	Peso volumétrico en kNm ³	Contenido de agua en %	Modo de falla	Resistencia a la compresión uniaxial (RCU) en MPa	Módulo tangente al 50% de la RCU en MPa	Resistencia a la tensión indirecta en MPa	Resistencia a la compresión triaxial (R _{3σ})		
												Esfuerzo confinante en prueba de la RCT en MPa	Esfuerzo principal mayor en MPa	Módulo tangente al 50% de la RCT en MPa
LIMOLITA	NATI-08	61.69 A 61.80	TEPEXIC	NAOPA	4.75	26.22	0.63	Estratificación	-	-	1.99	-	-	-
LIMOLITA	NATI-09	55.60 A 55.70	TEPEXIC	NAOPA	4.75	26.06	0.33	Estratificación	-	-	2.53	-	-	-
LIMOLITA	NATI-33	19.00 A 19.13	TEPEXIC	NAOPA	4.75	26.35	0.20	Estratificación	-	-	3.31	-	-	-
LIMOLITA	NATI-17	147.00 A 147.2	SANTIAGO	SAN FRANCISCO	4.75	25.86	0.53	Estratificación	-	-	3.66	-	-	-
LIMOLITA	NATI-18	64.75 A 64.90	SANTIAGO	NAOPA	4.74	26.27	0.31	Estratificación	-	-	3.67	-	-	-
LIMOLITA	NATI-35	75.65 A 75.76	SANTIAGO	NAOPA	4.75	25.74	0.54	Estratificación	-	-	3.91	-	-	-
LIMOLITA	NATI-16	46.50 A 46.65	SANTIAGO	NAOPA	4.75	25.99	0.32	Estratificación	-	-	4.64	-	-	-
LIMOLITA	NATI-22	225.74 A 225.85	HUAYACOCOTLA	NAOPA	4.75	25.82	0.88	Estratificación	-	-	5.54	-	-	-
LIMOLITA	NATI-20	117.98 A 118.10	SANTIAGO	SAN FRANCISCO	4.75	25.95	0.38	Estratificación	-	-	5.92	-	-	-
LIMOLITA	NATI-34	12.71 A 12.85	SANTIAGO	NAOPA	4.75	26.08	0.36	Estratificación	-	-	7.84	-	-	-
LIMOLITA	NAT-24	34.66 A 34.84	TEPEXIC	NAOPA	4.74	26.89	0.35	Estratificación	-	-	-	4.05	30.20	10 007
LIMOLITA	NAT-25	117.76 A 118.25	TEPEXIC	SAN FRANCISCO	4.72	26.71	0.44	Estratificación	-	-	-	12.15	68.20	17 060
LIMOLITA	NAT-41	210.73 A 210.87	HUAYACOCOTLA	NAOPA	4.72	26.47	0.52	Estratificación	-	-	-	12.15	73.80	14 998
LIMOLITA	NAT-50	50.76 A 50.90	SANTIAGO	NAOPA	4.74	25.68	0.46	Estratificación	-	-	-	24.30	-	-
LIMOLITA	NAT-28	13.67 A 13.80	SANTIAGO	NAOPA	4.74	25.95	0.58	Estratificación	-	-	-	24.30	74.30	8 005
LIMOLITA	NAT-49	67.10 A 67.22	SANTIAGO	NAOPA	4.76	25.94	0.49	Estratificación	-	-	-	24.30	103.10	6 457
LIMOLITA	NAT-31	47.97 A 48.08	SANTIAGO	NAOPA	4.74	26.59	0.52	Estratificación	-	-	-	24.30	129.90	10 718
LIMOLITA	NAT-30	27.45 A 27.63	SANTIAGO	NAOPA	4.74	29.82	0.31	Estratificación	-	-	-	40.50	132.20	17 753
LIMOLITA	NAT-32	61.30 A 61.50	SANTIAGO	NAOPA	4.74	25.51	0.56	Estratificación	-	-	-	40.50	140.60	6 262

ANEXO 2

GRÁFICAS Y REPORTE FOTOGRAFÍCO DE LOS ENSAYES MECÁNICOS

