

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS



**EVALUACION GEOMECANICA Y DETERMINACIÓN DE ANGULOS DE
TALUD EN LOS PROYECTOS MINEROS**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

PRESENTADA POR:

MARINO MOLINA QUISPE

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

PUNO – PERÚ

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



**EVALUACION GEOMECANICA Y DETERMINACIÓN DE ANGULOS DE
TALUD EN LOS PROYECTOS MINEROS**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PRESENTADA POR:

MARINO MOLINA QUISPE

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

APROBADA POR:

PRESIDENTE DE JURADO

:
Dr. JUAN MAYHUA PALOMINO

PRIMER JURADO

:
Ing. DAVID VELASQUEZ MEDINA

SEGUNDO JURADO

:
M.Sc. LUCIO QUEA GUTIERREZ

TEMA : Mecánica de rocas, geomecánica y geotécnia

ÁREA : Ingeniería de minas

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 14 DE NOVIEMBRE DE 2019

DEDICATORIA

Primeramente, a Dios padre todo poderoso, a mis padres adorables, Leoncio Molina Huacani y Martina Rufina Quispe Apaza, tenerlos es un privilegio. Asimismo, a mí pareja Maritza Maribel Quispe Peralta, mis hermanos: Francisca, Rosita y Luis y mis compañeros, amigos (as) que me dieron la mayor motivación en mi formación profesional.

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento a mi alma mater “Universidad Nacional del Altiplano - Puno”, a mis docentes de la Facultad de Ingeniería de Minas quienes me brindaron su conocimiento en mi formación profesional.

De igual manera mi profundo y eterno agradecimiento a mis padres: Leoncio Molina Quispe y Martina Rufina Quispe Apaza, a mis queridos hermanos por su apoyo y consejo durante mi vida profesional.

Marino Molina Quispe

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN	10
1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
4. CONCLUSIONES.....	29
5. AGRADECIMIENTO.....	30
6. LITERATURA CITADA.....	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sistemas de discontinuidades estructurales	16
Tabla 2. Criterio para la clasificación de la masa rocosa.....	18
Tabla 3. Resumen de calidades de la masa rocosa.....	18
Tabla 4. Zonificación geomecánica de la masa rocosa.....	19
Tabla 5. Resistencia compresiva no confinada de la roca intacta.....	20
Tabla 6. Resistencia compresiva calculada a partir de ensayos de Carga Puntual	20
Tabla 7. Resultados de los ensayos del tablero inclinable	20
Tabla 8. Parámetros de resistencia de la masa rocosa	21
Tabla 9. Aceleraciones sísmicas máximas para el proyecto Arasi S.A.C.....	22
Tabla 10. Factores de seguridad de taludes finales.....	27
Tabla 11. Relaciones entre los ángulos de taludes de bancos, interrampas y finales ...	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estación de mediciones mapeo geomecánico por celdas de detalle.....	16
Figura 2. Diagrama estereográfico de contornos del compósito general.....	17
Figura 3. Diagrama estereográfico de planos principales del compósito general.	17
Figura 4. Diagrama de roseta de discontinuidades del compósito general.....	17
Figura 5. Sectorización del tajo Jessica para la identificación de los mecanismos probables de falla	22
Figura 6. Análisis cinemático talud 1	23
Figura 7. Análisis cinemático talud 2	23
Figura 8. Análisis cinemático talud 3	23
Figura 9. Análisis cinemático talud 4	23
Figura 10. Análisis cinemático talud 5	23
Figura 11. Análisis cinemático talud 6	23
Figura 12. Análisis cinemático talud 7	24
Figura 13. Análisis cinemático talud 8	24
Figura 14. Análisis cinemático talud 9	24
Figura 15. Análisis cinemático talud 10	24
Figura 16. Análisis cinemático talud 11	24
Figura 17. Análisis cinemático talud 12	24
Figura 18. Análisis cinemático talud 13	25
Figura 19. Análisis cinemático talud 14	25
Figura 20. Análisis cinemático talud 15	25
Figura 21. Análisis cinemático talud 16	25
Figura 22. Secciones de análisis del tajo Jessica	26
Figura 23. Sección 1, ubicado en el lado Oeste. Análisis de falla circular del talud inicial propuesto con 44°. FSe = 2.832. FSse = 2.186.	26
Figura 24. Sección 2, ubicado en el lado Noroeste. Análisis de falla circular del talud inicial propuesto con 44°. FSe = 2.427. FSse = 1.889.	26
Figura 25. Sección 3, ubicado en el lado Norte. Análisis de falla circular del talud inicial propuesto con 44°. FSe = 2.435. FSse = 1.874.	27
Figura 26. Sección 4, ubicado en el lado Noreste. Análisis de falla circular del talud inicial propuesto con 44°. FSe = 2.249. FSse = 1.692	27

Figura 27. Sección 5, ubicado en el lado Suroeste. Análisis de falla circular del talud inicial propuesto con 44° . $FSe = 2.712$. $FSse = 2.082$ 27

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

a_{max}	: Aceleración máxima
Dip Direction	: Dirección de Buzamiento
Dip	: Buzamiento
E	: Este
FSe	: Factor de seguridad estático
FSse	: Factor de seguridad pseudoestático
GSI	: Geological Strength Index
ISRM	: Sociedad internacional de mecánica de rocas
ISRM	: International Society for Rock Mechanics
MPa	: Mega Pascal
N	: Norte
θ	: Ángulo de Fricción
RMR	: Rock Mass Rating
RQD	: Rock Quality Designation
RQD	: Rock Quality Designation
S	: Sur
SA	: Sílice Alunita
SC	: Sílice Clay
SGV	: Sílice Granular-Vuggy
SM	: Sílice Masiva
Tr	: Tiempo de retorno
W	: Oeste

EVALUACION GEOMECANICA Y DETERMINACIÓN DE ANGULOS DE TALUD EN LOS PROYECTOS MINEROS

Marino Molina Quispe

Facultad de Ingeniería de Minas - Universidad Nacional del Altiplano – Puno

marin_12.min@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7334-6246>

Cel.: 928112073

RESUMEN

En minería, la geotécnica ha tomado gran importancia a escala creciente, en particular en términos de proyectos de taludes. El proyecto Jéssica de Arasi S.A.C., contempla la explotación a cielo abierto de un yacimiento aurífero ubicado en distrito de Ocuvi, provincia de Lampa, departamento de Puno, enero del 2008. El cual tiene como objetivo desarrollar la evaluación geomecánica y estimar los ángulos de los taludes del futuro tajo abierto Jéssica. Para ello, fue necesario realizar trabajos de campo, laboratorio y gabinete. Se ha hecho una caracterización de la masa rocosa, en base al mapeo geotécnico de afloramientos rocosos y de testigos de perforaciones diamantinas. Asimismo, se determinaron en base a ensayos realizados insitu y en laboratorio las propiedades físicas, parámetros de resistencia de la roca intacta, de las discontinuidades y de la masa rocosa. También, se realizaron un número de análisis, evaluando así el grado de estabilidad de los taludes con los ángulos propuestos en el diseño por el área de planeamiento de Arasi S.A.C. Como resultado los ángulos de taludes de bancos 65° , interrampas y finales globales 44° , tienen un factor de seguridad no drenado estático en promedio 2.53 y pseudoestático 1.9. En conclusión, los ángulos de taludes de bancos, interrampas y finales globales propuestos por Arasi S.A.C. en su diseño del tajo Jessica, estos taludes presentarán condiciones de estabilidad satisfactorias, puesto que los factores de seguridad superan por buen margen a los mínimos requeridos.

Palabras clave: Clasificación geomecánica, análisis cinemático, estabilidad de taludes, factor de seguridad, macizo rocoso.

GEOMECHANICAL EVALUATION AND DETERMINATION OF SLOPE ANGLES IN MINING PROJECTS

ABSTRACT

In mining, geotechnics has taken great importance on a growing scale, particularly in terms of slope projects. The Jéssica de Arasi SAC project contemplates the open-pit exploitation of a goldfield located in Ocuvi district, Lampa province, Puno department, January 2008. Which aims to develop the geomechanical evaluation and estimate the angles of the slopes of the future open pit Jéssica. For this, it was necessary to carry out field work, laboratory and cabinet. A characterization of the rock mass has been made, based on the geotechnical mapping of rock outcrops and diamond drilling witnesses. Likewise, physical properties, resistance parameters of intact rock, discontinuities and rock mass were determined based on tests carried out. Also, a number of analyzes were carried out, thus evaluating the degree of slope stability with the angles proposed in the design by the planning area of Arasi S.A.C. As a result, the bench angles of benches 65° , inter ramps and 44° global endings have a static undrained safety factor on average 2.53 and pseudo static 1.9. In conclusion, the bench angles of benches, inter ramp and global

endings proposed by Arasi S.A.C. In its design of the Jessica pit, these slopes will have satisfactory stability conditions, since the safety factors exceed the required minimums by a good margin.

Keywords: Geometric classification, kinematic analysis, slope stability, safety factor, rock mass.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la minería necesita llevar un control geomecánico de estabilidad de la masa rocosa en sus labores de explotación y extracción (Quispe-Matos, 2018). La inestabilidad de taludes son fenómenos que tienen que ser estudiados siendo uno de los factores primordiales la geometría que se propone y ejecuta (Turpo-Phuño, 2018). La inestabilidad de taludes conjugada con eventos sísmicos o periodos de lluvias excepcionales ha generado en el mundo grandes desastres, por lo cual se están llevando a cabo estudios que ayuden a conocer la verdadera magnitud de estos peligros (Arreygue-Rocha et al., 2002).

Esto implica la necesidad de establecer los parámetros geomecánicos y establecer los dominios geotécnicos del área de la explotación que permitan un diseño seguro de bancos y taludes en roca (Rodríguez-Copare, Morales-Cabrera, & Paredes-Lupaca, 2003).

Con una investigación geotécnica de los materiales del frente del tajo, que comprendió la recolección de muestras representativas del talud, la realización de ensayos de laboratorio para la caracterización de los suelos y la determinación de los parámetros de resistencia. Determinándose los parámetros geométricos óptimos de diseño para el talud con el fin de garantizar su estabilidad (Turpo-Phuño, 2018).

Con el método de caracterización se realiza: la orientación de las estructuras, la zonificación de dominios geotécnicos en la mina, la cual queda establecida por la distribución del GSI. A partir de la clasificación se determinan los parámetros importantes para realizar los distintos análisis en perfiles distribuidos dentro de la superficie de la mina: contención, determinístico, probabilístico y rotacional. Se hacen luego, con ayuda de software específico, simulaciones de acuerdo a cada perfil para el modo de falla determinado, para analizar la posibilidad de un incremento del ángulo de talud entregado por la ingeniería de perfil anteriormente desarrollada. (Morales-Cárdenas, 2009).

Asimismo, la caracterización geomecánica del macizo rocoso afectado y la determinación del factor de seguridad de los taludes; información que será evaluada mediante mediciones in situ e información existente, para esto se evaluará mediante: RMR, SMR Y GSI, se aplicará los softwares Dips v5.103 y Slide. Con los resultados que se obtienen se puede afirmar que existe estabilidad global en los taludes del macizo. (Alvarado-Marquez & Villanueva-Huatay, 2018).

La estabilidad de taludes constituye, el problema principal en la concepción y diseño de minas a cielo abierto, tanto desde el punto de vista económico como de seguridad. Los estudios en el diseño de taludes se realizan,

aplicando los conceptos de cinemática y de equilibrio límite como métodos de cálculo (Lopes-Pomareda, 2016). En el ámbito de la ingeniería civil y la minería es usual encontrar problemas relacionados a la estabilidad de taludes, ya sean estos suelos o macizos rocosos. La identificación de los modos de falla en un talud en roca es primordial para un posterior análisis de estabilidad del talud (Valeriano-Nina, 2015).

Los métodos estereográficos y de equilibrio límite han sido utilizados para el análisis de estabilidad de talud de la cantera Mucra. En el área de investigación se ha realizado la caracterización geológica, la caracterización geotécnica, el análisis de estabilidad de taludes y su interacción por métodos, empíricos, cinemático, analítico o equilibrio límite; en base a parámetros para cada una de las familias de discontinuidades de la zona de mapeo (Arenas-Lope, 2019).

El análisis cinemático se realizó con el software Dips, para un diseño de un talud de banco. Considerando los sistemas de las familias de discontinuidades en el tajo, por cada domino estructural. El cálculo de la estabilidad del talud, aplicando el método de equilibrio límite con el software Slide, resulta que el diseño de un talud de 60° es estable para cada uno de los dominios estructurales determinados en el talud. (Lopes-Pomareda, 2016).

Los resultados obtenidos del cálculo geotécnico reportan valores del macizo rocoso, la matriz rocosa de mayor influencia teniendo una estimación del factor de seguridad así como:

resistencia a la compresión simple (MPa), Índice Geológico de Resistencia (GSI), Dip y Dip Direction (Montoya-Toroverero, 2014)

Por lo general, se tiende a asegurar la calidad o el buen comportamiento de un talud a partir del concepto de factor de seguridad global (fs). Este valor se usa para examinar el estado de la estabilidad de los taludes (Suárez-Burgoa, 2016).

Hipótesis con la evaluación geomecánica de los macizos rocosos y el análisis de estabilidad de taludes se determinará los ángulos de taludes en el proyecto Jessica de Arasi S.A.C.

El objetivo es desarrollar la evaluación geomecánica y estimar los ángulos de los taludes del tajo abierto Jéssica de Arasi S.A.C.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El área del Proyecto Jéssica, está ubicado en el distrito de Ocuvi, provincia de Lampa, departamento de Puno, a una altitud entre los 4 750 y 5 050 msnm. Las coordenadas UTM de la zona mineralizada son: 303500 E, 8312500 N y 305000 E, 8313500 N. El área mineralizada corresponde a un cuerpo elongado E-W de 1100 m. de largo y 180 m. de ancho.

2.1. Materiales

- Equipo de protección personal (EPP)
- Libreta de campo
- Tablero de apuntes
- Cinta métrica de 100 m
- Martillo del geólogo
- Lupa

- Martillo Schmidt tipo L
- Estación total
- Softwares especializados (RocData, Dips, RocPlane, Slide, Swedge)
- Computadora
- Brújula
- GPS
- Cámara fotográfica

2.2. Metodología de la investigación

Se realizó mediante un análisis cuantitativo de los mapeos geotécnicos de afloramientos rocosos y testigos diamantinos; descriptivo de los parámetros geomecánicos, que determinan la estabilidad del macizo rocoso del proyecto, en las que consideran las siguientes etapas:

En una primera etapa el estudio se orientó a la ejecución de investigaciones básicas, con el fin de obtener la información necesaria, que permita evaluar los factores que condicionan el comportamiento de la masa rocosa de los taludes, y estimar los parámetros geomecánicos básicos. En una segunda etapa, se integró la información obtenida durante las investigaciones básicas, con el fin de evaluar las condiciones de estabilidad de los taludes en función del diseño del tajo proporcionado por Arasi S.A.C. El estudio realizado, combinó observaciones y acopio de información de campo, pruebas de campo, laboratorio y trabajos de gabinete, utilizando técnicas adecuadas. Los aspectos técnicos materia del estudio fueron los siguientes:

2.3. Investigaciones básicas

Se revisó y analizó toda la información disponible, a fin de que pueda ser aprovechada para los propósitos del estudio.

2.3.1. Caracterización de la masa rocosa

Se caracterizó litológica y estructuralmente a la masa rocosa, en base a la revisión, análisis de la información y el mapeo geomecánico de afloramientos rocosos superficiales, por el método directo de celdas de detalle, cada una constituyó una estación de medición, en total se realizaron mapeos en 20 celdas en el área de estudio. En los testigos de las perforaciones diamantinas, el logueo geotécnico se llevó por métodos convencionales en formatos según a las normas ISRM (International Society for Rock Mechanics), en total se registraron 15 sondajes representativos del área de estudio. Los parámetros de observación y medición son: tipo de roca, tipo de sistema de discontinuidad, orientación, espaciado, persistencia, apertura, rugosidad, tipo de relleno, espesor del relleno, intemperización y presencia de agua. Para propósitos de la caracterización de la masa rocosa, la distribución de los sistemas de discontinuidades se determinó utilizando técnicas estereográficas computarizadas, y las características geomecánicas de los sistemas de discontinuidades fueron establecidas mediante análisis estadísticos. En el área de estudio, está presente la litología dominante roca andesita de la sub unidad andesita Lamparasi de la formación Sillapaca, presentándose remanentes

de afloramientos dacíticos subvolcánicos. Las andesitas se encuentran en diferentes grados de alteraciones, las que condicionan su comportamiento mecánico. Para establecer las características de la distribución de discontinuidades mayores y menores, el procesamiento de los datos orientacionales se realizó mediante técnicas de proyección estereográfica equiareal, utilizando programa de computo Dips.

2.3.2. Clasificación geomecánica de la masa rocosa

Para clasificar geomecánicamente a la masa rocosa se utilizó el criterio de clasificación geomecánica de Bieniawski RMR Valoración del Macizo Rocosos (Bieniawski, 1989).

2.3.3. Zonificación geomecánica de la masa rocosa

Se realizó una zonificación geomecánica de áreas de estudio, a fin de determinar los dominios estructurales en base a la información obtenida en los puntos precedentes. Considerando los aspectos litológicos, geoestructurales, grado de intemperismo, alteración y calidad del macizo rocoso, se han definido cuatro dominios estructurales en las zonas involucradas con el futuro tajo Jéssica.

2.3.4. Resistencia de la roca:

Resistencia de la roca intacta

Se evaluaron las propiedades de resistencia de

la roca, mediante: la ejecución de ensayos con el martillo de geólogo, ensayos de impacto con el martillo Schmidt. Por otro lado, se llevaron a cabo ensayos de propiedades físicas, carga puntual y compresión uniaxial.

Resistencia de las discontinuidades

La resistencia al corte está regida por los parámetros de fricción y cohesión de los criterios de falla Mohr-Coulomb. Estos parámetros de corte fueron determinados mediante los ensayos del tablero inclinable “*tilt table test*”, efectuados sobre testigos de las perforaciones diamantinas.

Resistencia de la masa rocosa

Para estimar los parámetros de resistencia de la masa rocosa, se utilizó el criterio de falla de Hoek & Brown (2002-2006), con el programa RocLab. Para ello se tomaron los valores de calidad de la masa rocosa en cada dominio estructural, asimismo de resistencia compresiva uniaxial y constante “mi” de la roca intacta.

2.3.5. Condiciones de agua subterránea

El principal efecto de la presencia del agua subterránea en la masa rocosa, es la presión que ejerce en las discontinuidades, disminuyendo la resistencia al corte y favoreciendo la inestabilidad, por lo que es importante evaluar las características de su presencia.

2.3.6. Peligro sísmico

El reglamento de seguridad minera en su

artículo 264 dispone que la pendiente general de los tajos sea establecida bajo condiciones pseudoestáticas asumiendo la máxima aceleración sísmica para un periodo de retorno de 100 años (D.S. N° 024-2016-EM, 2016).

2.4. Análisis de la estabilidad y diseño de taludes

2.4.1. Identificación de los mecanismos probables de falla

Para la identificación de los modos de falla, se efectuó una evaluación de los problemas de inestabilidad potencial de los taludes, efectuando análisis cinemáticos con utilización de técnicas estereográficas y aplicando el Test de Markland (1976). Para el análisis de los taludes de banco, identificados como potencialmente inestables en el análisis cinemático, se utilizaron las siguientes herramientas de cálculo: para la falla tipo cuña, el software Swedge y para la falla tipo vuelco, el criterio de Goodman, (1989). Para el análisis de los taludes finales globales se ha utilizado el software Slide, aplicando el modo de falla circular. Este es un programa de análisis de estabilidad de taludes completamente integrado, que permite desarrollar la geometría de los taludes rocosos interactivamente y realizar el análisis utilizando el concepto de equilibrio límite.

2.4.2. Condiciones de análisis

Para los análisis de estabilidad de los taludes de

bancos, se han considerado las secciones respectivas de la inestabilidad potencial y la información estructural de los resultados del análisis cinemático. Por otro lado, se han considerado las propiedades de resistencia al corte de las discontinuidades. Para el caso de los taludes finales globales, que desde el punto de vista del presente estudio revisten la mayor importancia, los diferentes análisis de estabilidad se llevaron a cabo en diferentes perfiles del tajo, (secciones 1, 2, 3, 4 y 5).

2.5. Factores de seguridad mínimos

Para el caso de los taludes finales globales, el criterio adoptado es considerar un factor de seguridad mínimo de 1.0, considerando el efecto de la presencia de agua subterránea y el efecto sísmico, es decir se trata este de un factor de seguridad pseudoestático no drenado. En términos del factor de seguridad estático no drenado, el factor de seguridad mínimo considerado es de 1.3. (DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las características de distribución de los sistemas de discontinuidades estructurales se muestran en Figura 1 y un resumen de los mismos se muestra en la Tabla 1 y en las Figuras 2, 3 y 4.

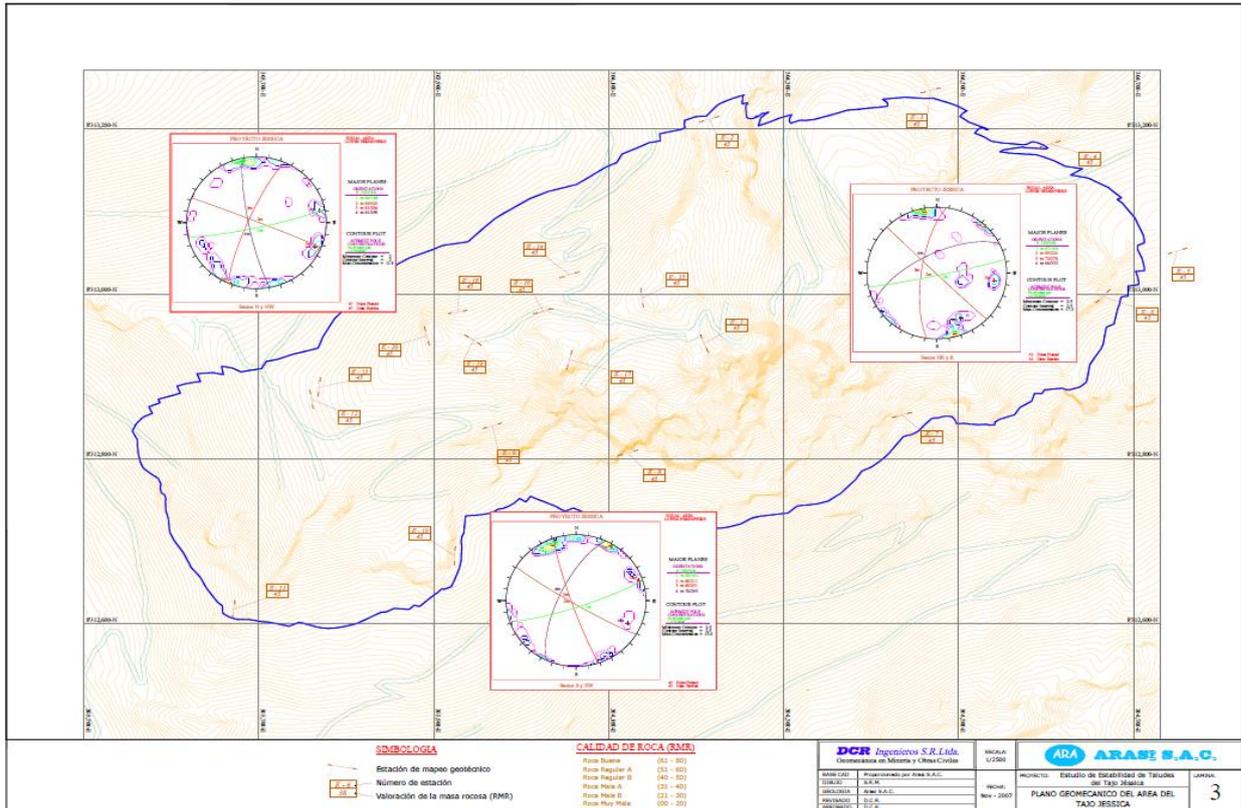


Figura 1. Estación de mediciones mapeo geomecánico por celdas de detalle.

Fuente: (DCR Ingenieros S.R.Ltda, 2008)

Tabla 1.
Sistemas de discontinuidades estructurales

Dominio		Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4
Sector N y NW	Rumbo y Buzamiento	N78°E/84°SE	N68°W/89°NE	N24°E/81°NW	N11°W/81°SW
	Direc.Buz. y Buzam.	168°/84°	022°/89°	294°/81°	259°/81°
Sector NE y E	Rumbo y Buzamiento	N78°E/87°SE	N46°W/89°SW	N08°E/72°NW	N63°E/66°NW
	Direc.Buz. y Buzam.	168°/87°	224°/89°	278°/72°	333°/66°
Sector S y SW	Rumbo y Buzamiento	N72°E/81°SE	N59°W/86°SW	N19°W/85°SW	N25°E/70°NW
	Direc.Buz. y Buzam.	162°/81°	211°/86°	251°/85°	295°/70

Fuente: (DCR Ingenieros S.R.Ltda, 2008)

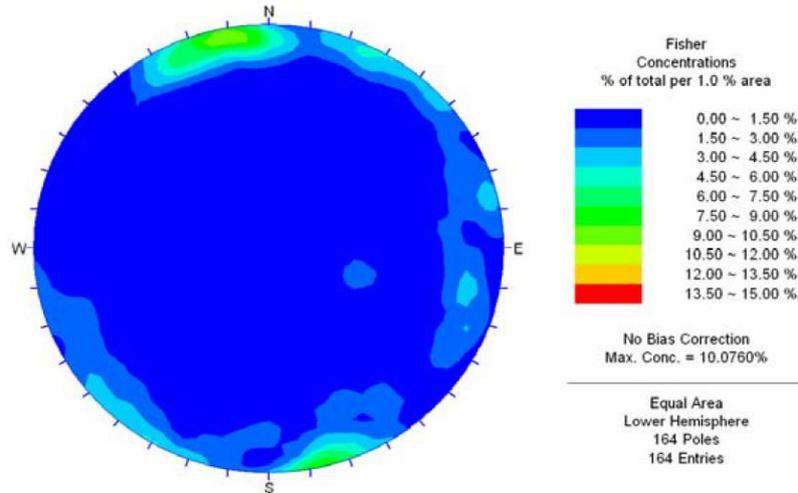


Figura 2. Diagrama estereográfico de contornos del compuesto general.

Fuente: (DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008)

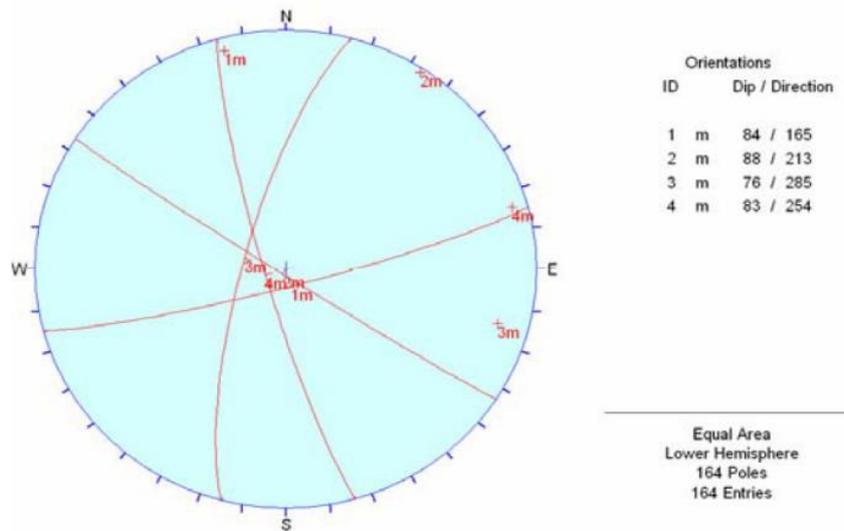


Figura 3. Diagrama estereográfico de planos principales del compuesto general.

Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

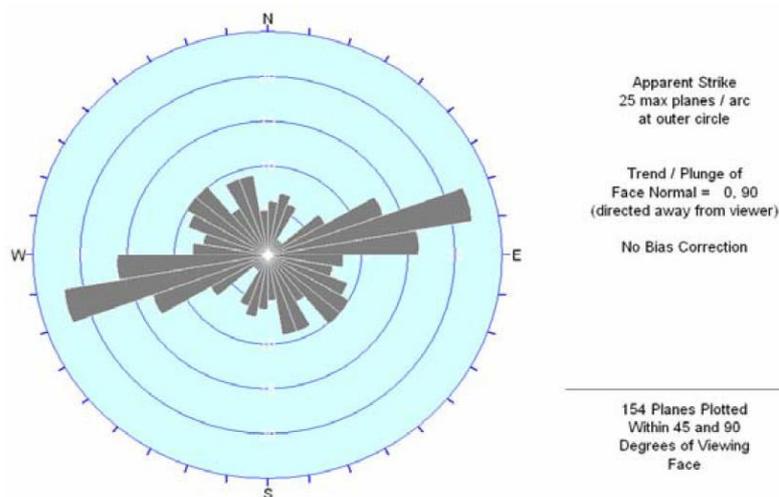


Figura 4. Diagrama de roseta de discontinuidades del compuesto general

Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

Según la Tabla 1, se observa que en el área del futuro tajo Jessica el arreglo estructural de la masa rocosa está conformado por tres sistemas principales de discontinuidades estructurales y un sistema secundario. Los sistemas principales están presentes en toda el área de estudio y estos son:

Sistema 1: rumbo NEE y buzamiento alto al SE, conformado mayormente por diaclasas y algunas fallas menores. Este es el sistema predominante.

Sistema 2: rumbo NWW y buzamiento subvertical, conformado por diaclasas.

Sistema 3: rumbo NNE y buzamiento alto al NW, conformado por diaclasas.

Los sistemas secundarios presentan diferentes orientaciones, cuyos rumbos y buzamientos pueden verse en la referida tabla como sistema

4. En las figuras siguientes se muestran el compósito de la distribución de los sistemas de discontinuidades que conforman el arreglo estructural de la masa rocosa del yacimiento Jessica.

El criterio utilizado para clasificar a la masa rocosa se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 2.
Criterio para la clasificación de la masa rocosa

Tipo de roca	Rango RMR	Calidad según RMR
II	> 60	Buena
IIIA	51 – 60	Regular A
IIIB	41 – 50	Regular B
IVA	31 – 40	Mala A
IVB	21 – 30	Mala B
V	< 20	Muy Mala

Fuente: Bieniawski, 1989

Tabla 3.
Resumen de calidades de la masa rocosa

Dominio	RMR		Calidad
	Rango	Promedio	
DE-1 SC-SA	38 - 40	39	Mala A
DE-2 SA-SC-SM	42 - 50	46	Regular B
DE-3 SC-SA-SGV-SM	54 - 57	55	Regular A
DE-4 SC-SA	62 - 63	62	Buena

Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

Según la Tabla 3, podemos concluir que la calidad de la roca está directamente asociada a los tipos de alteraciones presentes en estas áreas. Se presentan los valores de calidad por dominios, correspondiendo cada dominio a un tipo de alteración: Sílice Masiva (SM), Sílice Granular-Vuggy (SGV), Sílice Alunita (SA) y

Sílice Clay (SC). La zona mineralizada se encuentra mayormente dentro de rocas de alteración sílice masiva y sílice granular-vuggy. La calidad de la roca varía desde mala A (RMR 38-40), hasta buena (RMR 62-63), pasando por regular B (RMR 42-50) y regular A (RMR 54-57).

Tabla 4.
Zonificación geomecánica de la masa rocosa

Dominio estructural	RQD (%)	Esp. (cm)	Condición de juntas				Agua subterránea	
			Persistencia (m)	Apertura (mm)	Rugosidad	Relleno		Alteración
DE-1 SC-SA	25-50	20-50	10-20	0.1-1	Lig. rugosas	Suaves	Lig. - Mod. alteradas	Húmedas
DE-2 SA-SC-SM	50-75	10-40	10-20	0.1-1	Lig. rugosas	Suaves	Lig. - Mod. alteradas	Húmedas
DE-3 SC-SA-SGV-SM	75	20-60	3-10	0.1-1	Lig. rugosas	Suaves	Lig.. alteradas	Húmedas
DE-4 SC-SA	75-90	30-80	3-10	< 0.1	Lig. rugosas	Suaves	Lig.. alteradas - sanas	Húmedas

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4, considerando los aspectos litológicos, geoestructurales, grado de intemperismo, alteración y calidad del macizo rocoso, se han definido cuatro dominios estructurales en las zonas involucradas con el futuro tajo Jéssica. Es necesario indicar que los dominios de calidad de la masa rocosa están asociados al tipo de alteración de las rocas; y como éstas se presentan a manera de capas sub horizontales, el zoneamiento es de la misma tendencia.

3.1. Resultados de los ensayos con el martillo Schmidt

Los ensayos con el martillo Schmidt efectuados en afloramientos rocosos indicaron valores del número de rebote entre 40 y 59, los mismos que corresponden a rocas de resistencia moderada a alta. Los ensayos con el martillo Schmidt no se

efectuaron en testigos de las perforaciones diamantinas, debido a que estaban cortados por la mitad y en trozos pequeños que no permiten realizar rebotes sólidos.

3.2. Resultados de ensayos de laboratorio de mecánica de rocas

En la Tabla 5 se presentan los resultados de los ensayos referidos a la resistencia compresiva no confinada en bloques de roca y en la Tabla 6 los resultados de los ensayos calculados por carga puntual de los testigos de roca.

Otro parámetro importante y de interés para el presente estudio, es la constante “mi” de la roca intacta del criterio de falla de Hoek & Brown (1988-2006). Estos valores fueron estimados utilizando el programa RocLab (2006).

Tabla 5.

Resistencia compresiva no confinada de la roca intacta

Litología	Alteración	σ_c (MPa)
Andesita	SC	35.4
Andesita	SA	49.7

Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008**Tabla 6.**

Resistencia compresiva calculada a partir de ensayos de Carga Puntual

Sondaje	Profundidad (m)	Litología	Alteración	Ensayo
JES - 3	14.80 - 15.30	Andesita	SGV	144
JES - 3	22.72 - 22.98	Andesita	SA / SGV	120.6
JES - 20	82.05 - 82.42	Andesita	SGV	74.1
JES - 20	114.78 - 115.10	Andesita	SGV	62.3
JES - 18	51.78 - 52.10	Andesita	Propilit /A	156.9
JES - 18	94.17 - 94.55	Andesita	Silicif. mod.	172.4
JES - 18	124.40 - 124.84	Andesita	SGV	37.3
JES - 18	189.56 - 189.95	Andesita	Silicif. mod.	70.8
JES - 10	121.60 - 121.90	Andesita	SGV	158.7
JES - 10	183.70 - 184.07	Andesita	SGV	58.9
JES - 17	36.45 - 36.81	Andesita	SGV	116.6
JES - 17	239.77 - 240.10	Andesita	SGV	83
JES - 17	286.00 - 286.37	Andesita	SGV	124.5
JES - 17	310.15 - 310.50	Andesita	Argiliz. mod	93.3
DDH -37	243.03 - 243.36	Andesita	Roca fresca	160.5
DDH -37	296.00 - 296.32	Andesita	Propilit.	62.1

Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

Finalmente, los valores de densidad de las rocas considerados a partir de los ensayos de laboratorio varían de 0.0185 a 0.0242 MN/m³.

3.3. Resistencia de las discontinuidades

Estos resultados revelan que el ángulo de fricción básico promedio de las discontinuidades varía en un rango de 30° a 32° en los diferentes tipos de rocas involucradas con las áreas de interés del proyecto.

Tabla 7.

Resultados de los ensayos del tablero inclinado

Litología/ Alteración	Angulo de fricción básico	
	Rango	Promedio
Sobre testigos rocosos		
SC	31 -33	32
SA	28 -33	30.5
SGV	29 -32	30.5
SM	29 -33	31

Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

3.4. Resistencia de la masa rocosa

Según el diseño preliminar proporcionado por Arasi S.A.C. En la Tabla 8, se presentan los

resultados obtenidos sobre las propiedades de resistencia de la masa rocosa por dominios estructurales y secciones de análisis.

Tabla 8.
Parámetros de resistencia de la masa rocosa

Tipo de roca	RMR	σ_c MPa	γ (KN/m ³)	"m _r "	H (m)	Cohesión "c" (KPa)	Angulo de fricción (°)
Sección 1							
SC	38	40	20.6	20	28	154	43.6
SC – SA	56	90	22.5	20	72	699	51.5
SA – SGV	45	70	21.5	20	144	653	39
Sección 2							
SC	42	40	20.6	20	10	98	53
SC	62	100	20.6	20	20	613	61.5
SC	47	50	20.6	20	50	313	45.8
SC – SA	57	80	22.5	20	65	649	51.4
SA – SGV	46	50	21.5	20	168	645	35.8
Sección 3							
SA	40	40	24.2	20	25	169	44.4
SA	62	100	24.2	20	65	926	54.5
SC–SA–SGV	54	70	20	20	155	837	43.7
SA – SM	50	60	21.5	20	250	980	36.3
Sección 4							
SC	39	40	20.6	20	38	191	41.9
SA	62	100	24.2	20	74	979	53.7
SC–SA–SGV	43	60	22.5	20	165	649	35.4
SV – SM	54	70	20	20	226	1045	40.8
Sección 5							
SC	46	40	20.6	20	95	407	38.8
SA	62	100	20.6	20	95	1018	53.1
SC–SA–SGV	51	40	20.6	20	95	467	41.4

Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

3.5. Condiciones de agua subterránea

En el caso del proyecto Jéssica, el relieve muestra valles profundos y estrechos, controlados la mayor parte por las estructuras plegadas en un alineamiento NNW, que

contribuye a las divisorias de aguas. Al producirse el levantamiento general andino, los ríos hacían lo propio, llegando a cambiar de sentido y a profundizar su cauce. Las laderas occidentales de la cordillera occidental están

drenadas por ríos que fluyen al océano pacífico. Los ríos de la parte este de la divisoria drenan a la cuenca del lago titicaca.

3.6. Peligro sísmico

Vector Perú S.A.C., quien realizó el diseño del pad de lixiviación del proyecto Arasi, desarrolló un estudio detallado de riesgo sísmico. De este estudio, se ha tomado la información que se presenta en la Tabla 9. El proyecto Jéssica

forma parte de Arasi, encontrándose a una distancia aproximada de unos 3 Km de los tajos Valle y Carlos. Según esta Tabla 9, para un periodo de retorno de 100 años, la aceleración sísmica máxima es de 182.38 cm/s², lo cual equivale a 0.18g. Luego, para los análisis de estabilidad seudo estáticos del diseño de los taludes del tajo Jessica se tomará un coeficiente sísmico de $\alpha = 0.18$ (Vector Perú S.A.C., 2006).

Tabla 9.

Aceleraciones sísmicas máximas para el proyecto Arasi S.A.C.							
Tr (Años)	30	50	100	200	400	475	1000
a _{max} (cm/s ²)	117.98	141.9	182.38	234.41	289.75	304.61	376.88

Fuente: Vector Perú S.A.C., (2006)

3.7. Análisis de la estabilidad y diseño de taludes

3.7.1. Análisis de taludes de banco



Figura 5. Sectorización del tajo Jessica para la identificación de los mecanismos probables de falla

Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

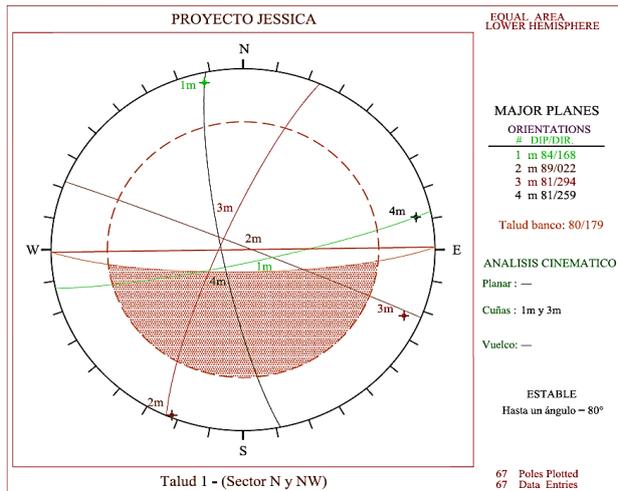


Figura 6. Análisis cinemático talud 1
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

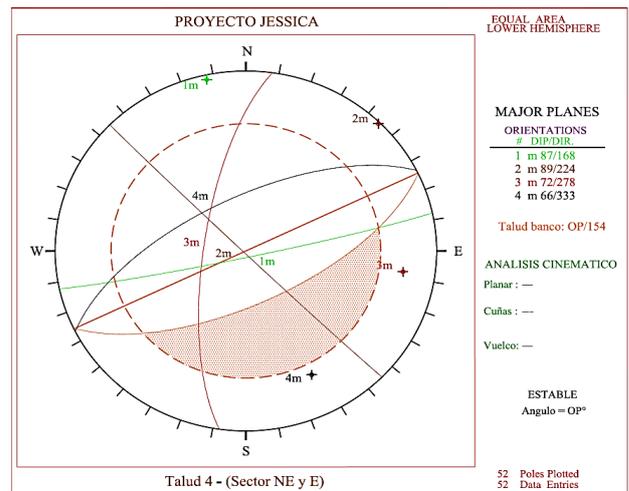


Figura 9. Análisis cinemático talud 4
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

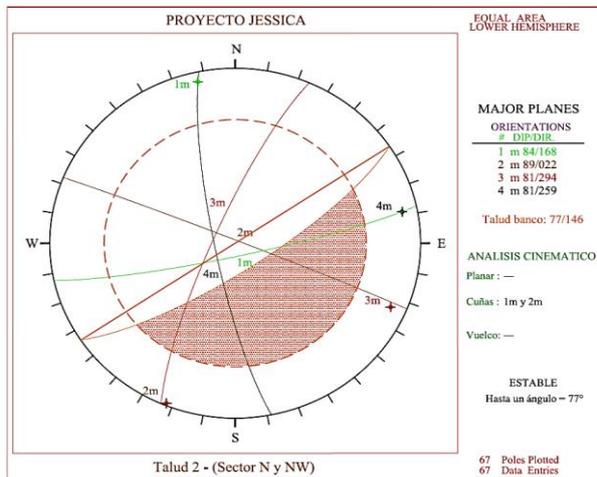


Figura 7. Análisis cinemático talud 2
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

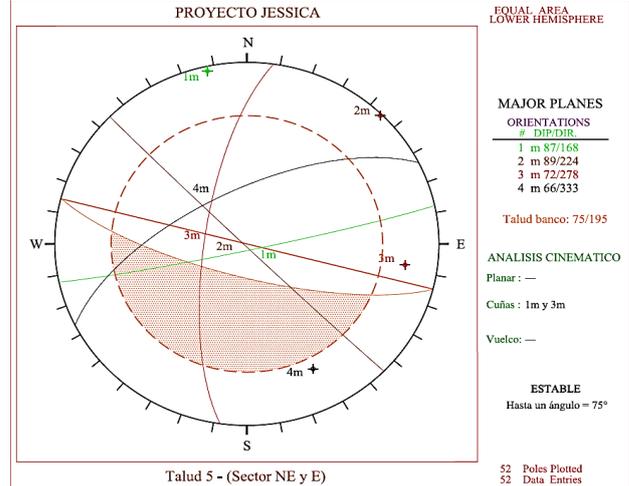


Figura 10. Análisis cinemático talud 5
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

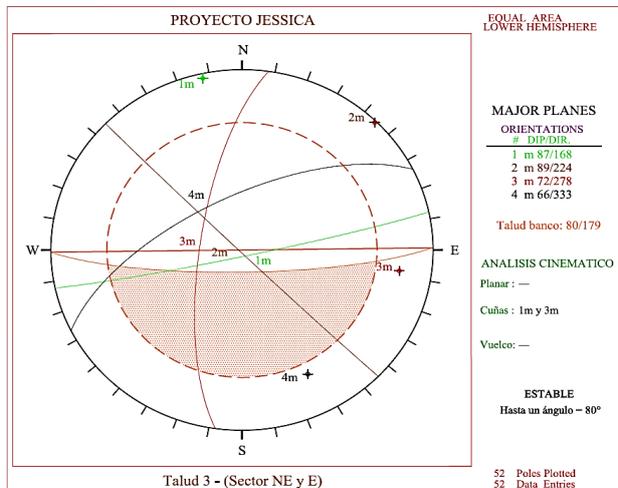


Figura 8. Análisis cinemático talud 3
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

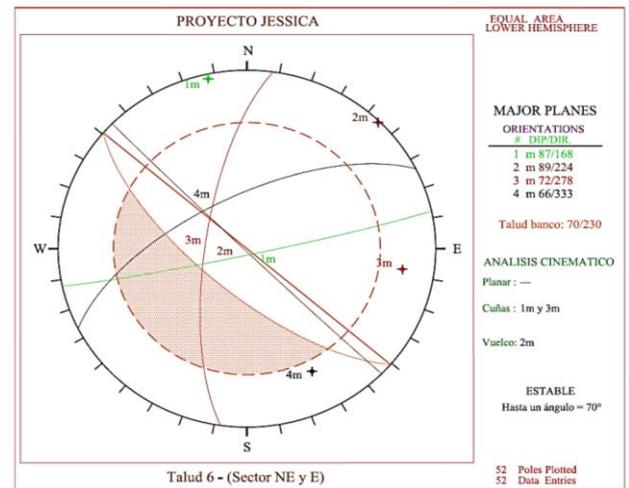


Figura 11. Análisis cinemático talud 6
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

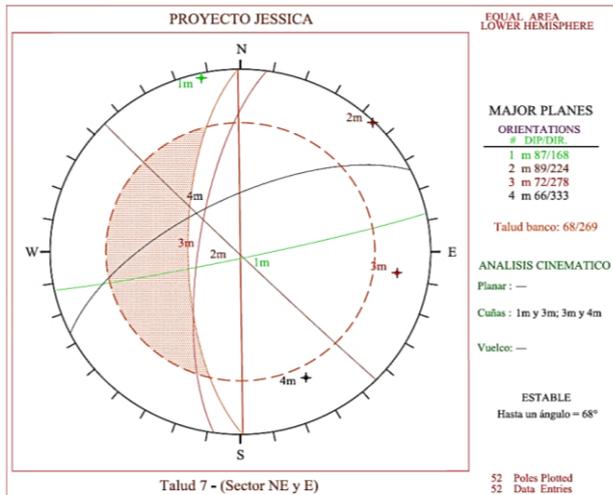


Figura 12. Análisis cinemático talud 7
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

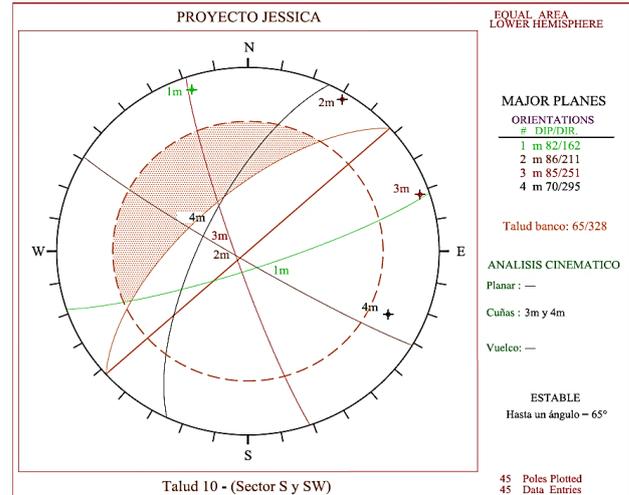


Figura 15. Análisis cinemático talud 10
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

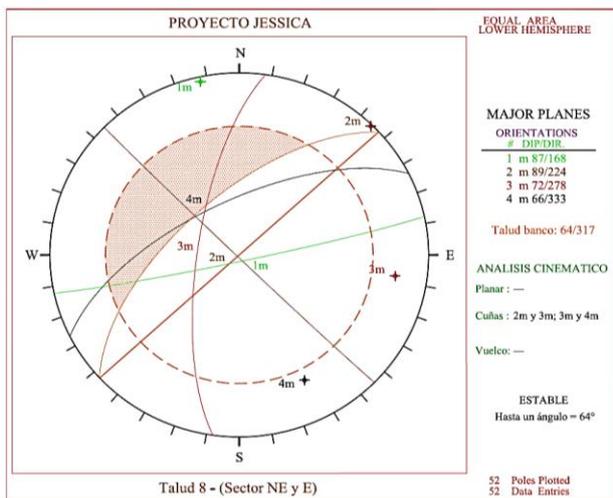


Figura 13. Análisis cinemático talud 8
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

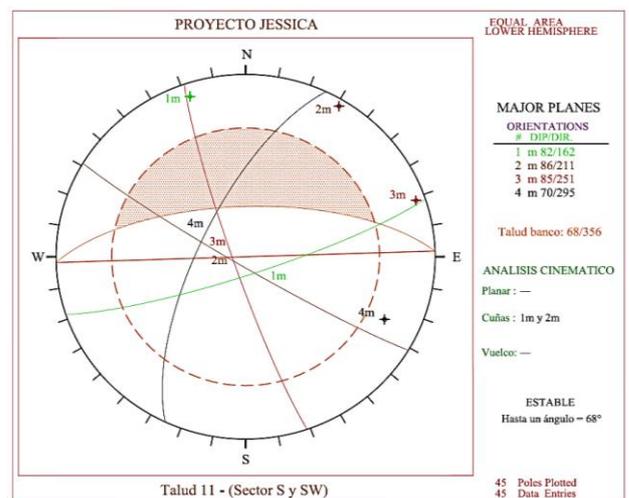


Figura 16. Análisis cinemático talud 11
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

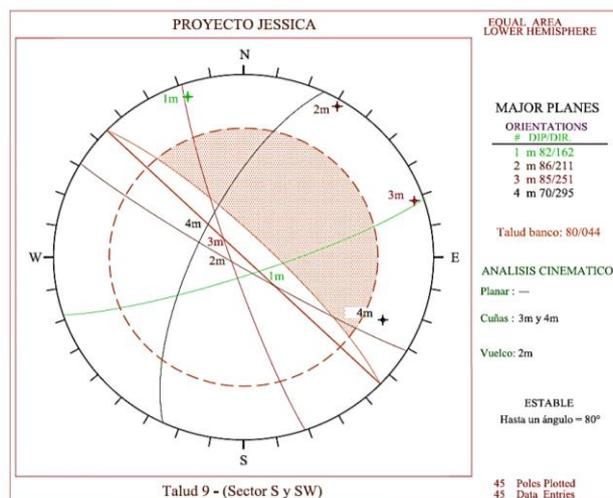


Figura 14. Análisis cinemático talud 9
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

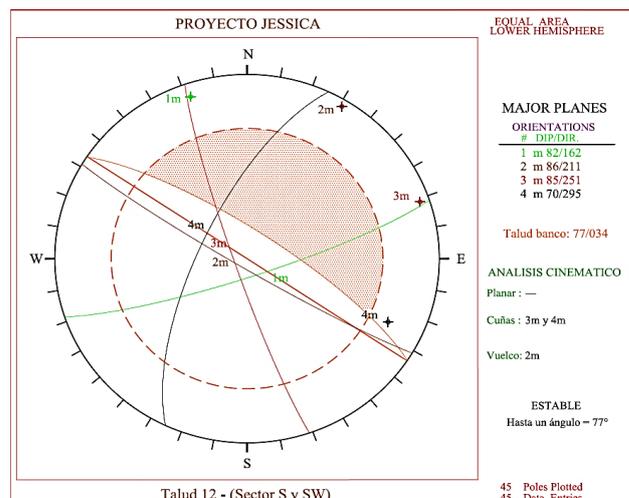


Figura 17. Análisis cinemático talud 12
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

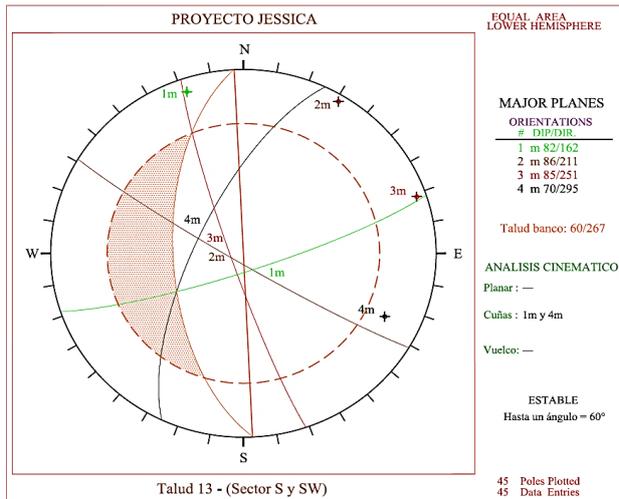


Figura 18. Análisis cinemático talud 13
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

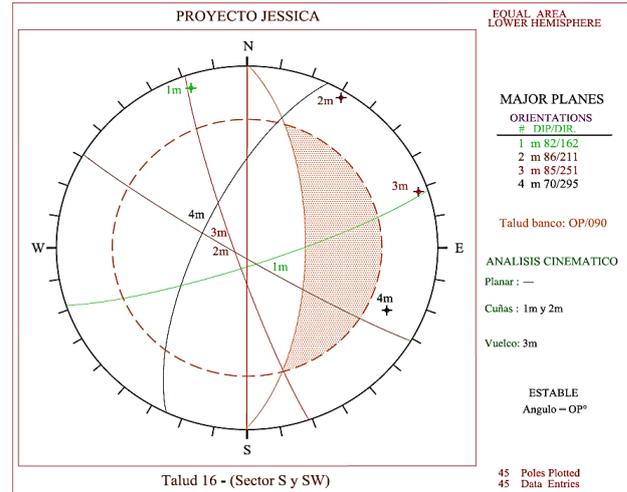


Figura 21. Análisis cinemático talud 16
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

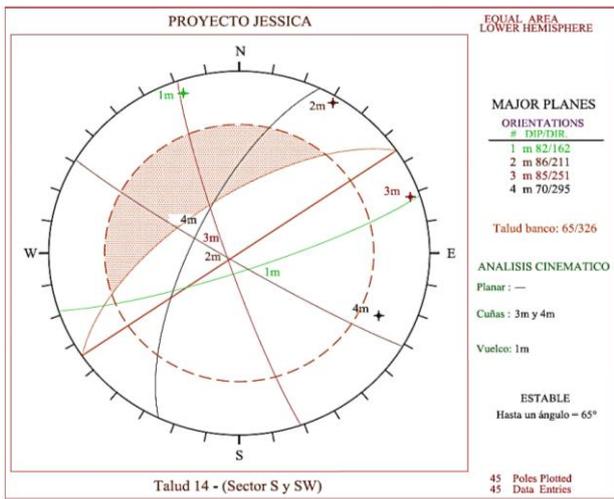


Figura 19. Análisis cinemático talud 14
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

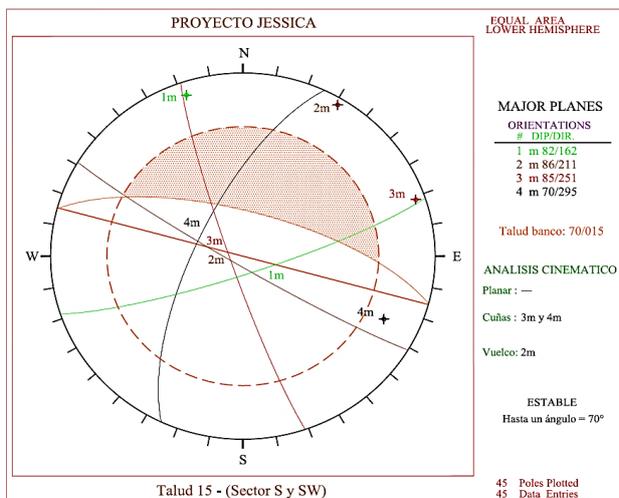


Figura 20. Análisis cinemático talud 15
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

Los resultados de los análisis cinemáticos.

Desde el punto de vista estructural, los taludes de bancos son estables con 65°. Solo en casos muy puntuales se encontró inestabilidad potencial con ángulos mayores a 60°, pero al realizar los análisis de estabilidad de estos taludes resultan estables para 65°, siendo, recomendable que se adopte este ángulo para los taludes de bancos.

Los mecanismos de rotura de las inestabilidades potenciales comprenden mayormente fallas tipo cuña, y en muy pocos casos fallas de tipo vuelco.

3.7.2. Análisis de talud final global

Primero se ha tomado como sistema banco-berma, el diseño proporcionado por Arasi S.A.C., que considera doble banco de 16 m de altura y 8.5 m de ancho de berma. Con estos datos y mediante relaciones geométricas se estima el ángulo interrampa. Tomando el ángulo estimado del talud interrampa, se establece una altura interrampa; para el caso del

tajo Jessica, para la mayor altura de los taludes, la altura interrampas considera 12 bancos dobles de 16 m de altura cada uno, haciendo una altura de 184 m. Conociendo la altura que alcanzarán los taludes finales globales 264 m y estableciendo la estabilidad de los mismos

mediante análisis de equilibrio límite con el programa SLIDE, se puede interactuar con los ángulos de taludes interrampas para establecer en el diseño, el ángulo final de los mismos.

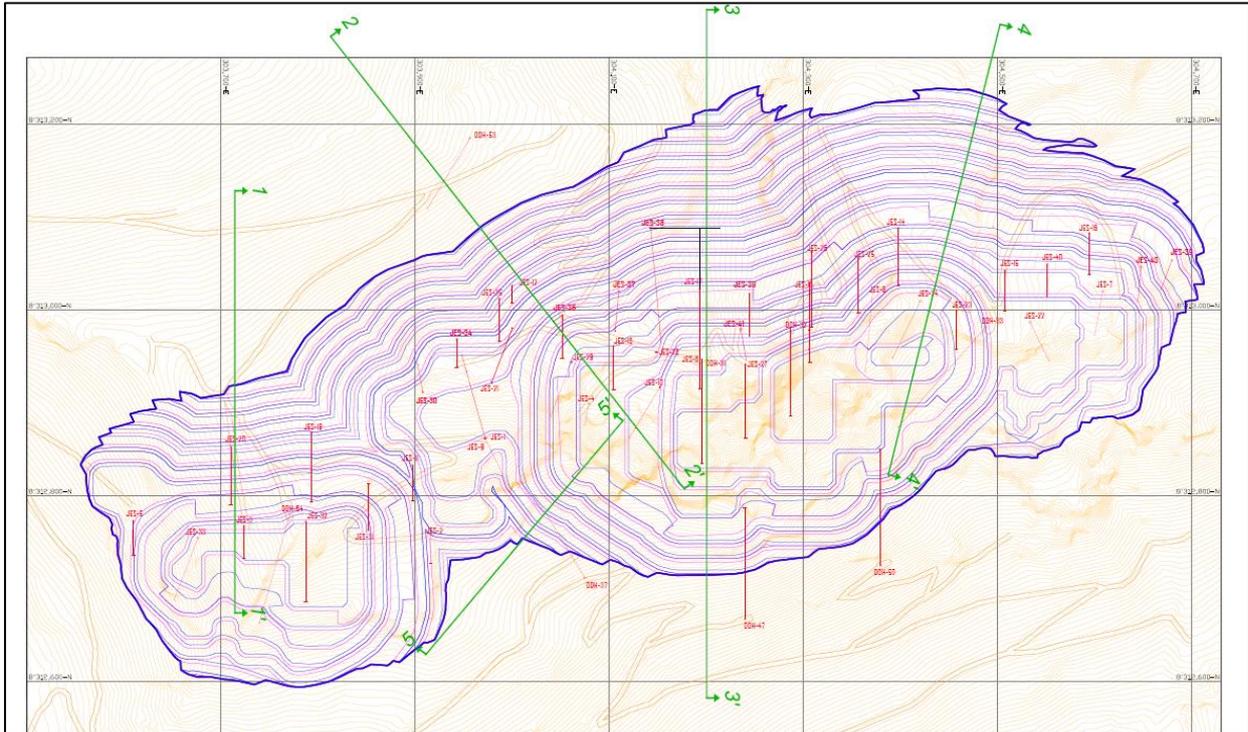


Figura 22. Secciones de análisis del tajo Jessica
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

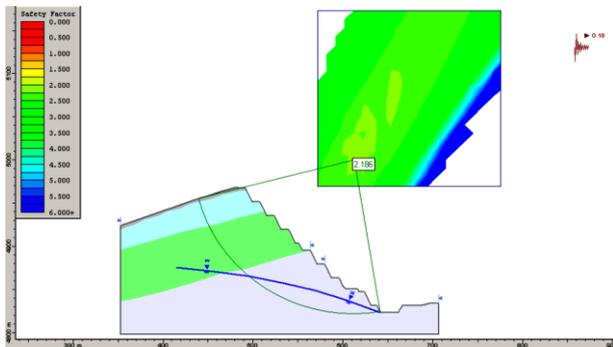


Figura 23. Sección 1, ubicado en el lado Oeste. Análisis de falla circular del talud inicial propuesto con 44°. FSe = 2.832. FSse = 2.186.
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

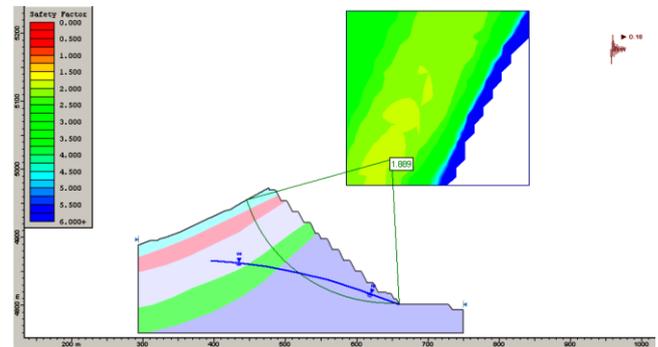


Figura 24. Sección 2, ubicado en el lado Noroeste. Análisis de falla circular del talud inicial propuesto con 44°. FSe = 2.427. FSse = 1.889.
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

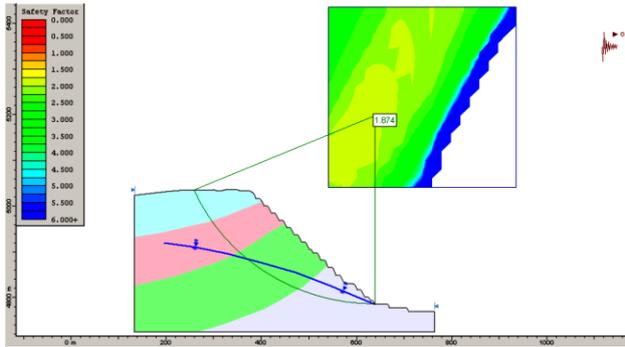


Figura 25. Sección 3, ubicado en el lado Norte. Análisis de falla circular del talud inicial propuesto con 44°. FSe = 2.435. FSse = 1.874.
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

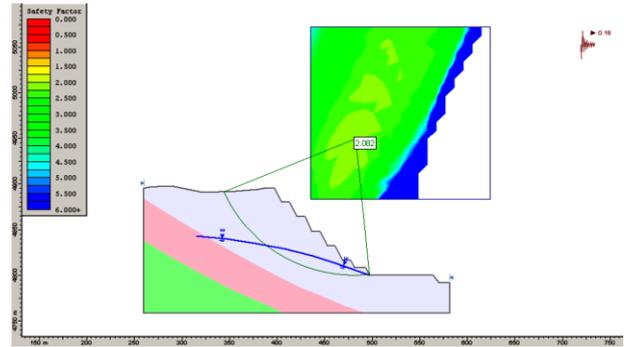


Figura 27. Sección 5, ubicado en el lado Suroeste. Análisis de falla circular del talud inicial propuesto con 44°. FSe = 2.712. FSse = 2.082.
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

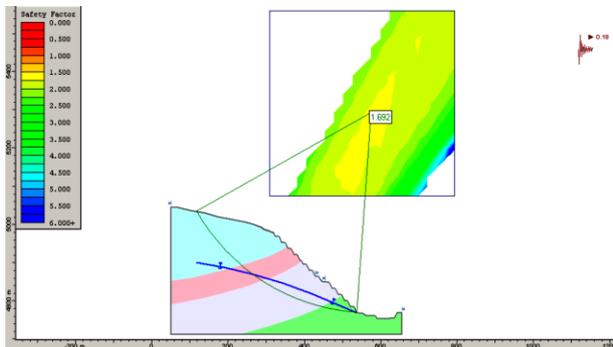


Figura 26. Sección 4, ubicado en el lado Noreste. Análisis de falla circular del talud inicial propuesto con 44°. FSe = 2.249. FSse = 1.692
Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

Resultados de los análisis de estabilidad

Se presentan los resultados de los análisis de estabilidad de los taludes finales globales tomando como base el diseño del tajo Jessica proporcionado por Arasi S.A.C. un resumen de los mismos se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10.
Factores de seguridad de taludes finales

Sección	Sector	Angulo del talud final	Altura del talud (m)	Factores de seguridad	
				Estático no drenado	Pseudoestático no drenado
1	W	44°	144	2.832	2.186
2	NW	44°	168	2.427	1.889
3	NE	44°	250	2.435	1.874
4	E	44°	226	2.249	1.692
5	SW	44°	95	2.712	2.082

Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

Estos resultados revelan que con los ángulos de taludes finales globales propuestos por Arasi S.A.C. en su diseño del tajo Jessica, estos taludes presentarán condiciones de estabilidad satisfactorias, puesto que los factores de

seguridad superan por buen margen a los mínimos requeridos. Incluso, subiendo los ángulos de los taludes finales globales en 2 a 3 grados, los factores de seguridad superan a los mínimos requeridos.

Tabla 11.

Relaciones entre los ángulos de taludes de bancos, interrampas y finales

Sección análisis de estabilidad	1	2	3	4
Altura talud general	144	168	264	226
Angulo talud general	44	44	44	44
Altura interrampa	116	150	200	128
Ancho de berma interrampa (m)	12	12	12	12
Número de taludes interrampa	2	2	2	2
Talud interrampa (°)	47	46	46	47
Características de los bancos				
Altura talud interrampas	116	150	200	128
Angulo talud interrampas	47	46	46	47
Altura de bancos	16	16	16	16
Ancho de berma de bancos	7.5	7.75	8	7.5
Número de bancos	7.3	9.4	12.5	8.0
Talud de bancos (°)	65	65	65	65

Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltada, 2008

De acuerdo a los resultados del análisis cinemático y de los resultados de los análisis de estabilidad de los taludes de bancos, efectuados según el mecanismo de falla en cuña, utilizando el programa Swedge, el ángulo recomendado de los taludes de bancos es de 65° , y para tener esta configuración el ancho de berma deberá variar entre 7.5 y 8 m ver Tabla 11. En el diseño de Arasi S.A.C. se ha observado que no hay una estandarización del ancho de bermas, puesto que estas varían de 3.5 a 8.5 m, motivo por lo que se obtiene un rango de valores de las mismas. Para el diseño final es recomendable que se estandarice tanto el ancho de bermas y la altura de los bancos.

3.8. Discusión

Según los autores Hoek, (2000) y Wyllie & Mah, (2004) y Gonzales de Vallejo, (2002), nos

indican que la orientación de las distintas familias de discontinuidades combinadas con la orientación del talud en cada dominio estructural, dan origen a la formación de los potenciales modos de falla que se podrían presentar en el talud. El procedimiento de diseño habitual es utilizar el análisis cinemático para identificar bloques potencialmente inestables, seguido de un análisis de estabilidad detallada de estos bloques usando el método de equilibrio límite. Para taludes permanentes, el coeficiente de seguridad a adoptar debe ser igual o superior a 1,5, e incluso 2,0, dependiendo de la seguridad exigida y de la confianza que se tenga en los datos geotécnicos que intervienen en los cálculos; para taludes temporales el factor de seguridad está en torno a 1,3, pero en ocasiones puede adoptarse valores inferiores.

Para el caso de nuestra investigación se realizó el análisis de estabilidad de taludes en roca a nivel de banco berma: estereográfico o cinemático con la ayuda de software Dips, de lo cual se definió el modo de falla para cada zona de estudio con este no calculamos los factores de seguridad solo porcentajes de predisposición de las estructuras a fallar y para el análisis de estabilidad a nivel de talud final por el método equilibrio límite o analítico con la ayuda del software Slide, por lo cual nos proporcionó el factor de seguridad de las estructuras a fallar, de acuerdo a ello se hace las recomendaciones de los ángulos de los taludes para cada zona inestable.

En la caracterización geomecánica y determinación de ángulos de taludes, Morales-Cárdenas, (2009) indica que con el método de caracterización se realiza, de acuerdo con la orientación de las estructuras, una zonificación de dominios geotécnicos en la mina, la cual queda establecida por la distribución del GSI. A partir de la clasificación se determinan los parámetros importantes para realizar los distintos análisis en los perfiles distribuidos dentro de la superficie de la mina: contención, determinístico, probabilístico y rotacional. Se hacen luego, con ayuda de software específico, simulaciones de acuerdo a cada perfil para el modo de falla determinado, para analizar la posibilidad de un incremento del ángulo de talud entregado por la ingeniería de perfil anteriormente desarrollada.

En el análisis de estabilidad Valeriano-Nina, (2015), indica que los modos de falla estructural controlados por la dirección de las discontinuidades, altura del talud, pendiente del talud, orientación del talud y el ángulo de fricción básico de discontinuidades, fueron identificados a través de porcentajes de probabilidad de falla.

Para la determinación de ángulos de talud Ñontol-Castrejon y Quispe-Chilon, (2019). Los métodos de análisis cinemático se aplican a la cara del banco y el diseño interrampa, y los métodos de análisis de equilibrio límite para interrampa, en general el diseño de un tajo abierto.

4. CONCLUSIONES

Los ángulos de taludes finales globales propuestos por Arasi S.A.C. en su diseño del tajo Jessica, estos taludes presentarán condiciones de estabilidad satisfactorias, puesto que los factores de seguridad superan por buen margen a los mínimos requeridos. Incluso, subiendo los ángulos de los taludes finales globales en 2 a 3 grados, los factores de seguridad superan a los mínimos requeridos. El análisis de la distribución de las discontinuidades, ha mostrado que en general en el área de estudio el arreglo estructural de la masa rocosa está conformado por 3 sistemas de discontinuidades: sistema 1, rumbo NEE y buzamiento alto al SE, que es el predominante; sistema 2, rumbo NWW y buzamiento

subvertical, y sistema 3, rumbo NNE y buzamiento alto al NW.

La clasificación geomecánica de la masa rocosa efectuada, utilizando el criterio de Bieniawski (1989). La calidad de la roca varía desde mala A (RMR 38-40), hasta buena (RMR 62-63), pasando por regular B (RMR 42-50) y regular A (RMR 54-57).

La zonificación geomecánica efectuada en el área del futuro tajo Jéssica, ha indicado la presencia de cuatro dominios estructurales: Dominios DE-1 (SC-SA), DE-2 (SA-SC-SM), DE-3 (SC-SA-SGV) y DE-4 (SC-SA). Las calidades de la masa rocosa en cada uno de ellos son respectivamente: mala A (IVA), regular B (IIIB), regular A (IIIA) y buena (II), con RMR promedios de 39, 46, 55 y 62.

5. AGRADECIMIENTO

Mi profundo y eterno agradecimiento a mis padres: Leoncio Molina Huacani, Martina Rufina Quispe Apaza, a mis queridos hermanos y mi pareja quienes me brindaron su apoyo y consejo durante mi vida profesional.

Asimismo, mi agradecimiento a mi alma mater “Universidad Nacional del Altiplano - Puno”, a mis docentes de la Facultad de Ingeniería de Minas quienes me brindaron su conocimiento en mi formación profesional.

6. LITERATURA CITADA

Alvarado-Marquez, I. M., & Villanueva-Huatay, L. (2018). *Evaluación*

geomecánica y geotécnica para el diseño de estabilidad de taludes de la cantera Agocucho, Cajamarca 2018 (Universidad Privada del Norte). Retrieved from <http://hdl.handle.net/11537/14988>

Arenas-Lope, F. M. (2019). *Evaluación geomecánica del macizo rocoso con fines de estabilización de talud en la Cantera Mucra, Juliaca* (Universidad Nacional del Altiplano Puno). Retrieved from <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/11703>

Arreygue-Rocha, E., Garduño-Monroy, V. H., Canuti, P., Casaglie, N., Iotti, A., & Chiesa, S. (2002). Análisis geomecánico de la inestabilidad del escarpe La Paloma, en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19, 91–106. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57219202>

Bieniawski, Z. T. (1989). *Ingeineering rock mass classifications* (W. John & Sons, Eds.). Retrieved from <https://es.scribd.com/doc/38805110/Engineering-Rock-Mass-Classifications>

D.S. N° 024-2016-EM. (2016, July 26). Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería. *Diario Oficial El Peruano*.

DCR Ingenieros S.R.Ltada, G. en M. y O. C. (2008). *Estudio de estabilidad de taludes del Tajo Jessica*.

- Gonzales de Vallejo, L. I. (2002). *Ingeniería geológica* (2da edición; Person Education, Ed.). Madrid España:
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics* (second ed.; J. Wile & Sons, Eds.). Canada.
- Hoek, E. (2000). *Rock engineering* (B. C. North Vancouver, Ed.). Canada.
- Lopes-Pomareda, E. S. (2016). *Estudio geotécnico y diseño del talud final de una mina a cielo abierto aplicando modelos numéricos* (Universidad Nacional Mayor de San Marcos). Retrieved from <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/4816>
- Montoya-Toroverero, F. R. (2014). *Evaluación geotécnica de los taludes de la carretera Cruz Blanca - El Gavilán* (Universidad Nacional de Cajamarca). Retrieved from <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/118>
- Morales-Cárdenas, M. O. (2009). *Caracterización geotécnica y determinación de ángulos de talud en Yacimiento Franke* (Universidad de Chile). Retrieved from <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103406>
- Ñontol-Castrejon, L. V., & Quispe-Chilon, M. L. (2019). *Caracterización geotécnica para el diseño de explotación del proyecto minero Azod, en los yacimientos Accha y Yanque, Cusco* (Universidad Privada del Norte). Retrieved from <http://hdl.handle.net/11537/21536>
- Quispe-Matos, K. A. (2018). *Evaluación geomecánica para la elección del tipo de sostenimiento en el túnel Yauricocha del NV. 720, Sociedad Minera Corona S.A.* (Universidad continental). Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12394/4685>
- Rodríguez-Copare, J. D., Morales-Cabrera, D. U., & Paredes-Lupaca, L. (2003). *Evaluación de la estabilidad de taludes en la Mina Lourdes* (Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann). Retrieved from <https://es.scribd.com/document/248792928/Tesis-UNJBG-2003-Evaluacion-de-La-Estabilidad-de-Taludes-en-La-MINA-LOURDES>
- Suárez-Burgoa, L. O. (2016). *Analisis de Estabilidad de Taludes* (Primera; L. O. Suárez-Burgoa, Ed.). Retrieved from www.geomecanica.org
- Turpo-Phuño, J. I. (2018). *Determinación de los parámetros geométricos del talud, para garantizar la estabilidad del tajío superficial del área de explotación en la unidad minera "Moises Randy 2010"*. (Universidad Nacional de Moquegua). Retrieved from <http://repositorio.unam.edu.pe/handle/UNAM/73>
- Valeriano-Nina, F. A. (2015). *Caracterización geotécnica y modos de falla estructural en*

el talud en roca del Cerro Espinal Juliaca

(Universidad Nacional del Altiplano).

Retrieved from

<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UN>

AP/2297

Vector Perú S.A.C. (2006). *Pad de lixiviación proyecto Arasi – anexo C, cálculos hidrológicos e hidráulicos.*

Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2004). *Rock slope engineering* (cuarta edi; Taylor and Francis Group, Ed.). New York.